



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**  
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA  
INGENIERÍA EN SISTEMAS – INVESTIGACIÓN DE OPERACIONES

MODELO DE RUTEO PARA GENERAR RUTAS TURÍSTICAS

T E S I S  
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:  
MAESTRA EN INGENIERÍA

PRESENTA  
BEATRIZ ILIANA YÁÑEZ MANCILLA

TUTOR PRINCIPAL  
DRA. MAYRA ELIZONDO CORTÉS

MÉXICO, D. F. DICIEMBRE 2013

**JURADO ASIGNADO:**

Presidente: Dra. Idalia Flores de la Mota  
Secretario: M. I. Héctor Daniel Resendiz López  
Vocal: Dra. Mayra Elizondo Cortés  
1 er. Suplente: M. I. Mariano Antonio García Martínez  
2 do. Suplente: Dra. Cozumel Allanec Monroy León

Lugar o lugares donde se realizó la tesis: UNAM, Facultad de Ingeniería.

TUTOR DE TESIS

---

**Dra. Mayra Elizondo Cortés**

*Dedicada con todo mi cariño  
para mi familia y seres queridos,  
por su apoyo incondicional  
en esta aventura que significó la maestría.*

*Agradecimientos:*

*A la Dra. Mayra Elizondo Cortés por su tiempo, apoyo y guía  
invaluables.*

*A la Dra. Idalia Flores de la Mota, al M. I. Héctor Daniel Resendiz  
López, a la Dra. Cozumel Allanec Monroy León y al M. I. Mariano  
Antonio García Martínez por su amable disposición y contribuir  
con sus recomendaciones para mejorar este trabajo.*

*A mis profesores de la maestría por compartir sus conocimientos  
para mi formación académica y enseñarme con su ejemplo.*

*A quienes de manera directa e indirecta aportaron  
conocimiento para este proyecto.*

*A mi hermosa casa de estudios la Universidad Nacional  
Autónoma de México por cambiar mi vida con sus enseñanzas.*

## Tabla de Contenido

Introducción .....	1
Capítulo I.....	3
1.1 Antecedentes .....	3
1.2 Análisis de la problemática.....	10
1.3 Problema.....	12
1.4 Objetivo de la investigación.....	13
1.5 Justificación.....	13
Capítulo II .....	14
2.1 Estado del arte sobre el diseño de rutas turísticas.....	14
2.1.1 Enfoque del especialista en turismo.....	14
2.1.2 Enfoque de la Investigación de Operaciones.....	17
2.1.3 Metaheurísticas en los servicios.....	23
2.1.4 Ubicación de la investigación y aportación .....	24
2.2 Marco teórico .....	25
2.2.1 Problema de ruteo de vehículos .....	25
2.2.2 Métodos de solución .....	32
2.2.3 Formas en que se ha abordado la satisfacción del cliente .....	42
2.3 Metodología.....	45
Capítulo III .....	47
3.1 Proceso de modelación.....	47
3.2 Metodología para la modelación matemática.....	50
3.3 Definición del problema.....	52
3.4 Supuestos del modelo.....	52
3.5 Especificación de parámetros .....	53
3.6 Modelo de ruteo para satisfacer al cliente.....	54
3.7 Validación y verificación.....	56

Capítulo IV .....	60
4.1 Introducción .....	60
4.2 Presentación del caso de estudio .....	60
4.3 Modelo conceptual.....	68
4.3.1 Consideraciones adicionales.....	70
4.3.2 Descripción de los supuestos.....	70
4.4 Recolección de datos .....	71
4.5 Método de solución.....	71
4.6 Resultados .....	72
Supuesto 1 .....	72
Supuesto 2 .....	74
Supuesto 3.....	76
Conclusiones y extensiones .....	79
Anexo 1 .....	81
Tabla de Pueblos Mágicos – Secretaría de Turismo (SECTUR) .....	81
Anexo 2.....	83
Código LINGO 10 - Problema de ruteo de vehículos .....	83
Anexo 3.....	85
Aeropuertos de México más transitados por número de pasajeros del 2011 .....	85
Anexo 4.....	86
Nivel Socioeconómico AMAI .....	86
Bibliografía .....	87
Páginas web de consulta .....	93

## Lista de Figuras

Figura 1: Producto Interno Bruto Nominal por sector.....	3
Figura 2: Aportación de las actividades turísticas al PIB de la economía 2010. ....	5
Figura 3: Distribución del ingreso de divisas 2011 .....	7
Figura 4: Mapa de servicios que intervienen en el negocio turístico.....	8
Figura 5: Cartel del concurso Procter & Gamble 1962.....	19
Figura 6: Problema del agente viajero – Suecia 24,978 ciudades. ....	20
Figura 7: Algoritmo de ahorros – unión de dos rutas. ....	36
Figura 8: Datos iniciales algoritmo de Clark & Wright.....	38
Figura 9: Solución inicial, algoritmo de Clark & Wright. ....	39
Figura 10: Solución, algoritmo de Clark & Wright. ....	42
Figura 11: Metodología de la investigación. ....	45
Figura 12: Modelación matemática. ....	48
Figura 13: Metodología para la modelación matemática. ....	50
Figura 14: LINGO – se excedió la capacidad de la versión. ....	58
Figura 15: Mapa de Pueblos Mágicos por región.....	62
Figura 16: Mapa Pueblos Mágicos – Región Norte. ....	63
Figura 17: Mapa Pueblos Mágicos – Región Centro. ....	63
Figura 18: Mapa Pueblos Mágicos – Región Pacífico. ....	65
Figura 19: Mapa Pueblos Mágicos – Región Golfo. ....	66
Figura 20: Mapa Pueblos Mágicos – Región Sur.....	67
Figura 21: Datos muestra de la Región Pacífico.....	72
Figura 22: Matriz de resultados para la Región Pacífico. ....	73
Figura 23: Mapa de resultados primer supuesto. ....	74
Figura 24: Matriz de resultados del segundo supuesto.....	75
Figura 25: Mapa de resultados segundo supuesto.....	76
Figura 26: Error LINGO por presupuesto menor a la demanda.....	76
Figura 27: Cambio de datos en la Región Pacífico.....	77
Figura 28: Matriz de resultados tercer supuesto de la Región Pacífico. ....	77
Figura 29: Mapa de resultados tercer supuesto. ....	78

## Lista de Tablas

Tabla 1. Clasificación de los problemas de ruteo de vehículos. ....	30
Tabla 2. Algoritmo de Ahorros – Clark y Wright. ....	37
Tabla 3. Listado de ahorros.....	39
Tabla 4. Metodología de la modelación matemática.....	51
Tabla 5. Número de localidades por región.....	69
Tabla 6. Nodos de salida del viajero.....	69

## Introducción

La inquietud por mostrar el uso de las herramientas matemáticas en la economía de los servicios, me motivó a realizar este trabajo. La Investigación de Operaciones puede contribuir a lograr los objetivos de posicionamiento de mercado de las empresas de servicios, ofreciendo alternativas que ayuden a identificar cuáles son las necesidades que busca satisfacer el cliente, e implementar modelos matemáticos que favorezcan la personalización de servicios.

Los servicios turísticos tienen un gran valor económico en el mundo, por ello es vital para las empresas del rubro generar un diferenciador a través de la satisfacción de las necesidades específicas de cada cliente, las cuales podrían ser cambiantes, por ejemplo, existen rutas turísticas temáticas, y es posible que la necesidad o deseo de los clientes no se ajuste a lo preestablecido.

En este texto se propone un modelo de ruteo para la administración adecuada de los recursos del cliente turístico y satisfacerlo a partir de una variedad de rutas personalizadas en un tiempo breve de espera, en consecuencia, el objetivo de ésta investigación es desarrollar un modelo de optimización, mediante la adaptación del problema de ruteo de vehículos, para generar rutas turísticas que maximicen la satisfacción del cliente, con restricciones de presupuesto y tiempo.

El documento está estructurado de la siguiente forma:

Capítulo uno, el planteamiento del problema, muestra los antecedentes y el análisis de la problemática que sirvió para definir el objetivo de la investigación.

En el capítulo dos se da a conocer el marco de referencia de ésta investigación, los enfoques con los que se ha abordado el problema de ruteo turístico, un poco de la historia de la Investigación de Operaciones en éste tema y los conceptos necesarios para el estudio del problema. Además, se describen las características de los problemas de ruteo de vehículos, la formulación matemática y su complejidad; se comparte un breviarío sobre los métodos de solución tratados en la literatura, y dado que es un pilar el tema de la satisfacción en ésta tesis, se incorpora también el cómo se ha abordado éste tema. Por último, se describe la metodología de la investigación.

Capítulo tres, presenta el proceso de modelación, el método que se siguió para definir y construir el modelo que resuelve la problemática planteada. Se presenta

su validación con *software* comercial y para completar se muestra una instancia que ejemplifica el algoritmo de ahorros en un caso turístico.

El capítulo cuatro lo constituye el caso de estudio, se muestra el funcionamiento del modelo propuesto; las consideraciones adicionales y supuestos realizados, así como, el método de solución. Por último, la interpretación y análisis de resultados.

Se exponen las conclusiones y extensiones del trabajo de investigación.

Finalmente, se encuentran los anexos y referencias bibliográficas que sustentan el documento.

## Capítulo I

# Planteamiento del problema

---

### 1.1 Antecedentes

“Los servicios son el centro de la actividad económica de cualquier sociedad” (Fitzsimmons, J. & M., 2011). En México la contribución más importante en el Producto Interno Bruto Nominal (PIBN) es la del sector servicios. En 2012, tuvo una participación promedio de 9,271,792 millones de pesos a precios corrientes (9.271 billones), equivalente al 61.8% del PIBN (INEGI: Instituto Nacional de Estadística y Geografía).

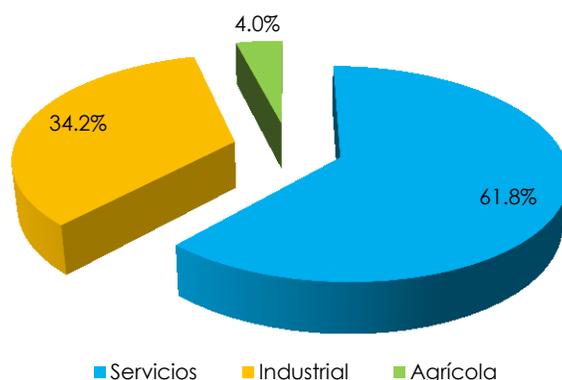


Figura 1: Producto Interno Bruto Nominal por sector.

Fuente: Elaboración propia con base en los datos de INEGI.<sup>1</sup>

Dada la importancia económica de los servicios, a continuación se da un breve preliminar del tema. El servicio es la interacción entre un cliente y un prestador de servicios, éste último realiza un conjunto de actividades que tienen como finalidad satisfacer las necesidades del consumidor. Además es un diferenciador en el mercado ya que ofrece claras ventajas ante el competidor si es de calidad y por tanto, se convierte en una palanca competitiva para el negocio. Se ha

---

<sup>1</sup> [http://www.inegi.org.mx/inegi/contenidos/notasinformativas/pib\\_precl/NI-PIBCR.pdf](http://www.inegi.org.mx/inegi/contenidos/notasinformativas/pib_precl/NI-PIBCR.pdf)

creado una amplia variedad de servicios personales (como: cuidados de la salud, restaurantes y hoteles) integrando las necesidades del individuo en la economía. Independiente de las particularidades del tipo, los servicios:

- son intangibles;
- son perecederos;
- no pueden inventariarse;
- tienen interacción directa con el cliente;
- requieren breves tiempos de espera;
- tienen mano de obra intensiva;
- son difíciles de evaluar;
- no pueden hacer pruebas antes de salir al mercado.

Las empresas de servicios se clasifican, comúnmente, de acuerdo a las necesidades atendidas por los diferentes rubros como: salud, educación, transporte, vivienda, finanzas, comunicación, comercio, alimentación, etc. Estos criterios de clasificación aportan una visión global de cada sistema de servicio aunque no son suficientes para analizar los procesos involucrados en la producción de un servicio. El criterio de clasificación más claro y que agrupa a la mayoría de los servicios se relaciona con la forma del cómo se financian, es decir, qué entidades proporcionan dinero para diseñarlos, producirlos y mantenerlos vigentes. Según éste criterio podemos encontrar los servicios públicos y privados. Los servicios que son proporcionados por el Estado se denominan públicos, mientras que aquellos realizados por la iniciativa privada o empresas, adquieren el nombre de servicios privados y tienen un campo de acción muy amplio; abarca los servicios comerciales, de transporte, de comunicaciones, banca, turismo, educacionales y de salud, entre muchos otros.

*"El turismo es uno de los sectores económicos más importantes y dinámicos en el mundo actual"* dice el Consejo de Promoción Turística<sup>2</sup> (CPTM), aporta alrededor del 11% de la producción mundial y se estima que en los próximos 20 años viajarán por el mundo 1.6 millones de turistas que dejarán una derrama económica de dos millones de millones de dólares, también su importancia es reconocida mundialmente debido a:

- la participación en el crecimiento económico;
- la generación de empleos;
- la preservación del medio ambiente y;
- su aportación en el desarrollo regional.

---

<sup>2</sup> [http://www.cptm.com.mx/es/CPTM/CPTM\\_Panorama\\_del\\_Sector\\_Turistico/\\_rid/7792](http://www.cptm.com.mx/es/CPTM/CPTM_Panorama_del_Sector_Turistico/_rid/7792)

Con respecto a la participación del turismo en la economía mexicana, se estima que ascendió al 7.8% del PIB en el año 2010,<sup>3</sup> de acuerdo a la información del Banco de Información Económica (BIE) y de la Cuenta Satélite del Turismo (CST) de México a cargo del INEGI. En el cuadro se puede ver la composición del PIB 2010 y la aportación de las actividades turísticas. En la composición del PIB por actividades turísticas, resalta que los servicios de transporte aportan casi un 30% del PIB.

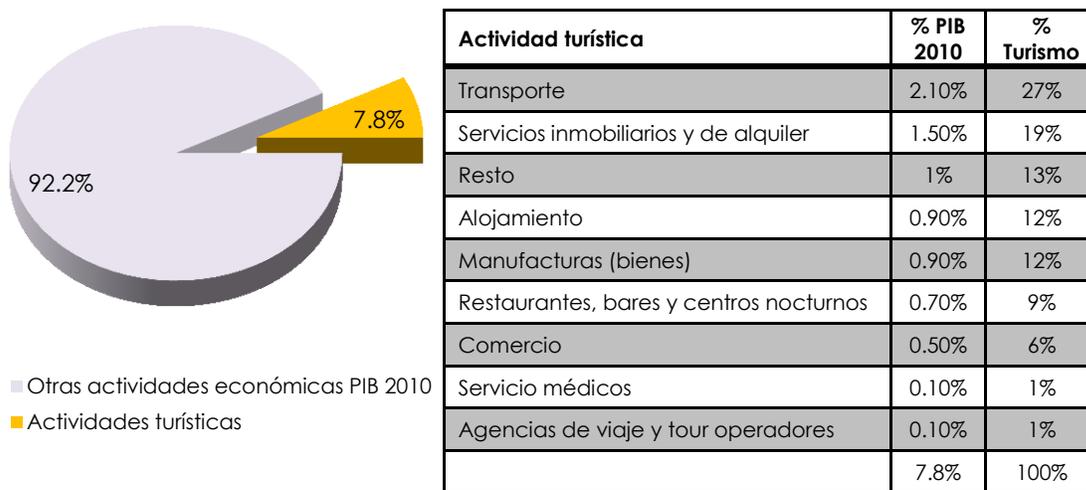


Figura 2: Aportación de las actividades turísticas al PIB de la economía 2010.  
 Fuente: Elaboración propia con base en la información de la CST, INEGI 2010.

El sector turismo, en el contexto del Plan Nacional de Desarrollo 2007-2012, fue considerado una prioridad nacional, debido al carácter que tiene como factor de desarrollo y motor de crecimiento; busca posicionar a México como un país líder con servicios turísticos de calidad internacional a través del fomento de la competitividad de sus empresas y la diversificación de sus mercados, productos y destinos. Dicha actividad es una alternativa económica para México dado que contribuye:

- al crecimiento económico;
- a la preservación de la cultura;
- al enriquecimiento del desarrollo humano, a partir de la diversidad de pensamientos, rasgos culturales, diferencias geográficas y motivaciones del tiempo libre.

En julio del 2012, el Presidente Calderón Hinojosa, en un mensaje difundido por la Secretaría de Turismo (SECTUR), mencionó que el turismo representa gran

<sup>3</sup> Cuando se realizó ésta investigación aún no estaba disponible la estadística oficial del 2011.

recaudación económica ya que es la 3ª fuente de ingresos de divisas del país<sup>4</sup>, genera empleos directa e indirectamente, impulsa la inversión privada nacional e internacional y genera el fomento para zonas turísticas sustentables (Baltazar, 2011).

México cuenta con una oferta turística rica en cultura, historia, gastronomía y maravillas naturales, que le permiten ser uno de los principales destinos turísticos del mundo ya que cuenta con una amplia gama de productos y destinos turísticos que pueden satisfacer las necesidades y gustos de los turistas. Debido a la gran variedad en la oferta turística, el tipo de cliente que lo demanda también lo es, en consecuencia, las características de éste son diversas (culturalmente, económicamente, rasgos de personalidad, edades, etc.).

Se clasifican en dos mercados: el nacional o doméstico y el internacional; estos son incomparables debido a que en México se carece de la cultura para prever la asignación de recursos en la actividad turística. En contraparte, el turista extranjero en ocasiones lo tiene planeado con un año de antelación. Además en el Sistema Integral de Información de Mercados Turísticos (SIIMT) se menciona que la recaudación económica que se tiene a través de la actividad turística, en el primer semestre del 2012, es:

- Divisas por visitantes internacionales: \$6,553.3 millones USD (ene - jul 2012)
- Turistas nacionales (Flujo doméstico): \$103.4 millones (ene - jul 2012)<sup>5</sup>

Nuestro país está en el lugar 10 en llegadas de turistas internacionales con casi 23.4 millones registrados en el año 2011 de acuerdo con datos del SIIMT. En los últimos diez años, México se ha ubicado entre el lugar 7 y 10 del *Ranking* Mundial de la Organización Mundial del Turismo (OMT). Además, se ubica en el lugar 23 en divisas por turismo internacional, con casi 11 mil 869 millones de dólares, en el mismo año. Como se puede ver en la siguiente gráfica, el turismo internacional al interior, representó el 79.6% del ingreso de divisas. En 2011, llegaron 63.6 millones de turistas nacionales a los hoteles del país, el mercado doméstico contribuyó con más del 80% del consumo turístico en nuestro país. Además, es el principal motor para la gran mayoría de los destinos turísticos del país, dónde no cuentan con flujos internacionales importantes.

---

<sup>4</sup> [http://www.sectur.gob.mx/es/sectur/sect\\_Mensaje\\_del\\_Presidente\\_El\\_Turismo\\_como\\_Prior](http://www.sectur.gob.mx/es/sectur/sect_Mensaje_del_Presidente_El_Turismo_como_Prior)

<sup>5</sup> <http://www.siimt.com/wb2/#>

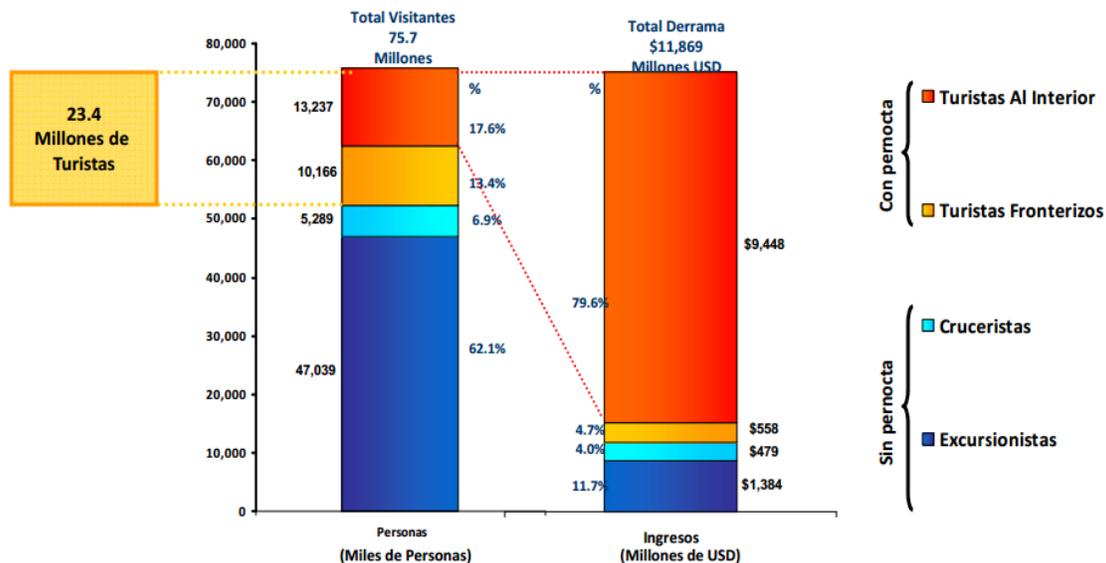


Figura 3: Distribución del ingreso de divisas 2011.  
Fuente: Banco de México, SIIMT 2012.

Uno de los grandes retos para el turismo doméstico es des-estacionalizar los flujos que se concentran principalmente en Semana Santa, Verano y Fin de Año. Las plazas emisoras más importantes son Ciudad de México, Zona Metropolitana del Estado de México, Guadalajara, Monterrey, Puebla y León. Con lo anterior, se pueden elaborar las siguientes premisas, que servirán para definir a qué segmento va dirigido el presente estudio:

- El turista nacional, al carecer de una cultura de recreación, no tiene un presupuesto asignado a la actividad turística, o bien, su recurso es limitado y de acuerdo a la información que posee, cree que no tiene alternativas para viajar.
- El turista extranjero, tal vez no tiene recursos limitados y cuenta con un periodo de estancia mayor a 15 días y menor a 180 días para conocer el país; no tiene una ruta definida.

El consumidor de viajes está dispuesto a experimentar nuevas formas para ocupar su tiempo de esparcimiento, busca satisfacer sus exigencias de calidad, flexibilidad y adaptabilidad a sus condiciones, cuando no encuentra un servicio que cubre sus expectativas se produce la insatisfacción.

En uno de los comunicados de la SECTUR se reconoce al turismo como una de las actividades económicas más dinámica y competida a nivel mundial, además enfatiza que:

“los destinos turísticos que reaccionen con mayor oportunidad a las expectativas de los turistas serán los que cuenten con mejores oportunidades en los mercados”<sup>6</sup>.

En consecuencia, las empresas turísticas se mantienen buscando calidad, esto es, mejorando el conjunto de atributos o propiedades del servicio que permitirá al cliente emitir un juicio de valor acerca de él, es decir, evalúa el servicio recibido como satisfactorio o no. Garantizar la satisfacción del cliente a través de la competitividad y la calidad es la tarea más importante para las empresas que desean mantenerse elegibles.

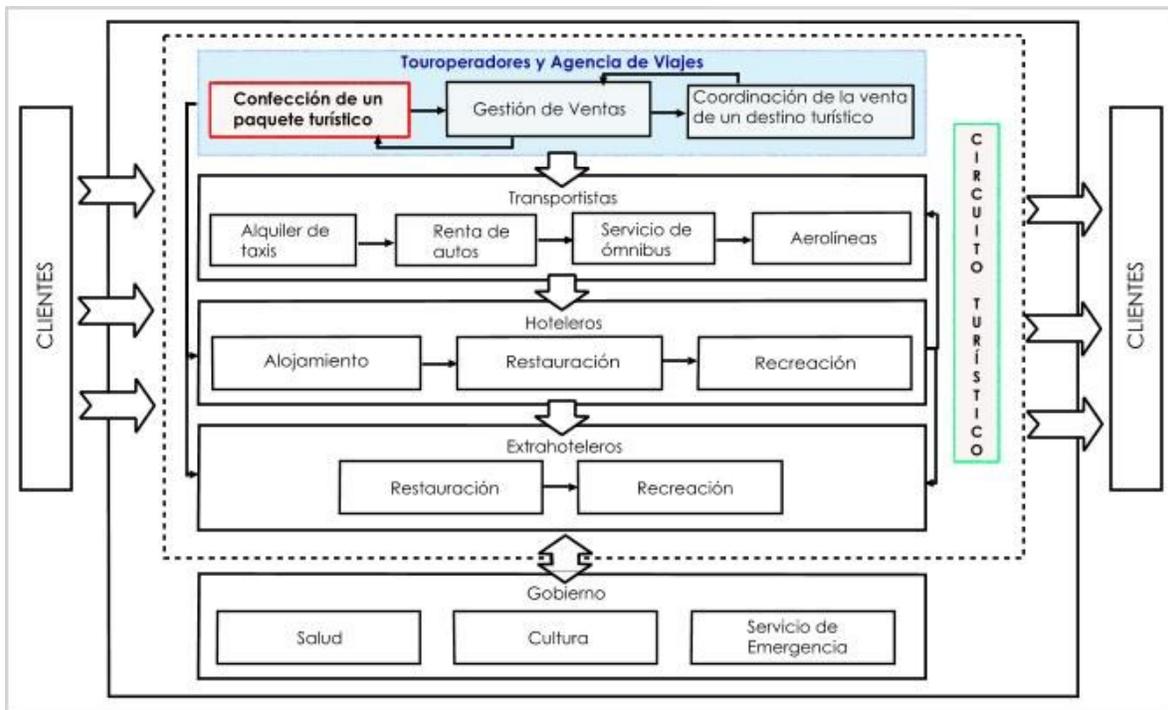


Figura 4: Mapa de servicios que intervienen en el negocio turístico.

Fuente: Santana, Y., & Fernández, E. (2008).

El diagrama realizado por Santana, Y., & Fernández, E. (2008), evidencia los tipos de servicios que intervienen en el negocio turístico, por lo que podemos inferir que la calidad de los servicios depende de las actitudes de todo el personal que es parte del negocio, también del impacto que tienen los procesos eficientes. Es decir, un cliente es atendido por la agencia de viajes, utiliza varios tipos de

<sup>6</sup> [http://www.sectur.gob.mx/es/sectur/sect\\_8415\\_verificacion\\_de\\_serv](http://www.sectur.gob.mx/es/sectur/sect_8415_verificacion_de_serv)

transporte según su ubicación (avance en el itinerario), es recibido en un hotel para disfrutar de su estancia, es afectado por los dedicados al entretenimiento en el lugar, y finalmente, también se ve afectado por las decisiones que ha tomado el gobierno respecto a: seguridad, salud, servicios de emergencia, recolección de basura, etc. Un turista es afectado por diversas entidades, sin embargo, el deseo de los empresarios dedicados al negocio es poder tener un cliente satisfecho en cada etapa del proceso, además de cumplir con la esencia del servicio, que es: el deseo y convicción de ayudar a otra persona en la solución de un problema o en la satisfacción de una necesidad.

Nótese que en el diagrama se hace diferencia entre paquete turístico y circuito turístico, dichos conceptos se analizan a continuación: el primero, es un producto integral de servicios que se adquiere en agencias de viajes. Suele incluir alojamiento, traslados, excursiones, alimentación, etc., y se vende a un precio global.<sup>7</sup>

En el turismo, el término "Ruta Turística" es muy usual, sin embargo, también se utiliza con frecuencia "Circuito Turístico". Estos términos refieren a una idea similar pero por su operatividad y dinamismo, el circuito turístico contiene casi los mismos elementos de la ruta turística, pero en él primero es ineludible que el punto de salida sea igual al punto de llegada; esa es la diferencia básica entre uno y otro término.

Es cierto que todo circuito turístico posee una ruta determinada, no obstante, no toda ruta puede ser un circuito turístico ya que en las rutas turísticas es necesario regresar por el mismo camino, mientras que en el circuito, los paisajes, pueblos, manifestaciones culturales, etc., son diferentes, lo cual contribuye a que el recorrido sea más atractivo, es decir, en la trayectoria no se pasa dos veces por el mismo punto. También puede definirse como una sucesión de rutas turísticas cuya duración depende de la extensión del recorrido. En ambos casos son necesarios elementos básicos como: transporte, alojamiento y comida para el turista. Con respecto a las semejanzas entre una ruta y un circuito se tiene que:

- ambos son trayectos de interés turístico que pueden ser: largos o cortos, para los cuales se debe analizar la oferta turística de la región donde se realizan;
- se trata de recorridos técnicamente planificados, tomando en cuenta las necesidades de los usuarios potenciales;

---

<sup>7</sup> [visitandoelmundo.org/diccionario-de-viaje/](http://visitandoelmundo.org/diccionario-de-viaje/)

- deben ser diseñados de manera estratégica, con respecto al detenimiento en lugares claves;
- pueden tener un carácter regional, nacional o internacional y el tiempo empleado variará de acuerdo al número de lugares involucrados.

Se busca aportar en la tarea de confeccionar circuitos turísticos, cuya labor es principalmente de las agencias de viaje y módulos turísticos, se desea dar satisfacción al cliente ofreciendo múltiples alternativas de viaje acorde a los recursos disponibles.

## 1.2 Análisis de la problemática

La palabra ruta proviene del francés *route*, que a su vez deriva del latín *rupta*. Se trata de un camino, carretera o vía que permite transitar desde un lugar hacia otro; una ruta es la dirección que se toma para un propósito, también se puede considerar una ruta como el itinerario planeado para un viaje, la ruta turística es un recorrido que tiene como objetivo: admirar paisajes, contemplar sitios históricos, disfrutar de playas o montañas, participar en actividades deportivas o de aventura, siguiendo un itinerario predeterminado y conectando zonas con diversos atractivos. En las paradas que se hacen en los distintos centros turísticos que integran la ruta, se hallan instalaciones hoteleras y servicios para los turistas, que son una gran fuente de recursos económicos para la región.

En general, las agencias de viaje trazan al viajero una ruta basándose en un mapa, dónde se le señalan los distintos destinos, los medios en que se trasladarán, el estado de las rutas, los horarios de salida y de arribo, las distancias entre un lugar y otro, los alojamientos, describen los atractivos que disfrutarán y el costo. Al elaborar una ruta se busca determinar los lugares de cierta región que se puedan recorrer en el menor tiempo posible con el menor costo, sin que se dejen de lado sitios de transcendencia y al mismo tiempo se cuente con información útil como lo es direcciones de hoteles, restaurantes, líneas de autobuses, horarios, etc.

Otras rutas ya están predeterminadas por las respectivas regiones, exigiéndose un esfuerzo conjunto del sector público y privado. En México se cuenta con diversas rutas turísticas<sup>8</sup>, tales como:

- Barrancas del Cobre, Chihuahua;

---

<sup>8</sup> <http://www.zonaturistica.com/rutas-turisticas/>

- Costa Esmeralda, Veracruz;
- Mérida, Yucatán;
- Misiones de la Sierra Gorda, Querétaro;
- Pueblos Mancomunados, Oaxaca;
- Ruta del Café, Veracruz;
- Ruta del Chocolate, Tabasco;
- Ruta del Desierto, Coahuila;
- Ruta del Queso y Vino, Querétaro;
- Zona del Silencio, Durango;
- Ruta del Tequila, Jalisco;
- Ruta del Vino, Baja California;
- Ruta Huichol, Nayarit;
- Ruta Olmeca, Veracruz – Tabasco;
- Zona Purépecha, Michoacán.

Por otra parte, como se mencionó en la sección anterior, los circuitos turísticos son un recorrido regional o nacional, que poseen un carácter circular cerrado, se le puede definir como un conjunto de rutas turísticas, cuya duración depende de la extensión del recorrido. En México, la SECTUR, por medio de la página web “El corazón de México”<sup>9</sup>, da a conocer en qué Estados de la República Mexicana se cuenta con circuitos turísticos y a continuación se listan:

- Distrito Federal:
  - Recorridos en turibus;
  - Xochimilco mágico (paseos en trajinera).
- Tlaxcala:
  - Descubre Tlaxcala;
  - Sendero de textiles.

Además, en la página de la SECTUR<sup>10</sup> se mencionan los programas a nivel nacional que están elaborados bajo el concepto de circuito y estos son:

- Programa México Norte;
- Programa Mundo Maya;
- Programa Ruta de los Dioses;
- Programa Tesoros Coloniales;
- Programa en el Corazón de México;

---

<sup>9</sup> <http://www.elcorazondemexico.com.mx/publica/seccion.php?edo=2&seccion=6>

<sup>10</sup> [http://www.sectur.gob.mx/es/sectur/sect\\_Programas\\_Regionales](http://www.sectur.gob.mx/es/sectur/sect_Programas_Regionales)

- Programa Mar de Cortés y Barrancas del Cobre.

Los destinos y programas antes mencionados se impulsan de manera preferente, ya que son proyectos turísticos que tienen beneficios inmediatos de recuperación de inversión y fuerte crecimiento de su demanda, además se han considerado como exitosos.

Ahora bien, la mayoría de las rutas (o circuitos) ya confeccionadas son temáticas, suponiendo que la necesidad de los clientes no es la que ofrece el mercado, entonces se debe enfrentar a la elaboración de una ruta o circuito, y no es sencillo ya que para satisfacer al cliente hay diversos elementos a considerar, tales como: horarios, costos, rutas y sitios turísticos seguros, tiempos mínimos de traslado, el tipo de sitio turístico que busca, transportes, hospedaje, clima, comodidad, tipo de actividades, entre otros. Si el cliente no cuenta con una herramienta que le ayude a construir el circuito más conveniente para sus necesidades, podría:

- i. administrar inadecuadamente los recursos de presupuesto y tiempo;
- ii. tener dificultad para optimizar la distancia del viaje;
- iii. utilizar mayor tiempo del requerido para recorrer el destino;
- iv. omitir sitios importantes de la ruta;
- v. exceder gastos;
- vi. carecer de información valiosa para tomar una decisión.

Por tanto, una mala planeación del viaje puede llevar al turista a una experiencia poco satisfactoria. En caso de que el servicio lo estuviese contratando con una agencia de viajes, esta perdería confiabilidad ante sus clientes.

### **1.3 Problema**

Como se ha mencionado en la sección anterior:

- El viajero no conoce las alternativas (posibles rutas o circuitos turísticos) para hacer el uso adecuado de sus recursos de tiempo y dinero.

Al plantear una solución a lo anterior se espera influir en la satisfacción del viajero.

## 1.4 Objetivo de la investigación

Desarrollar un modelo de optimización, mediante la adaptación del problema de ruteo de vehículos, para generar rutas turísticas que maximicen la satisfacción del cliente, sujeto a restricciones de presupuesto y tiempo.

Además, se mostrará el funcionamiento de dicho modelo a través de un caso propuesto para los Pueblos Mágicos en México.

## 1.5 Justificación

La importancia de esta investigación radica en encontrar alternativas para que el viajero utilice sus recursos y mejore su proceso de toma de decisiones. Se propone desarrollar un modelo de optimización que maximice la satisfacción del cliente por:

- la administración adecuada de sus recursos;
- la variedad de rutas personalizadas y;
- la información oportuna en un tiempo breve de espera.

El turista beneficiado pertenece al mercado nacional que no tiene la cultura de planear con antelación sus vacaciones, cuando tiene recursos no sabe cómo ocuparlos de manera eficiente y al internacional, que puede llegar a tener más recursos económicos y de tiempo (por ejemplo un permiso con vigencia de hasta 180 días), sin embargo, ambos se benefician con el conjunto de rutas individualizadas.

La aportación del trabajo consiste en:

- contribuir con el uso de técnicas de Investigación de Operaciones en el ramo turístico;
- realizar la modelación matemática;
- y destacar la importancia del modelo matemático para el proceso de toma de decisiones.

## Capítulo II

# Marco de referencia

---

### 2.1 Estado del arte sobre el diseño de rutas turísticas

El objeto de estudio es crear un “modelo de ruteo para satisfacer al cliente de servicios turísticos”, se investigó en la literatura quiénes habían abordado este tema antes. Se escudriñó con un enfoque de planeación o diseño, ya que se espera que el modelo final contribuya en dicha tarea.

Es necesario reconocer, que gran parte de la labor que se ha hecho al respecto la han desarrollado los especialistas en turismo, quienes han seguido algunas metodologías con el objeto de simplificar su tarea.

Por otro lado, dado que este estudio tiene un perfil matemático, se investigaron las herramientas que se utilizan en la Investigación de Operaciones para diseñar o planear circuitos o rutas turísticas. En las siguientes secciones se profundiza sobre ambos enfoques.

#### 2.1.1 Enfoque del especialista en turismo

Para el diseño de rutas, los especialistas en turismo se apoyan en metodologías que analizan el contexto geográfico, sociodemográfico, la existencia de grupos étnicos en la región (costumbres y tradiciones). Se apoyan en estudios de mercado para orientarse sobre los costos que están dispuestos a pagar los turistas, mapas regionales, estadísticos, análisis de amenazas y oportunidades (FODA), entre otros. Es decir, se analizan las características de la región que pueden ser explotadas comercialmente como se menciona en el trabajo de Rodríguez, M. (2010).

También mencionan que debe definirse el objetivo que permita explicar la esencia del diseño de dicha ruta, ya que no se debe perder de vista que se desea comercializar y por ende están sujetas a una serie de variables. Las cuales a continuación se enuncian. (Fernández y Guzmán, 2003).

a. La ruta debe construirse sobre la base de una actividad específica que la distinga y la diferencie, es decir, debe tener un vínculo o conexión común, que es el elemento clave para que el turista se sienta atraído por este tipo de turismo.

b. El itinerario turístico debe desarrollarse sobre la base de una red viaria u otro tipo de vía de comunicación, ya que este elemento es fundamental para el traslado de los turistas. La no existencia de esta red vial implica la necesidad por parte de los diseñadores de las rutas de tomar medidas de transporte alternativas para los turistas.

c. El itinerario turístico debe iniciarse en algún punto en el cual la empresa organizadora de la ruta debe estar perfectamente señalizada, mostrando cuando se considere necesario, mapas de información que permitan a los demandantes de este producto ubicarse correctamente en la ruta.

Las rutas turísticas están organizadas en función de un producto o de un rasgo cultural característico que les da su nombre, el interés primordial es incentivar el consumo de un elemento que se da en abundancia para promover el desarrollo de local.

Las rutas turísticas dependen principalmente de los recursos culturales y naturales que posee una zona, tomando en cuenta el tipo de público al cual se desea llegar. La metodología a seguir para el diseño y construcción de rutas turísticas, según Szmulewicz (2003), consta de las siguientes etapas:

**Determinación de objetivos:** Los objetivos de las rutas turísticas se determinan en función de la temática y de la definición de la estructura. La determinación de la temática puede ser general o específica, con base en un área geográfica o los atractivos del recorrido de la ruta. Con respecto a la definición de la estructura se refiere a la duración estimada, la zona a recorrer, actividades a desarrollar, tipo y nivel de servicios de alojamiento, alimentación y transporte requerido, servicios complementarios, excursiones, tiempo disponible y grupos de pasajeros.

**Diagramación y relevamiento de área:** Conocimiento histórico, cultural y geográfico del área de estudio. Determinación de atractivos a incluir de acuerdo a la distancia desde el centro más cercano y considerando la accesibilidad de los atractivos previamente seleccionados.

**Diseño de la ruta:** Se lleva a cabo la estructuración del itinerario mediante un bosquejo de la ruta que está definida en cuanto al tiempo en ruta, tiempo de

visita, tiempo libre paradas y atractivos propios de la ruta. La redacción del itinerario se realiza a partir del traspaso a papel de los antecedentes recopilados previamente. Szmulewicz (2003) considera las siguientes fases para determinar la ruta o circuito turístico, las cuales ameritan dedicación y estudios particulares como el de seguridad<sup>11</sup>, para obtener un buen resultado.

*Fase 1:*

Estructuración de la Ruta o Circuito

1. Elaboración del inventario con los recursos turísticos seguros del lugar o lugares.
2. Determinación de los puntos de:
  - i. salida;
  - ii. lugares con actividades;
  - iii. parada con estancia y;
  - iv. llegada.
3. Elaboración de alternativas con respecto a los puntos intermedios de la ruta.
4. Determinar los recorridos internos de interés (si los hubiere) en los distintos puntos de parada con estancia.

*Fase 2:*

Determinación y selección de los servicios a incluir en la Ruta o Circuito

1. transporte;
2. alojamiento;
3. alimentación;
4. servicio de guías y;
5. actividades recreativas.

*Fase 3:*

Determinación de los costos y gastos de operación

1. costos fijos;
2. costos variables;
3. gastos generales;
4. imprevistos y;
5. presupuesto total.

*Fase 4:*

Determinación de precios y beneficios netos de operación

1. cálculo del precio por persona y;
2. determinación del beneficio neto.

---

<sup>11</sup> Se determinan los recursos turísticos y servicios seguros para el turista.

La preparación de un operador o diseñador turístico es de carácter práctico, sin embargo, su actuación se vuelve teórica ya que la operatividad de una ruta o circuito se basa generalmente en:

- datos estadísticos;
- costos aproximados de cada recorrido;
- puntos estratégicos de parada en la Ruta o Circuito;
- y otros elementos que dan mayor precisión.

La actuación del diseñador no es tarea fácil pues debe estar centrada en el estudio constante del flujo turístico y en el conocimiento del turista. Este último se convierte en el mejor aliado del diseñador para enriquecer la programación a través de sus opiniones.

El diseñador se enfrenta a un trabajo laborioso de carácter más intelectual que manual; y generalmente, éste no tiene contacto con el turista, sino con los datos originados en el tiempo, por lo que tiene que estudiar cuidadosamente toda la información para poder elegir los aspectos afines al diseño en cuestión. Por ello, no resulta disparatado el hecho de que las herramientas de Investigación de Operaciones pueden contribuir en la tarea del diseñador ya que a través de los resultados del modelo propuesto se pueden ofrecer un conjunto de rutas personalizadas.

### **2.1.2 Enfoque de la Investigación de Operaciones**

La Investigación de Operaciones se ha utilizado en la mayoría de los ámbitos de la actividad humana. No obstante, las aplicaciones en el turismo no son muy usuales a pesar de su importancia mundial en la economía; la aplicación de la Investigación de Operaciones en la planificación del viaje apenas si ha sido estudiada (Godart, 2005).

Godart (2003) explica sobre la dificultad para elegir entre los innumerables componentes turísticos disponibles y el cómo una combinación de ellos de una manera consistente no es sencilla, de hecho asemeja la planificación del viaje a un rompecabezas chino. Como ya se había mencionado en la sección anterior, la actividad de planificación requiere una gran habilidad técnica, por ejemplo, para calcular costos, calcular precios, determinar el beneficio neto, analizar la demanda de un lugar turístico, entender las estadísticas del sitio, analizar el clima, analizar el transporte y dar una respuesta en minutos. El conjunto de datos

podrían ser tan grande que se vuelve infactible trabajarlo manualmente. Por otra parte, si hay una persona que no está contratando los servicios de una agencia y decide planificar su viaje, se pierde entre tantos datos, probablemente no reconozca la mejor ruta. Aunque las opciones para vacacionar implican una compleja decisión, el turista dedicará tiempo y esfuerzo apreciable para la selección de un viaje ideal, ya que la planeación del viaje desempeña un papel importante en el éxito de éste.

#### **2.1.2.1 Líneas de investigación**

Si bien la aplicación de la Investigación de Operaciones no es tan destacada en éste campo, se buscó en literatura documentos cuya aportación fuera sobre la implementación de herramientas en el ruteo turístico (planeación de rutas turísticas) y se encontraron algunos de los modelos utilizados para el diseño de rutas turísticas, como:

- Problema de la ruta más corta:
  - Bérubé, J., Potvin, J., & Vaucher, J, 2006.
- Modelos multiobjetivo:
  - Godart, 2005;
  - Hernández y García, 2007.
- Problema de orientación de equipo:
  - Vansteenwegena, P. *et al.*, 2011;
  - Souffriau *et al.*, 2011.
- Problema del agente viajero:
  - Thompson, Gerald, 1962;
  - Godart, Jean, 2001;
  - Helsgaun, Keld, 2004;
  - Chiu, Lik Hang Eric, 2011.

En la siguiente sección se dan a conocer detalles relevantes de dichas investigaciones.

#### **2.1.2.2 Algunos datos relevantes sobre la planeación de viajes**

En 1962, Procter & Gamble realizó un concurso cuya publicidad fue el cartel del coche 54. El concurso pedía el mejor recorrido, lo cual se puede ver como un Problema de Agente Viajero cuyo nombre en inglés es: *Traveling Salesman Problem* (TSP), a través de las 33 ciudades indicadas en el cartel (las distancias de



de al menos 500 (usando una lista creada a partir de una base de datos de la CIA).

En 1998, el diario "Florida Sun-Sentinel" presentó un artículo, en su página de Ciencia, cuyo título era "Santa Claus & the traveling salesman problem".

En 2001, Applegate, Bixby, Chvatal, y Cook resolvieron un ejemplo TSP de 15,112 ciudades en Alemania. Por otra parte, se creó la lista de ubicaciones en Suecia con la base de datos de la Agencia Nacional de Inteligencia Geoespacial, la elección de todos los puntos de Suecia fueron clasificados como poblados. El TSP Suecia se compone de 24,978 ciudades, pueblos y aldeas del país. La población total de Suecia es de aproximadamente 9 millones (que es de alrededor de 360 personas por ubicación), por lo que se están visitando algunos lugares muy pequeños.

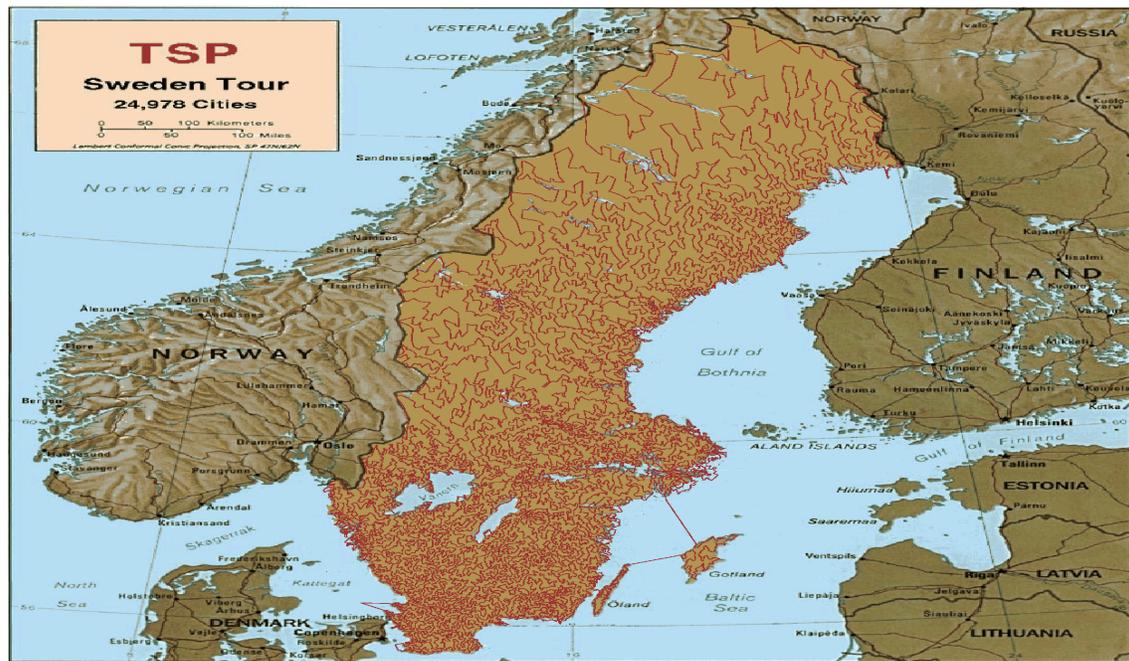


Figura 6: Problema del agente viajero – Suecia 24,978 ciudades.

Fuente: [www.tsp.gatech.edu](http://www.tsp.gatech.edu) consultada en marzo 2012.

En 2004, el TSP Suecia (24,978 ciudades) se resolvió para una longitud aproximada de 72,500 kilómetros; se encontró y se comprobó que no existe recorrido más corto, dicha mejora fue realizada por Keld Helsgaun, sin embargo, el equipo de trabajo está conformado también por David Applegate, Robert Bixby, Vašek Chvátal y William Cook, lo realizaron a través del solver Concorde y todavía

siguen en activo algunos retos computacionales de gran magnitud, muestra de ello es que existe una adaptación de la aplicación para *iPad* o *iPhone*<sup>13</sup>.

Dado el carácter de reto que tiene el TSP existen varias mejoras respecto a los algoritmos utilizados para su solución e incluso mantienen la tradición de realizar convocatorias, actualmente existen las siguientes:

- Estados Unidos TSP, premio de 500 dólares para el mejor recorrido a través de 115,475 ciudades;
- Mona Lisa TSP, premio de 1,000 dólares para un problema de 100,000 ciudades;
- Iowa Tour, ruta óptima para una gira de 99-condados.

Como se ha podido observar, el ruteo y el entretenimiento mantienen una fuerte relación, sin embargo, los estudios comentados anteriormente representan un reto en cuanto al mayor número de ciudades computadas, pero, ¿quién podría visitar las 24,978 ciudades? ¿quién tendría el tiempo y dinero disponibles para realizar dicha tarea?

El trabajo realizado con respecto al TSP es muy valioso en términos de tiempo computable y de algoritmos que mejoran la solución, no obstante, dichas investigaciones podrían aportar al turismo como lo muestran las siguientes investigaciones.

El trabajo de Godart, J. (2005) tiene por objetivo mostrar la aplicación de la optimización combinatoria en el mundo real de la planeación de viajes turísticos. Sugiere el uso de un modelo multiobjetivo ya que puede ser enriquecido con diferentes situaciones concernientes al diseño de viajes como por ejemplo: minimizar el costo de transporte, minimizar el costo de alojamiento y minimizar los costos por las actividades; es importante mencionar que el modelo no sólo toma en consideración los costos, también las **preferencias del turista**.

Además, debido a la gran cantidad de variables, la solución de éste problema se lleva a cabo mediante metaheurísticas; a través de ello se le **ayuda al turista para que pueda tomar su decisión**. Su estudio se basó principalmente en el caso de las visitas guiadas, por lo que toda un área es visitada, a partir de un punto específico de origen / destino, con alojamiento en hoteles y transporte en coche o en autobús.

---

<sup>13</sup> <https://itunes.apple.com/us/app/concorde-tsp/id498366515?mt=8>

Godart, parte de un TSP y lo considera como un buen punto para comenzar un modelo para la planeación de viajes; inicia realizando algunas alteraciones, agregando restricciones necesarias para su análisis y finalmente a su transformación le llama "*trip planning problem* (TPP)", el autor considera que el TPP puede jugar un papel importante en la construcción de viajes turísticos como una extensión del TSP, tal como lo es el problema de ruteo de vehículos.

Por su parte, Bérubé, J. *et al.* (2006), muestran la aplicación del problema de la ruta más corta en la planeación de viajes resuelto mediante una secuencia fija de nodos, que consiste en encontrar el mejor plan de viaje, incluyendo la participación de aviones y hoteles, según las **preferencias del viajero**.

En 2007 la "Revista Matemática: Teoría y aplicaciones de Uruguay" publica el artículo "Investigación de Operaciones y turismo" donde se muestra que la aplicación de técnicas de Investigación de Operaciones, pueden contribuir para preparar un viaje más placentero. Hernández, J. & García, M. (2007) son quienes muestran otro enfoque para abordar los problemas de ruteo turístico, ya que a partir del orden de preferencia obtenido a través de un modelo multiatributo, indican cuál o cuáles lugares visitar y cuáles son los corredores turísticos a seguir, para que **proporcionen mayor satisfacción**, según las restricciones establecidas por el cliente.

Souffriau *et al.*, 2011 presentan un nuevo enfoque para encontrar la ruta en un grafo dirigido, motivado por el problema de un ciclista recreativo que busca una ruta agradable de cierta longitud. Lo anterior puede analizarse como un caso de turismo recreativo, y es por ello, que se le ha contemplado en éste análisis. Definen al problema como una variante del problema de la orientación de arco (AOP), un nuevo problema de optimización combinatoria en la que la puntuación de una ruta en un grafo dirigido tiene que ser maximizada por los arcos de visita, mientras que cada arco se puede visitar más de una vez y el costo total de la ruta no debe exceder un costo predefinido.

La contribución del trabajo de Souffriau *et al.*, es dar:

- i. un modelo matemático (AOP);
- ii. un método de resolución (metaheurístico) para instancias de AOP;
- iii. una muestra de aplicaciones reales del método presentado.

Una vía en línea para la planificación, ofrece **rutas personalizadas basadas en las preferencias del usuario**, y ofrece un servicio de SMS (*Short Message Service*) ciclistas "en el campo", con rutas a la carta. Actualmente, la tendencia es adaptar heurísticas a la solución de problemas de ruteo y llevarlas al cliente a través de sistemas de comunicación móviles. Una muestra de ello es el trabajo de

Vansteenwegena, P. *et al.*, 2011; quienes aseguran que **una guía electrónica personalizada ayuda a los turistas a planificar y disfrutar de su viaje**. El problema de planificación se debe resolver, en tiempo real y puede ser modelado como una variación del problema de orientación *Team Orienteering Problem with Time Windows* (TOPTW).

El TOPTW consiste en un conjunto de ubicaciones que tienen una puntuación, un tiempo de servicio y una ventana de tiempo. El objetivo es maximizar la suma de los puntos obtenidos por un número fijo de rutas. Los itinerarios permiten visitar lugares en el momento adecuado y están limitados en longitud. La principal contribución de este trabajo es una forma simple, rápida y efectiva para resolver el TOPTW mediante una búsqueda iterativa local (metaheurística).

Es importante resaltar, que los autores comentados tratan la satisfacción del cliente como una consecuencia por el uso de las herramientas de la Investigación de Operaciones, por ello, las preferencias y necesidades del viajero son satisfechas.

### **2.1.3 Metaheurísticas en los servicios**

Las heurísticas y metaheurísticas son las herramientas de vanguardia para la solución de problemas de planeación de rutas turísticas; muestra de ello es el artículo "*Metaheuristics for Tourist Trip Planning*" escrito por Vansteenwegen, P. *et al.* en 2009. El artículo tiene por objeto mostrar el uso de los métodos metaheurísticos en el turismo, mediante el diseño de un viaje personalizado utilizando puntos de interés; fue publicado por *Springer* en un libro llamado "*Metaheuristics in the Service Industry*". El libro presenta una colección de artículos que describen los recientes avances en metaheurísticas, en particular, con aplicaciones en la industria de servicio y enfatiza, que en la actualidad los países desarrollados muestran mayor importancia en los servicios. Además, se cree que al igual que en las situaciones derivadas de la fabricación, los problemas de optimización pueden ser identificados en los servicios y ser abordados eficientemente con los enfoques modernos de los métodos metaheurísticos.

#### **2.1.3.1 Métodos de resolución utilizados para resolver el problema de planeación de viajes**

Ahora bien, con lo que respecta a las líneas de investigación que se han seguido para resolver los problemas de planeación de viajes destaca el uso de heurísticas y metaheurísticas. A continuación se enuncian algunas de las técnicas utilizadas:

- Heurístico de secuenciación (Fitzsimmons, 2011);
- Heurístico de ahorros y de barrido (Olivera, 2004);
- Métodos de descomposición (Bérube, *et al.*, 2006);
- Búsqueda Tabú y Recocido simulado (Godart, 2005);
- Búsqueda local iterativa (Vansteenwegena, *et al.*, 2011).

#### 2.1.4 Ubicación de la investigación y aportación

Durante ésta investigación, se ha encontrado y analizado que para poder realizar la planeación de un viaje (diseño de una ruta turística) existen cuatro visiones principalmente:

1. La de los aficionados: en la red se pueden encontrar varios consejos que dan los simpatizantes de los viajes; estos dan estrategias a seguir para poder llevar a cabo la planeación de un viaje sin contratiempos y sin hacer uso de una metodología.
2. La de los expertos en turismo: que usan metodologías basadas en herramientas como la investigación de mercados para conocer las preferencias del consumidor, el FODA para determinar qué aceptación podría o no haber del mercado, entre otras.
3. La de los dueños de páginas web: por lo regular pertenecen a grandes cadenas dedicadas a la comercialización de viajes que ofertan paquetes en determinadas regiones y cuya misión es mostrar el costo que tiene el ir a un lugar, permanecer algunos días y regresar al origen. Por otra parte, en México existe el atlas turístico que muestra algunas rutas temáticas, sin embargo, es un trabajo que apenas ha surgido en el 2012 y no ha tenido gran difusión.
4. La de los investigadores de operaciones: no es muy frecuente ni tan amplia pero se enfoca principalmente en el desarrollo y transformación de modelos de ruteo para adecuar a las necesidades, utilizando como métodos de solución heurísticas o metaheurísticas.

Esta tesis se sitúa en ésta última visión, contribuye en la modelación de problemas de ruteo turísticos que ofrecen satisfacción al cliente por medio de la adecuación de la ruta a las restricciones de tiempo y dinero, además fortalece el estudio de los servicios turísticos mediante el uso de herramientas matemáticas. Se puede

decir que éste trabajo contribuye en un campo no tan explotado por la Investigación de Operaciones, pero que puede llegar a tener potencial debido a la importancia económica que el turismo representa en el mundo.

## 2.2 Marco teórico

Este estudio se aborda con el problema de ruteo de vehículos utilizando para su resolución métodos exactos y heurísticos. Por lo que a continuación se muestra la teoría de estos temas.

### 2.2.1 Problema de ruteo de vehículos

El problema de ruteo de vehículos (VRP: *Vehicle Routing Problem*) es un problema clásico de optimización combinatoria con aplicaciones en entornos logísticos, cuyo objetivo es dar servicio a clientes con ubicación geográfica dispersa y para atenderlos se cuenta con una flota de vehículos que parten desde un depósito central. El modelo realiza la asignación de cada vehículo disponible a una ruta de clientes de manera que se minimice: el costo de transporte, el tiempo o la distancia.

#### 2.2.1.1 Antecedentes

El VRP destaca principalmente en distribución y logística, dado que Dantzig y Ramser (1959) realizan el primer estudio dónde utilizaron el problema de ruteo de vehículos para la distribución de combustible. Este estudio es de gran importancia en mensajería, transporte de valores, recolección de basura, transporte de contenedores, transporte de pasajeros, transporte de alimentos, entre otros. Los trabajos donde hacen referencia al VRP son vastos y en diversas disciplinas, algunos ejemplos de ello son:

- Distribución y Logística
  - Combustible: Dantzig, G. B. & Ramser, J. H. (1959)
  - Logística: Alshamrani, A., Mathur, K. & Ballou, R. H. (2007)
  - Residuos de aceites: Repoussis, P.P. *et al.* (2009)
  - Comercio: Zeng, H., Wu, Y., Zhang, D. & Li, J. (2007)
- Industria
  - Producción horarios: Chen, A. L., Yang, G. K. & WU, Z. M. (2008)
- Transporte
  - Banco: Anbuudayasankar, S. P., Ganesh, K. & Mohandas, K. (2009)

### *2.2.1.2 Características del problema de ruteo de vehículos*

A continuación se mencionan los elementos de un problema de ruteo y sus características.

**La red vial**, usada para la transportación de los bienes, se representa por un grafo, cuyos arcos representan secciones o tramos viales y cuyos vértices corresponden a las intersecciones carreteras que son las localizaciones de los clientes y el depósito. Los arcos pueden ser dirigidos o no dirigidos dependiendo de si se pueden recorrer en una sola dirección o ambas. Cada arco tiene asociado un costo, que generalmente representa su longitud o tiempo de viaje.

**Los clientes**, son representados por un nodo en la red vial y corresponde a la localización. Cada cliente tiene cierta demanda que debe ser satisfecha por algún vehículo. Generalmente, la demanda es un bien cuyo volumen debería ser considerado para cargar los vehículos y es usual que un mismo vehículo no pueda satisfacer la demanda de todos los clientes en una misma ruta. Un escenario es cuando los clientes son proveedores y lo que se desea es recoger mercancía y transportarla hacia el depósito. También puede ocurrir que los bienes deban ser transportados a los clientes pero no estén inicialmente en el depósito, sino tener varios sitios de recolección. En este caso los proveedores deben ser visitados antes que los clientes.

Cuando la demanda no es un bien sino un servicio: el cliente simplemente debe ser visitado por el vehículo. Un mismo vehículo podría visitar a todos los clientes. Otra variante del problema, es cuando cada cliente tiene cierta ubicación y desea ser transportado hacia otro sitio. Aquí la capacidad del vehículo impone una cota sobre la cantidad de clientes que puede llevar. Es usual que cada cliente deba ser visitado exactamente una vez.

En ciertos casos se acepta que la demanda de un cliente sea satisfecha en momentos diferentes y por vehículos diferentes. Los clientes podrían tener restricciones relativas al horario de servicio. Como se puede observar el cliente puede tener variantes según su propia realidad, ya que al final lo que se busca es poder adecuar el modelo según las características del cliente.

Los **vehículos** transportan los bienes a través de un subconjunto de arcos del grafo por los que el vehículo puede transitar. En general, cada vehículo tiene asociado un costo fijo el cuál aplica al momento de utilizarlo y un costo variable

proporcional a la distancia que recorra, además se asume que cada vehículo recorre una sola ruta.

Los problemas en que los atributos (capacidad, costo, etc.) son los mismos para todos los vehículos se denominan de flota homogénea y si hay diferencias, de flota heterogénea. La cantidad de vehículos puede ser un dato de entrada o una variable de decisión. Es usual esperar utilizar la menor cantidad de vehículos y minimizar la distancia recorrida ocupa un segundo lugar. Al igual que en el caso de los clientes, las particularidades ligadas al vehículo pueden ser tantas según las necesidades de adecuación a la realidad, las características propias del problema.

El **depósito**, ya que tanto los vehículos como los bienes a distribuir suelen estar ubicados ahí. Usualmente se exige que cada ruta comience y termine en un mismo depósito, aunque existen variantes, como en el caso de los múltiples depósitos. Podría ocurrir que cada depósito tenga una flota de vehículos asignada a priori o que dicha asignación sea parte de lo que se desea determinar. Los depósitos, al igual que los clientes, podrían tener ventanas de tiempo asociadas.

Los objetivos típicos en un problema de ruteo de vehículos son los siguientes:

- Minimización del costo global de transportación, que depende de la distancia recorrida y costos fijos asociados a cada vehículo.
- Minimización del número de vehículos necesarios para satisfacer a todos los clientes.
- Balanceo de rutas para la carga de los vehículos o del tiempo de viaje.
- Minimización de las penalidades asociadas con el servicio parcial a los clientes.

### ***2.2.1.3 Formulación de un problema de ruteo de vehículos capacitado***

La versión básica del VRP es el problema capacitado, y su principal característica es que todos los vehículos tienen la misma capacidad (Toth, P. & Vigo, D., 2002). El VRP es una extensión del m-TSP, (formulación, dada por Toth, P. & Vigo, D. (2002)) en la cual cada cliente  $i \in V \setminus \{0\}$  tiene asociada una demanda y cada vehículo tiene una capacidad  $Q$ .

Se puede modelar como un problema de flujo en redes, con variables binarias y una gran cantidad de restricciones (una por cada subconjunto del conjunto de nodos). Cada cliente o centro de depósito se considera como un nodo de una

red y se tienen arcos que unen estos nodos. Asociado a cada arco se tiene un costo no negativo que representa el costo del envío de unidades entre dos nodos de la red. Cada cliente tiene una demanda de productos y se cuenta con un número  $k$  de vehículos disponibles, cada uno de ellos con una capacidad de carga  $Q$ . Se busca determinar las rutas de distribución desde el depósito a los clientes de tal forma que se minimicen los costos y se satisfaga la demanda.

El Problema de Ruteo de Vehículos Capacitado (CVRP) consiste en encontrar una colección de exactamente  $k$  ciclos, cada uno de ellos corresponde a la ruta de un vehículo con mínimo costo. Se define el costo total como la suma de los costos de los arcos que pertenecen al ciclo y tal que,

- i. cada ciclo visita el depósito,
- ii. cada cliente es visitado exactamente por un ciclo, y
- iii. la suma de las demandas de los vértices de un ciclo no excede la capacidad del vehículo  $Q$ .

Usualmente se denota como 0 el nodo depósito y los vehículos parten y finalizan en él después de realizar el recorrido.

#### *Formulación matemática*

Sea:

$G = (V, A)$  grafo completo no dirigido

$V = \{v_0, v_1, v_2, \dots, v_n\}$  conjunto de nodos,  $v_0$  es el depósito

$A = \{(i, j) : i, j \in V, i \neq j\}$  conjunto de aristas

$C = (c_{ij})$  matriz de costos de ir del nodo  $i$  al nodo  $j$

$d_i$  = demanda del nodo  $i$

$k$  = número de vehículos disponibles

$Q$  = capacidad de los vehículos

Las variables binarias  $x_{ij}$  determinan si el arco  $(i, j)$  se utiliza o no en la solución. El problema es encontrar  $k$  ciclos que parten del nodo depósito, recorren algunos nodos y regresan al nodo depósito, con mínimo costo.

$$\min \sum_{i \in V} \sum_{j \in V} c_{ij} x_{ij}$$

sujeto a:

$$\sum_{i \in V} x_{ij} = 1, \quad \forall j \in V \setminus \{0\} \quad (2.1)$$

$$\sum_{j \in V} x_{ij} = 1, \quad \forall i \in V \setminus \{0\} \quad (2.2)$$

$$\sum_{i \in V} x_{i0} = K \quad (2.3)$$

$$\sum_{j \in V} x_{0j} = K \quad (2.4)$$

$$\sum_{i \notin S} \sum_{j \in S} x_{ij} \geq r(S), \forall S \subset V \setminus \{0\}, S \neq \emptyset \quad (2.5)$$

$$x_{ij} \in \{0, 1\} \forall i, j \in V \quad (2.6)$$

La restricción (2.1) y (2.2) hacen referencia a que un vehículo entra y sale sólo de un nodo, esto es, que cada cliente es servido por sólo un vehículo; conocidas también como restricciones de grado. Con lo que respecta a las restricciones (2.3) y (2.4), éstas imponen el grado para el vértice del depósito, sólo saldrán del depósito  $k$  vehículos y esos mismos retornarán al depósito.

La restricción (2.5) es para evitar subrutas, éstas son llamadas restricciones de capacidad y corte, las cuales imponen tanto la conectividad de la solución como los requerimientos de capacidad de los vehículos, aquí  $r(S)$  es el número mínimo de vehículos necesarios para satisfacer la demanda en  $S$ . Estas restricciones tienen cardinalidad que crece exponencialmente con  $n$ , lo cual dificulta mucho la resolución, Toth, P. & Vigo, D. (2002) sugieren sustituirlas por una familia de restricciones con cardinalidad polinomial, dadas por

$$u_i - u_j + Qx_{ij} \leq Q - d_j, \forall i, j \in V \setminus \{0\}, i \neq j,$$

$$\text{tal que } d_i + d_j \leq Q$$

$$d_i \leq u_i \leq Q, \forall i \in V \setminus \{0\}$$

donde  $u_i, i \in V \setminus \{0\}$ , son variables continuas adicionales que representan la carga del vehículo después de visitar al cliente  $i$ . Finalmente, la restricción (2.6) especifica que  $x_{ij}$  es una variable binaria.

#### 2.2.1.4 Variantes del problema de ruteo de vehículos

El problema tiene algunas diversificaciones que incluyen restricciones adicionales y en algunos casos se incorporan múltiples variables; estas diferencias surgen como una propuesta de aproximación a la realidad.

1. CVRP (VRP Capacitado);
2. MDVRP (VRP con múltiples almacenes);
3. PVRP (VRP Periódico);
4. SDVRP (VRP donde se permite completar pedidos con varios vehículos);

5. SVRP (VRP aleatorio);
6. VRPB (VRP donde los clientes pueden pedir o devolver algunos productos);
7. VRPPD (VRP con levantamiento y entrega);
8. VRPSF (VRP con almacenes satélite);
9. VRPTW (VRP con ventanas de tiempo).

En la siguiente tabla se muestran las características, el objetivo y la viabilidad de cada problema.

Tabla 1. Clasificación de los problemas de ruteo de vehículos.

<b>Problema</b>	<b>Características</b>	<b>Objetivo</b>	<b>Viabilidad</b>
VRP Capacitado (CVRP - <i>Capacitated VRP</i> )	Cada vehículo tiene una capacidad limitada.	Minimizar la flota vehicular y el tiempo de recorrido. La demanda total de producto para cada ruta no puede exceder la capacidad del vehículo que la opera.	Si la cantidad total asignada a cada recorrido no supera la capacidad del vehículo que le da servicio entonces la solución es factible.
VRP con múltiples almacenes (MDVRP - <i>Multiple Depot VRP</i> )	Varios almacenes para abastecer a los clientes. La ruta Inicia y finaliza en el mismo almacén.	Minimizar la flota vehicular y la suma del tiempo de recorrido. La demanda total de producto se satisface con varios depósitos.	Un resultado es factible cuando cada ruta satisface las restricciones del VRP capacitado.
VRP con almacenes satélite (VRPSF - <i>VRP with Satellite Facilities</i> )	Almacenes satélite para reponer los vehículos durante la ruta.	Minimizar la suma del tiempo de recorrido. Los conductores hacen entregas hasta el final de su turno sin necesidad de volver al depósito central.	La solución es factible si todas las restricciones son satisfechas.
VRP de entrega particionada (SDVRP)	Los clientes son atendidos por diferentes vehículos.	Minimizar la flota vehicular y la suma del tiempo de recorrido necesario para abastecer a todos los clientes.	La solución es factible si todas las restricciones del VRP son satisfechas, y un cliente puede ser atendido por más de un vehículo.
VRP con ventanas de tiempo (VRPTW - <i>VRP with Time Window</i> )	Cada cliente es suministrado en un tiempo determinado.	Minimizar la flota vehicular y el tiempo de recorrido y de espera, para abastecer a todos en las horas requeridas.	Una solución es infactible si se suministra después del límite superior de su ventana de tiempo o la ruta supera dicho tiempo.

<b>Problema</b>	<b>Características</b>	<b>Objetivo</b>	<b>Viabilidad</b>
VRPB - VRP <i>with Backhauls</i>	Los clientes pueden pedir o devolver algunos productos.	Encontrar un conjunto de rutas que minimice la distancia total recorrida.	Una solución es viable si las entregas para cada ruta se completan antes que la recolección y la capacidad del vehículo sea violada.
VRP Estocástico (SVRP - <i>Stochastic VRP</i> )	Algunos alores como: el número de clientes, demanda, el tiempo de viaje son aleatorios.	Minimizar la flota vehicular y el tiempo de recorrido necesario para abastecer a todos los clientes con valores aleatorios en cada ejecución.	Si hay datos aleatorios, no es posible exigir que todas las restricciones se cumplan para toda variable. Por tanto, el tomador de decisiones puede exigir la satisfacción de ciertas restricciones.
VRP con levantamiento y entrega (VRPPD)	Los clientes pueden devolver algunos bienes al almacén.	Minimizar la flota vehicular y el tiempo de recorrido. El vehículo debe poder transportar los productos a entregar y recoger productos para el almacén.	Una solución es factible si no se supera la capacidad del vehículo mientras recoge o deja productos.
VRP Periódico (PVRP - <i>Periodic VRP</i> )	Las entregas deben hacerse en días que el cliente requiere.	Minimizar la flota vehicular y la suma del tiempo de recorrido necesario para abastecer a todos los clientes.	La solución es factible si todas las restricciones del VRP son satisfechas y durante el período de M-día, cada cliente es visitado al menos una vez.

Fuente: Elaboración propia con base en Toth, P. & Vigo, D. (2002)

### **2.2.1.5 Complejidad del problema de ruteo**

Los problemas de ruteo de vehículos y sus variantes pertenecen a la rama de la optimización combinatoria. Es necesario abordar estos problemas desde la *Teoría de Complejidad Computacional* y se recomienda consultar Papadimitriou, Ch. (1995). De la definición formal, tenemos que un problema es NP-completo si pertenece a la clase NP y se puede reducir a algún problema NP-completo conocido.

Los problemas de complejidad NP-completo (Garey, M., Johnson, D. (1979) se caracterizan por un tiempo de cómputo elevado al momento de resolver, ya que un pequeño aumento del tamaño del problema supone un aumento exponencial

del tiempo de cómputo. El problema de ruteo de vehículos, que es uno de los problemas más conocidos y desafiantes en la programación entera, es de complejidad NP-completo (Rinnooy Kan, A. & Lenstra, J., 1981), dado que el modelo de esta investigación pertenece a esta variante se propone usar heurísticas para su solución.

### 2.2.2 Métodos de solución

Los temas de optimización son de gran interés, ya que encontrar un resultado óptimo puede ser difícil y hasta imposible en algunas ocasiones. Herbert A. Simon (1962) menciona que: *“usualmente en el esfuerzo por acercarse a una decisión suficientemente placentera, se tiene que satisfacer, esto es, ser satisfecho con un resultado aceptable, más que uno óptimo”*. (Elster, 1997).

En la literatura se encuentra que algunos métodos adecuados para la solución de los problemas de ruteo de vehículos se pueden dividir en tres clases: métodos exactos, métodos heurísticos y métodos metaheurísticos. A continuación se explican dichas técnicas de solución.

#### 2.2.2.1 Métodos exactos

Dada la complejidad de los problemas, solo las instancias con pocos clientes (menos de 70 aproximadamente) pueden ser resueltas consistentemente por métodos exactos, en este tipo de metodologías suele resolverse alguna relajación del problema y utilizarse un esquema de ramificación y acotamiento conocido como *Branch and Bound* (Nemhauser, G. & Wolsey, L., 1988).

Sin embargo, también se utiliza el método de ramificación y corte (*Branch and Cut*), que ha tenido grandes avances en los últimos años, actualmente es el método exacto de mayor importancia, (Cordeau, *et al.*, 2007). Si se busca mayor información se recomienda el compendio completo de métodos exactos para VRP cuyo trabajo es de Laporte, G. (1992).

##### 2.2.2.1.1 *Branch and Bound*

El método de *Branch and Bound* (Ramificación y Acotamiento) aborda la resolución de modelos de programación entera a través de la solución de una secuencia de modelos de programación lineal que constituyen los nodos o subproblemas del problema entero, considerado uno de los métodos más efectivos hasta finales de los 80's basado en relajaciones combinatorias, en los

Últimos tiempos se han propuesto relajaciones lagrangianas y con ello se ha incrementado el tamaño de los problemas que se pueden resolver.

Los algoritmos de este tipo se concentran principalmente en la determinación de una buena cota inferior que constituye una de las principales aportaciones, además mantiene su importancia a nivel comercial, por ello a continuación se muestra el algoritmo (Hillier, F. & Liberman, G., 2010).

### **Algoritmo Branch and Bound (B-B)**

#### *Paso inicial*

- La solución actual  $Z^* = -\infty$  (max) o  $Z^* = \infty$  (min).
- Se resuelve la relajación del IP, la más común implica relajar las restricciones de integralidad (pueden existir otras relajaciones).
- Si la solución del LP relajado satisface las restricciones de integralidad la solución obtenida es óptima (si el LP es infactible, también lo es el IP). De otra forma, al menos una de las variables requeridas enteras es fraccional en la solución del LP.

#### **Pasos para cada iteración**

##### *Ramificación*

De los problemas restantes (no sondeados) elija el de creación más reciente (los empates se rompen con el de cota mejor), seleccione una o más de las variables fraccionales y ramifique para crear dos o más subproblemas, los cuales excluyen la solución previa pero no eliminan ninguna solución entera factible.

##### *Acotación*

Estos nuevos problemas constituyen un árbol de ramificación, y un LP se resuelve (acotación) para cada nodo creado.

##### *Sondeo*

Cada nuevo subproblema se descarta (sondea) si:

1. tiene un v.o. igual o peor que una solución entera conocida o;
2. la solución del problema es infactible o;

3. satisface todas las restricciones de integralidad; si además su v.o. es mejor que la solución actual, se convierte en la nueva solución actual y se aplica de nuevo la prueba 1 a todos los problemas no sondeados con la mejor  $Z^*$ .

#### *Prueba de optimalidad*

El algoritmo termina cuando todos los subproblemas están sondeados, la solución actual es la óptima, en otro caso, se realiza otra iteración.

La mayoría del software de optimización utiliza el algoritmo de *Branch and Bound* para resolver modelos matemáticos de programación entera o de programación entera mixta, algunas aplicaciones cuentan con la posibilidad de usar otros algoritmos.

##### *2.2.2.1.2 Branch and Cut*

El método de *Branch and Cut* (Ramificación y Corte) trata de generar desigualdades válidas para añadir planos de corte en el espacio factible de soluciones, tratando de acotar el árbol de ramificación no sólo en el nodo raíz (Cordeau, *et al.*, 2007).

Actualmente representa el mejor algoritmo exacto para el VRP, la investigación en esta área se ha expandido debido al surgimiento exitoso de combinaciones poliédricas, Naddef y Rinaldi (2002) mencionan que: "La cantidad de la investigación utilizada para resolver el CVRP por este tipo de métodos no es comparable con la que se ha dedicado para resolver el TSP, la investigación en este campo es limitada y no se ha publicado".

##### *2.2.2.1.3 Branch and cut and price (BCP)*

Surge a partir de la combinación de algoritmos de ramificación y corte con otros algoritmos. Fukasawa *et al.* (2006) proponen un método de solución que combina ramificación y corte con un algoritmo de generación de columnas, la idea es mejorar las cotas inferiores en el proceso de ramificación, por su parte Baldacci *et al.* (2008) proponen un algoritmo basado en partición de conjuntos con cortes adicionales para el CVRP.

##### *2.2.2.2 Métodos heurísticos*

Conforme el número de clientes aumenta, el número de restricciones crece exponencialmente y un método exacto tardaría mucho tiempo en encontrar una solución, se han desarrollado métodos heurísticos que permiten encontrar

soluciones aproximadas con un bajo costo de recursos computacionales, además se ha demostrado en la práctica que estos métodos encuentran muy buenas soluciones de forma eficiente. Existen algoritmos heurísticos con distintos grados de complejidad que utilizan técnicas diferentes para abordar un problema; se pueden clasificar como:

- heurísticas clásicas, diseñadas entre los años 1960 y 1990, realizan una exploración relativamente limitada del espacio de soluciones, proporcionando resultados aceptablemente buenos con tiempos de cómputo moderados;
- metaheurísticas, que surgieron a principios de los 90 y se han mantenido en desarrollo.

La mayoría de las heurísticas clásicas pueden modificarse sencillamente, de esa forma se incorporan nuevas restricciones relacionadas con el problema real o ajustando variantes del problema. Por otra parte, los resultados son de mejor calidad al utilizar técnicas metaheurísticas y son los métodos que se han estudiado en los últimos años. Los métodos heurísticos se pueden clasificar en:

**Métodos constructivos:** Estos poco a poco construyen una solución factible pero no contienen una fase de mejora por sí mismos.

- Algoritmo de Ahorros (*Savings Algorithm*);
- Algoritmo de Ahorros basado en uniones (*Matching Based*);
- Multi-ruta de mejora (*Multi-route Improvement Heuristics*).

**Algoritmo de 2-Fases:** El problema se descompone en dos componentes naturales:

1. la agrupación de los vértices en las rutas posibles y;
2. la construcción de la ruta actual.

Además existen mecanismos de retroalimentación entre las dos etapas.

- Fisher and Jaikumar (1981);
- Algoritmo de Pétalos (*The Petal Algorithm*);
- Algoritmo de Barrido (*The Sweep Algorithm*);
- Taillard (1993);
- Asignar primero - Rutear después (*Cluster-First, Route-Second Algorithms*);
- Rutear primero - Asignar después (*Route-First, Cluster-Second Algorithms*).

Para la solución del VRP también se han trabajado las técnicas metaheurísticas que a continuación se mencionan:

- Algoritmo de Colonia de hormigas (*Ant Colony Optimization Algorithms*);
- Programación de constantes (*Constraint Programming*);
- Recocido determinista (*Deterministic Annealing*);
- Algoritmos Genéticos (*Genetic Algorithm*);
- Recocido Simulado (*Simulated Annealing*);
- Búsqueda Tabú (*Tabu Search*).

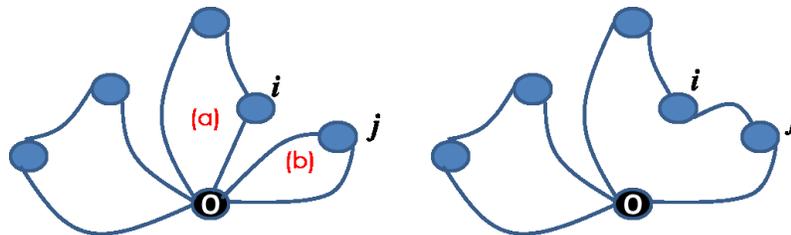
En la siguiente sección se describe una de las heurísticas más importantes para la solución del VRP, su importancia radica en que fue una de las primeras desarrolladas para resolver éste tipo de problemas de manera rápida a pesar de la gran cantidad de datos.

#### 2.2.2.2.1 Algoritmo de la heurística de ahorros

Uno de los algoritmos utilizados para resolver el VRP es el Algoritmo de Ahorros de Clarke y Wright (1964). Esta heurística es un procedimiento simple que realiza una exploración limitada del espacio de búsqueda y da una solución de calidad aceptable en un tiempo de cálculo moderado. Además, las soluciones pueden ser optimizadas con los algoritmos de mejora del TSP (como 2-opt). Si en una solución hay dos rutas diferentes  $(0, \dots, i, 0)$  y  $(0, j, \dots, 0)$  pueden ser combinadas formando una nueva ruta  $(0, \dots, i, j, \dots, 0)$ , el ahorro (en distancia) obtenido por dicha unión es:

$$s_{ij} = c_{i0} + c_{0j} - c_{ij}$$

pues en la nueva solución los arcos  $(i, 0)$  y  $(0, j)$  no serán utilizados y se agregará el arco  $(i, j)$ . En este algoritmo se parte de una solución inicial y se realizan las uniones que den mayores ahorros siempre que no violen las restricciones del problema.



Ruta (a) y (b) diferentes, formando una nueva ruta.

Figura 7: Algoritmo de ahorros – unión de dos rutas.

Fuente: Elaboración propia basada en el algoritmo de Clark y Wright.

Tabla 2. Algoritmo de Ahorros – Clark y Wright.

PASO	1	Calcular el ahorro $s(i, j) = d(d, i) + d(d, j) - d(i, j)$ para cada par $(i, j)$ de puntos de demanda.
PASO	2	Hacer una lista en orden descendente de acuerdo a la magnitud de $s(i, j)$ , con esto se crea la "lista de ahorro". Procesar la lista de los ahorros a partir de la entrada superior de la lista (el más grande de $s(i, j)$ ).
PASO	3	Para el ahorro $s(i, j)$ evaluado: incluir el enlace $(i, j)$ en una ruta si no hay restricciones de ruta violados a través de la inclusión de $(i, j)$ en la ruta, y si:  a. Ni $i$ ni $j$ han sido asignados a una ruta, se inicia una nueva ruta incluyendo tanto a $i$ como a $j$ .  b. Exactamente uno de los dos puntos $(i$ o $j)$ ha sido incluido en una ruta ya existente, el punto no es interior a esa ruta (un punto es interior a una ruta si no está al lado del depósito en el orden de recorrido de puntos), en cuyo caso el enlace $(i, j)$ se añade a la misma ruta.  c. Tanto $i$ como $j$ se han incluido ya en dos diferentes rutas existentes y no es el punto interior a su ruta, en cuyo caso las dos rutas se fusionan.
PASO	4	Si la lista de ahorro $s(i, j)$ no se ha agotado, volver al paso 3 y procesar la próxima entrada de la lista, de lo contrario, dejar de iterar ya que la solución para el VRP se compone de las rutas creadas en el paso 3.

Fuente: Elaboración propia con base en Clarke, G. & Wright, W. (1964).

#### *Instancia muestra de la heurística de ahorros*

A continuación, se ilustra cómo funciona el algoritmo. Los datos representan únicamente un ejemplo, no son reales.

#### *Datos iniciales*

- $n = 4$  ciudades  $\{1,2,3,4\}$ ;  $\{\text{Tepozotlán, Malinalco, Tepoztlán, Tlaxcala}\}$
- Origen del viajero; el punto 0.
- Las demandas de tiempo de cada una de las ciudades:  $d_i = (0,3,2,3,4)$  (días)

- La matriz de costos (miles de pesos):

$$c_{ij} = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 3 & 2 & 5 \\ 1 & 0 & 2 & 1 & 3 \\ 3 & 2 & 0 & 3 & 3 \\ 2 & 1 & 3 & 0 & 3 \\ 5 & 3 & 3 & 3 & 0 \end{pmatrix}$$

- La capacidad de tiempo del viajero es de 7 días.
- El presupuesto del viajero son 5 mil pesos.

La siguiente figura muestra los sitios turísticos representados en color amarillo y el lugar de partida de la Ciudad de México,

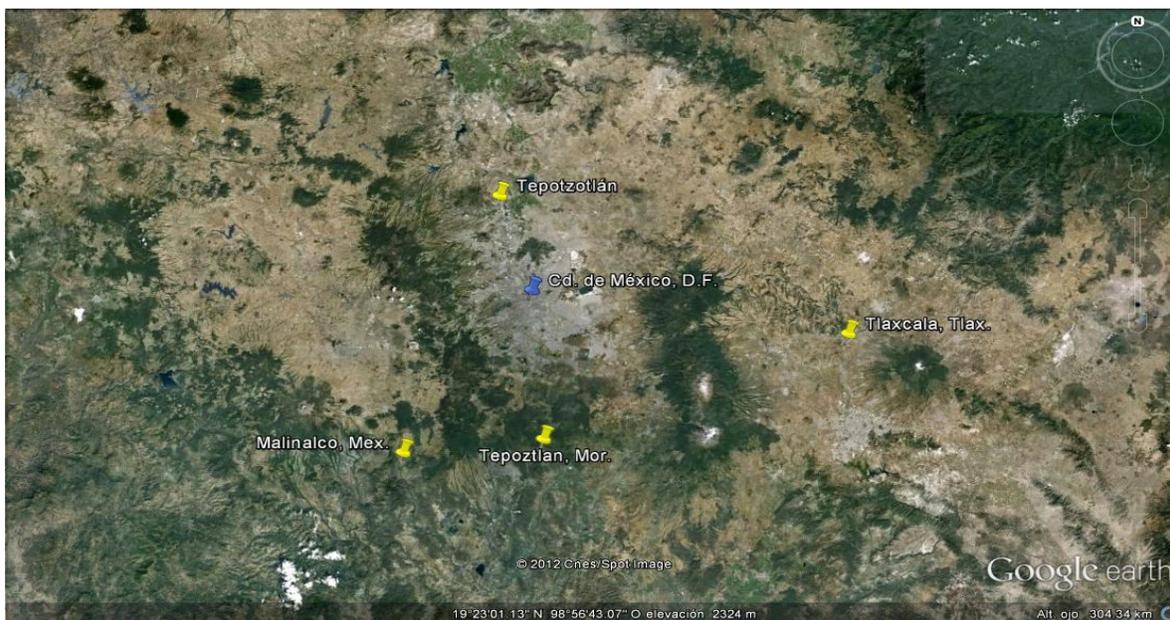


Figura 8: Datos iniciales algoritmo de Clark & Wright.

Fuente: Elaboración propia usando Google earth 2012.

### *Paso inicial*

El algoritmo de ahorros comienza calculando el conjunto de rutas iniciales, esto es asignar con cada punto una ruta diferente, como en la siguiente figura.

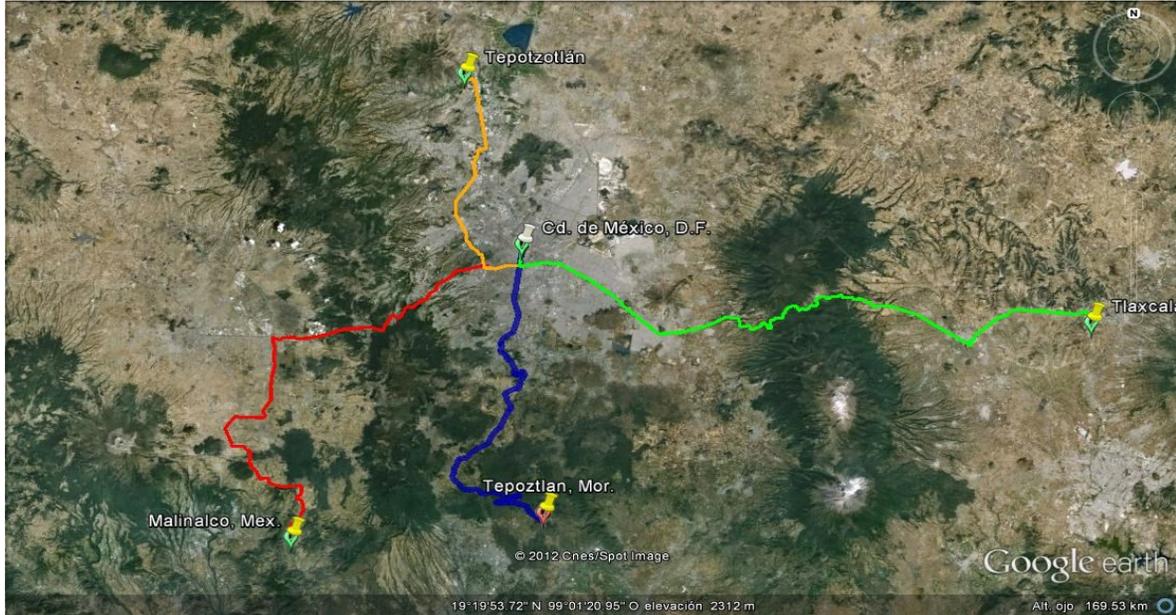


Figura 9: Solución inicial, algoritmo de Clark & Wright.

Fuente: Elaboración propia usando Google earth 2012.

### Segundo paso

Lo siguiente es realizar fusiones entre las diferentes rutas ya que se trata de obtener una mejor solución. Se calculan los ahorros, lo cual permite visualizar las diferentes rutas que se pueden fusionar, se usa la fórmula de ahorros:

$$s_{ij} = c_{i0} + c_{0j} - c_{ij},$$

si  $s_{ij} > 0$  se debe considerar dicha unión.

Además, se debe tener en cuenta la restricción que impone la capacidad limitada del viajero:  $d_i + d_j \leq Q$  donde  $Q = 7$  días. A continuación la tabla de ahorros obtenida:

Tabla 3. Listado de ahorros.

<i>i</i>	<i>J</i>	<i>S<sub>ij</sub></i>	<i>c<sub>il</sub></i>	<i>c<sub>li</sub></i>	<i>c<sub>ij</sub></i>	<b>Resultado</b>
2	4	S <sub>24</sub>	3	5	3	5
3	4	S <sub>34</sub>	2	5	3	4
1	4	S <sub>14</sub>	1	5	3	3
1	2	S <sub>12</sub>	1	3	2	2
1	3	S <sub>13</sub>	1	2	1	2
2	3	S <sub>23</sub>	3	2	3	2

Fuente: Elaboración propia.

### Puntos internos

El punto que no es el primero ni el último en una de las rutas actuales, no puede ser considerado para realizar posibles fusiones.

### Puntos que se encuentren en la misma ruta

Si los puntos sugeridos por la lista de ahorros son extremos de la misma ruta, la operación de unión no puede llevarse a cabo, ya que en ese caso se formarían subrutas y no se permite.

### Tercer paso

La lista se ordena con los valores de ahorros de mayor a menor, mientras mayor sea el valor más conveniente es la ruta ya que tenemos la certeza de que se trata del mejor ahorro.

Iteración 1. Se toma el primer valor de la lista:

<i>i</i>	<i>J</i>	<i>S<sub>ij</sub></i>	<i>c<sub>il</sub></i>	<i>c<sub>li</sub></i>	<i>c<sub>ij</sub></i>	<b>Resultado</b>
2	4	S <sub>24</sub>	3	5	3	5

Se debe comprobar que cumpla con las restricciones antes mencionadas:

- $d_i + d_j \leq Q$  donde  $Q = 7$  días  $d_2 + d_4 = 5$ ;  $5 < 7$
- $c_{ij} \leq L$ ; donde  $L = 5$   $c_{24} + c_{02} + c_{04} = 11$ ,  $11 > 5$  por lo tanto, se rechaza.

Iteración 2. Tomar el siguiente valor de la lista:

<i>i</i>	<i>J</i>	<i>S<sub>ij</sub></i>	<i>c<sub>il</sub></i>	<i>c<sub>li</sub></i>	<i>c<sub>ij</sub></i>	<b>Resultado</b>
3	4	S <sub>34</sub>	2	5	3	4

Comprobar que cumpla con las restricciones:

- $d_i + d_j + d_k \leq Q$  donde  $Q = 7$  días  $d_3 + d_4 + d_2 = 9$ ;  $9 > 7$  por lo tanto, se rechaza.

Iteración 3. Siguiendo valor de la lista:

<i>i</i>	<i>J</i>	<i>S<sub>ij</sub></i>	<i>c<sub>il</sub></i>	<i>c<sub>li</sub></i>	<i>c<sub>ij</sub></i>	<b>Resultado</b>
1	4	S <sub>14</sub>	1	5	3	3

Verificar que satisface las condiciones:

- $d_i + d_j + d_k \leq Q$  donde  $Q = 7$  días  $d_2 + d_4 + d_1 = 9$ ;  $9 > 7$  por lo tanto, se rechaza.

Iteración 4. Siguiendo valor de la lista:

<i>i</i>	<i>J</i>	<i>S<sub>ij</sub></i>	<i>c<sub>il</sub></i>	<i>c<sub>li</sub></i>	<i>c<sub>ij</sub></i>	<i>Resultado</i>
1	2	S <sub>12</sub>	1	3	2	2

Comprobar las restricciones:

- $d_i + d_j + d_k \leq Q$  donde  $Q = 7$  días  $d_2 + d_4 + d_1 = 9$ ;  $9 > 7$  por lo tanto, se rechaza.

Iteración 5. Siguiendo valor de la lista:

<i>i</i>	<i>J</i>	<i>S<sub>ij</sub></i>	<i>c<sub>il</sub></i>	<i>c<sub>li</sub></i>	<i>c<sub>ij</sub></i>	<i>Resultado</i>
1	3	S <sub>13</sub>	1	2	1	2

Probar que satisface las condiciones:

- $d_i + d_j \leq Q$  donde  $Q = 7$  días  $d_1 + d_3 = 6$ ;  $6 < 7$
- $c_{ij} \leq L$ ; donde  $L = 5$   $c_{13} + c_{03} + c_{01} = 1 + 1 + 2, 4 < 5$
- Ambos puntos son extremos en sus rutas.
- Ambos puntos no pertenecen a la misma ruta. Por tanto, la fusión de ambas rutas puede llevarse a cabo.

Iteración 6. Siguiendo valor de la lista:

<i>i</i>	<i>J</i>	<i>S<sub>ij</sub></i>	<i>c<sub>il</sub></i>	<i>c<sub>li</sub></i>	<i>c<sub>ij</sub></i>	<i>Resultado</i>
2	3	S <sub>23</sub>	3	2	3	2

Evidenciar que cumple con las restricciones:

- $d_i + d_j + d_k \leq Q$  donde  $Q = 7$  días  $d_1 + d_3 + d_2 = 8$ ;  $8 > 7$  por tanto se rechaza.

El número de iteraciones depende del tamaño de la lista de ahorro. En la siguiente figura se ilustra la solución, sin embargo, es importante enfatizar que los datos usados para éste ejemplo no son verídicos y únicamente se utilizaron para mostrar cómo funciona el algoritmo de ahorros.

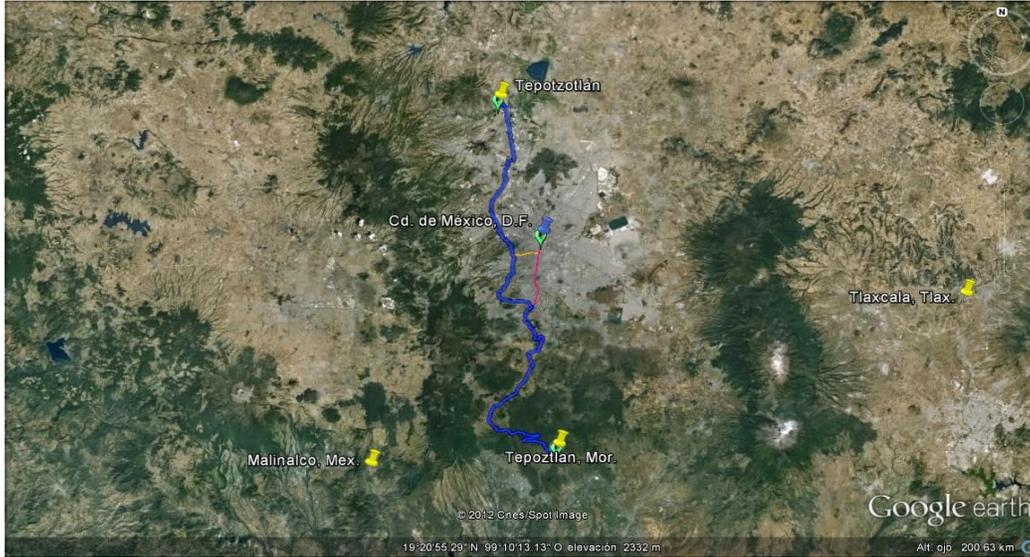


Figura 10: Solución, algoritmo de Clark & Wright.  
Fuente: Elaboración propia usando Google earth 2012.

Por otra parte, es importante indicar que el ejemplo aquí presentado comprueba dos restricciones, verifica la demanda de tiempo de la ciudad pero también identifica el capital que tiene disponible el viajero, es por ello que sólo nos da una ruta de tres ciudades. La ruta:

Ciudad de México – Tepotztlán – Tepoztlán – Ciudad de México.

- Costo: 4 mil pesos
- Demanda: 6 días

### 2.2.3 Formas en que se ha abordado la satisfacción del cliente

En las empresas de servicios, la satisfacción es el elemento principal de la competitividad; por ello, dedican tiempo a analizar factores como calidad, flexibilidad y adaptabilidad, dichos valores son evaluados por el consumidor, quién finalmente es el foco de atención al decir si está satisfecho o no con el servicio recibido. Algunas definiciones formales sobre éste tema se dan a continuación.

- Philip Kotler (1996), define la satisfacción del cliente como "el nivel del estado de ánimo de una persona, que resulta de comparar el rendimiento percibido de un producto o servicio con sus expectativas".

- James & Mona Fitzsimmons (2011), dicen que “la **habilidad para personalizar el servicio** requiere de proveedores altamente capacitados, cuyo servicio sea flexible y se pueda adaptar a las necesidades de los clientes”.

Por otra parte, el uso de un Sistema de Gestión de Calidad (SGC) es frecuente para conocer el grado de satisfacción de los clientes por los servicios recibidos y una metodología importante al respecto es el uso de la norma ISO 9001:2008, la cual tiene muchas semejanzas con el famoso ciclo *Deming* también conocido como círculo PDCA o círculo de Gabo (de Edwards Deming). “PDCA”: acrónimo de *Plan, Do, Check, Act* (Planificar, Hacer, Verificar, Actuar).

La norma está estructurada en cuatro grandes bloques, completamente lógicos, y esto significa que con el modelo de sistema de gestión de calidad basado en la Organización Internacional para la Estandarización (ISO: *International Organization for Standardization*) puede desarrollar cualquier actividad, sin importar si el producto o servicio lo brinda una organización pública o privada, cualquiera que sea su tamaño.

Dada la importancia que actualmente tiene el uso de un SGC, a continuación se presentan distintas metodologías, citadas en ISO 9001:2008, para conocer la satisfacción del cliente. El apartado 8.2.1. de ISO 9001:2008 define la satisfacción del cliente como el resultado de comparar las expectativas previas del cliente (en los productos y/o servicios y en los procesos e imagen de la empresa), con el valor percibido al finalizar la relación comercial. Conocer la opinión de los clientes es fundamental para establecer posteriormente acciones de mejora en la organización y es por ello que se utilizan las siguientes herramientas:

**Encuestas de satisfacción.** La empresa elabora un cuestionario con preguntas relacionadas con aspectos claves: calidad del producto o servicio, atención personal, etc. Lo habitual es que estas preguntas sean respondidas en una escala de valoración (por ejemplo: Excelente, Buena, Regular, Deficiente o escalas numéricas del 1 al 5 o del 1 al 10) que permita el tratamiento estadístico de los resultados. También es aconsejable incorporar campos en blanco donde el cliente pueda expresar sus comentarios y aquellos aspectos de mejora que estime oportuno. El inconveniente de este método es la dificultad de conseguir un número de encuestas que resulte representativo respecto al número total de clientes.

**Análisis de no conformidades y reclamaciones.** Un bajo número de incidencias y reclamaciones es un dato representativo de la calidad de la organización y está relacionado con la satisfacción del cliente. Utilizar únicamente este método presenta el problema de que la mayoría de los clientes insatisfechos no realizan reclamaciones sino que simplemente dejan de ser clientes.

**Análisis de pérdida de negocio.** La empresa realiza un seguimiento de las ventas realizadas a cada cliente y detecta su grado de fidelidad, identifica, además, aquellos clientes que han tenido descensos significativos de su facturación o que simplemente han dejado de solicitar sus productos o servicios. Este método debe ir acompañado del análisis de causas de las pérdidas de negocio.

**Felicitaciones o comentarios de clientes.** La empresa recopila las comunicaciones de sus clientes en las que se realicen comentarios positivos o negativos. Este método carece de toda proactividad y puede resultar poco eficaz si no aporta datos representativos.

**Informes de agentes comerciales.** La empresa dispone de una metodología para recopilar la información captada por los agentes comerciales en sus visitas a clientes. Puede disponerse de un cuestionario o encuesta de satisfacción, similar al comentado anteriormente, en el que el agente comercial anota los resultados de satisfacción. Con este método, se soluciona el problema de obtener un bajo índice de respuestas pero existe el inconveniente de perder la opinión directa del cliente al pasar por el filtro del agente comercial.

Por otra parte, los servicios turísticos se rigen a través de encuestas para conocer la opinión de los turistas en los rubros de hospitalidad, servicios de hotel, parques recreativos, seguridad, entre otros. Además, los portales en internet se alimentan de comentarios sobre los servicios de la línea aérea que utilizaron o sobre el hotel dónde se hospedaron.

Ahora bien, por lo que respecta al estudio aquí propuesto, se pretende ofrecer satisfacción al cliente mediante información oportuna para la toma de decisiones, ya que dicha información será:

- i. **personalizada**, dado que según las capacidades del cliente (tiempo-dinero) se le ofrecerán las **alternativas** que tiene para viajar;
- ii. **precisa**, como consecuencia del uso de herramientas matemáticas;
- iii. **flexible**, porque puede ser modificada según las capacidades del cliente,
- iv. y ésta información se le dará en un **tiempo breve de espera**.

Considerando lo anterior, se espera poder dar al cliente la satisfacción de tener un viaje hecho a la medida de sus capacidades, sin que éste tenga la necesidad de enfrentarse al diseño de un circuito turístico sumando costos, y mostrando a la brevedad tantas opciones adaptadas a sus intereses haya. Para lograr construir dicho modelo se siguió la metodología que en la siguiente sección se describe.

## 2.3 Metodología

El diagrama muestra la estrategia seguida para desarrollar la investigación.

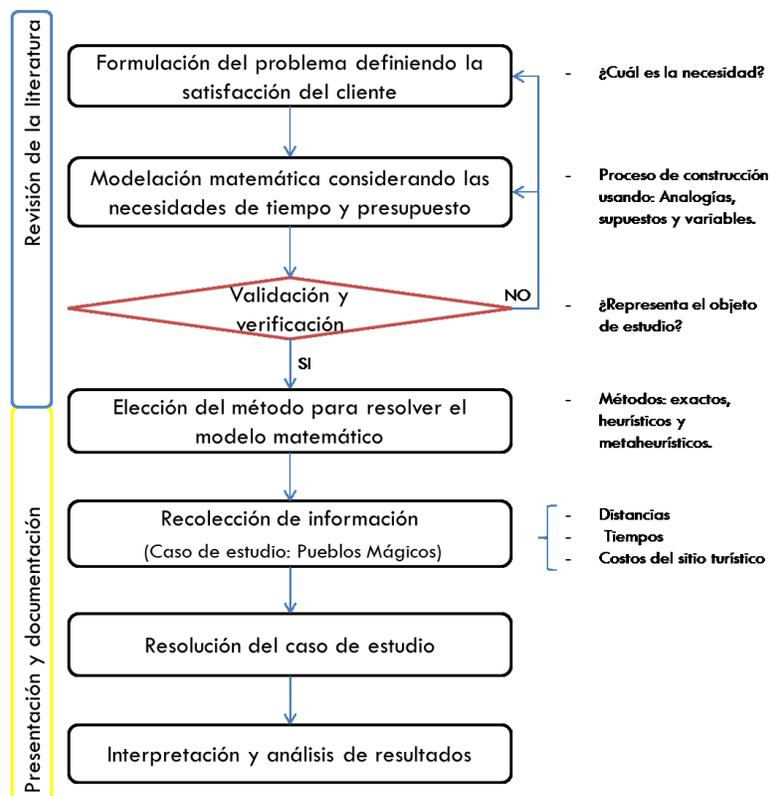


Figura 11: Metodología de la investigación.

Fuente: Elaboración propia.

**Formulación del problema.** Para estructurar el problema se puede preguntar ¿cuál es la necesidad del cliente?, a partir de ello se define la satisfacción del cliente y los resultados esperados del modelo. Es importante en esta etapa tener una idea muy clara de qué se quiere hacer y qué se va a lograr con ello. En este caso, la necesidad del cliente es conocer las alternativas que tiene para viajar de acuerdo a su tiempo y dinero, por tanto el resultado del modelo ofrece un

conjunto de rutas personalizadas. Los diagramas sirven para delimitar el objeto de estudio y son un apoyo en los procesos de validación-verificación.

**Modelación matemática.** Para llevar a cabo esta tarea se realizó revisión bibliográfica y mediante una analogía se determinó qué problema funciona como base para construir el modelo de ruteo, además se determinó que variables y supuestos son necesarios. En esta fase se utilizó el principio de parsimonia<sup>14</sup>, iniciando el modelo con una restricción y comprobando su funcionamiento para añadir otras variables.

**Validación y verificación.** Esta fase sirve para corregir deficiencias en la formulación o conceptualización del modelo. Para realizar la validación y verificación se pueden analizar varias instancias mediante un software para observar que el comportamiento del modelo es el esperado.

**Elección del método para resolver el modelo matemático.** Para definir cómo resolver el modelo es necesario conocer las características propias del problema y los métodos de solución utilizados. En lo particular, al momento de realizar las diferentes instancias, elegí el método de solución para el caso de estudio.

**Recolección de información y datos.** Los datos requeridos son: tiempo, distancia y costo del sitio turístico para ejemplificar y mostrar la funcionalidad del modelo propuesto, sin embargo, es necesario validar la confiabilidad de los datos que se están utilizando ya que de ello depende obtener el resultado esperado.

**Resolución del caso.** El caso de estudio permite mostrar la funcionalidad del modelo propuesto.

**Interpretación.** Los resultados del caso de estudio se analizan.

**Documentación.** La documentación a realizar es del tipo técnico para poder reportar los avances de la investigación.

La metodología antes descrita contempla los elementos esenciales para poder desarrollar una investigación ordenada, y también para poder visualizar los posibles conflictos en el desarrollo de la investigación. Si se sigue la metodología establecida se obtendrán los resultados deseados y se podrá inferir qué trabajo podría enriquecer ésta investigación en el futuro.

---

<sup>14</sup> Refiere a que en igualdad de condiciones, sean preferidas las teorías más simples.

## Capítulo III

# Modelo de ruteo turístico para la satisfacción del cliente

---

### 3.1 Proceso de modelación

Con antelación se ha declarado que la intención de este estudio es crear un modelo de ruteo y para ello se requiere la acción de modelar, la cual se refiere a construir una representación de la realidad, sin embargo, para lograrlo es necesario primero definir claramente qué parte de la realidad se desea representar.

Un modelo es un esquema teórico, generalmente en forma matemática, de un sistema o de una realidad compleja que se elabora para facilitar su comprensión y el estudio de su comportamiento. El propósito de los modelos es ayudar a:

- explicar,
- entender o,
- mejorar un sistema.

Puede ser una réplica de éste o una abstracción de las propiedades dominantes del objeto, además es de ayuda para estructurar el pensamiento al organizar y clasificar conceptos confusos e inconsistentes.

La gran utilidad de los modelos se debe a que son simplificaciones, explican parte de la realidad de manera concisa; su gran ventaja es que pueden ser probados y evaluados. La modelación es el proceso de construcción de un modelo para estudiar determinado ambiente, por medio de símbolos abstractos, el cual desde el punto de vista de los intereses planteados, concuerda con el sistema real.



Figura 12: Modelación matemática.  
Fuente: Elaboración propia con base en Morris, W. T. (1967).

La adecuada construcción de un modelo ayuda a organizar, evaluar y examinar la validez de las ideas, para ello es necesario tener la habilidad de:

- seleccionar de la realidad los elementos que son imprescindibles;
- definir la perspectiva: ¿qué es lo que se está viendo como objeto de estudio?
- plantear el problema, normalmente de manera simplificada en términos relativos;
- seguir un método para la obtención de los modelos.

En general, primero se procede a identificar las variables que intervienen, el carácter de las mismas (dependientes o independientes) las relaciones entre ellas, para después organizar y poder hallar la forma de vincular dicha información a través de funciones. Morris, W. (1967) recomienda comenzar con modelos muy simples, alejados de la realidad e intentar avanzar en forma evolutiva hacia modelos más elaborados que reflejen mejor la complejidad de la situación. Además comenta que si se trata de iniciar con un modelo más complejo puede convertirse en una seria frustración. En el proceso para construir un modelo es necesario:

- omitir y distorsionar ciertos aspectos de la situación deliberadamente;
- suprimir consideraciones difíciles y suboptimizar.

La analogía o asociación con estructuras lógicas bien desarrolladas, juega un papel importante en la determinación del punto de partida del proceso de elaboración o enriquecimiento del modelo. El proceso de elaboración o enriquecimiento implica por lo menos dos tipos de procedimientos:

1. Alternar tareas de modificación del modelo y confrontación de datos. Conforme cada versión del modelo sea probada, una nueva versión es producida que conduce a su vez a una prueba subsecuente;

2. Exploración de la viabilidad del modelo y los supuestos que lo caracterizan. Si una versión del modelo permite el logro de los objetivos del analista, él puede solicitar más enriquecimiento o complejidad en los supuestos. Si el modelo no es realizable o no puede ser resuelto, se regresa a simplificar los supuestos.

Facilidad en el modelado significa, en gran medida, la selección y modificación de supuestos básicos que caracterizan el modelo. La tarea es descubrir el conjunto de supuestos que son descriptivamente útiles y posibles. Morris, W. (1967), enuncia un conjunto de actividades iterativas que pueden ayudar en la elaboración de un modelo y estas son:

- descomponer el problema en problemas más simples;
- establecer los objetivos claramente;
- buscar analogías;
- considerar un ejemplo numérico del problema;
- escribir en términos de símbolos;
- hacer diagramas;
- escribir lo obvio.

Si no se tiene éxito, tal vez el siguiente paso sería regresar al ejemplo numérico o a los supuestos, buscar formas de simplificar e intentar de nuevo. *"Si se obtiene un modelo viable, enriquecelo. De otro modo, simplifica"*. (Morris, W., 1967). Una forma de simplificar es:

- convirtiendo variables en constantes;
- eliminando variables;
- empleando relaciones lineales;
- añadiendo supuestos y restricciones más fuertes;
- suprimiendo aleatoriedad.

Los intentos por desarrollar consciencia sobre algunas de las características de los modelos parece ser útil. Más allá de la somera descripción de un modelo como "simple" o "complejo", uno podría considerar:

- Relacionar. ¿Cuántos teoremas o resultados previamente conocidos ejerce el modelo en el problema?
- Transparencia. ¿Qué tan obvia es la interpretación del modelo? ¿Qué tan inmediata es la confirmación intuitiva?
- Robustez. ¿Qué tan sensible es el modelo a los cambios en los supuestos que lo caracterizan?

- Fertilidad. ¿Qué tan rica es la variedad de consecuencias deductivas que el modelo produce?
- Facilidad de enriquecimiento. ¿Qué dificultades se presentan por los intentos de enriquecer y elaborar el modelo en varias direcciones?

### 3.2 Metodología para la modelación matemática

La modelación matemática es una actividad retadora que requiere del arte de extraer lo esencial de un problema, convertirlo en una composición abstracta donde es imperante tener creatividad, intuición y previsión suficientes, para realizar un proceso demandante. Se recomienda usar una metodología como guía en el desarrollo de un modelo ya que ayuda a estructurar las ideas. El siguiente diagrama muestra la metodología para la modelación matemática propuesta por Dym (1980).

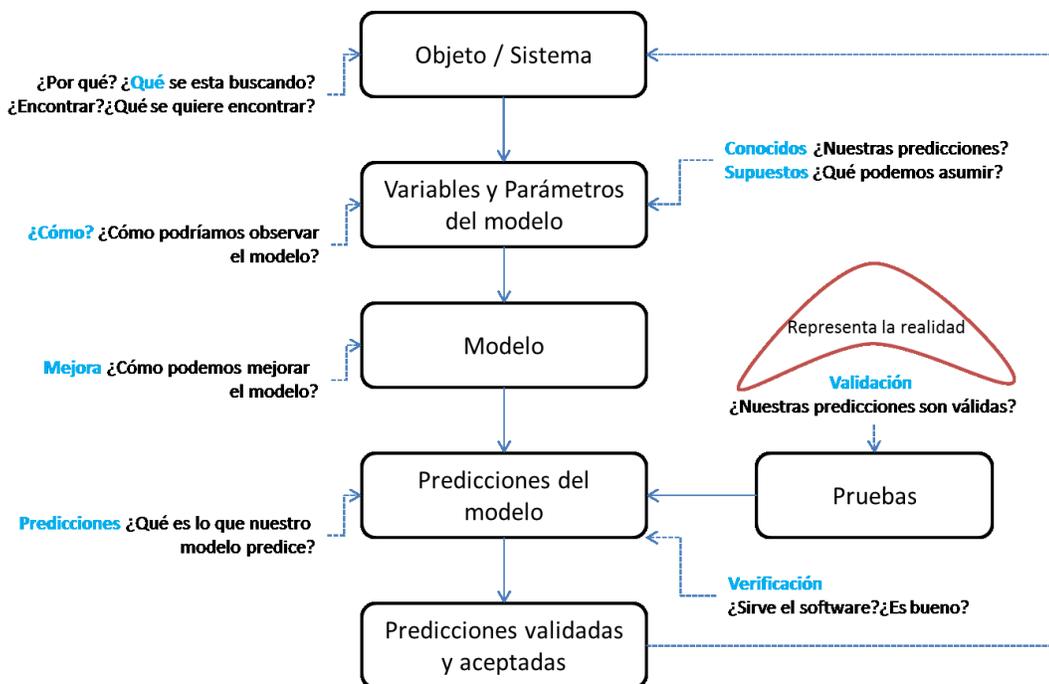


Figura 13: Metodología para la modelación matemática.

Fuente: Dym, Clive L. (1980).

En la figura se muestra en primera instancia que es necesario definir el objetivo, identificar con claridad a qué se quiere llegar. Enseguida reconocer qué impacta en nuestro modelo con respecto a las variables y los parámetros que lo

componen. Realizar la construcción del modelo; hacer pruebas y modificaciones sin perder de vista el objeto de estudio. Validar que el modelo se apega a la realidad que se desea estudiar y verificar que el programa sirva para resolver el modelo.

El objetivo de esta investigación es construir un modelo de ruteo, se utilizó la metodología propuesta por Dym para lograrlo. La siguiente tabla muestra un bosquejo claro de lo que se espera y qué consideraciones se deben tener en el proceso.

Tabla 4. Metodología de la modelación matemática.

<b>Fases</b>	<b>Preguntas evaluadas</b>	<b>Desarrollo de la investigación</b>
Objeto / Sistema (Identificar y tener claro qué es lo que se va a estudiar)	¿Qué estamos buscando? ¿Cuál es la necesidad? ¿Por qué?	Maximizar la satisfacción del cliente al generar rutas turísticas de distancia mínima y ajustada a los recursos disponibles de tiempo-dinero.
Variables y Parámetros del modelo	¿Qué queremos conocer? ¿Cuánto? ¿Cuándo? ¿Dónde? ¿Cómo? ¿Cuál? Identificar datos ¿Conocido? ¿Supuestos? ¿Cómo?	Las rutas turísticas que satisfagan las restricciones (tiempo-dinero) del cliente.
Modelo	¿Qué se desea representar en el modelo? ¿Cómo? ¿Cuáles son los principios teóricos? ¿Cuáles son los datos conocidos? ¿Supuestos? ¿Cuáles son las reglas del juego?	Se propone un modelo de optimización ya que lo que se desea es minimizar las distancias de viaje. Dado que es un problema de ruteo se puede utilizar como analogía un VRP. Respecto a las reglas, en las siguientes secciones se explican a detalle.
Predicciones del modelo	¿Cuál es la técnica y/o recursos para solucionar el modelo?	Uso del <i>software</i> LINGO10 para resolver una pequeña instancia del caso.
Predicciones Validadas y Aceptadas	¿Es consistente con los principios y supuestos? ¿Representa el objeto de estudio? ¿Es útil en términos de la razón inicial por la que fue hecho? ¿Es creíble? ¿Es posible mejorar el modelo?	Al momento de construir el modelo se utilizaron pruebas de casos extremos para validar que el modelo cumpliera el objetivo deseado. Se siguió el principio de parsimonia.

Fuente: Elaboración propia con base en Dym, Clive L. (1980).

### 3.3 Definición del problema

El problema de ruteo de vehículos ha ampliado constantemente sus líneas de investigación, mediante la construcción de modelos para diferentes rubros, un ejemplo de ello es el presente estudio que utiliza dicho modelo para mostrar su aplicación en los servicios turísticos. A continuación se da a conocer en qué consiste el modelo de ruteo turístico para la satisfacción del cliente.

#### *Características del problema*

Dado un conjunto de sitios turísticos y un lugar dónde el viajero comienza y termina el recorrido. Se desea determinar un conjunto de rutas turísticas de distancia mínima, para que los paseantes visiten los atractivos del lugar mientras se respeta su capacidad (tiempo y dinero).

- La red vial que seguiría el viajero puede ser descrita mediante un grafo, cuyos arcos representan tramos viales y los nodos corresponden a la localización de un sitio turístico y el lugar de salida-regreso;
- Los arcos son no dirigidos, es decir, se pueden recorrer en ambas direcciones;
- El tiempo y costo asociado a cada destino turístico;
- El viajero siempre regresa al lugar de partida;
- La capacidad del turista se expresa en términos del presupuesto que tiene disponible para su ruta y el tiempo para ejecutarla;

### 3.4 Supuestos del modelo

- a) Un cliente con determinado tiempo y dinero para viajar por los Pueblos Mágicos de México;
- b) El cliente desea conocer las opciones para viajar de acuerdo a su capacidad;
- c) Las rutas turísticas obtenidas por el modelo satisfacen al cliente ya que son personalizadas;
- d) Cada ciudad es visitada sólo una vez;
- e) La ruta turística únicamente considera transporte terrestre;
- f) Cada sitio turístico tiene una demanda en días según la cantidad de actividades recreativas del lugar y, en consecuencia, económica;

- g) Los tiempos se consideran a partir de la salida del viajero de la ciudad origen;
- h) La distancia de ir de la ciudad  $i$  a  $j$  es igual a la distancia de ir de  $j$  a  $i$  (simetría).

### 3.5 Especificación de parámetros

*Variable de decisión*

$$x_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{si la solución utiliza el arco } (i, j) \\ 0 & \text{en otro caso} \end{cases}$$

*Parámetros*

$n$  = Número de lugares turísticos.

$d_{ij}$  = Distancia del lugar turístico  $i$  al  $j$ .

$M$  = Número positivo muy grande para obtener todas las posibles rutas.

$q_i$  = Costo demandado para cubrir las necesidades en el lugar turístico  $i$ .

$Q$  = Capacidad económica del viajero.

$t_i$  = Tiempo demandado en el lugar turístico  $i$  para disfrutar de la estancia.

$T$  = Capacidad de tiempo del viajero.

*Cuantificación de los Parámetros*

$n$ : Número de lugares turísticos.

Para ésta investigación se consideraron los Pueblos Mágicos como los sitios turísticos en los cuáles podría vacacionar el viajero, el objeto es únicamente ejemplificar el funcionamiento del modelo.

$d_{ij}$ : Distancia del lugar turístico  $i$  al  $j$ .

La matriz de distancias sobre el conjunto de aristas donde  $d_{ij}$  es no negativo, y asocia ir del vértice  $i$  al vértice  $j$ . Esta matriz es simétrica y satisface la desigualdad triangular, esto es  $c_{ij} \leq c_{ik} + c_{kj}$  para todos los nodos del grafo. Las distancias que serán utilizadas en el caso de estudio se tomarán de *Google Maps*.

$M$ : Número positivo grande para obtener todas las rutas posibles.

Se desea encontrar todos los viajes posibles que el cliente podría hacer en la región por lo que  $M$  será un número positivo grande que permita identificar las posibles rutas turísticas que satisfagan las restricciones.

$q_i$ : Costo demandado para cubrir las necesidades en el lugar turístico  $i$ .

El costo por persona será calculado como:  $Costo = Tarifa\ promedio\ de\ estancia + Tarifa\ promedio\ de\ alimentos + Tarifa\ promedio\ de\ transporte\ en\ el\ lugar + Tarifa\ promedio\ de\ transporte\ de\ arribo + Tarifa\ promedio\ de\ actividades + Otros\ gastos$

$Q$ : Capacidad económica del viajero.

El viajero deberá tener una cantidad destinada a vacacionar y se espera poder ofrecerle al menos una alternativa de acuerdo a sus posibilidades.

$t_i$ : Tiempo demandado en el lugar turístico  $i$  para disfrutar de la estancia.

Para determinar el tiempo que requiere cada sitio turístico se utilizará un estimado construido con la información de SECTUR.

$T$ : Capacidad de tiempo del viajero.

El cliente tendrá un número de días disponibles para poder disfrutar de sus vacaciones.

### 3.6 Modelo de ruteo para satisfacer al cliente

El modelo propuesto está basado en el VRP Capacitado (CVRP), considerado como el modelo base de muchos de los problemas de ruteo. Para la formulación matemática, se define un grafo completo donde cada lugar turístico tiene asignado un nodo, al igual que el lugar de inicio del viaje. Se utiliza como base el modelo del CVRP propuesto por Toth, P. & Vigo, D., (2002).

El modelo **minimiza la distancia recorrida entre los lugares turísticos y se ajustan los recursos del turista** a las rutas que podrían cubrir su necesidad. El resultado del modelo ofrece **varias rutas**, por lo que **el cliente puede elegir la que más le complazca**. En la sección 2.2.3 se menciona que se pretende ofrecer satisfacción al cliente mediante **información oportuna para la toma de decisiones**; la información que el modelo arroja es personalizada y es flexible, ya que puede ser modificada para ofrecer diversas alternativas.

Considerando lo anterior, se espera poder dar al cliente la satisfacción de tener **un viaje hecho a la medida de sus capacidades**, sin ninguna complicación y a la brevedad. En concreto, el modelo que a continuación se muestra ofrecerá satisfacción al cliente ya que permitirá al turista tener:

- administración adecuada de su tiempo y su dinero;
- variedad de rutas personalizadas;
- información oportuna en un tiempo breve de espera.

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

sujeito a:

$$\sum_{i \in V} x_{ij} = 1, \quad \forall j \in V \setminus \{0\} \quad (3.1)$$

$$\sum_{j \in V} x_{ij} = 1, \quad \forall i \in V \setminus \{0\} \quad (3.2)$$

$$\sum_{i \in V} x_{i0} \leq M \quad (3.3)$$

$$\sum_{j \in V} x_{0j} = \sum_{i \in V} x_{i0} \quad (3.4)$$

$$u_i - u_j + Qx_{ij} \leq Q - q_j, \quad \forall i, j \in V \setminus \{0\}, i \neq j,$$

$$\text{tal que } q_i + q_j \leq Q \quad (3.5)$$

$$q_i \leq u_i \leq Q, \quad \forall i \in V \setminus \{0\} \quad (3.6)$$

$$v_i - v_j + Tx_{ij} \leq T - t_j, \quad \forall i, j \in V \setminus \{0\}, i \neq j,$$

$$\text{tal que } t_i + t_j \leq T \quad (3.7)$$

$$t_i \leq v_i \leq T, \quad \forall i \in V \setminus \{0\} \quad (3.8)$$

$$x_{ij} \in \{0, 1\} \quad \forall i, j \in V \quad (3.9)$$

#### Descripción de la función objetivo y restricciones

Como ya se había mencionado, la función objetivo busca minimizar la distancia recorrida entre los destinos turísticos. Las restricciones (3.1) y (3.2) son las restricciones de grado, exactamente un arco llega y sale de cada lugar turístico. De manera similar (3.3) y (3.4) imponen las restricciones de grado para la ciudad origen; implica que no puede haber más de  $M$  viajeros que salgan del origen

(cada viajero entra y sale del nodo). Las restricciones (3.5) y (3.6) hacen referencia al ajuste de la capacidad de tiempo que tiene el viajero; (3.7) y (3.8) la adaptación al presupuesto. Mientras que (3.9) define las variables de decisión como binarias.

### 3.7 Validación y verificación

Una vez que se tiene una primera aproximación del modelo es importante efectuar los procesos de validación y verificación, ya que parte esencial de dichos procesos es observar, retroalimentar, modificar, y evaluar, para obtener un modelo confiable. Sabemos que un modelo es una aproximación del sistema real, no importa cuánto tiempo se le ha dedicado a la construcción del modelo. Por tanto, si el modelo producido no es una aproximación suficiente de la realidad que se desea representar, las conclusiones derivadas del modelo tienden a ser divergentes y erróneas.

Ahora bien, bajo el supuesto de que un modelo erróneo se implementara, derivaría costos altos y sobre todo, dado que es un modelo aplicado al servicio turístico, causaría mala imagen ante el cliente e insatisfacción. Por lo tanto, es necesario realizar constantes cuestionamientos, sobre si lo que se está representando se apega a la realidad, si los datos son correctos, si el modelo matemático empleado es el adecuado, entre otras preguntas. A continuación, se explica en qué consisten ambos procesos y se mencionan las actividades que se realizaron para demostrar la credibilidad del modelo propuesto.

**Validación** es el proceso de demostrar que todas las aproximaciones a la realidad fueron intencionalmente incorporadas en el modelo y son tolerables a la calidad del resultado del modelo (Martis, M. S., 2006). Existen fallas comunes que pueden llevar a un modelo al fracaso, sin embargo, si durante el proceso de validación se analizan los siguientes puntos es probable que puedan reducirse las fallas:

- revisar la estructura del modelo, para ello, debe comenzarse con la comprensión de la realidad y encontrar el modelo adecuado;
- no perder de vista que la solución numérica debe ser congruente con la realidad;
- observar qué valores de entrada tiene el modelo, ya que es bien conocido que si entra basura al modelo lo mismo producirá;
- evitar errores de observación;

- e identificar el *software* adecuado para la solución.

El proceso de validación se puede resumir en tener claro el objetivo del modelo, validar la estructura del modelo y validar su comportamiento, para ello se utiliza:

- La comparación con otros modelos validados (Ijeoma *et al.*, 2001);
- La prueba de degeneración mediante valores extremos (Sargent, 2003);
- La validación de acontecimientos que consiste en comparar los resultados con el sistema real;
- La validación de cara que cuestiona si la estructura del modelo es como el sistema real (Forrester, 1961);
- La validación de datos históricos (Balci *et al.*, 1982);
- La validación profética que consiste en comparar el verdadero comportamiento de sistema y el pronóstico (Sargent, 2003);
- Los Criterios de Schellenberger: validación dinámica que asegura que el modelo seguirá siendo válido durante su vida (Ijeoma *et al.*, 2001);
- El acercamiento al modelo que utiliza la asignación de pesos por instancias (Gass, 1993).

*"Fallar una prueba ayuda a rechazar una hipótesis incorrecta, pero si la pasa no es ninguna garantía de que el modelo es válido"* (Sushil 1993). La validación de un modelo puede verse como un procedimiento complicado que es inevitable ya que es la evidencia de su firmeza y su legitimidad, además debe existir una prueba con la cual se pueda juzgar su validez; es importante recordar que un modelo:

- puede ser juzgado por su utilidad y no por su validez absoluta;
- debe ser válido para el objetivo para el cual es construido y;
- es confiable si pasa varias pruebas, por tanto aumenta la confianza en él.

El término **verificación** es usualmente aplicado cuando se pregunta si el resultado del modelo es lo que se esperaba. Este proceso consiste en revisar el modelo, encontrando algunos errores que son del tipo no intencional, y en realizar ajustes de tal forma que el modelo cumpla con el objetivo. Es importante recalcar que todo modelo se debe verificar sin importar su tamaño. Para la verificación de un modelo se recomienda revisar los resultados del modelo:

- i. en casos especiales de solución;
- ii. en casos extremos conocidos;
- iii. con pequeños ejemplos que se pueden resolver manualmente;

- iv. con cambios de los parámetros de entrada (presupuesto y tiempo);
- v. con casos inválidos o manejo de excepciones, con la finalidad de darle robustez.

El modelo propuesto, se validó y verificó mediante instancias resueltas en un software comercial (LINGO, *Linear, INteractive, and General Optimizer*). LINGO, es una herramienta para resolver modelos matemáticos de optimización y utiliza el método exacto *Branch and Bound* para su resolución.

Se siguió el principio de parsimonia, se utilizó una prueba numérica de cinco ciudades para comprobar que el modelo estuviese haciendo lo que se esperaba, primero se evaluó que las rutas estuvieran limitadas a cierto presupuesto, una vez validado y verificado se agregó la restricción de tiempo. Los resultados fueron satisfactorios ya que se confirmó que el objetivo de esta investigación era congruente con el modelo, es decir, da como resultado un conjunto de rutas que respetan los recursos ingresados. Además la ruta comienza y termina en el mismo lugar y cada ciudad es visitada sólo una vez.

Asimismo se verificó la sintaxis del código (anexo 2). Se realizaron varios experimentos para demostrar la confiabilidad y se aplicó la prueba de valores extremos que consiste en analizar los supuestos de no tener presupuesto o tiempo asignado. Posteriormente, se realizaron experimentos con más ciudades y se observó el comportamiento del software, se eligieron aleatoriamente instancias de 5, 15, 20 y 30 ciudades. Con ello se pudo demostrar que el modelo propuesto puede ser resuelto, mediante la versión educativa de LINGO10, para un máximo de 28 ciudades. En la instancia de prueba para 30 ciudades el programa envía un mensaje de error como el que se muestra en la siguiente imagen.

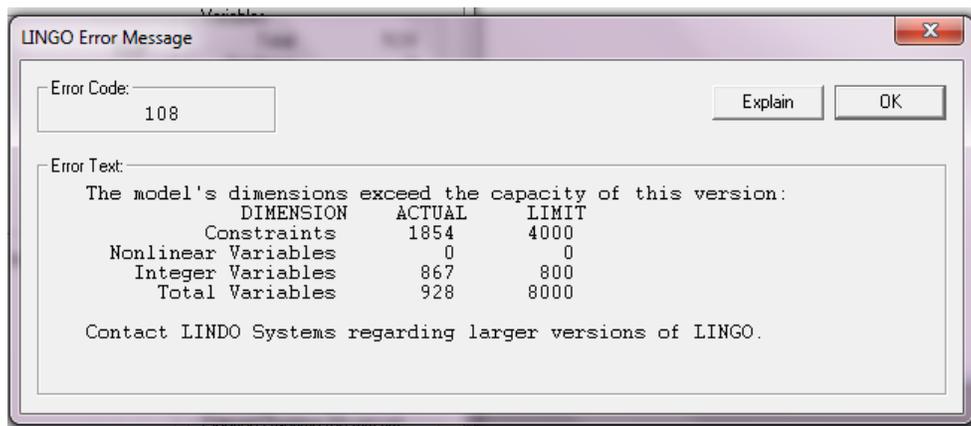


Figura 14: LINGO – se excedió la capacidad de la versión.

Fuente: LINGO 10 versión educativa, 2006.

El tiempo que tarda en resolver una instancia de 28 ciudades es menor a un minuto en promedio, por lo que se considera apropiado ya que se pueden ofrecer tiempos breves de espera al cliente utilizando este *software*.

En el mundo turístico hay constantes cambios, de hecho, de enero a noviembre del 2012 se han agregado 18 pueblos mágicos. En caso de que fuera necesario resolver el modelo para más de 28 ciudades, se propone utilizar un método heurístico para su resolución, ya que el VRP es de complejidad NP-completo y con cierto número de ciudades<sup>15</sup> no puede ser resuelto mediante métodos exactos ya que su tiempo de cómputo sería demasiado y el turista espera tener una respuesta al momento.

Recordemos que un método heurístico es un procedimiento para resolver un problema de optimización bien definido mediante una aproximación intuitiva, en la que la estructura del problema se utiliza de forma inteligente para obtener una buena solución. Además de que tiene ventajas como: precisión, velocidad, simplicidad y flexibilidad. En la sección 2.1.3.1 se analizó que se utilizan con mayor frecuencia los métodos heurísticos y metaheurísticos para la planeación de rutas personalizadas, esto es debido a que las heurísticas facilitan la tarea de modelar restricciones complejas. La estructura de este problema ha sido abordada para su solución a través del algoritmo de ahorros, ya que es uno de las técnicas que ofrece resultados rápidos y prácticos, además se utiliza cuando el número de vehículos es variable, en éste caso es un número variable de rutas turísticas.

---

<sup>15</sup> El número de ciudades depende de cada problema, en éste caso con 29 nodos tendría que ser resuelto mediante heurísticos.

## Capítulo IV

# Caso de estudio: Ruteo turístico en Pueblos Mágicos, México

---

### 4.1 Introducción

El siguiente caso de estudio busca mostrar la aplicación de las herramientas de Investigación de Operaciones en el área del turismo. Se desea mostrar desde un punto de vista práctico los conceptos explicados en los capítulos anteriores.

El sector turismo en México está representado por un conjunto de prestadores de servicios que mantienen una interacción constante con el viajero. Una de las necesidades que deben cubrir estos servidores es ayudar al turista en la planeación de su circuito turístico y satisfacer sus expectativas. El viajero requiere del apoyo de un experto para poder administrar adecuadamente sus recursos, en éste caso de estudio, dichos recursos son el tiempo y el dinero que tiene disponible el cliente para realizar su viaje. Lo anterior se ha analizado en el capítulo 3 y se propone el modelo de ruteo turístico para la satisfacción del cliente como un medio para ayudar en el proceso de decisión, por lo que a continuación se verá el cómo se aplicó en éste estudio.

### 4.2 Presentación del caso de estudio

México cuenta con una gran diversidad de sitios turísticos clasificados en programas regionales por la Secretaría de Turismo (SECTUR). Uno de esos programas es el de Pueblos Mágicos, que busca resaltar el valor turístico de localidades en el interior del país, para estructurar una oferta innovadora y original para los visitantes nacionales y extranjeros. Un Pueblo Mágico es una localidad que tiene atributos simbólicos, leyendas, historia, hechos trascendentes, cotidianidad; magia que emana en cada una de sus manifestaciones socio -

culturales, y que representan una gran oportunidad para el aprovechamiento turístico (SECTUR)<sup>16</sup>.

El programa busca detonar la economía local y regional, dado que el flujo de visitantes produce resultados económicos sorprendentes en estas comunidades, asimismo, la localidad puede favorecer sus condiciones ya que del presupuesto público se le asignan recursos. Además, el turismo en México genera más de 2 millones de empleos directos y es un impulsor de la inversión extranjera, ofreciendo oportunidades de desarrollo a nivel nacional, regional y local (SIIMT).

El Sistema Nacional de Educación a Distancia (SINED)<sup>17</sup>, en una presentación titulada "Aprendiendo de los Pueblos Mágicos", menciona que la población municipal impactada por este programa es de 2'776,384 habitantes y que la población local beneficiada es de 837,447 habitantes según el Censo de Población y Vivienda 2010 (INEGI). En el mismo análisis el SINED menciona que la Dirección General de Información y Análisis estimó al cierre del 2011 que el gasto turístico en Pueblos Mágicos fue de 3,163 millones de pesos.

Por otra parte, la SECTUR cuenta con instrumentos metodológicos que le permiten verificar qué localidades deben participar en el Programa Pueblos Mágicos y en el Anexo 1 se pueden ver las que pertenecían a dicho programa en marzo del 2012, cabe recalcar que dicha información cambia constantemente ya que hay localidades que se integran y reciben el nombramiento por el cumplimiento de las normas del programa<sup>18</sup>, o salen por la falta de consecución.

El Consejo de Promoción Turística de México mediante su página web<sup>19</sup> muestra la regionalización del Programa de Pueblos Mágicos, dicha clasificación es utilizada en éste caso de estudio ya que es la información en la que se basa el sector turístico en México. El Programa de Pueblos Mágicos está clasificado en cinco regiones, en el siguiente mapa se pueden observar dichas clasificaciones diferenciadas por color:

- Región Norte en amarillo;
- Región Centro en verde;
- Región Pacífico en rosa;
- Región Golfo en azul;
- Región Sur en blanco.

---

<sup>16</sup> [http://www.sectur.gob.mx/wb2/sectur/sect\\_Pueblos\\_Magicos](http://www.sectur.gob.mx/wb2/sectur/sect_Pueblos_Magicos)

<sup>17</sup> <http://www.sined.mx/sined/content/micrositios/50/file/PresentacionConfMagistral.pdf>

<sup>18</sup> [http://www.sectur.gob.mx/work/models/sectur/Reglas\\_de\\_operacion.pdf](http://www.sectur.gob.mx/work/models/sectur/Reglas_de_operacion.pdf)

<sup>19</sup> <http://www.visitmexico.com/es/>

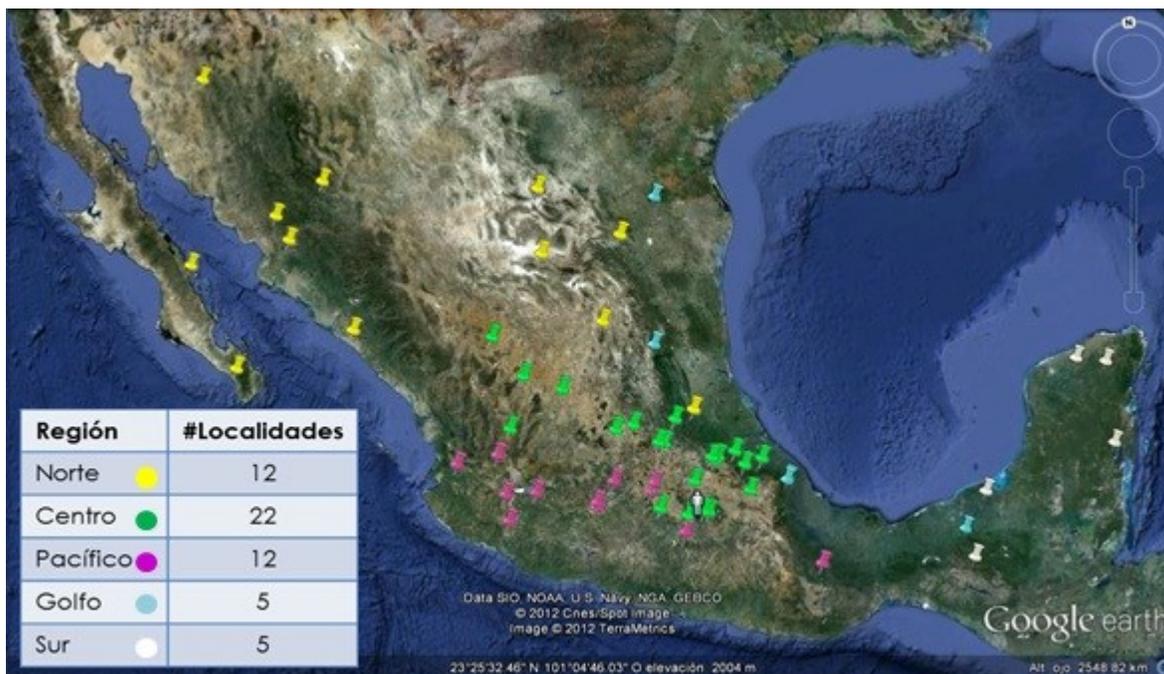


Figura 15: Mapa de Pueblos Mágicos por región.  
Fuente: Elaboración propia con base en la información de SECTUR.

En el mapa se puede visualizar que la Región Centro es la más grande, además que las Regiones Sur y Golfo cuentan con el menor número de localidades. A continuación se muestran los mapas por región con el detalle de las localidades.

### Región Norte

- Loreto, Baja California Sur
- Todos Santos, Baja California Sur
- Creel, Chihuahua
- Cuatro Ciénegas, Coahuila
- Parras de la Fuente, Coahuila
- Villa de Santiago, Nuevo León
- Real de Catorce, San Luis Potosí
- Xilitla, San Luis Potosí
- Cosalá, Sinaloa
- El Fuerte, Sinaloa
- Alamos, Sonora
- Magdalena de Kino, Sonora

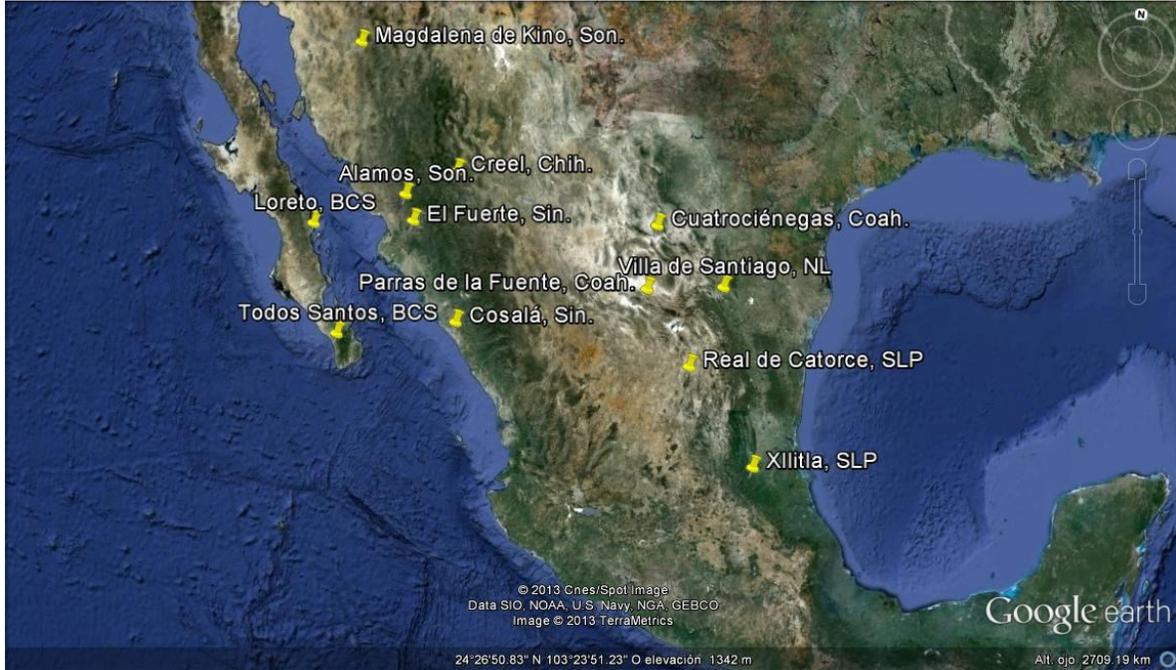


Figura 16: Mapa Pueblos Mágicos – Región Norte.  
Fuente: Elaboración propia con base en la información de SECTUR.

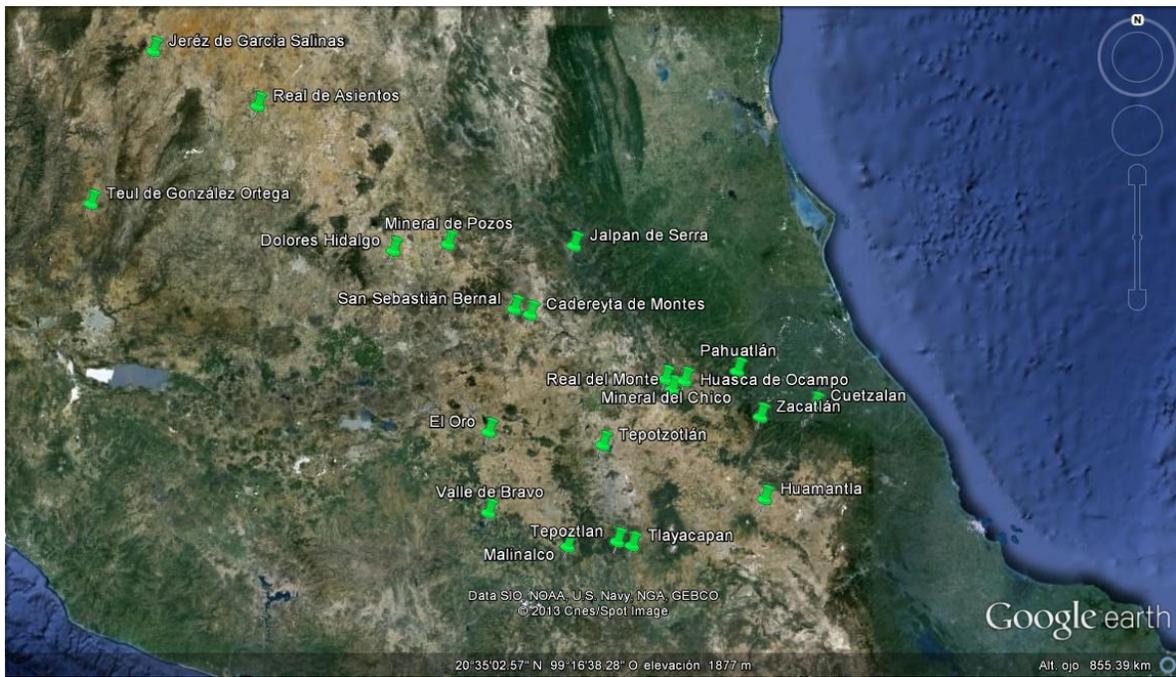


Figura 17: Mapa Pueblos Mágicos – Región Centro.  
Fuente: Elaboración propia con base en la información de SECTUR.

## Región Centro

- Real de Asientos, Aguascalientes
- El Oro, Estado de México
- Malinalco, Estado de México
- Tepotzotlán, Estado de México
- Valle de Bravo, Estado de México
- Dolores Hidalgo, Guanajuato
- Mineral de Pozos, Guanajuato
- Huasca de Ocampo, Hidalgo
- Mineral del Chico, Hidalgo
- Real del Monte, Hidalgo
- Tepoztlán, Morelos
- Tlayacapan, Morelos
- Cuetzalan, Puebla
- Pahuatlán, Puebla
- Zacatlán de las Manzanas, Puebla
- Cadereyta de Montes, Querétaro
- Jalpan de Serra, Querétaro
- San Sebastián Bernal, Querétaro
- Huamantla, Tlaxcala
- Jerez de García Salinas, Zacatecas
- Sombrerete, Zacatecas
- Teul de González Ortega, Zacatecas

## Región Pacífico

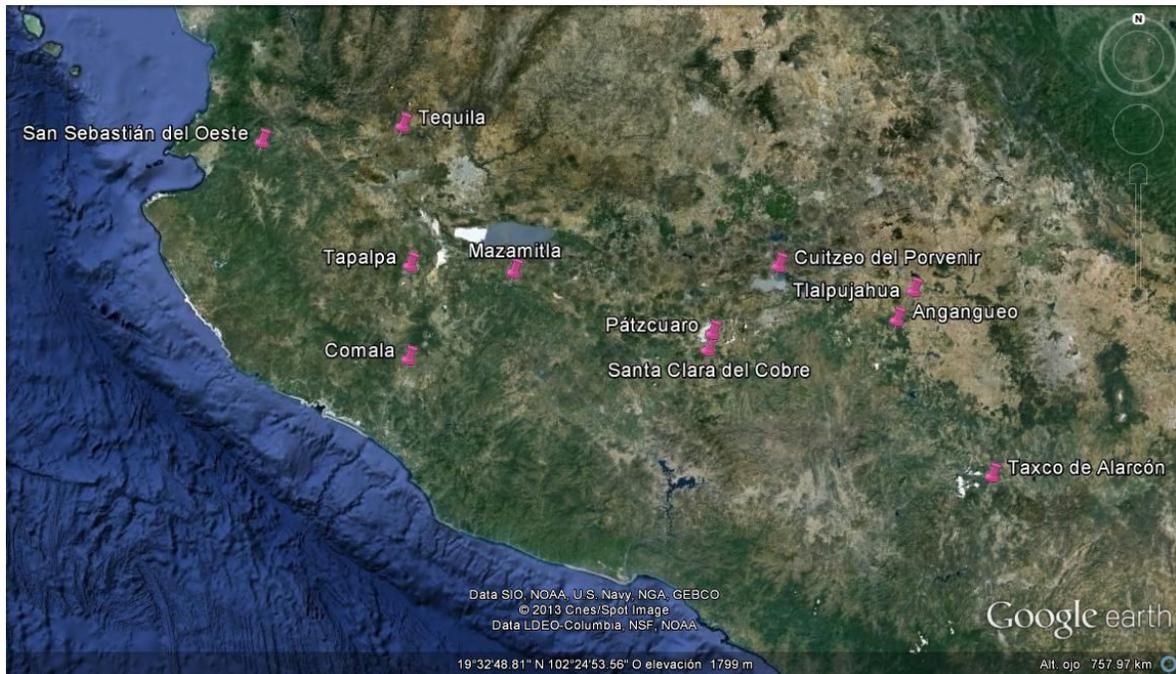


Figura 18: Mapa Pueblos Mágicos – Región Pacífico.

Fuente: Elaboración propia con base en la información de SECTUR.

- Comala, Colima
- Taxco de Alarcón, Guerrero
- Mazamitla, Jalisco
- San Sebastián del Oeste, Jalisco
- Tapalpa, Jalisco
- Tequila, Jalisco
- Angangueo, Michoacán
- Cuitzeo del Porvenir, Michoacán
- Pátzcuaro, Michoacán
- Santa Clara del Cobre, Michoacán
- Tlalpujahuá, Michoacán
- Capulálpam de Méndez, Oaxaca

## Región Golfo

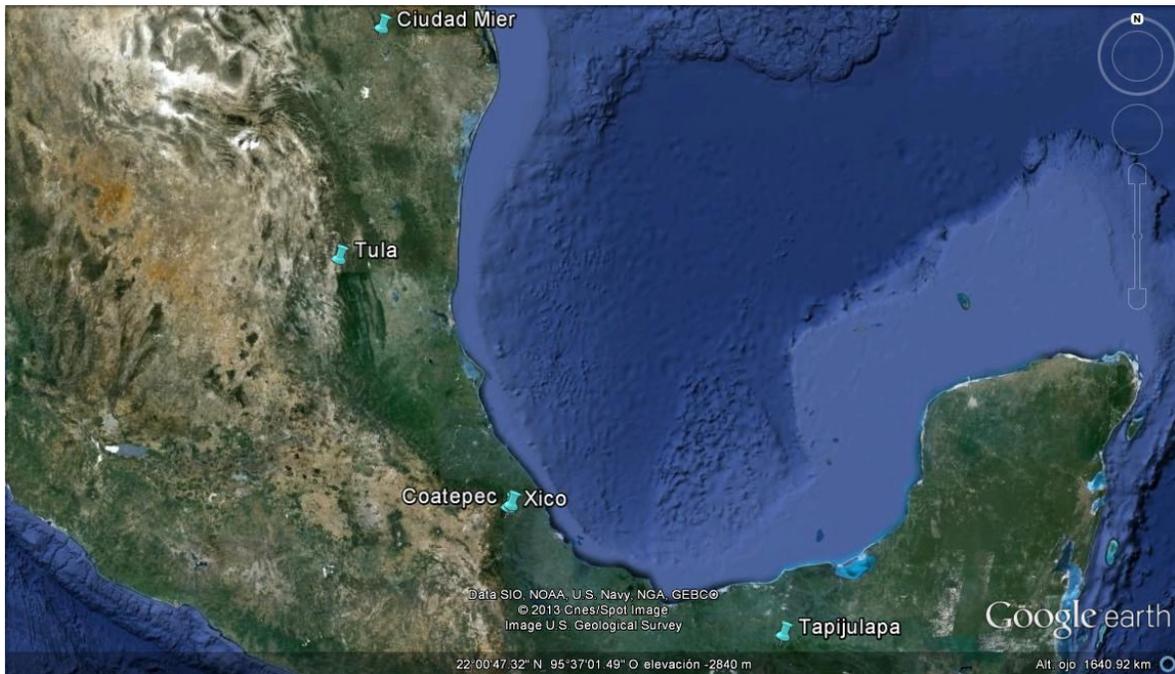


Figura 19: Mapa Pueblos Mágicos – Región Golfo.  
Fuente: Elaboración propia con base en la información de SECTUR.

- Tapijulapa, Tabasco
- Ciudad Mier, Tamaulipas
- Tula, Tamaulipas
- Coatepec, Veracruz
- Xico, Veracruz

## Región Sur



Figura 20: Mapa Pueblos Mágicos – Región Sur.

Fuente: Elaboración propia con base en la información de SECTUR.

- Palizada, Campeche
- San Cristóbal de las Casas, Chiapas
- Bacalar, Quintana Roo
- Izamal, Yucatán
- Valladolid, Yucatán

En la siguiente sección se dan a conocer las características propias del caso de estudio.

### 4.3 Modelo conceptual

El mercado turístico en México es: Doméstico (Nacional) e Internacional, de acuerdo con las estadísticas mostradas en el SIIMT, el mercado doméstico contribuye con más del 80% del consumo turístico del país y los niveles socioeconómicos que contribuyen principalmente son: A/B, C+, C ver Anexo 4.<sup>20</sup> Tomado las estimaciones AMAI y lo publicado por el SIIMT casi el 40% de los hogares en México pueden vacacionar. El mercado internacional se ha ubicado entre el lugar 7 y 10 del Ranking Mundial de la OMT. Por otra parte, en julio de 2012 CNNExpansión publicó los resultados de una encuesta elaborada por OCCMundial<sup>21</sup>, en dicha encuesta participaron más de 3,000 personas según se menciona en la nota y en ella se dan a conocer los siguientes resultados:

- Respecto a los gastos, de los profesionistas en México, relacionados con las vacaciones, la encuesta reveló que:
  - 80% las financia con ahorros;
  - 20% apoya el gasto con la prima vacacional y el uso de tarjetas de crédito.
  
- Sobre el presupuesto destinado para el periodo de descanso:
  - 30% de los participantes manifestaron dedicar entre 5,000 y 10,000 pesos;
  - 24.5% destina entre 2,500 y 5,000 pesos;
  - 18% dispone de entre 10,000 y 20,000 pesos.
  
- El presupuesto destinado a las vacaciones permite que el:
  - 67.6% de los casos visite sólo una ciudad del país;
  - 14.6% viaje al extranjero;
  - 17.8% no cuenta con recursos suficientes para salir de su ciudad de residencia.
  
- Referente a la temporada vacacional el:
  - 53% de los trabajadores toma vacaciones en fechas determinadas por la empresa o el jefe;
  - 47% tiene la libertad para escoger la fecha.

---

<sup>20</sup> [http://www.siiimt.com/work/sites/siiimt/resources/LocalContent/1651/114/Situacion\\_Sector\\_2012.pdf](http://www.siiimt.com/work/sites/siiimt/resources/LocalContent/1651/114/Situacion_Sector_2012.pdf)

<sup>21</sup> <http://www.cnnexpansion.com/economia/2012/07/05/mexicanos-quieren-mas-vacaciones>

En función de la información anterior se propone un cliente con tiempo y dinero limitado para viajar, además desea conocer las rutas turísticas que se ajustan a sus recursos. Por otra parte, al cliente se le proveerán las alternativas que tiene para vacacionar respetando su capacidad, y con ello se espera ofrecer satisfacción.

Dado que los pueblos mágicos ya están clasificados por región, se asume que el turista escoge por comodidad visitar las localidades de la misma, debido a que prefiere distancias cortas entre los sitios a visitar. El cliente puede solicitar sus alternativas por cada región, por lo que se puede ofrecer una amplia gama de viajes acorde a sus recursos. Para efectos del estudio, cada región constituye una instancia, en la tabla siguiente se muestran las cinco instancias con el respectivo número de nodos. Como se había mencionado, en este estudio un lugar turístico (Pueblo Mágico) es representado por un nodo.

Tabla 5. Número de localidades por región.

<b>Región</b>	<b>Número de localidades</b>
Norte	12
Centro	22
Golfo	12
Pacífico	5
Sur	5

En las instancias Centro y Pacífico se hizo el supuesto de que el cliente saldría del Distrito Federal (D.F.), por la gran distancia entre el D.F. y las ciudades de las otras regiones ese supuesto se omitió. Al analizar la importancia de los aeropuertos en México del 2011 (ver Anexo 3) se propone la asignación de los nodos depósito para cada instancia tomando los dos puntos de mayor afluencia y la distancia a las localidades.

Tabla 6. Nodos de salida del viajero.

<b>Región</b>	<b>Ciudad /Estado</b>
Norte	Monterrey, Nuevo León Chihuahua, Chihuahua
Centro	México, D. F. Toluca, Estado de México
Golfo	Monterrey, Nuevo León Veracruz, Veracruz
Pacífico	México, D. F. Guadalajara, Jalisco
Sur	Cancún, Quintana Roo Mérida, Yucatán

La distancia entre cada nodo dentro de la instancia correspondiente se determinó mediante *google maps*. Cada nodo tiene asociado un tiempo y un presupuesto necesario para poder vacacionar ahí.

#### 4.3.1 Consideraciones adicionales

- a) El listado de pueblos mágicos con el que se cuenta fue actualizado por la SECTUR en marzo del 2012, además, se utilizó como apoyo la regionalización de Pueblos Mágicos de la página <http://www.visitmexico.com/es>.
- b) Las distancias y tiempos obtenidos por medio de *google maps* son para un transporte terrestre.
- c) El propósito de este caso de estudio es mostrar la funcionalidad del modelo propuesto, por lo que los datos utilizados son únicamente para ejemplificar, por ningún motivo se pueden tomar como verídicos los resultados obtenidos.
- d) Respecto al dato: tiempo requerido por cada localidad, se hizo un estimado de acuerdo al número de atractivos que marcaba la página de SECTUR.
- e) La instancia más grande, con base en la regionalización, es de 22 ciudades, por lo que se utilizó LINGO10 para resolver el caso.
- f) Dos tipos de clientes: un extranjero que tiene 180 días disponibles y dinero suficiente para recorrer lo que desee; un cliente nacional que tiene un presupuesto y tiempo menores a los del extranjero, que usualmente busca en el último momento la oportunidad de viajar.

#### 4.3.2 Descripción de los supuestos

Para mostrar la adaptabilidad del algoritmo, se harán tres supuestos con base en la información publicada por CNNExpansión respecto al presupuesto destinado para el periodo vacacional que se detalló en la sección anterior:

##### *Datos generales*

- desean viajar por la Región Pacífico;
- los viajeros inician su viaje en el Distrito Federal.

##### *Datos específicos*

- 1) Cliente extranjero:
  - tiempo disponible para su viaje: 15 días;
  - presupuesto: \$15,000.
- 2) Cliente doméstico:
  - tiempo disponible para su viaje: 7 días;
  - presupuesto: \$5,000.
- 3) Cliente doméstico:
  - tiempo disponible para su viaje: 3 días;
  - presupuesto: \$2,500.

#### **4.4 Recolección de datos**

La recolección de datos se hizo por región y se verificó que la información se hubiese capturado correctamente. Por otra parte, debido a que se trata de un ejemplo, para calcular los costos se utilizó una tarifa promedio de \$650 por noche en habitación doble en todas las localidades.

#### **4.5 Método de solución**

Dado que la instancia más grande es de 22 localidades según la regionalización, se identificó que podría ser resuelto mediante LINGO10, sin embargo, si se deseara hacer un estudio con 29 ciudades sería necesario utilizar algún heurístico para la resolución del caso.

El uso de LINGO facilitó la tarea, ya que una vez elaborado el programa del Anexo 1, se construyó un archivo para cada región e inmediatamente se tenían las posibles propuestas para un cliente; además, se utilizó la conexión de LINGO a Excel.

La siguiente imagen muestra los datos del primer supuesto, dado que no cambia la matriz de distancias ni las demandas del nodo, únicamente se realiza el cambio de presupuesto y tiempo para generar la información de cada cliente.

	Presupuesto			15000	Distancia Total																	
Región Pacífico	Tiempo			15																		
		x0	x1	x2	x3	x4	x5	x6	x7	x8	x9	x10	x11	x12	q	t						
DF	DF	0	678	174	548	801	558	612	191	297	363	378	194	537	0	0						
Comala	Colima	0	0	724	133	391	146	250	517	393	373	375	506	1191	4000	3						
Taxco de Alarcón	Guerrero	0	724	0	596	849	723	661	253	346	412	427	242	594	2500	2						
Mazamitla	Jalisco	0	133	596	0	329	157	183	386	262	236	226	370	1061	4500	3						
San Sebastián del Oeste	Jalisco	0	391	849	329	0	238	194	642	519	524	543	626	1317	2000	1						
Tapalpa	Jalisco	0	146	723	157	238	0	175	519	396	401	339	503	1194	2300	2						
Tequila	Jalisco	0	250	661	183	194	175	0	455	332	337	356	439	1130	2500	2						
Angangueo	Michoacán	0	517	253	386	642	519	455	0	135	195	211	38.3	718	2600	2						
Cuitzeo del Porvenir	Michoacán	0	393	346	262	519	396	332	135	0	88.2	103	126	816	1500	1						
Pátzcuaro	Michoacán	0	373	412	236	524	401	337	195	88.2	0	19.2	189	880	4000	3						
Santa Clara del Cobre	Michoacán	0	375	427	226	543	339	356	211	103	19.2	0	206	897	2000	1						
Tlalpujahua	Michoacán	0	506	242	370	626	503	439	38.3	126	189	206	0	711	2300	2						
Capulálpam de Méndez	Oaxaca	0	1191	594	1061	1317	1194	1130	718	816	880	897	711	0	3000	2						

Figura 21: Datos muestra de la Región Pacífico.  
Fuente: Elaboración propia con base en información de Google maps.

La Región Pacífico cuenta con doce localidades, el viajero sale del D.F., en x0-X12 se muestran las distancias simétricas entre las localidades. La columna  $q$  representa la cantidad demanda por la estancia en la localidad  $i$ . La columna  $t$  da a conocer el tiempo necesario para cubrir los principales atractivos y actividades del lugar.

## 4.6 Resultados

### Supuesto 1

Cliente extranjero con un tiempo disponible para su viaje de 15 días y un presupuesto de \$15,000.

Al resolver con LINGO10 se obtiene la siguiente matriz de resultados.

		x0	x1	x2	x3	x4	x5	x6	x7	x8	x9	x10	x11	x12
DF	DF	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	1	1
Comala	Colima	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
Taxco de Alarcón	Guerrero	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Mazamitla	Jalisco	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
San Sebastián del Oeste	Jalisco	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Tapalpa	Jalisco	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Tequila	Jalisco	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
Angangueo	Michoacán	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
Cuitzeo del Porvenir	Michoacán	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Pátzcuaro	Michoacán	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
Santa Clara del Cobre	Michoacán	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
Tlalpujahuá	Michoacán	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
Capulálpam de Méndez	Oaxaca	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Figura 22: Matriz de resultados para la Región Pacífico.

Fuente: Elaboración propia.

Se pueden observar las cuatro rutas propuestas para el turista. Cada una minimiza la distancia entre los lugares turísticos, además, cada opción respeta el límite de recursos del cliente. Las alternativas que tiene el cliente para utilizar su tiempo y dinero de manera apropiada son:

- 1) DF – Taxco de Alarcón  
Costo: \$2,500  
Tiempo: 2 días  
Distancia: 174 km
- 2) DF – Angangueo – Santa Clara del Cobre – Pátzcuaro – Tequila – San Sebastián del Oeste  
Costo: \$13,100  
Tiempo: 9 días  
Distancia: 952.2 km
- 3) DF – Tlalpujahuá – Cuitzeo del Porvenir – Mazamitla – Comala – Tapalpa  
Costo: \$14,600  
Tiempo: 11 días  
Distancia: 861 km
- 4) DF – Calpulálpam de Méndez  
Costo: \$3,000  
Tiempo: 2 días  
Distancia: 537 km

Se utilizó *Google earth* para mostrar gráficamente los resultados obtenidos por Lingo10.



Figura 23: Mapa de resultados primer supuesto.  
 Fuente: Elaboración propia.

Se puede observar claramente que ninguna de las propuestas rebasa las capacidades de tiempo y dinero, en caso de que el cliente deseará hacer un cambio respecto al número de días de estancia en una ciudad o respecto al dinero invertido, se podría realizar con rapidez ya que la interfaz con Excel lo permite.

## Supuesto 2

Cliente doméstico con un tiempo disponible para su viaje de 7 días y un presupuesto de \$5,000.

Los datos se cambiaron en el archivo de Excel y a través de la interfaz con LINGO se obtiene la siguiente matriz de resultados.

	x0	x1	x2	x3	x4	x5	x6	x7	x8	x9	x10	x11	x12
DF	0	1	1	1	0	1	1	1	1	1	0	0	1
Comala	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Taxco de Alarcón	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Mazamitla	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
San Sebastián del Oeste	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Tapalpa	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Tequila	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
Angangueo	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
Cuitzeo del Porvenir	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
Pátzcuaro	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Santa Clara del Cobre	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Tlalpujahua	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Capulálpam de Méndez	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Figura 24: Matriz de resultados del segundo supuesto.

Fuente: Elaboración propia.

Se le pueden recomendar al turista tres rutas o bien visitar sólo una localidad ya que de esa forma se respetan los recursos del cliente.

Las alternativas de viaje utilizando sus recursos de manera apropiada son:

- 1) DF – Tequila – San Sebastián del Oeste  
Costo: \$4,500  
Tiempo: 3 días  
Distancia: 806 km
- 2) DF – Cuitzeo del Porvenir – Santa Clara del Cobre  
Costo: \$3,500  
Tiempo: 2 días  
Distancia: 400 km
- 3) DF – Angangueo – Tlalpujahua  
Costo: \$4,900  
Tiempo: 4 días  
Distancia: 229 km

En el siguiente mapa se pueden ver las rutas propuestas.

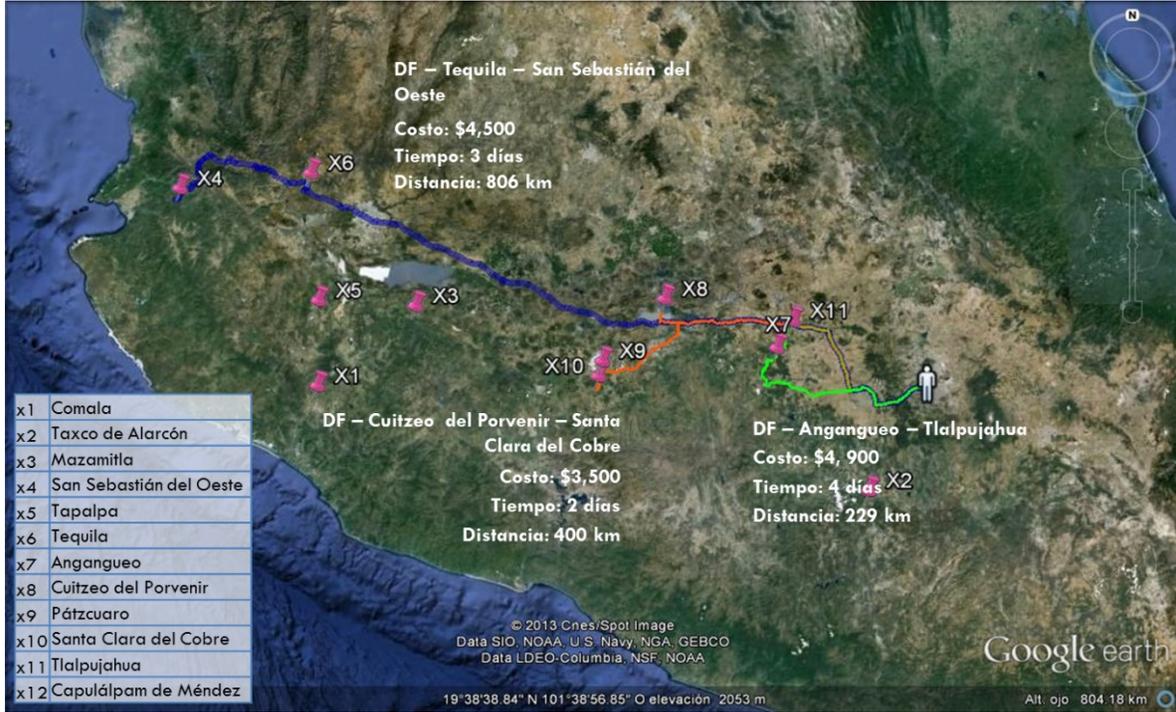


Figura 25: Mapa de resultados segundo supuesto.

Fuente: Elaboración propia.

### Supuesto 3

Cliente doméstico con un tiempo disponible para su viaje de 3 días y un presupuesto de \$2,500. Al realizar los cambios dada la matriz mostrada en la Figura 19, LINGO muestra el siguiente error ya que el presupuesto asignado es menor que la demanda de algunas localidades.

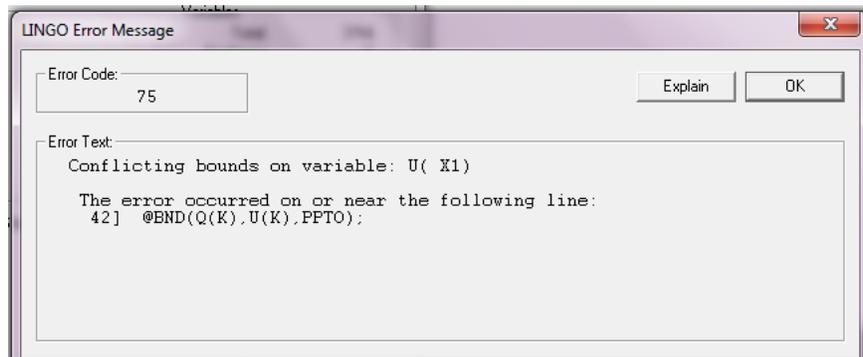


Figura 26: Error LINGO por presupuesto menor a la demanda.

Fuente: LINGO 10 versión educativa 2006.





Figura 29: Mapa de resultados tercer supuesto.  
Fuente: Elaboración propia.

Como se ha mostrado, el trabajar con una interfaz entre LINGO y Excel es práctico ya que permite cambiar los datos de forma ordenada, además de obtener los resultados claros. Se demostró que no se pueden sobrepasar los recursos del cliente ya que LINGO manda un error sobre el límite. Además, es evidente que el modelo propuesto tiene una utilidad práctica, ya que se puede responder de manera espontánea a las necesidades del cliente.

## Conclusiones y extensiones

El objetivo se cumplió ya que se generó un modelo de optimización que encuentra alternativas para que el viajero utilice sus recursos y mejore su de toma de decisiones en el proceso de planeación vacacional. El modelo propuesto se convierte en una herramienta diferenciadora del negocio, al generar una variedad de rutas personalizadas y a su vez poder ofrecer tantos cambios como sean necesarios en un tiempo breve de respuesta, por lo que el cliente turístico queda satisfecho al tener toda la información para tomar la decisión que mejor le convenga y así la experiencia de viaje podría resultarle más placentera. Sin embargo, el modelo podría implementarse como una herramienta en un portal web para la administración adecuada de los recursos del público en general y es posible que ayude a incentivar los viajes en estratos sociales diferentes a los que el AMAI menciona.

Este trabajo contribuye con el uso de técnicas de Investigación de Operaciones en el ramo turístico, a pesar del gran potencial económico del turismo y los beneficios que podría generar la investigación e implementación de herramientas en este sector, no tiene tanta importancia dentro del campo. Los servicios buscan personalizar la experiencia del cliente y con éste trabajo se demuestra que a través de un modelo matemático se puede individualizar un viaje y facilitar la decisión. Actualmente, los países desarrollados muestran mayor interés en los servicios, creen que los problemas de optimización pueden ser identificados en ese sector y ser abordados con enfoques modernos de las técnicas metaheurísticas, esta investigación se puede complementar con el uso de estos métodos para su solución. Por otra parte, el modelo propuesto podría mejorar si el cliente tiene oportunidad de elegir:

- los medios de transporte (aéreo, ferroviario, marítimo, otros);
- las rutas con peaje o libres de peaje;
- las carreteras seguras;
- los tiempos de determinada actividad (ventanas de tiempo)
- el tipo de alojamiento
- el tipo de actividades recreativas

lo cual ayudaría a poder ofrecer viajes con mayor variedad.

Por otra parte, los datos utilizados para el caso de estudio a pesar de no ser reales mostraron la funcionalidad del modelo propuesto, el uso conjunto de Excel y

Lingo facilitó la tarea de analizar el caso, sin embargo, la instancia muestra de la heurística de ahorros permite ver que también es una opción viable para resolver el modelo propuesto.

Los especialistas del turismo para llevar a cabo la planeación de un viaje se ayudan de estudios FODA y de estudios de mercado, encuestas de satisfacción, entre otros, lo cual podría resultar más costoso que la implementación de un modelo matemático para diseñar rutas turísticas, por otra parte, los estudios que utiliza el especialista en turismo podrían enriquecer el modelo propuesto.

Es importante mencionar que la SECTUR tiene un Atlas Turístico Interactivo de la República Mexicana<sup>22</sup>, en el cual se pueden observar los productos que ofrece la Secretaría, entre ellos existen algunas rutas turísticas predeterminadas. Sin embargo, una forma de enriquecer dicho servicio puede ser a través de la implementación de una base de datos con costos y un algoritmo de ruteo como el propuesto en este trabajo, que permitiera al cliente planear un viaje de acuerdo a sus necesidades. También se pueden generar rutas mediante la implementación en un sistema de información geográfica e investigar cómo se implementarían algoritmos de ruteo en *Google earth*.

---

<sup>22</sup> <http://www.atlasturistico.sectur.gob.mx/atlas/viewer.html>

## Anexo 1

**Tabla de Pueblos Mágicos – Secretaría de Turismo (SECTUR)**

<b>Actualización SECTUR 23/03/2012</b>				
No.	Estado	Municipio	Pueblo mágico	Año ingreso
1	Aguascalientes	Asientos	Real de Asientos	2006
2	Baja California Sur	La Paz	Todos Santos	2006
3	Campeche	Palizada	Palizada	2011
4	Chihuahua	Bocoyna	Creel	2007
5	Coahuila	Parras	Parras de la Fuente	2004
6	Coahuila	Cuatro Ciénegas	Cuatro Ciénegas	2012
7	Colima	Comala	Comala	2002
8	Chiapas	San Cristóbal de las Casas	San Cristóbal de las Casas	2003
9	Guanajuato	Dolores Hidalgo	Dolores Hidalgo	2002
10	Guanajuato	San Luis de la Paz	Mineral de Pozos	2012
11	Guerrero	Taxco de Alarcón	Taxco	2002
12	Hidalgo	Mineral del Monte	Real del Monte	2004
13	Hidalgo	Huasca de Ocampo	Huasca de Ocampo	2001
14	Hidalgo	Mineral del Chico	Mineral del Chico	2011
15	Jalisco	Tapalpa	Tapalpa	2002
16	Jalisco	Tequila	Tequila	2003
17	Jalisco	Mazamitla	Mazamitla	2005
18	Jalisco	San Sebastián del Oeste	San Sebastián del Oeste	2011
19	Morelos	Tepoztlán	Tepoztlán	2010
20	Morelos	Tlayacapan	Tlayacapan	2011
21	México	El Oro	El Oro	2011
22	México	Tepetzotlán	Tepetzotlán	2002
23	México	Valle de Bravo	Valle de Bravo	2005
24	México	Malinalco	Malinalco	2010
25	Michoacán	Pátzcuaro	Pátzcuaro	2002
26	Michoacán	Tlalpujahua	Tlalpujahua	2005
27	Michoacán	Cuitzeo del Porvenir	Cuitzeo	2006
28	Michoacán	Santa Clara del Cobre	Santa Clara del Cobre	2010

<b>29</b>	Michoacán	Angangueo	Angangueo	2012
<b>30</b>	Nuevo León	Santiago	Santiago	2006
<b>31</b>	Oaxaca	Capulálpam de Méndez	Capulálpam de Méndez	2007
<b>32</b>	Puebla	Cuetzalan del Progreso	Cuetzalan	2002
<b>33</b>	Puebla	Zacatlán de las Manzanas	Zacatlán de las Manzanas	2011
<b>34</b>	Puebla	Pahuatlán de Valle	Pahuatlán	2012
<b>35</b>	Querétaro	Ezequiel Montes	Bernal	2005
<b>36</b>	Querétaro	Jalpan de Serra	Jalpan de Serra	2010
<b>37</b>	Querétaro	Cadereyta de Montes	Cadereyta de Montes	2011
<b>38</b>	Quintana Roo	Bacalar	Bacalar	2006
<b>39</b>	San Luis Potosí	Catorce	Real de Catorce	2001
<b>40</b>	San Luis Potosí	Xilitla	Xilitla	2011
<b>41</b>	Sinaloa	Cosalá	Cosalá	2005
<b>42</b>	Sinaloa	El Fuerte	El Fuerte	2009
<b>43</b>	Sonora	Álamos	Álamos	2005
<b>44</b>	Sonora	Magdalena	Magdalena de Kino	2012
<b>45</b>	Tabasco	Tacotalpa	Tapijulapa	2010
<b>46</b>	Tamaulipas	Mier	Mier	2007
<b>47</b>	Tamaulipas	Tula	Tula	2011
<b>48</b>	Tlaxcala	Huamantla	Huamantla	2007
<b>49</b>	Veracruz	Coatepec	Coatepec	2006
<b>50</b>	Veracruz	Xico	Xico	2011
<b>51</b>	Yucatán	Izamal	Izamal	2002
<b>52</b>	Zacatecas	Jerez	Jerez de García Salinas	2007
<b>53</b>	Zacatecas	Teúl González Ortega	Teúl González Ortega	2011
<b>54</b>	Zacatecas	Sombrerete	Sombrerete	2012

## Anexo 2

### Código LINGO 10 - Problema de ruteo de vehículos

```
!Modelo de ruteo turístico(fase de validación y verificación);

SETS:
    NODO:Q,U,T,V;
    RED(NODO,NODO):DIST,X;
ENDSETS
DATA:
    NODO=@OLE('C:\DELIVERY\RP.XLSX');
    PPTO=@OLE('C:\DELIVERY\RP.XLSX');
    TIEMPO=@OLE('C:\DELIVERY\RP.XLSX');
    DIST=@OLE('C:\DELIVERY\RP.XLSX');
    Q=@OLE('C:\DELIVERY\RP.XLSX');
    T=@OLE('C:\DELIVERY\RP.XLSX');
ENDDATA

!Modelo Matemático;
N=@SIZE(NODO);

!Función objetivo;
MIN=DISTANCIATOTAL;
DISTANCIATOTAL=@SUM(RED:DIST*X);

!Para todo nodo K excepto el nodo dónde inicia y termina el viaje;

@FOR(NODO(K)|K#GT#1:
X(K,K)=0;

    @SUM(NODO(I)|I#NE#K #AND#(I#EQ#1 #OR# (
Q(I)+Q(K)#LE#PPTO #AND#
T(I)+T(K)#LE#TIEMPO)
):X(I,K)=1;

    @SUM(NODO(J)|J#NE#K #AND#(J#EQ#1 #OR# (
Q(J)+Q(K)#LE#PPTO #AND#
T(J)+T(K)#LE#TIEMPO)
):X(K,J)=1;

    @BND(Q(K),U(K),PPTO);
    @BND(T(K),V(K),TIEMPO);

@FOR(NODO(I)|I#NE#K #AND# I#NE#1:

    U(K)>=U(I)+Q(K)-PPTO+PPTO*(X(K,I)+X(I,K))-
(Q(K)+Q(I))*X(K,I);
```

```

V(K) >= V(I) + T(K) - TIEMPO + TIEMPO * (X(K, I) + X(I, K)) -
(T(K) + T(I)) * X(K, I); );

U(K) <= PPTO - (PPTO - Q(K)) * X(1, K);
V(K) <= TIEMPO - (TIEMPO - T(K)) * X(1, K);
U(K) >= Q(K) + @SUM(NODO(I) | I#GT#1: Q(I) * X(I, K));
V(K) >= T(K) + @SUM(NODO(I) | I#GT#1: T(I) * X(I, K));

@FOR(REDA(I, J) : @BIN(X(I, J)));
);

@SUM(NODO(J) | J #GT# 1: X(1, J)) >=
@FLOOR((@SUM(NODO(I) | I#GT#1: Q(I)) / PPTO) + .999);
@SUM(NODO(J) | J #GT# 1: X(1, J)) >=
@FLOOR((@SUM(NODO(I) | I#GT#1: T(I)) / TIEMPO) + .999);
);
DATA:
@OLE('C:\DELIVERY\RP.XLSX') = DISTANCIATOTAL;
@OLE('C:\DELIVERY\RP.XLSX') = X;

ENDDATA

```

## Anexo 3

### Aeropuertos de México más transitados por número de pasajeros del 2011<sup>23</sup>

No.	Aeropuerto	Ciudad/Estado	Pasajeros Totales
1	Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México	México, D. F.	263,556,001
2	Aeropuerto Internacional de Cancún	Cancún, Quintana Roo	130,224,812
3	Aeropuerto Internacional de Guadalajara	Guadalajara, Jalisco	7,201,700
4	Aeropuerto Internacional Mariano Escobedo	Monterrey, Nuevo León	5,582,794
5	Aeropuerto Internacional General Abelardo L. Rodríguez	Tijuana, Baja California	3,500,800
6	Aeropuerto Internacional Lic. Adolfo López Mateos	Toluca, Estado de México	3,000,000
7	Aeropuerto Internacional Lic. Gustavo Díaz Ordaz	Puerto Vallarta, Jalisco	2,645,300
8	Aeropuerto Internacional de Los Cabos	Los Cabos, Baja California Sur	2,807,000
9	Aeropuerto Internacional Manuel Crescencio Rejón	Mérida, Yucatán	1,225,593
10	Aeropuerto Internacional General Ignacio Pesqueira García	Hermosillo, Sonora	1,200,900
11	Aeropuerto Internacional Federal de Culiacán	Culiacán, Sinaloa	1,062,893
12	Aeropuerto Internacional General Heriberto Jara	Veracruz, Veracruz	867,438
13	Aeropuerto Internacional de Guanajuato	León, Guanajuato	854,200
14	Aeropuerto Internacional Carlos Roviroza Pérez	Villahermosa, Tabasco	851,264
15	Aeropuerto Internacional General Roberto Fierro Villalobos	Chihuahua, Chihuahua	782,133
16	Aeropuerto Internacional General Rafael Buelna	Mazatlán, Sinaloa	722,492
17	Aeropuerto Internacional Ángel Albino Corzo	Tuxtla Gutiérrez, Chiapas	784,196
18	Aeropuerto Internacional Abraham González	Ciudad Juárez, Chihuahua	673,364
19	Aeropuerto Internacional General Juan N. Álvarez	Acapulco, Guerrero	596,326
20	Aeropuerto Internacional de Ixtapa-Zihuatanejo	Ixtapa-Zihuatanejo, Guerrero	480,613

<sup>23</sup> [http://es.wikipedia.org/wiki/Anexo:Aeropuertos\\_m%C3%A1s\\_importantes\\_de\\_M%C3%A9xico](http://es.wikipedia.org/wiki/Anexo:Aeropuertos_m%C3%A1s_importantes_de_M%C3%A9xico)

## Anexo 4

### Nivel Socioeconómico AMAI<sup>24</sup>

El nivel socioeconómico es una segmentación del consumidor que define la capacidad económica y social de un hogar. En México el Nivel Socioeconómico se mide a través de la regla AMAI 10X6. Esta regla es un índice que clasifica a los hogares en seis niveles, considerando nueve características o posesiones del hogar y la escolaridad del jefe de familia o persona que más aporta al gasto.

Desde 1994, el índice de Nivel Socioeconómico de la Asociación Mexicana de Agencias de Investigación de Mercados y Opinión Pública (AMAI) se ha convertido en el criterio estándar de clasificación de la industria de la investigación de mercados en México. El primer índice de clasificación AMAI se dio a conocer en 1994. Desde entonces, el índice ha evolucionado mejorando su capacidad de discriminación y predicción.

El Nivel Socioeconómico A/B es el estrato con el más alto nivel de vida e ingresos del país y representan el 7.2% de la población. Usualmente, vacacionan en el extranjero.

El Nivel Socioeconómico C+ el segundo estrato con el más alto nivel de vida e ingresos del país y representan el 14% de la población. Muy parecido al A/B, sin embargo tiene limitantes para ahorrar y realizar gastos mayores o excesivos. Aspira a ahorrar más y a tener un futuro más cierto. Vacacionan en el interior del país.

El Nivel Socioeconómico C aunque es denominado medio, en realidad se encuentra arriba del promedio poblacional de bienestar. Representa 17.9% de la población y se caracteriza por haber alcanzado un nivel de practicidad adecuado. Aspira a mayor bienestar en entretenimiento y tecnología.

Considérese que la fecha de publicación del documento por AMAI es noviembre 2009.

---

<sup>24</sup> <http://www.amai.org/NSE/NivelSocioeconomicoAMAI.pdf>

## Bibliografía

- Alshamrani, A., Mathur, K. & Ballou, R. H. (2007, abril). Reverse logistics: simultaneous design of delivery routes and returns strategies. *Computers & Operations Research*, vol. 34, 595–619.
- Anbuudayasankar, S. P., Ganesh, K. & Mohandas, K. (2009). Metaheuristic Approach for Simultaneous Delivery and Pick-Up Problem of Banking Industry. *The Icfai University Journal of Operations Management*, Vol. VIII, No. 1.
- Applegate, David L., Bixby, Robert E., Chvátal, Vasek & Cook, William J. (2006). *The Traveling Salesman Problem: A Computational Study*. Princeton University Press.
- Balci, O. and Sargent, R.G. (1982). Validation of multivariate response simulation models by using Hotelling's twosample T2 test. *Simulation*, Vol 39, No. 6, pp185-192.
- Baldacci, R., Christofides, N. & Mingozzi, A. (2008). An exact algorithm for the vehicle routing problem based on the set partitioning formulation with additional cuts, *Mathematical Programming: Series A and B* (115), 351-385.
- Baltazar, Ernesto. (2011, agosto). ¿Qué es el acuerdo nacional por el turismo? Secretaría de Turismo México. Obtenido en febrero de 2012 de:  
[http://www.sectur.gob.mx/es/sectur/Que\\_es\\_el\\_Acuerdo\\_Nacional\\_por\\_el\\_Turismo](http://www.sectur.gob.mx/es/sectur/Que_es_el_Acuerdo_Nacional_por_el_Turismo)
- Bérubé, J., Potvin, J., & Vaucher, J. (2006). Time-dependent shortest paths through a fixed sequence of nodes: application to a travel planning problem. *Computers & Operations Research*, 33(6), 1838-1856.
- Cordeau, J. F., Laporte, G., Savelsberg, M. & Vigo, D. (2007). Vehicle Routing. In: C. Barnhart and G. Laporte (Editors), *Transportation, handbooks in operations research and management science*, Vol. 14, Elsevier, Amsterdam, pp. 367–428.
- Chao-Yin, H., Zong-Long, L., & Ching-Sheng, C. (2012). A Diamond Search Algorithm of Travel Route Planning. 2012 International Symposium on Computer, Consumer and Control (IS3C 2012). Taichung, Taiwan.

- Chen, A. L., Yang, G. K. & WU, Z. M. (2008, abril) Production scheduling optimization algorithm for the hot rolling processes. *International Journal of Production Research*, Vol. 46, No. 7, 1955–1973.
- Clarke, G. & Wright, W. (1964). Scheduling of vehicles from a central depot to a number of delivery points. *Operations Research*, vol. 12(4), 568–581.
- Dantzing, G. B. & Ramser, J. H. (1959). The Truck Dispatching Problem. *Management Science*, vol. 6(1), 80-91.
- Daza, J. M., Montoya, J. R. & Narducci, F. (2009, diciembre). Resolución del Problema de Enrutamiento de Vehículos con Limitaciones de Capacidad Utilizando un Procedimiento Metaheurístico de dos Fases. *Revista EIA, Número 12*, 23-38. Obtenido el 25 de marzo de 2012 de:  
[http://revista.eia.edu.co/articulos12/EIA%2012%20\(pag.%2023-38\).pdf](http://revista.eia.edu.co/articulos12/EIA%2012%20(pag.%2023-38).pdf)
- Dym, Clive L. (1980). *Principles of Mathematical Modeling*. El Servier Academic Press. Segunda edición 2004, pg. 7.
- Dorronsoro, B. (2007). *The VRP Web*. Obtenida el 22 de febrero de 2012 de NEO-University of Málaga de:  
<http://neo.lcc.uma.es/radi-aeb/WebVRP/>
- Elster, Jon (1997). *Economics, análisis de la interacción entre racionalidad, emoción, preferencias y normas sociales en la economía de la acción individual y sus desviaciones*. Barcelona: Gedisa.
- Estrada Fernando (2008). *Economía y racionalidad de las organizaciones. Los aportes de Herbert A. Simon*. 84 -103.
- Fernández y Guzmán (2003) *La Creación de Productos Turísticos Utilizando Rutas Enológicas*. *Revista de Turismo y Patrimonio Cultural Pasos*. Consultada el 13 de septiembre de 2012 en:  
<http://www.pasosonline.org/>
- Fisher, M. L. (1994). Optimal solution of vehicle routing problems using minimum k-trees. *Operations Research*, (42) 626–642.

- Fitina, L., Imbal, J., Uiari, V., Murki, N., & Goodyear, E. (2010). An Application of Minimum Spanning Trees to Travel Planning. *Contemporary PNG Studies*, 121-11.
- Fitzsimmons, J. & Fitzsimmons, M. (2011). *Service Management*. Singapore: McGraw Hill International.
- Font, M. (2010). Metodología para el diseño de productos turísticos como alternativa de desarrollo local. Municipio Martí. Tesis presentada en opción al título de Máster en Gestión Turística. Matanzas.
- Forrester, J. W. and Senge, P. M. (1980). Tests for building confidence in system dynamics models. *TIME Studies in the Management Science* 14, 209-228.
- Forrester, J.W. (1961) *Industrial Dynamics*, Cambridge: MIT Press.
- Fukasawa, R., Longo, H., Lysgaard, J., Poggi de Aragão, M., Reis, M., Uchoa, E., Werneck, R. (2006). Robust Branch-and-Cut-and-Price for the Capacitated Vehicle Routing Problem, *Mathematical Programming* (106) 491-511.
- Garey, M., Johnson, D. (1979). *Computers and intractability: a guide to the theory of NP-completeness*. W. H. Freeman and Company
- Gass, S.I. (1993). Model Accreditation: A Rationale and Process for Determining a Numerical Rating. *European Journal of Operational Research*, Vol. 66, No. 2, pp. 250-258.
- Geiger, M.J.; Habenicht, W.; Sevaux, M.; Sörensen, K. (Eds.) (2009). *Metaheuristics in the Service Industry*. Series: *Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems*, Vol. 624, X, 171 p. 42 illus.
- Godart, J. (2005). Challenges in Real World Sightseeing Tour Optimization Using Meta-Heuristics. In A. J. Frew, M. Hitz, P. Proceedings of the 6<sup>th</sup> WSEAS Int. Conf. on Evolutionary Computing (pp. 233-238). Lisbon, Portugal.
- Godart, J. (2003). Beyond the Trip Planning Problem for Effective Computer-Assisted Customization of Sightseeing Tours. In A. J. Frew, M. Hitz, P. O'Connor (Eds.), *Information and communication technologies in tourism 2003: Proceedings of the international conference in Helsinki, Finland, 2003* (pp. 163-172). Vienna and New York.

- Godart, J. (2001). Using the Trip Planning Problem for Computer-Assisted Customization of Sightseeing Tours. In P. J. Sheldon, K. W. Wober, D. R. Fesenmaier (Eds.), *Information and communication technologies in tourism 2001: Proceedings of the international conference in Montreal, Canada, 2001* (pp. 377-386). Vienna and New York.
- Hillier, F. S & Liberman, G. J. (2010). *Introducción a la Investigación de Operaciones*. McGraw Hill. Novena Edición.
- Hernández, J. & García, M. (2007). Investigación de Operaciones y turismo. *Revista de Matemática: Teoría y aplicaciones*, 14(1), 221-238. Caracas, Venezuela.
- Ijeoma, S.I. Andersson, J. and Wall, A. (2001). Correctness criteria for models validation—A philosophical perspective. Department of Computer Science and Computer Engineering (IDT). Malardalen University, Sweden.  
[www.mrtc.mdh.se/publications/0731.pdf](http://www.mrtc.mdh.se/publications/0731.pdf),
- Kotler, P. (1996). *Dirección de Mercadotecnia*. (8va Ed., pp. 40-41). Prentice Hall.
- Labadie, N., Mansini, R. , Melechovsky J., Wolfler R. (2012, Julio). The Team Orienteering Problem with Time Windows: An LP-based Granular Variable Neighborhood Search. *El Servier. European Journal of Operational Research*, Volume 220, Issue 1, Pages 15–27.
- Laporte, G. & Nobert, Y. (1987). Exact algorithms for the vehicle routing problem. *Annals of Discrete Mathematics* 31, 147–184.
- Laporte, G. (1992). The vehicle routing problem: an overview of exact and approximate algorithms. *European Journal of Operational Research* 59, 345–358
- Martis, M. S. (2006). Validation of Simulation Based Models: A Theoretical Outlook. *The Electronic Journal of Business Research Methods* Volume 4 Issue 1, pp 39 - 46.  
<http://www.ejbrm.com/main.html>
- México, Instituto Nacional de Estadística y Geografía (2012). *Sistema de Cuentas Nacionales de México (Cuenta satélite del turismo de México, 2006-2010 Año base 2003. 2012)*, 49.

México, Instituto Nacional de Estadística y Geografía (2012). *Sistema de Cuentas Nacionales de México. (Indicadores trimestrales de la actividad turística Año base 2003. 2003/I-2011/IV.)*.

México, Secretaría de Turismo, Centro de Estudios Superiores en Turismo (2000). *Estudio de Gran Visión del Turismo en México: Perspectiva 2020*.

México, Sistema Integral de Información de Mercados Turísticos (SIIMT), Inteligencia de Mercados - Sector Turístico en México. Cifras ene – jul 2012 consultadas el 13 de septiembre 2012.

<http://www.siimt.com/wb2/#>

Miller, C., Tucker, A. & Zemlin, R. (1960). Integer programming formulation of traveling salesman problems. *Journal of the ACM* 7, 326–329

Morris, W. T. (1967). On the Art of Modeling. *Management Science* Vol. 13, No. 12, Series B, Managerial, pp. B707-B717. Published by: INFORMS

<http://www.jstor.org/stable/2628350>

Naddef, D. & Rinaldi, G. (2002). Branch and cut algorithms for the capacitated VRP. In: Toth and Vigo (Editors), *The Vehicle Routing Problem*, SIAM. Monographs on Discrete Mathematical and Applications. SIAM Philadelphia, 53–82, 2002.

Nemhauser, G., Wolsey, L. (1988). *Integer and Combinatorial Optimization*. JohnWiley & Sons

Olivera, A. (2004, agosto). Heurísticas para Problemas de Ruteo de Vehículos. Obtenido el 25 de marzo del 2012 de:

<http://www.fing.edu.uy/inco/pedeciba/bibliote/reptec/TR0408.pdf>

Papadimitriou, Ch. (1995). *Computational Complexity*, Addison Wesley Longman.

Repoussis, P.P., Paraskevopoulos, D. C., Zobolas, G., Tarantilis, C. D. & Ioannou, G. (2009). A web-based decision support system for waste lube oils collection and recycling. *European Journal of Operational Research*, vol. 195(3), 676–700.

Rinnooy Kan, A. & Lenstra, J. (1981). Complexity of Routing Vehicle and Scheduling Problems, *Networks* (11) 221-228.

Río, D. (2009). *Presentación de un problema de ruteo resuelto mediante la heurística de ahorros, Clarke and Wright*. Universidad Politécnica de Cataluña, Escuela Superior de Ingeniería Industrial y Aeronáutica de Terrasa. Obtenida el 10 de Marzo del 2012 de:

[http://www.youtube.com/watch?v=vYe\\_d7rThp4](http://www.youtube.com/watch?v=vYe_d7rThp4)

Rodríguez, María V. (2010). *Diseño de una ruta turística de interpretación cultural para la promoción y el desarrollo local de la etnia aborigen Warao en el Estado Delta Amacuro, Venezuela*. República Bolivariana de Venezuela, Colegio Universitario de Caracas; República de Cuba, Universidad de la Habana.

Salazar, J. (2008). *Google Maps para la optimización de rutas*. España: Universidad de la Laguna.

Santana, Y., & Fernández, E. (2008). La solución de la discrepancia no. 1 del modelo para la mejora de procesos en un circuito turístico: ¿qué información necesita ser compartida? (Spanish). *Ingeniería Industrial*, 29(3), 1-6, 6p, 3 Diagrams, 3 Charts Diagram; found on p3 "Modelo para la mejora de procesos en un circuito turístico"

Sargent, R.G. (2003). *Verification and Validation of Simulation models*. Proceedings of the 2003 Winter Simulation

Conference, S. Chick, P. J. Sanchez, D. Ferrin, and D. J. Morrice, (eds.), pp37-48.

Sasser, E. Olsen, P & Wyckoff D. (1978). *Management of Service Operations* (p. 8). Boston: Allyn and Bacon.

Simon, Herbert A. (1962). *Discussion: Problems of Methodology*. *American Economic Review*, 53, 229-31.

Souffriau, W., Vansteenwegen, P., Vanden Berghe, G., & Van Oudheusden, D. (2011). *The planning of cycle trips in the province of East Flanders*. *Omega*, 39(2), 209-213.

Sushil, (1993) *System Dynamics: A Practical approach for Managerial Problems*, Wiley Eastern Publication, New Delhi, ISBN: 81-224-0498-7, p137.

Sylejmani, K., & Dika, A. (2011). *Solving touristic trip planning problem by using taboo search approach*. *International Journal Of Computer Science Issues (IJCSI)*, 8(5), 139.

- Szmulewicz, Pablo (2003). Cátedra asignatura Métodos de Análisis del Fenómeno Turístico. Chile
- Tarantilis, C.D. & Kiranoudis, C.T. (2007). A flexible adaptive memory-based algorithm for real-life transportation operations: Two case studies from dairy and construction sector. *European Journal of Operational Research*, vol. 179(3), junio, 806–82.
- Toth, P. & Vigo, D. (2002) *The Vehicle Routing Problem (Monographs on Discrete Mathematics and Applications)*. Philadelphia: SIAM.
- Vansteenwegen, P., Souffriau, W., Berghe, G. V., & Oudheusden, V. D. (2009). *Iterated local search for the team orienteering problem with time windows*. *Computers & Operations Research*, 36(12), 3281-3290.
- Vansteenwegen, P., Souffriau, W., Berghe, G. V., Oudheusden, V. D., Sörensen, K., Sevau, M., Habenicht, W., & Geiger, M. J. (2009). *Metaheuristics for Tourist Trip Planning. Metaheuristics in the Service Industry*. Springer Berlin Heidelberg, 15-31.
- Zeng, H., Wu, Y., Zhang, D. & Li, J. (2007) *A hybrid Algorithm for Large-Scale Vehicle Routing Problem in Real Traffic Condition*. IEEE International Conference on Automation and Logistics, 2238-2242.

## **Páginas web de consulta**

<http://pueblosmagicos.visitmexico.com/wb2/>

<http://www.amai.org/NSE/NivelSocioeconomicoAMAI.pdf>

[http://www.youtube.com/watch?v=vYe\\_d7rThp4](http://www.youtube.com/watch?v=vYe_d7rThp4)

<http://www.fing.edu.uy/inco/pedeciba/bibliote/reptec/TR0408.pdf>

<http://www.siimt.com/wb2/#>

<http://www.jstor.org/stable/2628350>

<http://www.amai.org/NSE/NivelSocioeconomicoAMAI.pdf>