



**Universidad
Andrés Bello®**

**UNIVERSIDAD ANDRES BELLO
Facultad de Ingeniería
Ingeniería Civil Industrial**

**PROBLEMA DE INSPECCIÓN DE PUENTES EN LA PROVINCIA DE
VALPARAÍSO-CHILE**

Proyecto para optar al título de Ingeniero Civil Industrial

**Autor:
Sebastián Andrés Vergara Valenzuela
Profesor guía:
Ph.D. Germán Paredes Belmar
Viña del Mar
2018**

A mi madre por su extraordinario e incondicional apoyo y mi familia por dármele todo y nunca faltarme nada.

8. AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, quiero agradecer a mi madre Blanca Valenzuela, abuela Inés Espinoza y tío Pedro Valenzuela, por todo el esfuerzo y sacrificio por brindarme la mejor educación. A mi familia, por la unidad que los representa y estar siempre ahí como sustento.

Agradezco al profesor Germán Paredes por confiar y creer en mí, al darme la oportunidad de realizar este trabajo. Por todo su apoyo, paciencia, motivación, retroalimentación y excelente vocación esto no habría sido posible.

No puedo dejar de agradecer a todos los profesores que estuvieron a lo largo de mi formación como profesional y que me enseñaron además de la teoría, cómo ser una mejor persona. Entre ellos al profesor Alejandro Córdova y Álvaro Cepeda.

A todos mis amigos que me han manifestado de una u otra manera ánimo y coraje para concluir esta etapa. Entre ellos destacan los de la infancia y aquellos que conocí en enseñanza media.

A todos, infinitas gracias.

9. ÍNDICE GENERAL

Contenido

8.	AGRADECIMIENTOS	3
9.	ÍNDICE GENERAL	4
10.	ÍNDICE DE TABLAS	6
11.	ÍNDICE DE FIGURAS	7
12.	RESUMEN	8
13.	ABSTRACT	9
I.	Introducción	10
II.	Fundamentación	13
2.1.	Problemática u oportunidad	13
2.2.	Aportes del proyecto a la solución del problema o de la oportunidad	14
III.	Objetivos	16
3.1.	Objetivo General	16
3.2.	Objetivos Específicos	16
IV.	Alcance	17
V.	Antecedentes del problema y revisión bibliográfica	19
5.1.	Ruteo de vehículos	19
5.1.1.	Ruteo de vehículos con periodicidad	24
5.1.2.	Ruteo de vehículos con instalaciones satelitales	25
5.1.3.	Ruteo de vehículos con paradas intermedias	26
VI.	Descripción del modelo	30
6.1.	Formulación matemática del modelo	37
6.1.1.	Conjuntos	37

6.1.2.	Parámetros	37
6.1.3.	Variables de decisión	38
6.1.4.	Función objetivo	38
6.1.5.	Restricciones	39
VII.	Verificación y análisis del modelo	43
7.1.	Verificación del modelo	43
7.2.	Análisis de ensayos	45
VIII.	Caso de estudio	50
13.1.	Descripción de la instancia	50
13.2.	Resultados	58
IX.	Conclusiones	73
X.	Extensiones	75
XI.	Referencias	76
XII.	Anexos	78

10. ÍNDICE DE TABLAS

Tabla VII-1: Resumen instancia de prueba para ambos escenarios	44
Tabla VII-2: Soluciones óptimas de mínimo costo para instancia pequeña	46
Tabla VIII-1: Puentes de la Provincia de Valparaíso	51
Tabla VIII-2: Depósito y alojamientos de la Provincia de Valparaíso	53
Tabla VIII-3: Soluciones para la Provincia según escenario I del BIRP	58
Tabla VIII-4: Soluciones para la Provincia según escenario II del BIRP	63

11. ÍNDICE DE FIGURAS

Figura IV.1: Alcance del proyecto	17
Figura V.1: Forma Gráfica del problema de enrutamiento de vehículos clásico.	20
Figura V.2: Familia VRP	21
Figura V.3: Árbol de clasificación de variantes del VRP	23
Figura VI.1: Escenario 1: 5 días, 1 equipo de inspección	32
Figura VI.2: Escenario 2: 3 días, 2 equipos de inspección	33
Figura VI.3: Escenario 3: 3 días, 2 equipos de inspección	34
Figura VI.4: Escenario 4: 6 días, 1 equipo de inspección	36
Figura VII.1: Ruta de mínimo costo de escenario I para instancia pequeña	47
Figura VII.2: Ruta de mínimo costo de escenario II para instancia pequeña	49
Figura VIII.1: Depósito, puentes y alojamientos de la Provincia de Valparaíso	56
Figura VIII.2: Ruta de mínimo costo para la Provincia con instancia 1 equipo y 10 días de inspección	61
Figura VIII.3: Ruta de mínimo costo para la Provincia con instancia 1 equipo y 12 días de inspección	62
Figura VIII.4: Ruta de mínimo costo para la Provincia con instancia 9 equipos y 12 días de inspección	68
Figura VIII.5: Ruta de mínimo costo para la Provincia con instancia 12 equipos y 12 días de inspección	69
Figura VIII.6: Ruta de mínimo costo para la Provincia con instancia 16 equipos y 12 días de inspección	70

12.RESUMEN

En este artículo estudiamos un caso real de inspección de puentes de la provincia de Valparaíso, Chile. El problema consiste en determinar un plan de inspección de puentes para uno o varios equipos de trabajo en un horizonte de tiempo limitado. Cada equipo de trabajo inicia su recorrido en un depósito y debe volver a él una vez finalizada la inspección. Además, la jornada laboral diaria de un equipo es limitada. En este estudio permitimos que un equipo de inspección pueda hospedarse en un alojamiento cuando se encuentre lejos del depósito central y haya terminado el turno de trabajo. El alojamiento seleccionado será el punto de inicio al siguiente día. Proponemos un modelo de programación entera para el problema, minimizando los costos de los equipos de trabajo y de los alojamientos. Resolvemos el caso real en Valparaíso-Chile considerando dos escenarios: 1) un equipo de trabajo con varios días de planeación y 2) varios equipos de trabajo en un día de planeación.

Keywords: Problema de Ruteo de Vehículos; Inspección de Puentes; Modelos de Programación Lineal Entera

13. ABSTRACT

In this article we study a real case of inspection of bridges in the province of Valparaíso, Chile. The problem is to determine a bridge inspection plan for one or more work teams in a limited time horizon. Each work team starts its journey in a warehouse and must return to it once the inspection is finished. In addition, a team's daily workday is limited. In this study, we allow an inspection team to stay in a lodging when it is far from the central warehouse and the work shift has ended. The selected accommodation will be the starting point the next day. We propose an entire programming model for the problem, minimizing the costs of work equipment and accommodation. We solve the real case in Valparaíso-Chile considering two scenarios: 1) a work team with several days of planning and 2) several work teams in a planning day.

Keywords: Vehicle Routing Problem; Bridge Inspection; Whole Linear Programming Models

I. Introducción

Las carreteras y las infraestructuras viales que conectan diversas áreas dentro de un país influyen directamente en el desarrollo económico y social por lo que es fundamental su correcto mantenimiento. Las inspecciones periódicas son esenciales para detectar a tiempo incidencias o patologías.

En el presente año, colapsó el puente Cancura (ubicado en la Provincia de Osorno, región de Los Lagos, Chile) dejando 1 muerto y 6 heridos y también, el puente Ferroviario (localizado en Temuco, región de la Araucanía, Chile) que por fortuna estaba suspendida la circulación de trenes a través de él. Dichas consecuencias fueron producto de una falta de inspección, mantenimiento y monitoreo de estructuras, de manera periódica, que permita tomar acciones preventivas para evitar accidentes y derrumbes que generen un costo social y económico (www.ahoranoticias.cl, 2018).

Las inspecciones, como parte del mantenimiento, son realmente útiles, ya que nos permiten conocer el estado de los diferentes elementos integrados dentro de una carretera, confirmando si el estado es el adecuado para ofrecer el servicio de una forma segura y sin que existan riesgos que puedan poner en peligro la vida de los usuarios. Tal es el caso de los puentes, una de las estructuras más comunes en toda obra vial. Las inspecciones son visuales y se realizan con profesionales especializados para asegurar su fiabilidad.

En el caso particular de la inspección de puentes de carretera en España, se efectúan cada 5 años (en las carreteras que dependen del Ministerio de Fomento). Este plazo se acorta en caso de contingencias que afecten la estructura (terremotos, impacto de vehículos, etc.). La primera inspección se hace antes de que el puente esté en funcionamiento con el objetivo de observar la evolución de daños y deterioros en el tiempo.

Las inspecciones son realizadas por un equipo técnico a cargo de un ingeniero especialista en estructuras, los que disponen de conocimientos suficientes para poder conocer el comportamiento estructural de los puentes, degradación y deterioro de las estructuras y además disponer de información para preparar de manera adecuada la inspección. Usualmente se requiere de un vehículo con el cual se pueda acceder al lugar donde se encuentra la estructura, un notebook, una cámara para sacar fotografías de los daños observados, GPS que permita ubicar la estructura, material para anotar observaciones, cinta métrica y distanciómetro, tizas de colores para marcar deterioros, escalera de mano, martillo, linterna, equipos de seguridad y de señalización para evitar accidentes durante la realización de los trabajos, etc.

En relación con el tiempo que demora la inspección de un puente en particular, este es relativo y depende de factores como las características de la estructura, longitud, tipo de daño, accesibilidad, entre otras.

En cuanto a la logística de inspección de puentes no hay mucha información específica y gran parte de los equipos de inspección a la hora de realizar dicha labor priorizan aquellos que estén más cerca al punto de partida del circuito y generalmente visitan hasta 4 puentes en una jornada laboral. En caso de situaciones de emergencia, las prioridades las tienen éstos (Structuralia, 2016).

En la actualidad, en cuanto al diseño de rutas de vehículos muchas empresas con sistemas de distribución y despacho diseñan sus rutas de manera intuitiva sin utilizar herramientas de apoyo computacionales. Ante esto, es evidente que las soluciones no siempre son las más eficientes, debido a que no se incluye toda la información de los componentes del sistema ni las restricciones que lo caracterizan.

En términos generales, el diseño de ruta se ha convertido en una fuente de ventajas competitivas para las empresas que han tecnificado este proceso, ya

que han podido reducir sus costos y mejorar su ingreso debido al mejor aprovechamiento de la flota en términos de su capacidad de transporte, lo que a su vez mejora el nivel de servicio al cliente (Bustos Rosales & Jiménez Sánchez, 2014).

El modelo clásico del problema de ruteo vehicular conocido como VRP, describe el diseño de rutas donde a partir de un depósito del que sale cada vehículo y al que tiene que regresar, luego de visitar exactamente una sola vez a cada cliente para satisfacer su demanda, sin violar las restricciones de capacidad de carga de los vehículos, distancia máxima recorrida por estos y respetando el horario de trabajo todo con el fin de buscar el costo mínimo (Toth & Vigo).

Además, dado el nivel de competitividad actual en donde las empresas adicionalmente se han enfocado en la satisfacción del cliente, el problema del diseño de rutas se ha convertido en un problema multiobjetivo a fin de minimizar no solo el costo, sino también maximizar al mismo tiempo la satisfacción del cliente.

Las aplicaciones informáticas o software para el diseño de rutas se derivan de modelos VRP que atienden diferentes necesidades, e incluyen diversas restricciones o condiciones operativas impuestas por la dinámica de los mercados.

En general, el diseño de rutas de vehículos es crítico hoy en día en el área logística y de distribución para todo el sector público y privado, en donde el algoritmo o heurística más adecuado que determine la ruta eficiente (o ruta mínima) dependerá de la complejidad del sistema que se quiere modelar y resolver, de las restricciones y que las soluciones se acerquen a la realidad y se obtengan dentro de un marco de tiempo razonable.

II. Fundamentación

2.1. Problemática u oportunidad

El problema de inspección y mantención de puentes en la provincia de Valparaíso es crítico y de gran importancia para las autoridades respectivas debido a los recursos económicos y plazos limitados con los que cuentan para dicha labor.

Uno de los factores más importantes es el limitado tiempo de inspección disponible y los altos costos de inspección relacionados, por ende, resulta ser un problema de interés.

La zona de estudio es sísmica y los puentes tienen una vida útil determinada, que va disminuyendo a medida que fluyen por éstos diversas cargas en el tiempo. Por lo tanto, es importante saber y registrar cada cierto periodo el estado en que se encuentran dichas conexiones (sobre todo aquellas más transitadas) para poder repararlos o renovarlos según corresponda y así, se evite un colapso de dichas estructuras con posibles resultados fatales.

Otro aspecto importante a considerar es la escasa información sobre localización de puentes dentro de la región (coordenadas exactas de estos) y en Chile. Además, el estado y mantención tampoco es conocido en detalle, lo que justifica la importancia del problema en cuestión.

La literatura provee variados modelos que minimizan los costos totales de transporte utilizando uno o más vehículos para visitar puntos de demanda exactamente una vez, entendiendo que el costo de transporte entre dos puntos (nodo de origen y de destino) es directamente proporcional a la distancia recorrida. Este problema es un caso particular de VRP estudiado recientemente

en (Huang, Huang, Blazquez, & Paredes-Belmar, 2018). Es posible que durante una jornada laboral no se alcancen a revisar todos los puentes de una zona geográfica. Así, el equipo de inspección podrá buscar un alojamiento cercano al último puente visitado, ya que es más conveniente continuar al día siguiente con la labor de inspección desde el alojamiento disponible seleccionado, que volver al punto de partida (depot). Este modelo estándar, en contraste con la logística actual de inspección de puentes de la provincia, se aplicará a la zona de estudio de Valparaíso.

2.2. Aportes del proyecto a la solución del problema o de la oportunidad

Las autoridades respectivas correspondientes al sector público (Ministerio de Obras Públicas), encargadas de la labor de inspección y mantención de puentes, actualmente realizan inspecciones de puentes a través de circuitos de puentes cercanos. Por ejemplo, en la ciudad de Valparaíso se programa el recorrido de una camioneta saliendo desde el centro de Valparaíso para inspeccionar 3 ó 4 puentes en una jornada laboral (Hernandez Ortiz, Francisco;). Sin embargo, esta podría no ser la mejor estrategia de inspección cuando se tienen plazos acotados y un presupuesto limitado para la labor, por lo que es necesario contar con un modelo de optimización que represente lo más cercano posible dicha realidad y que se pueda resolver mediante algún método exacto o heurística.

El aporte al problema descrito se basa en el diseño de rutas eficientes de visitas a puentes de la provincia de Valparaíso que optimice los costos totales de inspección (costos de traslado, inspección, equipos y alojamiento). Se consideran factores tales como: periodo de inspección, jornada laboral, costos de transporte, costos de alojamientos disponibles, cantidad de equipos de

inspección, etc. El objetivo es determinar soluciones eficientes para el apoyo en la toma de decisiones de las autoridades de la provincia.

III. Objetivos

3.1. Objetivo General

Plantear una propuesta de diseño de rutas para planificar la inspección y mantenimiento de puentes pertenecientes a la Provincia de Valparaíso.

3.2. Objetivos Específicos

- Estudiar el contexto y revisar el estado del arte relacionado al problema en estudio para definir la contribución del trabajo.
- Recopilar información geoespacial de localizaciones de puentes, alojamientos (hostales, hoteles) en la provincia de Valparaíso para posteriormente representar el problema en un modelo matemático que contenga las principales variables de decisión y restricciones, minimizando los costos totales de inspección.
- Resolver el modelo matemático mediante algún método exacto o heurística, con el objetivo de obtener soluciones reales y dentro de un marco de tiempo razonable.
- Hacer análisis de sensibilidad de los resultados obtenidos con el objetivo de recomendar las mejores opciones según los distintos escenarios considerando factores de costos y tiempo.

IV. Alcance

El proyecto de tesis se enmarca en la provincia de Valparaíso. El Ministerio de Obras Públicas (MOP) señala que la provincia cuenta con 39 puentes ubicados en distintas comunas (Valparaíso, Viña del Mar, Concón, Puchuncaví, Quintero y Casablanca). El depósito (punto de inicio de recorridos de vehículos) esta ubicado en el centro de Valparaíso (Melgarejo 669, ubicación actual del Seremi de Obras Públicas). Se contará con algunos alojamientos tentativos ubicados en comunas lejanas como Concón, Quintero, Puchuncaví y Casablanca.

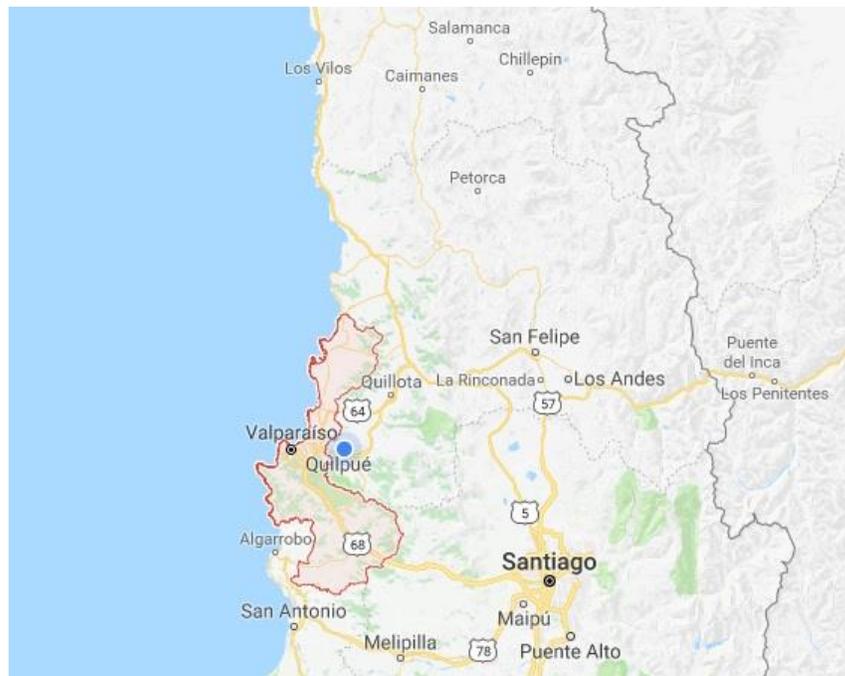


Figura IV.1: Alcance del proyecto

Fuente: Google Maps

Cabe mencionar, que se pretende diseñar un modelo matemático para la problemática y no se pretende, implementar esto en alguna plataforma por plazos y recursos económicos, todo lo posterior agrega valor y se deja para el futuro.

V. Antecedentes del problema y revisión bibliográfica

El problema de inspección y mantenimiento de puentes se ha estudiado como un caso especial del problema ruteo de vehículos en la literatura más reciente, sin embargo, no hay registro que dicho modelo matemático estándar haya sido aplicado a una instancia real.

Antes de mencionar los trabajos, investigaciones y aportes realizados por diversos autores, corresponde revisar, en primera instancia, los modelos y problemas más atingentes y cercanos al problema a desarrollar en esta tesis.

5.1. Ruteo de vehículos

Los problemas de ruteo de vehículos o VRP (por sus cifras en inglés *Vehicle Routing Problem*) son comunes en la optimización de operaciones logísticas y de los más estudiados. En general, plantean la búsqueda de la solución óptima bajo diversas restricciones tales como: número de vehículos, su capacidad, lugares de destino (clientes) y demanda de los clientes, etc. Una formulación de este tipo puede incluir un gran número de variables y parámetros según el caso (Rocha , González, & Orjuela, 2011).

El VRP es una generalización del TSP (Traveling Salesman Problem) o problema del vendedor viajero. Este último consiste en que un vendedor viajero debe visitar “ n ” ciudades, iniciando y finalizando en la ciudad de origen, en donde debe visitar una sola vez cada ciudad, este recorrido deberá ser el de mínimo costo, este costo puede estar dado por distancia o tiempo. Una variante del TSP, llamadas MTSP, múltiple agente viajero, el VRP deriva directamente de esta variante.

En específico, el VRP consiste en un problema donde se requiere atender a una gran cantidad de clientes dispersos geográficamente. Se cuenta con un número limitado de vehículos para satisfacer la demanda de los clientes, los cuales son enviados al inicio desde un depósito central. El problema se genera al determinar qué vehículo visita a cada cliente y en que orden lo hará, donde el objetivo es minimizar los costos, lo cual se traduce en la distancia total recorrida.

El VRP tiene muchas variantes que contemplan restricciones adicionales y múltiples variables, cada una de las variantes aproximándose a una realidad general, también existiendo múltiples métodos para la resolución de cada variante del problema.

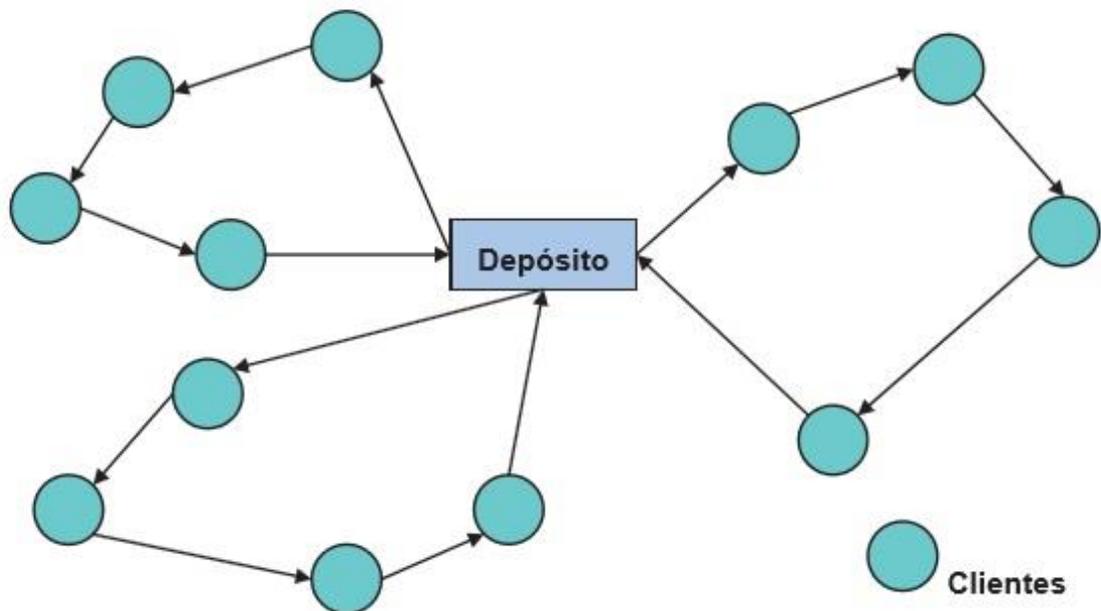


Figura V.1: Forma Gráfica del problema de enrutamiento de vehículos clásico.

Fuente: (Rocha , González, & Orjuela, 2011).

En la Figura V.1 se observa gráficamente el funcionamiento del problema, las flechas indican las rutas de los vehículos, siendo los círculos la ubicación de los clientes y el depósito en el centro. Para este caso en particular, se puede visualizar que se cuenta con 3 vehículos que parten del depósito, visitan sus clientes específicos según la ruta y vuelven al punto de partida.

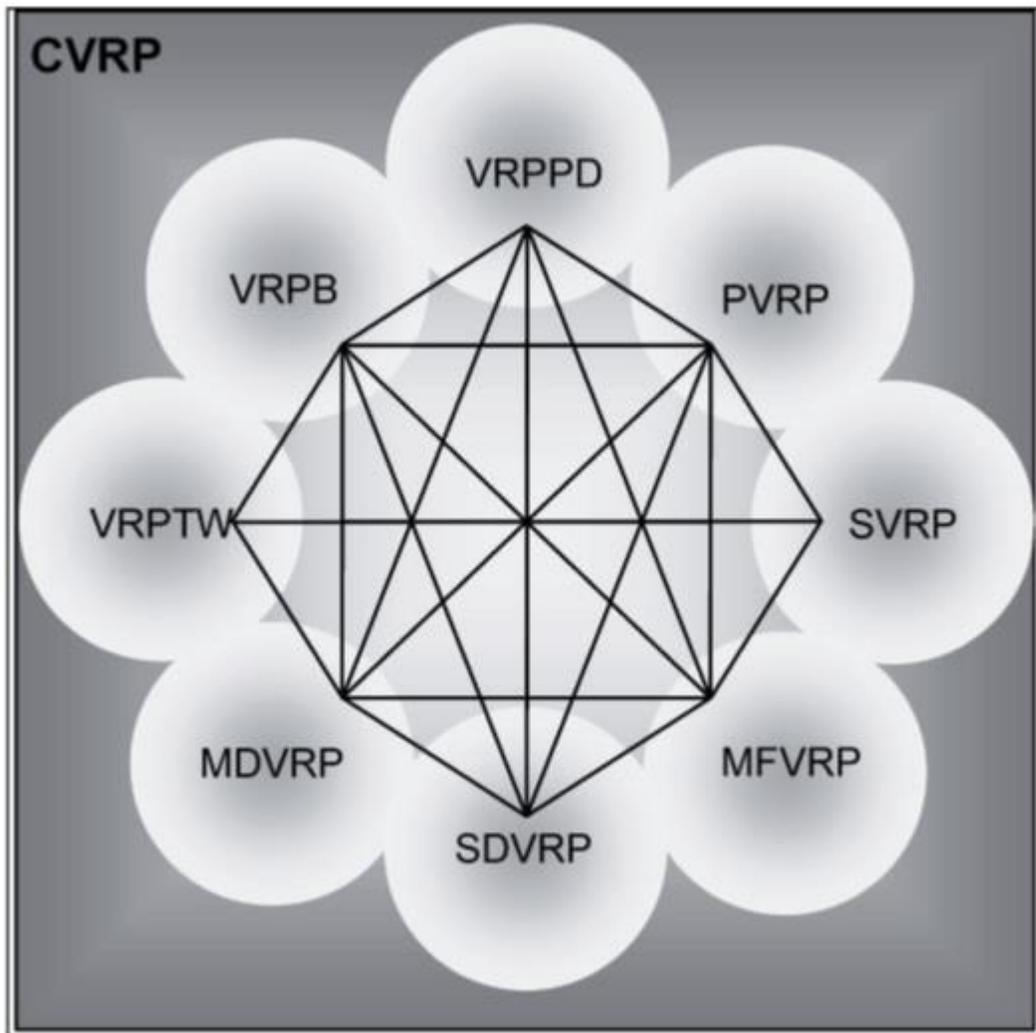


Figura V.2: Familia VRP.

Fuente: (Rocha , González, & Orjuela, 2011).

En la Figura V.2 se muestra un diagrama de la familia de los VRP, donde algunos autores como Guillermo González Vargas y Felipe González Aristizábal (“Metaheurísticas Aplicadas al Ruteo de Vehículos. Un caso de Estudio. Parte 1: Formulación del Problema”, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia, pp. 149-156, 2006.), la subdividen en 8 casos típicos los cuales pueden compartir características, dando lugar a todo un universo de problemas VRP.

Existen múltiples variantes del VRP, donde cada variante se acerca a una aproximación de realidad genérica, agregando restricciones y variables al problema original. La combinación de dos o más variantes crea un caso de más realismo, pero la complejidad aumenta de manera considerable. Es complejo modelar un VRP que contenga todos los elementos posibles, siempre hay factores que no se consideran y una complejidad mayor si se llegaran a considerar el máximo de los factores, sin embargo, en las organizaciones siempre hay tendencias en las cuales las variables se enfocan para modelar su realidad para algún caso específico.

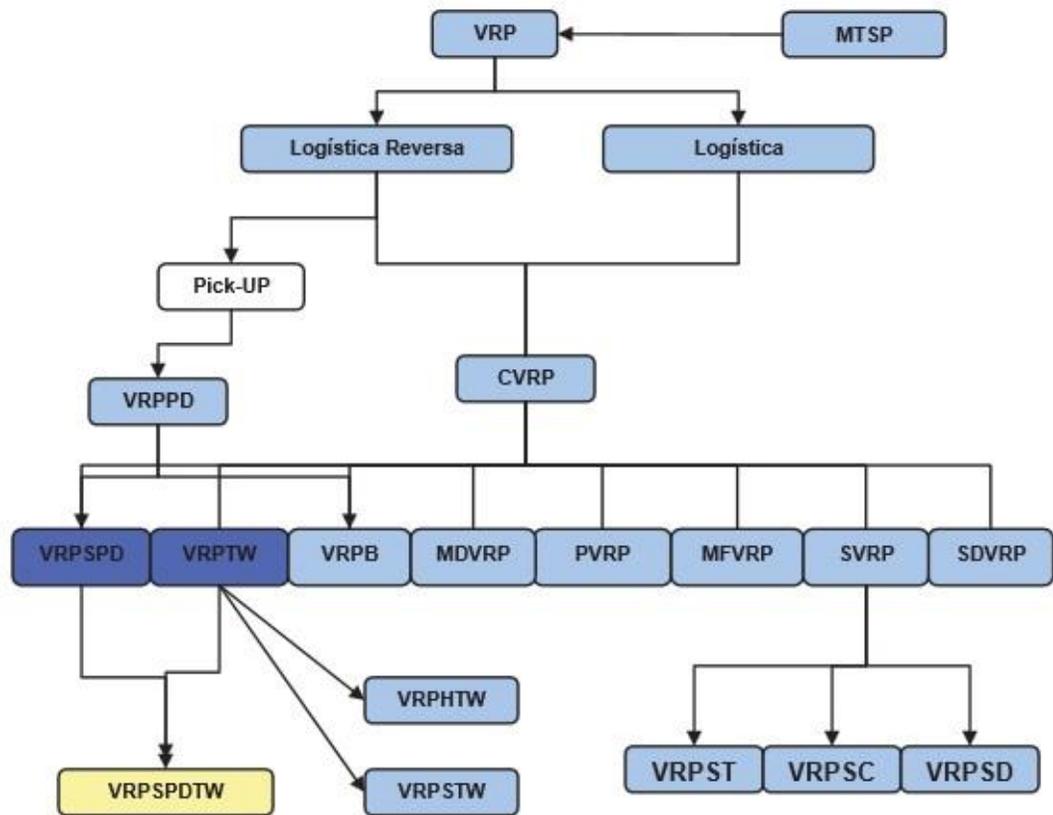


Figura V.3: Árbol de clasificación de variantes del VRP.

Fuente: (Peña, 2009).

En la Figura V.3 se muestran las variaciones y derivaciones del Problema de enrutamiento de Vehículos. VRPPD (VRP con entregas y recolecciones), VRPSPD (VRP con entregas y recolección simultáneas), SVRP (Familia de VRP con variables estocásticas), SVRP (VRP con demandas estocásticas), VRPSC (VRP con clientes estocásticos), VRPST (VRP con tiempos estocásticos), MDVRP (VRP con múltiples depósitos), VRPTW (VRP con ventanas de tiempo), VRPSTW (VRP con ventanas de tiempo suaves), VRPHTW (VRP con ventanas de tiempo duras), CVRP (VRP con capacidades determinísticas de los vehículos), PVRP (VRP periódico), SDVRP (VRP con

entregas divididas), VRPB (VRP con retornos), FMVRP (Carga Mezclada VRP). (Peña, 2009).

5.1.1. Ruteo de vehículos con periodicidad

El problema de ruteo de vehículos con periodicidad o PVRP (por sus cifras en inglés *Periodic Vehicle Routing Problem*) consiste en que una cantidad determinada de clientes pueden ser visitados más de una vez con una cierta periodicidad para un horizonte de planificación (M días, por ejemplo). Los días de visita para cada cliente se pueden elegir de un determinado conjunto de patrones de visita factibles. Por ejemplo, considerando un horizonte de planificación semanal, un cliente que requiere dos visitas y cuyos patrones se dan como sea posible (2,4) y (1,3), tendrá que ser visitado los martes y jueves o lunes y miércoles.

Así, el PVRP requiere de tres grandes decisiones:

- i) Seleccionar el patrón de visita factible para cada cliente.
- ii) Asignación de las combinaciones de días en el cliente elegido para cada viaje.
- iii) El ruteo de vehículos para cada día del horizonte de planificación.

Además, cada ruta tiene que empezar y terminar en el depósito y cumplir con las restricciones de capacidad y duración.

En relación con las aplicaciones prácticas de esta variante de VRP, es utilizado en la recogida de residuos y materiales reciclables, distribución de productos y su recogida, operaciones de mantenimiento y cuidado de la salud (Toth & Vigo).

5.1.2. Ruteo de vehículos con instalaciones satelitales

El problema del ruteo de vehículos con instalaciones satelitales o VRPSF (por sus cifras en inglés *Vehicle Routing Problem with satellite facilities*) consiste en el reabastecimiento de productos o insumos a un número de clientes con una demanda específica y que se encuentran geográficamente dispersos en un área. Básicamente, el problema consiste en que una flota de vehículos homogéneos está disponible en un depósito central para proporcionar servicio a los clientes en el transcurso del día. En este caso, cuando el conductor(distribuidor) agota su suministro de mercancía durante la jornada laboral, no es necesario que vuelva al depósito debido a que se cuenta con la presencia de instalaciones satelitales intermedias que cargan el vehículo con lo necesario para continuar con la labor de abastecimiento. Una de las decisiones principales de este tipo de problema, es dónde y cuando reponer un vehículo en alguna instalación intermedia. El objetivo de este tipo de problema es minimizar la distancia total recorrida por días y las restricciones principales son de capacidad y tiempo de las rutas. Además, hay que considerar que existe una limitación de jornada laboral diaria y se planifican las operaciones para un horizonte determinado (generalmente para una semana). Finalmente, cabe mencionar que este modelo se aplica en situaciones reales de abastecimiento de combustibles u otros insumos a puntos de demanda o clientes (F. BARD, HUANG, DROR, & JAILLET, 1998).

5.1.3. Ruteo de vehículos con paradas intermedias

El problema de ruteo de vehículos con paradas intermedias o VRPIS (por sus cifras en inglés *vehicle routing problems with intermediate stops*) consiste en que un número de vehículos homogéneos disponibles pueden hacer ciertas paradas intermedias durante la ruta para luego continuar con el servicio a los puntos de demanda de ciertos productos o insumos en un área geográfica. El objetivo principal de estas paradas intermedias es evitar volver al depósito durante la jornada laboral del día. En estas estaciones, se permite que los vehículos hagan reposición de mercancías, abastecimiento de combustible (o recargar batería en caso de vehículos eléctricos) y descarga de mercancías o eliminación de residuos recogidos. Además, hay que considerar que las paradas son opcionales y que el tiempo transcurrido en ellas depende de factores como el nivel de combustible o de carga de los vehículos que deciden ingresar en estas. Dentro de este problema de la familia VRP, es importante mencionar el ruteo con vehículos eléctricos de batería debido a que estos necesitan parar para recargar en las rutas más largas debido al reducido alcance. Por otra parte, este tipo de transporte ha ganado interés debido a que no emiten gases contaminantes en la ciudad, son eficientes en las paradas (tiempo y espacios) y tienen bajos niveles de ruidos. El objetivo de VRPIS es minimizar los costos totales compuesto por los gastos de viaje y los costos fijos para el despliegue de vehículos. Las principales restricciones son de capacidad y tiempo en ruta, considerando además una jornada laboral diaria y periodo de planificación. Finalmente, cabe mencionar que dentro de las aplicaciones prácticas esta la distribución de aceites para calefacción, mantenimiento de carreteras, entre otros (Schneider, Stenger, & Hof, 2015).

Ya habiendo hecho esta revisión global de los problemas más atingentes a esta tesis, corresponde ahora mencionar y abordar los trabajos, investigaciones y aportes realizados por distintos autores que han profundizado el estudio del problema de inspección y mantenimiento de puentes, como un caso particular de VRP aplicado además a una instancia específica.

En la literatura, el problema de inspección y mantenimiento de puentes (BIRP) ha sido estudiado como un caso especial del VRP por autores como (Huang et al. 2018). El problema es abordado como un conjunto de puentes localizados geoespacialmente en un área determinada, que requieren ser visitados por un equipo de inspección en un horizonte de planificación. El equipo inicia su recorrido en un depósito central el día k (por ejemplo), visita un conjunto de puentes y al concluir la jornada laboral diaria, se permite que hospede en un alojamiento disponible de un conjunto de éstos, sí se encuentra lejos del almacén. De esta forma, el hostel seleccionado será el punto de partida del circuito el día $k+1$ para continuar con la labor de inspección de estructuras restantes y así, retornar al depósito central el día que se visite el último puente. Este problema resuelto con dos escenarios, en donde en el primero se cuenta con un equipo de inspección para visitar todos los puentes sin un periodo de inspección limitado. En el segundo, se cuenta con varios equipos de inspección que deben visitar todos los puentes bajo un plazo de tiempo determinado.

Así, el problema consiste en encontrar rutas eficientes para la planificación de inspección y mantención de puentes con el objetivo de minimizar los costos totales de inspección (equipos, alojamientos, distancia total recorrida). En las restricciones, cabe mencionar que la duración de la jornada laboral diaria da sentido a hospedar en algún alojamiento disponible y, por ende, al nuevo problema (BIRP) aportado recientemente a la literatura existente. Los autores utilizan el ACO (algoritmo de colonias de hormigas, basado en la liberación de feromonas por parte de estas que indica a las demás que la mayor

concentración de esta sustancia en el camino muestra la ruta más corta para buscar alimentos desde un origen) para resolver el problema y un mecanismo de búsqueda local para mejorar la calidad de las soluciones existentes. Además, utilizan el software de optimización AMPL para obtener las soluciones de los distintos escenarios con instancias específicas dentro de un tiempo razonable.

En cuanto al modelo propuesto, es importante señalar que los autores no incluyen el tiempo que tarda un equipo desde el origen a un puente al comienzo de la jornada laboral el día uno (como parte del periodo de inspección). Además, consideran tarifas homogéneas para todo el conjunto de alojamientos disponibles y utilizados. Por otra parte, no se permite que un equipo, que inicia su recorrido en el depósito, después de visitar n puentes pueda volver al origen el mismo día k para continuar con la labor el día $k+1$. También, cabe mencionar que se podría visitar un alojamiento luego del depósito en el primer día del horizonte de planificación. Además, se resuelven solamente instancias test de hasta 100 puentes y 20 alojamientos.

Adicionalmente, se pretende agregar el ruteo de vehículos con múltiples depósitos o MDVRP (por sus cifras en inglés multi-depot vehicle routing problem) al problema en estudio, con el objetivo de ver como cambian las soluciones del problema original cuando se cuenta con más de un depósito o almacén localizado geoespacialmente dentro de un área. El MDVRP es parte de la familia VRP y consiste en que se tiene más de un depósito dentro de la región, con capacidades específicas y actúan como punto de origen y de destino de un circuito. Cada origen tiene asociado una flota de vehículos y un conjunto de clientes. En general, los vehículos homogéneos o heterogéneos parten de los almacenes, visitan clientes asociados a estos en la ruta (considerando capacidades de los vehículos y cantidades demandadas por clientes) y vuelven al depósito al terminar el recorrido. De esta manera, se

intenta buscar rutas óptimas que minimicen los costos totales de transporte (proporcionales a la distancia total recorrida) sujeto a limitaciones particulares según la situación en estudio para un horizonte específico. También, es importante señalar que no necesariamente los clientes más cercanos a un depósito estarán asociados a este (Salhi & Imran, 2013).

En esta tesis se pretende abordar ciertos “vacíos” identificados en la propuesta de (Huang et al. 2018) y también, se aplicará con énfasis el modelo estándar planteado a una instancia real como los puentes de la provincia de Valparaíso y así, proponer un diseño de rutas para la planificación de inspección y mantenimiento de puentes de la zona minimizando los costos totales de inspección. Además, se pretende agregar múltiples depósitos en distintos puntos de la zona y también, se incluirán nuevas variantes mencionadas con anterioridad al modelo para tener una mayor gama de posibilidades que se aproximan a la realidad.

VI. Descripción del modelo

El modelo desarrollado a continuación permite resolver eficientemente el problema etiquetado como “ruteo de vehículos para la inspección de puentes” para instancias de tamaño significativo, respetando restricciones de *PVRP*, *VRPSF*, *VRPIS* y *MDVRP* (*horizonte de planificación, jornada laboral diaria, paradas intermedias opcionales, múltiples depósitos o almacenes, tiempo y capacidad de ruta, etc.*), minimizando los costos totales de inspección (distancia total recorrida, equipos de inspección y alojamientos) (Huang et al. 2018).

El ruteo de vehículos para la inspección de puentes o BIRP (por sus cifras en inglés bridge inspection routing problem) puede ser visto considerando dos escenarios posibles (del problema original) que serán descritos a continuación y que tienen los siguientes supuestos en común (incluye adicionales):

- Se proporcionan las localizaciones de los puentes, alojamientos disponibles y depósito (o depósitos) para una región junto con el tiempo requerido para completar cada trabajo de inspección de puentes.
- Todos los puentes deben ser inspeccionados exactamente una vez, sin embargo, no se deben visitar todos los alojamientos disponibles.
- El equipo de inspección debe apartarse del depósito el primer día y volver a éste el día que termine los trabajos de inspección.
- El costo del viaje es una función de la distancia total recorrida en el viaje.
- La ruta de inspección para un día parte desde un alojamiento (a excepción del primer día) y termina en uno de los alojamientos disponibles (a excepción del último día). Además, se permite que un alojamiento disponible pueda ser visitado más de una vez dentro del periodo de inspección.

- El tiempo de inspección de un puente es menor que la duración de la jornada laboral diaria para un equipo de inspección.
- Las tarifas de los alojamientos disponibles y tentativos son variables.
- El tiempo de trabajo de un día se calcula desde el momento que parte del origen o alojamiento hasta el momento que termina la inspección del último puente de ese día.
- En el primer día u otro dentro del periodo de inspección, se permite que el equipo inicie en el depósito y visite de inmediato un alojamiento disponible.
- Un equipo de inspección que parte del depósito, puede visitar n puentes y volver al depósito el mismo día para continuar con los restantes al siguiente día.

El primer escenario (escenario 1), presenta el BIRP como una versión extendida de TSP (problema del vendedor viajero o por sus cifras en inglés traveling salesman problem). Similar al TSP, el BIRP implica la determinación de una ruta que parte de un depósito, inspecciona una cierta cantidad de puentes y vuelve al origen. La diferencia entre el BIRP y el TSP es que el BIRP involucra una restricción de tiempo de trabajo (es decir, una jornada laboral diaria). Sí el equipo de inspección no logra visitar todos los puentes dentro de esa limitación de tiempo de trabajo, se le permite que pueda pasar la noche en un hostel u hotel de un conjunto de alojamientos disponibles para descansar y reanudar la labor de inspección de puentes restantes al día siguiente. A continuación, se ilustra una secuencia que puede ser una solución factible para este escenario.

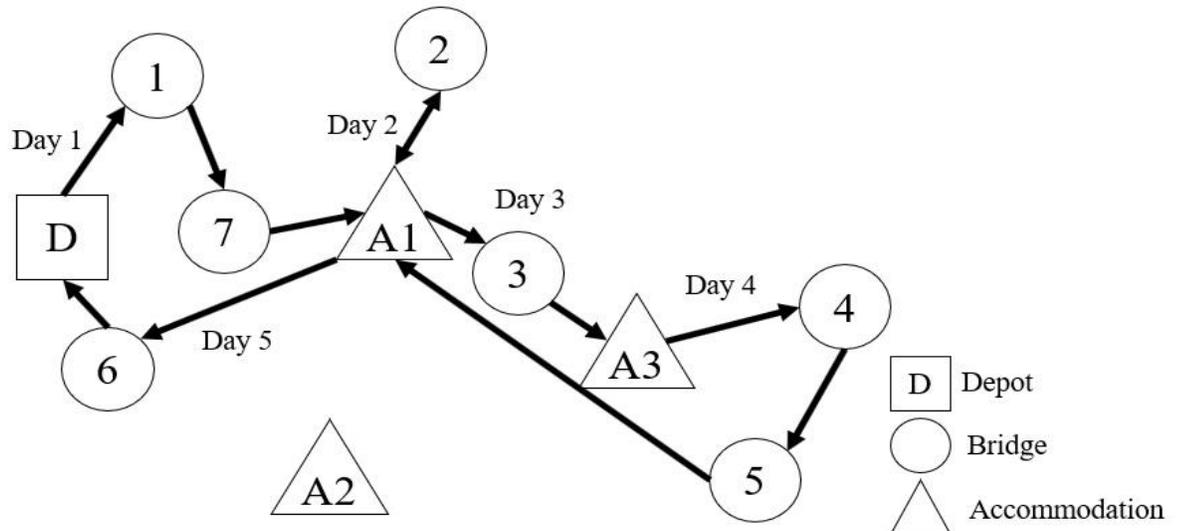


Figura VI.1: Escenario 1: 5 días, 1 equipo de inspección

Fuente: (Huang, Huang, Blazquez, & Paredes-Belmar, 2018)

La Figura VI.1 muestra un ejemplo de una ruta factible para un equipo de inspección. El equipo se aparta del depósito el día 1, tarda 5 días en inspeccionar siete puentes y utiliza dos alojamientos disponibles. Por lo general, un periodo de inspección pequeño implica una distancia total recorrida pequeña y un menor costo. Un corto tiempo de viaje acumulado es necesario para completar todas las inspecciones en el menor número de días laborales. En este caso, el objetivo es hallar las rutas con el menor costo total de inspección (gastos de viaje y alojamientos).

El segundo escenario (escenario 2), BIRP se modela como una extensión de VRP y, por ende, se obtienen las rutas con los menores gastos de viajes, alojamientos y equipos de inspección. Todos los puentes deben ser inspeccionados dentro de un periodo de inspección limitado. Esta restricción de tiempo obliga a que realice la labor más de un equipo (o vehículo). Así, más de un equipo de inspección lleva a cabo toda la tarea de inspección de puentes.

Además, el costo de los equipos de inspección queda definido como el costo fijo de enviar un equipo de inspección por el número de equipos utilizados. Cabe destacar, que se mantienen los supuestos restantes del escenario 1.

A continuación, se ilustra una secuencia de rutas viables para este escenario.

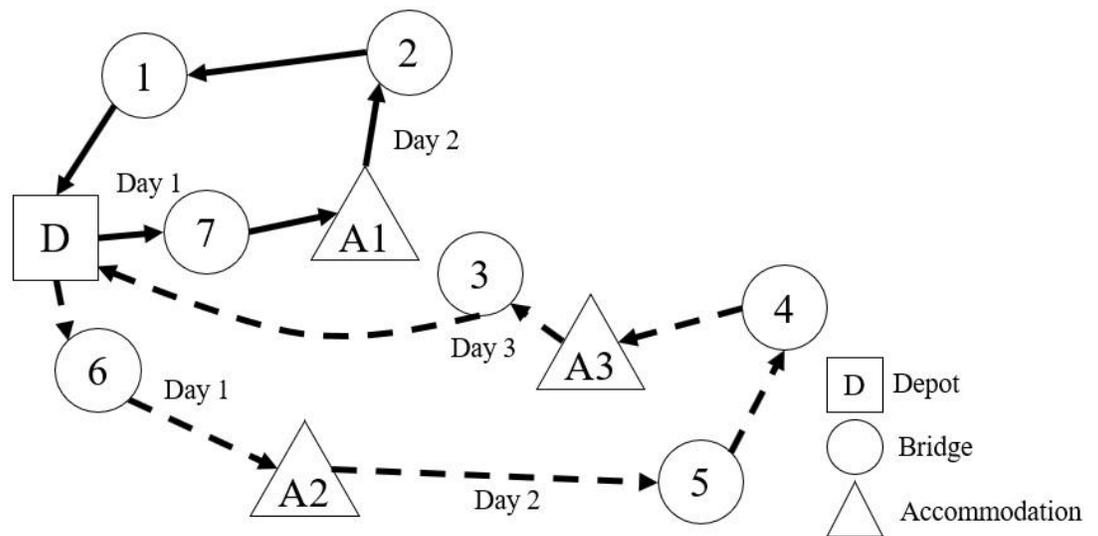


Figura VI.2: Escenario 2: 3 días, 2 equipos de inspección

Fuente: (Huang, Huang, Blazquez, & Paredes-Belmar, 2018)

La Figura VI.2 ilustra un ejemplo de una ruta factible con la suposición de que todos los puentes deben ser inspeccionados dentro de un número predefinido de días (en este caso, 3 días). En esta situación, los dos equipos de inspección se envían desde el depósito el día 1 para completar todos los trabajos de inspección. Un equipo de inspección toma 3 días para inspeccionar cuatro puentes utilizando dos alojamientos disponibles y el otro, tarda 2 días en inspeccionar tres puentes y pasando una noche en un hostel u hotel.

Además, se pueden considerar nuevos escenarios como aporte al problema original, con el objetivo de ver como cambian las soluciones bajo diversas condiciones. A continuación, serán descritos los nuevos contextos para el BIRP.

El tercer escenario (escenario 3), BIRP se modela como una extensión de VRP y, por ende, se obtienen las rutas con los menores costos de viajes, alojamientos y equipos de inspección. Al igual que el escenario 2, todos los puentes deben ser inspeccionados dentro de un periodo de inspección limitado. Esta restricción de tiempo junto con los múltiples depósitos obliga a que realice la labor más de un equipo (o vehículo). Así, más de un equipo de inspección lleva a cabo toda la tarea de inspección de puentes. Este nuevo escenario que se intenta aportar al modelo vigente para contar con nuevas opciones de soluciones factibles para este problema comparte los mismos supuestos que el escenario 1 y 2, sin embargo, en esta situación se tendrá un nuevo conjunto de nodos de origen o depósitos, es decir, ya no será visto el almacén como un parámetro del modelo. Además, cabe destacar que la presencia de más depósitos evita o disminuye los gastos en hospedaje y así, contribuye a la disminución del costo total de inspección.

A continuación, se ilustra una secuencia de rutas factibles para este escenario.

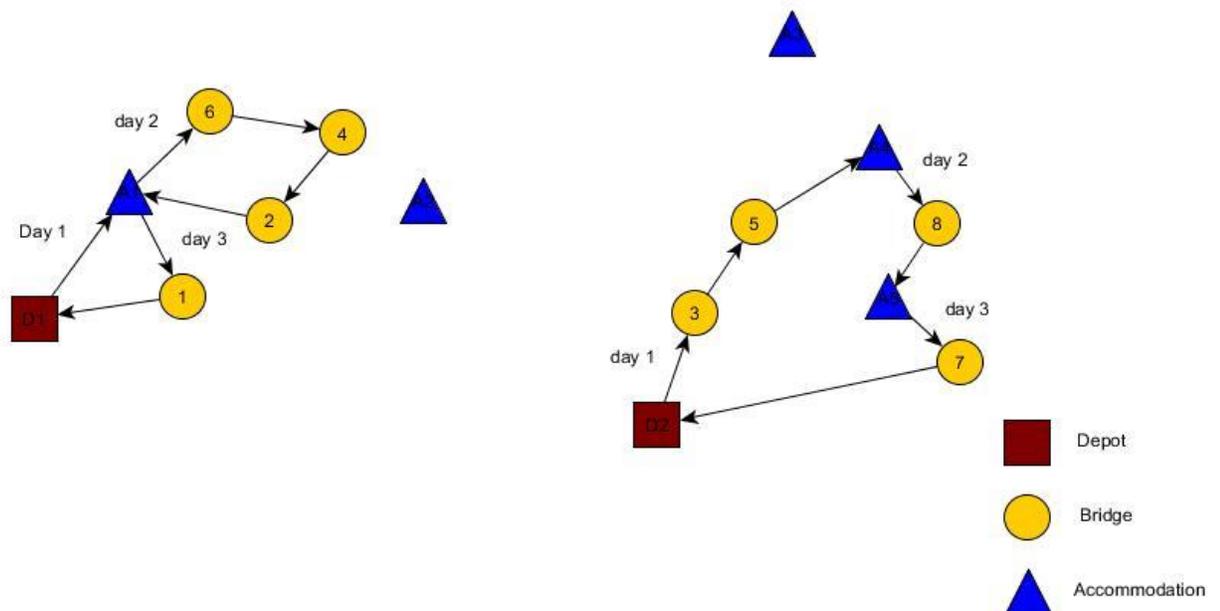


Figura VI.3: Escenario 3: 3 días, 2 equipos de inspección

Fuente: Elaboración del autor

En la Figura VI.3 se muestra un ejemplo de una ruta factible con la suposición de que todos los puentes deben ser inspeccionados dentro de un número previamente definido de días (en este caso, 3 días) y se tienen 2 depósitos o puntos de origen de los circuitos, los cuales están localizados geoespacialmente en distintos puntos de la zona. En esta situación, los dos equipos de inspección son enviados el día 1 desde cada uno de sus depósitos respectivos para completar todos los trabajos de inspección de puentes. El equipo de inspección que parte desde el depósito 1 (D1) se demora 3 días en inspeccionar cuatro puentes y utilizando un alojamiento disponible por dos noches. El equipo que parte desde el depósito 2 (D2) se demora 3 días en inspeccionar cuatro puentes y utilizando dos alojamientos disponibles.

El cuarto escenario (escenario 4), al igual que el escenario 1, presenta el BIRP como una versión extendida del problema del vendedor viajero o TSP. Comparte los mismos supuestos que el escenario 1, sin embargo, considera además que un equipo de inspección puede visitar un puente o un alojamiento disponible luego de iniciar la labor de inspección desde el origen. Además, incluye el tiempo que tarda un equipo en llegar a un puente desde otro puente, depósito o alojamiento para cualquier día dentro del período de inspección y también, permite que un equipo salga y llegue al depósito más de una vez.

A continuación, se muestra una secuencia de rutas factibles para este escenario.

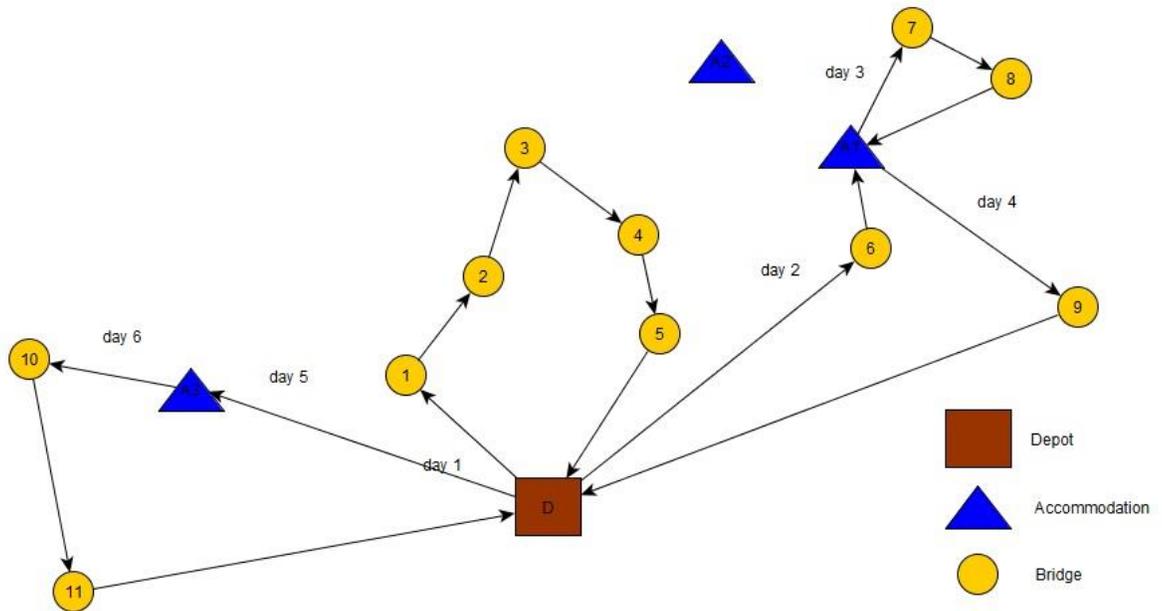


Figura VI.4: Escenario 4: 6 días, 1 equipo de inspección

Fuente: Elaboración del autor

En la Figura VI.4 se muestra un ejemplo de una ruta factible para un equipo de inspección que debe visitar todos los puentes sin un periodo de inspección limitado. En este caso particular, un equipo de inspección demora 6 días en visitar 11 puentes utilizando 2 alojamientos disponibles. En este caso, cabe destacar que el día 1 de la labor de inspección conviene volver al depósito en lugar de hospedar en algún alojamiento disponible y, por otra parte, el alojamiento 1 (A1) es visitado 2 veces en distintos días de inspección. En este escenario, el objetivo es hallar las rutas que minimicen los costos totales de inspección (distancia total recorrida y alojamientos) considerando las nuevas variantes previamente definidas.

6.1. Formulación matemática del modelo

El modelo de programación entera mixta desarrollado se presenta a continuación, el cual resuelve el BIRP para el escenario 1 y 2.

6.1.1. Conjuntos

N :	Conjunto de nodos de puentes.
M :	Conjunto de nodos de alojamientos.
K :	Conjunto de días de inspección.
T :	Conjunto de equipos de inspección.

$$MM = \{ (i,j) \in M \times M \}$$

$$A = \{ (i, j) \in N \cup M \cup \{o\} \times N \cup M \cup \{o\} / i \neq j, (i,j) \notin MM \}$$

6.1.2. Parámetros

D :	Número de días de inspección específico.
c_{ij} :	Costo por arco (i, j) . Depende de la distancia recorrida.
o :	Nodo del depósito.
v :	Costo de enviar un equipo de inspección.
tv_m :	Tarifa del alojamiento m por una noche.

t_{ij} :	Tiempo de viaje por el arco (i, j).
w_i :	Tiempo de trabajo requerido para el puente i.
Q:	Tiempo total de trabajo por 1 día.

6.1.3. Variables de decisión

$x_{ij}^{k\tau} = \{1, \quad \text{si el arco } (i, j) \in A \text{ esta atravesado en el día } k$
 $\in K \text{ por el equipo de inspección } \tau \in T. 0,$
si no

$y_i^{k\tau} = \{1, \quad \text{si el alojamiento } i \in M \text{ es visitado en el día } k$
 $\in K \text{ por el equipo de inspección } \tau \in T. 0, \quad \text{si no}$

$c_i^{k\tau} = \text{Tiempo acumulado para viajar al nodo } i \in N \cup M \cup \{o\} \text{ por el equipo } \tau$
 $\in T \text{ el día } k \in K$

6.1.4. Función objetivo

A continuación, se expresa la función que minimiza los costos totales de inspección (costos del viaje, alojamientos y equipos de inspección) como Z. Notar que la tercera expresión (costo total de los equipos de inspección) desaparece para el escenario 1, ya que se tiene solo un equipo de inspección.

$$\begin{aligned}
 \text{Min } Z = & \sum_{k \in K} \sum_{(i,j) \in A} \sum_{\tau \in T} c_{ij} * x_{ij}^{k\tau} + \sum_{i \in M} \sum_{k \in K} \sum_{\tau \in T} tv_i * y_i^{k\tau} + v \\
 & * \sum_{k \in K} \sum_{j \in NUM} \sum_{\tau \in T} x_{oj}^{k\tau} \quad (1)
 \end{aligned}$$

Z cuantifica el costo total de inspección que esta compuesto por tres expresiones: donde la primera de izquierda a derecha se refiere al costo total del viaje que es una función de la distancia total recorrida, la segunda se refiere al costo total de los alojamientos disponibles y utilizados en las rutas y la tercera se refiere al costo total de los equipos de inspección que salen del depósito el día 1.

6.1.5. Restricciones

A continuación, se presentan las restricciones que caracterizan el BIRP.

Restricciones de ruteo de vehículos con capacidad

Visita única:

$$\sum_{k \in K} \sum_{\substack{j \in MUN \\ (i,j) \in A}} \sum_{\tau \in T} x_{ij}^{k\tau} = 1 \quad \forall i \in N \quad (2)$$

$$\sum_{k \in K} \sum_{\substack{i \in M \cup N \\ (i,j) \in A}} \sum_{\tau \in T} x_{ij}^{k\tau} = 1 \quad \forall j \in N \quad (3)$$

(2) y (3) aseguran que cada puente se visite exactamente una vez durante el periodo de inspección.

Balance en alojamientos:

$$\sum_{\substack{i \in N \cup \{o\} \\ (i,m) \in A}} x_{im}^{k\tau} = \sum_{\substack{j \in N \cup \{o\} \\ (m,j) \in A}} x_{mj}^{k+1,\tau} \quad \forall m \in M, \tau \in T, k \in K : k < |K| \quad (4)$$

Asegura que cada equipo de inspección que visita un alojamiento al término del día debe dejar dicho hostel el siguiente día.

Balance de puentes:

$$\sum_{\substack{i \in N \cup M \cup \{o\} \\ (i,n) \in A}} x_{in}^{k\tau} = \sum_{\substack{j \in N \cup M \cup \{o\} \\ (n,j) \in A}} \sum_{k \in K} x_{nj}^{k\tau} \quad \forall n \in N, k \in K, \tau \in T \quad (5)$$

Asegura que la cantidad de puentes visitados por un equipo de inspección en un día del periodo de inspección correspondan a dicho día.

Entrada al depósito:

$$\sum_{k \in K} \sum_{\substack{i \in N : \\ (i,o) \in A}} x_{io}^{k\tau} = 1 \quad \forall \tau \in T \quad (6)$$

Cada equipo de inspección debe entrar al depósito una vez.

Salida del depósito:

$$\sum_{k \in K} \sum_{\substack{j \in NUM: \\ (o,j) \in A}} x_{oj}^{k\tau} = 1 \quad \forall \tau \in T \quad (7)$$

Cada equipo de inspección debe salir del depósito una vez.

Capacidad máxima de trabajo diario:

$$\sum_{i \in N} \sum_{\substack{j \in N: \\ (i,j) \in A}} t_{ij} * x_{ij}^{k\tau} + \sum_{p \in N} \sum_{\substack{i \in MUN: \\ (p,i) \in A}} w_p * x_{pi}^{k\tau} \leq Q \quad \forall k \in K, \tau \in T \quad (8)$$

Asegura que el tiempo total de trabajo de un equipo en un día del periodo de inspección no exceda la duración de la jornada laboral diaria.

Visitar puente después del alojamiento:

$$\sum_{\substack{j \in N \\ (m,j) \in A}} x_{mj}^{k+1,\tau} = y_m^{k\tau} \quad \forall m \in M, \tau \in T, k \in K: k < |K| \quad (9)$$

Asegura que si un equipo de inspección visita un alojamiento, al día siguiente debe inspeccionar un puente dentro del periodo de inspección.

Eliminar sub-tours:

$$c_j^{k\tau} \geq c_i^{k\tau} + t_{ij} - Q(1 - x_{ij}^{k\tau}) \quad \forall k \in K, \tau \in T, i \in N \cup \{0\}, j \in N \cup M, (i,j) \in A, j \neq 0 \quad (10)$$

Elimina los sub- tours, es decir, soluciones infactibles para el BIRP.

Naturaleza de las variables:

$$\begin{aligned} x_{ij}^{k\tau} &\in \{0,1\} \quad \forall (i,j) \in A, k \in K, \tau \\ &\in T \end{aligned} \tag{11}$$

$$\begin{aligned} y_m^{k\tau} &\in \{0,1\} \quad \forall m \in M, k \in K, \tau \\ &\in T \end{aligned} \tag{12}$$

$$\begin{aligned} c_i^{k\tau} &\in R_0^+ \quad \forall i \in M \cup N \cup \{o\}, k \in K, \tau \\ &\in T \end{aligned} \tag{13}$$

Periodo de inspección:

$$|K| \leq D \tag{14}$$

Limita el número de días de inspección para el escenario 2.

VII. Verificación y análisis del modelo

7.1. Verificación del modelo

Para probar el desempeño del modelo matemático propuesto se utilizó una instancia de prueba pequeña la cual incluye información de la red como depósito, puentes y alojamientos. Los costos asociados a distancias entre depósito-puente, puente-depósito, puente-puente, puente-alojamiento y alojamiento-puente son variables para cada arco del sistema y depende de la distancia recorrida entre nodos. Por otra parte, cada alojamiento tiene una tarifa por noche específica para un grupo que desee hospedarse y el costo de los grupos esta dado por el costo fijo de enviar un equipo de inspección desde el nodo origen (para el segundo escenario, dicho costo se multiplica por el número de equipos enviados). Además, cabe destacar, que cada puente tiene un tiempo de inspección específico que dependerá de la accesibilidad y estado de la estructura y también, se considera una jornada laboral diaria de 9 horas, es decir, 540 minutos para cada día del horizonte de planificación.

Esta instancia de prueba consta de 1 nodo de origen, 7 nodos puentes y 10 nodos alojamientos seleccionados de manera tentativa para la situación.

A continuación, se ilustra en la Tabla VII-1 el resumen de la instancia para ambos escenarios del BIRP, es decir, donde en el primero se tiene 1 equipo de inspección y varios días para la labor (en este caso, se configuró un horizonte de prueba de 3 días). En el segundo, hay 3 equipos de inspección y el periodo de inspección se limita a 1 día.

Tabla VII-1: Resumen instancia de prueba para ambos escenarios

Fuente: Elaboración del autor

Nodo	Localización (en Grados Decimales)	Tiempo de inspección (en Minutos)	Tarifa por noche (en CLP)
0	-33,0433611; - 71,6239929	0	0
41	-32,78588; - 71,52744	0	27.407
42	-32,78394; - 71,52737	0	45.907
43	-32,78327; - 71,52713	0	24.000
44	-32,78383; - 71,53013	0	26.037
45	-32,722; - 71,4117	0	63.000
46	-32,63548; - 71,42756	0	32.888
47	-32,63786; - 71,42968	0	68.517
48	-32,6749; - 71,43731	0	25.694
49	-32,92127; - 71,50889	0	39.740

50	-32,9219; - 71,51404	0	42.028
1	-32,63231; - 71,41994	46	0
2	-32,93309; - 71,44067	120	0
3	-32,93288; - 71,46642	110	0
4	-32,9314; - 71,47561	22	0
5	-32,97081; - 71,49971	50	0
6	-32,98257; - 71,5003	74	0
7	-32,99632; - 71,50138	104	0

Notar que los nodos identificados por {0 o 1000} corresponde al depósito, {41,42,43,44,45,46,47,48,49,50} corresponde a alojamientos y {1,2,3,4,5,6,7} corresponde a puentes que deben ser visitados (todos) dentro del periodo de inspección.

Con estos datos de entrada se espera validar el modelo y obtener rutas eficientes para el BIRP que minimicen los costos totales de inspección (costo total del viaje, alojamientos disponibles y utilizados y equipos de inspección enviados).

7.2. Análisis de ensayos

La Tabla VII-2 muestra las soluciones eficientes de la instancia pequeña para el BIRP: una ruta óptima para cada escenario que minimiza los costos totales de inspección.

Tabla VII-2: Soluciones óptimas de mínimo costo para instancia pequeña

Fuente: Elaboración del autor

Instancia	Costos totales de inspección	Gap	Ruta
1 equipo y 2 días de inspección	\$2.035.110,738	0,73%	<u>Dia1:</u> 1000-7-6-5-4-3-2-43 <u>Dia2:</u> 43-1-1000
3 equipos y 1 día de inspección	\$6.015.714,709	0,01%	<u>Equipo1:</u> 1000-6-1000 <u>Equipo2:</u> 1000-7-1000 <u>Equipo3:</u> 1000-5-4-3-2-1-1000

En relación con la instancia del escenario I (1 equipo y 2 días de inspección), el equipo visita los 7 puentes (respetando la restricción de visitar todos los puentes y exactamente 1 vez) en 2 días (notar que el periodo de inspección en este caso es indefinido) y utilizando 1 alojamiento disponible durante una noche (en este caso, el más económico dentro del conjunto de hostales u hoteles). Dado que se tiene 1 solo equipo para completar todas las labores de inspección

de puentes y, por otra parte, existe la restricción de jornada laboral diaria (en este caso, 9 horas) tiene sentido el uso de hostales u hoteles disponibles para descansar al fin del día y continuar al siguiente con el trabajo restante. Cabe mencionar que el primer día el equipo parte del depósito, visita los 6 puentes más cercanos al origen y entre ellos y termina la jornada en un hotel disponible. El segundo día, parte del hotel visita el puente restante y vuelve al depósito. De esta manera, la solución del BIRP para este escenario cumple con todas las restricciones del modelo estándar.

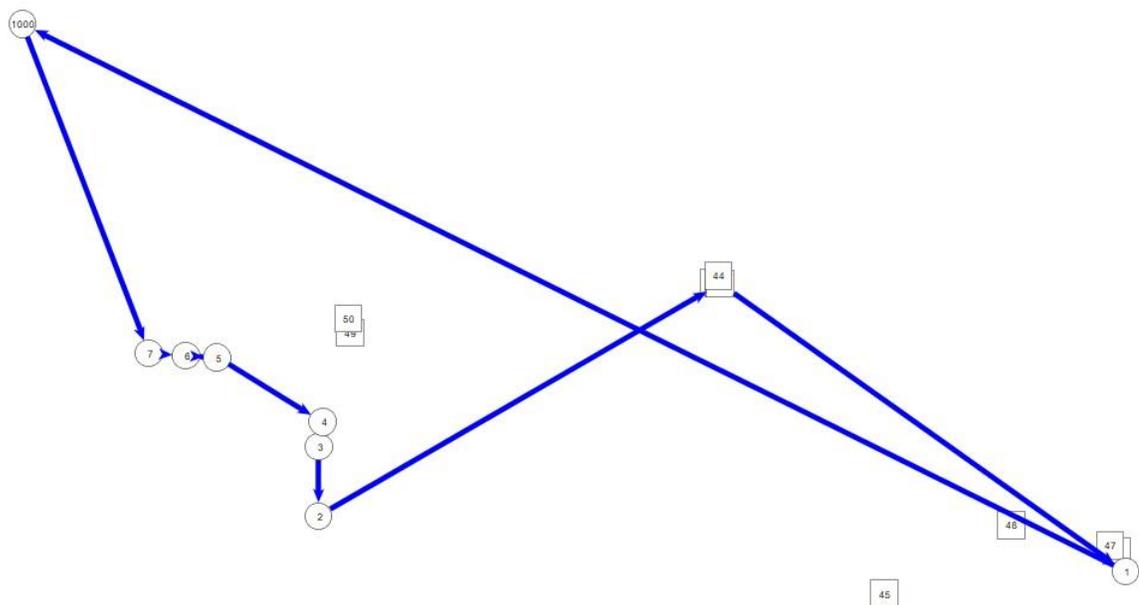


Figura VII.1: Ruta de mínimo costo de escenario I para instancia pequeña

Fuente: Elaboración del autor

El color azul de la Figura VII.1 representa el equipo de inspección que recorre la ruta eficiente, los círculos son puentes (incluyendo el depósito) y los cuadrados representan alojamientos.

En cuanto a la instancia del escenario II (3 equipos y 1 día de inspección), los 3 equipos salen del origen el primer día, visitan los 7 puentes (todos y exactamente 1 vez) y vuelven al depósito el mismo día. Al tener un periodo de inspección limitado da origen a que realice la labor más de 1 equipo de inspección de puentes. Cuando se tiene más de 1 grupo y los tiempos de inspección de cada puente son pequeños (y menor a la duración de la jornada laboral) y, por otra parte, las distancias entre los distintos nodos que forman la red son cortas, el uso de alojamientos es menos probable. Los 3 equipos salen del origen el primer día, el primero y segundo visitan 1 puente cercano (cada uno) y vuelven al depósito el mismo día. El tercero, visita los 5 puentes restantes (más lejanos) y vuelve al origen durante el día. No se utiliza ningún alojamiento disponible. De esta forma, las soluciones del BIRP para este escenario cumple con todas las restricciones del modelo estándar.

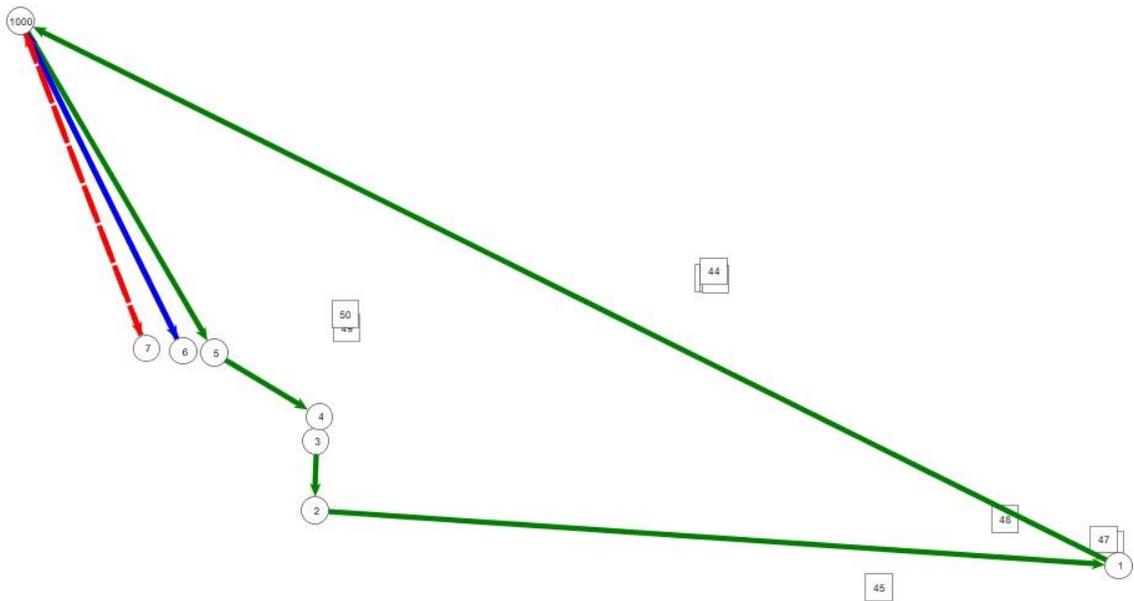


Figura VII.2: Ruta de mínimo costo de escenario II para instancia pequeña

Fuente: Elaboración del autor

Cada color distinto de la Figura VII.2 representa un equipo de inspección que recorre una ruta específica que depende de la solución del modelo. Los círculos representan puentes (incluyendo el depósito) y los cuadrados alojamientos.

Finalmente, al tener un gap bastante pequeño para la instancia de prueba de ambos escenarios, las rutas obtenidas son eficientes y están muy cercanas al óptimo global.

VIII. Caso de estudio

13.1. Descripción de la instancia

De acuerdo con el alcance de esta tesis, se ha planteado un caso hipotético de estudio en la Provincia de Valparaíso, basado en toda la red de transporte habilitada en la ciudad, es decir, calles, caminos, carreteras, etc. Se proporciona la localización geoespacial de algunos puentes de la Provincia (dado que aun las coordenadas de las estructuras restantes esta en proceso) por parte de Dirección de Vialidad, ubicada en la Región de Valparaíso. Dicha información de las coordenadas (en UTM) de las estructuras señala que hay 39 puentes distribuidos en diversas comunas de la Provincia (Puchuncaví, Concón, Viña del Mar, Quintero, Casablanca y Valparaíso) los que se encuentran en un estado determinado (con daños menores, buen estado, regular estado, etc.).

La Tabla VIII-1 ilustra los puentes y sus coordenadas en grados decimales. Además, se muestra el tiempo que demora la inspección de cada uno de ellos (que depende de la accesibilidad a la estructura, estado, longitud y otros factores) los cuales fueron Proporcionados (Hernandez Ortiz, Francisco;).

Tabla VIII-1: Puentes de la Provincia de Valparaíso

Fuente: Elaboración del autor

Identificador del nodo	Puentes	Latitud	Longitud	Tiempo de inspección (Minutos)
1	La Laguna	-32,6323171	-71,41994899	46
2	Limache	-32,93309294	-71,44067436	120
3	Lajarilla	-32,9328846	-71,46642733	110
4	Paso Superior Concón	-32,9314044	-71,47561382	22
5	Enlace Quillota	-32,97081338	-71,49971184	50
6	Reñaca Alto	-32,98257954	-71,50030065	74
7	Glorias Navales 1	-32,99632659	-71,50138403	104
8	Glorias Navales 2	-32,99632659	-71,50138403	72
9	Santa Julia 1	-32,99998413	-71,50963048	50
10	Santa Julia 2	-32,99998413	-71,50963048	104
11	Miraflores	-33,01882504	-71,50131316	113
12	Quilpué	-33,03626765	-71,5011104	98
13	La Quebrada	-32,68367733	-71,39664924	97
14	Sin Nombre	-32,86027999	-71,45446805	53
15	Valle Alegre	-32,80868628	-71,4418898	100
16	Sin Nombre	-32,75240996	-71,34311969	98

17	Los Manueles	-32,86249878	-71,46772418	110
18	Puchuncavi	-32,72223433	-71,41272195	63
19	Ventanas	-32,75049102	-71,47850113	84
20	Santa Julia	-32,8315096	-71,47534643	102
21	Mantagua	-32,86506727	-71,49053184	77
22	Las Gaviotas	-32,91519803	-71,49885235	67
23	Concón	-32,91961288	-71,50487788	50
24	Lo Orozco	-33,24236378	-71,44528961	111
25	Desauge Lago Peñuelas	-33,14943566	-71,56062085	96
26	Los Azules	-33,11423036	-71,65088623	91
27	Puente N°1	-33,10840406	-71,63269133	80
28	Puente N°2	-33,10941451	-71,62839324	66
29	Puente N°3	-33,1096223	-71,62666384	99
30	El Molle (El Molino)	-33,37955708	-71,38903663	119
31	Esmeralda	-33,32744467	-71,40089783	111
32	Las Tablas	-33,16773213	-71,54643658	105
33	Loreto	-33,20764895	-71,57225094	114
34	El Batro	-33,2125407	-71,5772424	89
35	Estero Las Dichas	-33,27897	-71,5198216	108
36	La Draga	-33,29115274	-71,47716294	114
37	El Carpintero	-33,24363905	-71,33151561	111
38	Sin Nombre	-33,29473561	-71,41054599	94
39	Laguna	-33,10389781	-71,66482366	58

	Verde			
--	-------	--	--	--

Una vez recopilada la información de la Tabla VIII-1, se procedió a seleccionar un depósito o punto de origen tentativo del circuito de manera arbitraria en el área de estudio y cerca de las vías de conexión. De esta manera, el origen escogido corresponde a la Seremi ubicada en Melgarejo 669, Valparaíso.

Luego, de manera similar, se seleccionó estratégicamente un conjunto de hoteles/hostales en la zona de interés y cercano a los puentes. Así, se escogió un total de 17 alojamientos ubicados en diversas comunas, los que cobran una tarifa por noche específica.

La Tabla VIII-2 muestra la ubicación del depósito y alojamientos en grados decimales junto con los precios por noche de estos últimos. La localización de los puntos se obtuvo con Google Maps.

Tabla VIII-2: Depósito y alojamientos de la Provincia de Valparaíso

Fuente: Elaboración del autor

Identificador del nodo	Depósito	Alojamientos	Latitud	Longitud	Tarifa (CLP/Noche)
1000	Seremi	-	- 33.04331	-71.6239	0
41	-	Hotel Palermo	- 32.78588	- 71.52744	27.407
42	-	Hotel Quintero	- 32.78394	- 71.52737	45.907

43	-	Hostal plaza armas	- 32.78327	- 71.52713	24.000
44	-	Hostal y cabañas La Moderna	- 32.78383	- 71.53013	26.037
45	-	Costa Quilen	-32.722	-71.4117	63.000
46	-	Hostal Maitencillo Norte	- 32.63548	- 71.42756	32.888
47	-	Cabañas Hermansen	- 32.63786	- 71.42968	68.517
48	-	Hostal Fache's house	-32.6749	- 71.43731	25.694
49	-	Riomar Apart Hotel	- 32.92127	- 71.50889	39.740
50	-	Yemanyá Hostal	-32.9219	- 71.51404	42.028
51	-	Casona Concón	- 32.92785	- 71.52579	45.000
52	-	Cabañas Concón	- 32.93139	- 71.52693	73.862
53	-	Route 68	- 33.26549	- 71.43191	32.000
54	-	Hotel Casavino	- 33.26621	- 71.36013	157.590
55	-	Hotel y Spa Casablanca	- 33.32806	- 71.38493	96.841

56	-	Cabañas Santa Fe	- 33.31516	- 71.41392	47.840
57	-	Residencial del Valle	- 33.31413	- 71.40841	45.000

Con la información de la Tabla VIII-1 y Tabla VIII-2, se localizaron dichos puntos utilizando distintas layers (capas diferentes para origen, puentes y alojamientos) en Google My Maps y como base el mapa de la Provincia de Valparaíso.

En la Figura VIII.1 se muestra el conjunto de nodos puentes, nodos alojamientos y el parámetro depósito del área de estudio.



Figura VIII.1: Depósito, puentes y alojamientos de la Provincia de Valparaíso

Fuente: Elaboración del autor

La Figura VIII.1 ilustra un círculo azul que corresponde al depósito (punto de partida y llegada del circuito), un conjunto de círculos rojos o puentes (que deben ser inspeccionados) y otro conjunto de círculos amarillos o alojamientos tentativos para la situación.

Los costos de cada arco que pertenecen a la red de nodos que ilustra la Figura VIII.1 y que forman parte de las soluciones del BIRP para dicha instancia, están

dados por una función que depende de la distancia recorrida entre nodos, es decir, distancia de viaje entre puentes (incluyendo el depósito), distancia de viaje entre puentes y alojamientos y distancia entre alojamientos y puentes. Cabe mencionar que las distancias entre alojamientos y de alojamientos al depósito o viceversa no son factibles para el BIRP según la naturaleza de sus restricciones.

Por ende, se formó una matriz de distancias entre los nodos de la figura VIII.1 que forman parte de las soluciones factibles para el problema del ruteo de inspección de puentes. Dichas distancias (en metros) se obtuvieron con Google Maps y, por lo tanto, corresponden a estimaciones de viaje entre nodos (que dependen de la hora, el día, el tránsito y otros factores).

Para obtener el parámetro (en pesos/metros) que forma parte de la función que determina el costo del viaje entre nodos, se eligió en base al rendimiento una camioneta Nissan Terrano Diesel que rinde 13,5 Kilómetros/litro para un equipo de inspección que sale del depósito el primer día del período de planificación y se consideró una estimación para el precio de la bencina en el punto de venta más económico de 582 pesos/litro para un día cualquiera. De esta manera, al dividir el precio de la bencina y el rendimiento de la camioneta (haciendo las conversiones pertinentes), se obtiene el parámetro igual a 0,0431 pesos/metros.

Los costos totales de los equipos de inspección esta dado por el costo fijo de enviar un equipo de inspección desde el origen el primer día del horizonte de planificación multiplicado por el número de equipos que realiza la labor de inspección. De esta manera, dado que el grupo lo conforma un ingeniero especialista en estructuras y técnicos, se estimó un costo fijo de 2.000.000 de pesos/equipo.

Para la restricción de tiempo máximo de trabajo por día o jornada laboral diaria que da origen al BIRP, se usó un horario de oficina de la zona de estudio de 9 horas diarias.

Con estos datos de entrada pertenecientes a la Provincia de Valparaíso, se espera validar el modelo para una instancia de tamaño significativo y obtener rutas eficientes para el BIRP en un tiempo razonable que minimicen los costos totales de inspección (costo total del viaje, alojamientos disponibles y utilizados y equipos de inspección enviados).

13.2. Resultados

El modelo fue parametrizado en lenguaje AMPL y el software utilizado para ejecutar el modelo y resolver los distintos escenarios para la instancia particular fue CPLEX versión 12.8.0 cuyas características del procesador del equipo son AMD A8-4555M APU with Radeon(tm) HD Graphics (4 CPUs), ~1.6GHz.

Cada escenario para la instancia fue resuelto por separado con un tiempo de cómputo máximo de 3.600 segundos (1 hora).

Para el escenario I del BIRP, se realizaron algunas pruebas computacionales con la instancia de la Provincia de Valparaíso cuyos resultados se resumen a continuación:

Tabla VIII-3: Soluciones para la Provincia según escenario I del BIRP

Fuente: Elaboración del autor

Instancia	Costos totales de inspección (en pesos)	Gap	Ruta
1 equipo y 10 días de inspección	2.390.963,886	14,83%	<u>Dia1:</u> 1000-28-26-39-32-25- 43 <u>Dia2:</u> 43 -11-12-27-29-14- 44 <u>Dia3:</u> 44 -9-10-38-24-37- 41 <u>Dia4:</u> 41 -30-31-13-16- 43 <u>Dia5:</u> 43 -22-23-8-6-15-20- 44 <u>Dia6:</u> 44 -4-5-3-2-21-17- 54 <u>Dia7:</u> 54 -34-36-7-18-1- 43 <u>Dia8:</u> 43 -19-35-33-1000
1 equipo y 12 días de inspección	2.250.061,014	9,5%	<u>Dia1:</u> 1000-23-22-4-17-14-15- 43 <u>Dia2:</u> 43 -35-24-37- 43 <u>Dia3:</u> 43 -27-28-34-26-39-29- 43 <u>Dia4:</u> 43 -10-9-6-7-1-13- 48 <u>Dia5:</u> 48 -19-31-

			<p>36-32-43</p> <p><u>Dia6:</u> 43-8-5-2-3- 20-44</p> <p><u>Dia7:</u> 44-12-11- 21-18-16-48</p> <p><u>Dia8:</u> 48-25-33- 30-38-1000</p>
--	--	--	---

Para las soluciones que ilustra la Tabla VIII-3, se procesaron alrededor de 28.000 a 35.000 variables y 23.000 a 28.000 restricciones. Notar que los números o identificadores de nodos que forman parte de las rutas obtenidas hacen referencia al depósito, puentes y alojamientos de las Tablas VIII-1 y VIII-2.

Las rutas para la instancia que minimizan los costos totales de inspección considerando 1 equipo de inspección y un periodo de planificación indefinido se muestran a continuación:

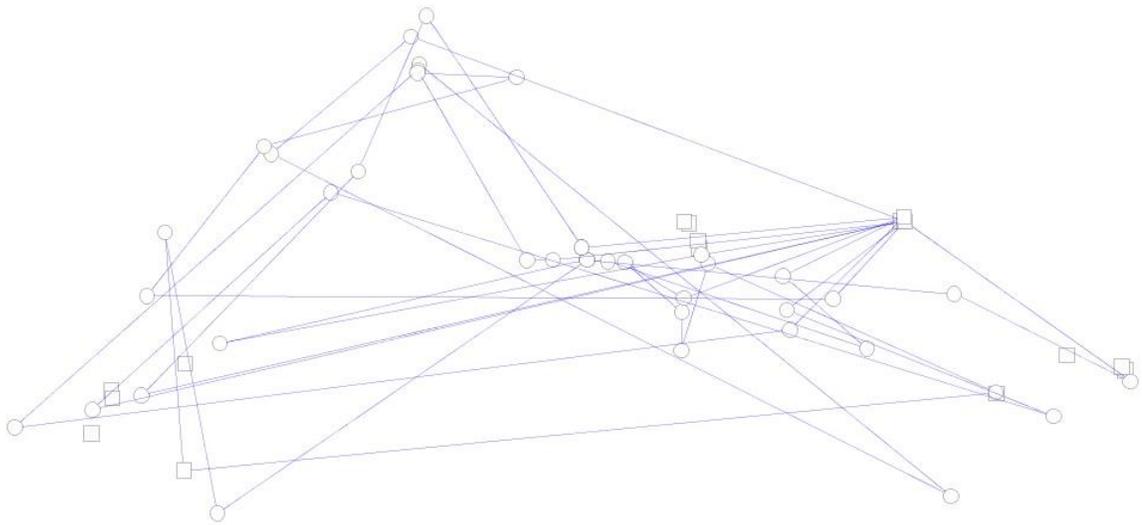


Figura VIII.2: Ruta de mínimo costo para la Provincia con instancia 1 equipo y 10 días de inspección

Fuente: Elaboración del autor

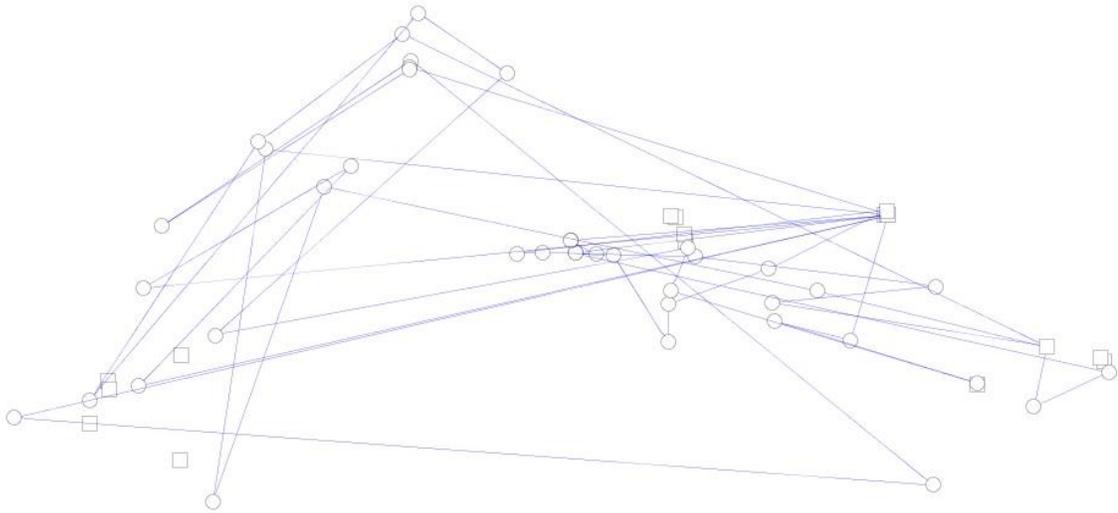


Figura VIII.3: Ruta de mínimo costo para la Provincia con instancia 1 equipo y 12 días de inspección

Fuente: Elaboración del autor

En la Figura VIII.2 y VIII.3 los círculos representan a los puentes (incluyendo el depósito) y los cuadrados a los alojamientos tentativos de la Provincia de Valparaíso.

En relación a la solución que ilustra la Figura VIII.2, el equipo de inspección tarda 8 días en inspeccionar los 39 puentes de la Provincia (todos y exactamente 1 vez) utilizando 7 alojamientos del área de estudio. El equipo hospeda en el alojamiento 43 durante 3 noches en distintos días del periodo de inspección y esto debido a que es el más económico y conveniente. Cuando concluye la jornada laboral del día y aun quedan estructuras restantes por visitar, el equipo hospeda en el hostel u hotel más cercano al último puente visitado del día considerando además la tarifa/noche. La secuencia o ruta tiene un gap de 14, 83% por lo que resulta ser una solución óptima local. Sin

embargo, al aumentar el tiempo de corrida para la instancia, podría llegar al óptimo global.

En la solución que ilustra la Figura VIII.3, el grupo demora 8 días en inspeccionar los 39 puentes (todos y exactamente 1 vez) ocupando 7 alojamientos disponibles en el área. El equipo hospeda en el alojamiento 43 por 4 noches en distintos días del periodo de inspección debido a que es el más económico. La secuencia de visita o ruta resulta ser diferente a la solución de la Figura VIII.2 pero mejor debido a que entrega un menor costo total de inspección y, por otra parte, el gap es de 9,5% por lo que se encuentra más cerca del óptimo global que la otra secuencia.

Es importante señalar que al realizar las pruebas computacionales para el escenario I del BIRP con la instancia de la Provincia de Valparaíso, para periodos de inspección menores a 10 días no encontraba soluciones factibles durante el tiempo de corrida (1 hora) y para periodos mayores a 12 días, el gap empeoraba en relación a las soluciones de las pruebas hechas, por lo que se decidió dejar las 2 pruebas computacionales de la Tabla VIII-3 y que son más representativas de la instancia.

Las soluciones del BIRP para la instancia de la Provincia considerando 1 grupo y varios días de inspección cumplen con todas las restricciones del modelo estándar.

Para el escenario II del BIRP, se realizaron algunas pruebas computacionales con la instancia de la Provincia de Valparaíso cuyos resultados se resumen en la siguiente tabla:

Tabla VIII-4: Soluciones para la Provincia según escenario II del BIRP

Fuente: Elaboración del autor

Instancia	Costos totales de inspección (en pesos)	Gap	Ruta
9 equipos y 12 días de inspección	1.864.888,784	1,93%	<u>Equipo1:</u> 1000-5-16-18-19-15-14-1000 <u>Equipo2:</u> 1000-27-24-37-34-1000 <u>Equipo3:</u> 1000-12-36-35-1000 <u>Equipo4:</u> 1000-29-38-31-30-1000 <u>Equipo5:</u> 1000-17-20-1-13-1000 <u>Equipo6:</u> 1000-7-9-6-10-11-1000 <u>Equipo7:</u> 1000-33-4-2-3-8-1000 <u>Equipo8:</u> 1000-21-23-22-28-32-25-1000 <u>Equipo9:</u> 1000-39-26-1000
12 equipos y 12 días de inspección	2.467.278,841	1,26%	<u>Equipo1:</u> 1000-8-30-36-35-1000 <u>Equipo2:</u> 1000-27-16-15-18-13-

			<p>1000</p> <p><u>Equipo3:</u> 1000-11-17-1-19-14-1000</p> <p><u>Equipo4:</u> 1000-24-37-38-31-1000</p> <p><u>Equipo5:</u> 1000-25-33-34-1000</p> <p><u>Equipo6:</u> 1000-29-1000</p> <p><u>Equipo7:</u> 1000-3-2-4-21-20-1000</p> <p><u>Equipo8:</u> 1000-26-39-1000</p> <p><u>Equipo9:</u> 1000-12-1000</p> <p><u>Equipo10:</u> 1000-32-1000</p> <p><u>Equipo11:</u> 1000-6-5-23-22-10-7-9-1000</p> <p><u>Equipo12:</u> 1000-28-1000</p>
16 equipos y 12 días de inspección	3.277.218,033	0,9%	<p><u>Equipo1:</u> 1000-10-1000</p> <p><u>Equipo2:</u> 1000-32-30-31-35-1000</p> <p><u>Equipo3:</u> 1000-</p>

			<p>27-1000</p> <p><u>Equipo4:</u> 1000-11-1-13-19-20-1000</p> <p><u>Equipo5:</u> 1000-6-1000</p> <p><u>Equipo6:</u> 1000-9-15-16-18-14-1000</p> <p><u>Equipo7:</u> 1000-29-1000</p> <p><u>Equipo8:</u> 1000-33-4-2-1000</p> <p><u>Equipo9:</u> 1000-39-1000</p> <p><u>Equipo10:</u> 1000-28-1000</p> <p><u>Equipo11:</u> 1000-8-1000</p> <p><u>Equipo12:</u> 1000-12-1000</p> <p><u>Equipo13:</u> 1000-26-1000</p> <p><u>Equipo14:</u> 1000-7-21-17-3-1000</p> <p><u>Equipo15:</u> 1000-25-24-37-38-1000</p> <p><u>Equipo16:</u> 1000-22-23-5-36-34-1000</p>
--	--	--	--

Para las soluciones que ilustra la Tabla VIII-4, se procesaron alrededor de 350.000 a 560.000 variables y 250.000 a 450.000 restricciones. Notar que los números o identificadores de nodos que forman parte de las secuencias obtenidas de las pruebas hacen referencia al depósito, puentes y alojamientos de las Tablas VIII-1 y VIII-2.

Las secuencias para la instancia que minimizan los costos totales de inspección considerando más de 1 equipo de inspección, pero con un periodo de planificación limitado se muestran a continuación:

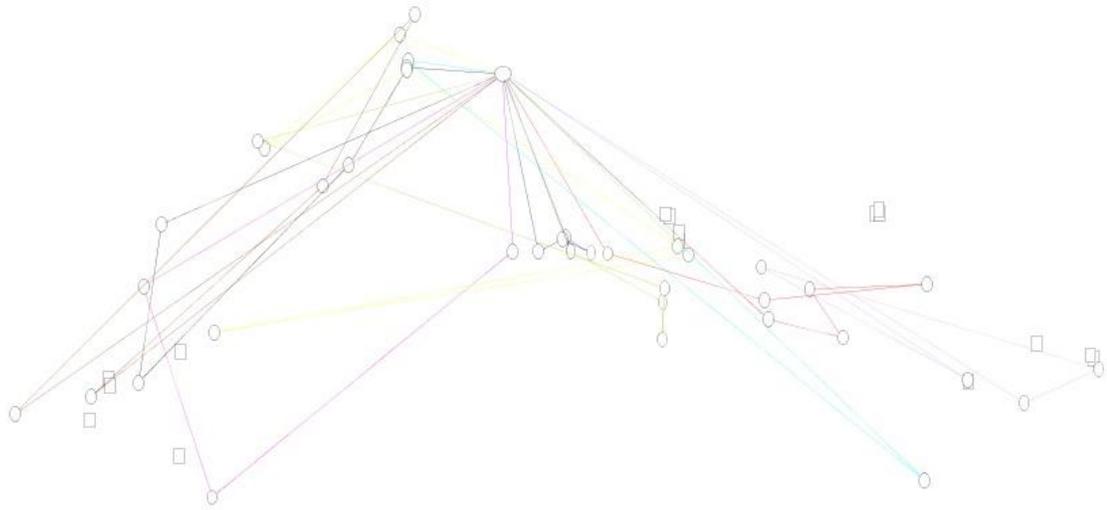


Figura VIII.4: Ruta de mínimo costo para la Provincia con instancia 9 equipos y 12 días de inspección

Fuente: Elaboración del autor

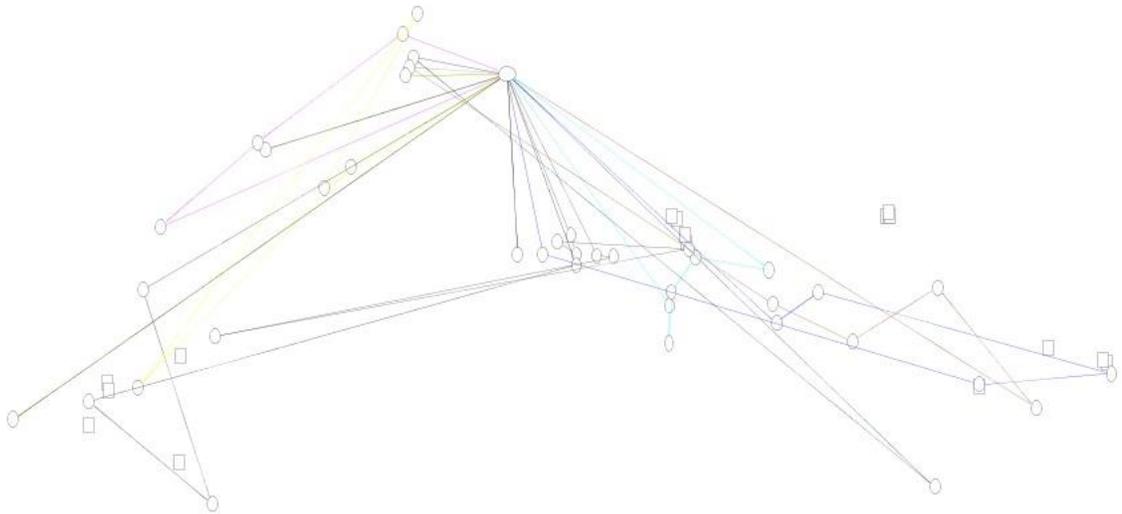


Figura VIII.5: Ruta de mínimo costo para la Provincia con instancia 12 equipos y 12 días de inspección

Fuente: Elaboración del autor

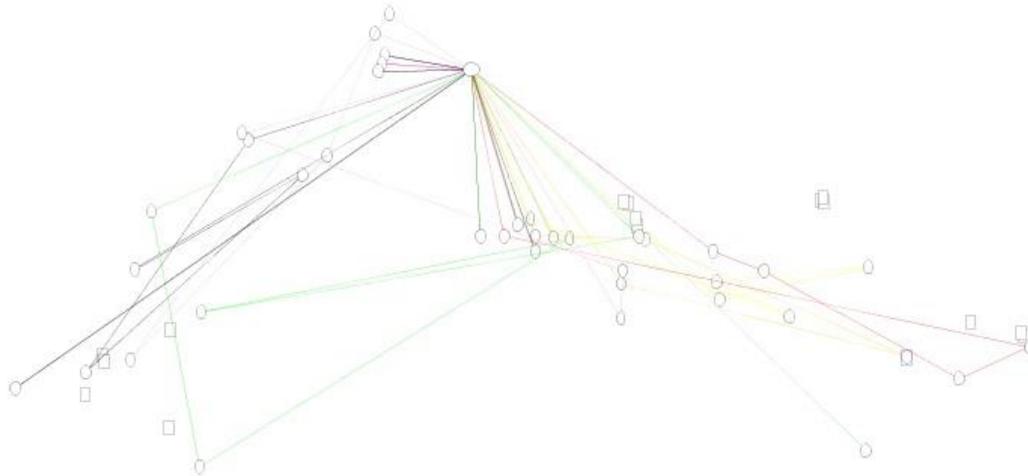


Figura VIII.6: Ruta de mínimo costo para la Provincia con instancia 16 equipos y 12 días de inspección

Fuente: Elaboración del autor

En la Figura VIII.4, VIII.5 y VIII.6 los círculos representan a los puentes (incluyendo el depósito) y los cuadrados a los alojamientos disponibles de la Provincia de Valparaíso. Además, cada color distinto de los arcos que ilustran las figuras representa un equipo de inspección y una ruta específica para cada uno de ellos que salen del depósito el primer día.

En la secuencia que muestra la Figura VIII.4, los 9 grupos salen del origen el primer día, visitan una cantidad de puentes dependiendo de cada ruta y vuelven al depósito el mismo día (es decir, se visitan todos los puentes y exactamente 1 vez en un día). No se utilizan alojamientos disponibles (opcionales) por ningún equipo de inspección dentro del periodo debido a que se cuenta con más de un equipo para realizar la labor, los tiempos de inspección de cada puente son cortos (a lo más 2 horas en el peor de los casos) y, por otra parte, las distancias entre nodos no son muy largas ya que están localizados en una Provincia (zona

geográfica menor a una región). Esta solución tiene un gap de 1,93% por lo que resulta ser eficiente y un óptimo local para la instancia.

En la solución que ilustra la Figura VIII.5, los 12 equipos salen del depósito el primer día, visitan una cantidad de puentes según cada ruta y vuelven al origen el mismo día (es decir, se visitaron todos los puentes y exactamente 1 vez en un día). Ningún equipo hospeda en algún alojamiento disponible dentro del periodo de inspección. Esta secuencia tiene un gap de 1,26% por lo que resulta ser eficiente y un óptimo local para la instancia.

En la secuencia que ilustra la Figura VIII.6, los 16 equipos salen del depósito el primer día, visitan una cantidad de puentes según cada ruta y vuelven al origen el mismo día (es decir, se visitaron todos los puentes y exactamente 1 vez en un día). El periodo de inspección de 1 día tiene sentido debido a que se trata de varios equipos y las distancias entre nodos no son muy grandes para la zona de estudio. Por lo mismo, ningún equipo hospeda en algún alojamiento disponible y tentativo dentro del horizonte. Esta solución tiene un gap de 0,9% por lo que resulta ser eficiente y muy cercana al óptimo global de la instancia.

Al comparar las soluciones que ilustra la Figura VIII.4, VIII.5 y VIII.6 cada una de ellas plantea una secuencia diferente del BIRP para la Provincia de Valparaíso, sin embargo, la ruta de la prueba computacional hecha con 16 equipos y 12 días de inspección (Figura VIII.6) resulta ser la más óptima y costosa dado el número de grupos que realiza la labor para la instancia.

En cuanto a las pruebas computacionales hechas del escenario II del BIRP para la instancia de la Provincia de Valparaíso, se decidieron dejar las salidas mostradas en la Tabla VIII-4 debido a que mostraron un mejor desempeño (menor gap) para el área de estudio. Además, al aumentar el tiempo de corrida de dichas salidas para la instancia los gaps podrían mejorar y así, llegar a un óptimo global en un tiempo razonable.

Las soluciones del BIRP para la instancia de la Provincia de Valparaíso considerando varios equipos de inspección y un periodo de inspección limitado (parámetro) cumplen y respetan todas las restricciones del modelo estándar.

IX. Conclusiones

Se ha desarrollado un modelo matemático que permite determinar rutas óptimas para el problema de ruteo de inspección de puentes o BIRP con instancias de tamaño significativo. El modelo desarrollado minimiza el costo total del viaje, costo total de alojamientos disponibles y utilizados (opcionales) y el costo total de los equipos de inspección que realizan la labor. Dicho modelo estándar, no estudiado anteriormente en la literatura, fue propuesto por autores como (Huang et al. 2018) y aplicado a una instancia particular de tamaño significativo (39 puentes) en la Provincia de Valparaíso, ubicada en la V región de Chile.

En el presente trabajo se utilizó una red formada por nodos puentes (visitas obligatorias), nodo origen (punto de partida del circuito), nodos alojamientos (visitas opcionales) y arcos que incluye todas las distancias y costos de ir de un nodo a otro, para luego a través del modelo determinar la ruta óptima.

Dentro de los resultados obtenidos, en un caso de estudio hipotético para la Provincia de Valparaíso, se aprecia que el enfoque de solución propuesto es capaz de resolver en menos de 10,5 segundos instancias de 1 equipo y 3 días de inspección y menos de 0,5 segundos instancias de 3 equipos y 1 día de inspección. Así mismo para instancias mayores (incluyendo ambos escenarios del BIRP) el tiempo aumenta considerablemente. Con esto se concluye que el modelo es altamente sensible a la cantidad de nodos en la red.

Haciendo análisis de sensibilidad de ambos escenarios del BIRP para la instancia, el escenario I con 2 casos indica que al aumentar el número de días de inspección (de 10 a 12 días), hay una mayor variedad de secuencias posibles por analizar y comparar (en términos de costos) y, por ende, se alcanza una solución mejor (menor costo total de inspección). Este escenario

resulta ser el más rentable y económico si no hay un plazo determinado para realizar la labor.

El escenario II con 3 casos indica que al aumentar el número de equipos de inspección (de 9 a 16 equipos), mejora el gap(disminuye) y se obtiene una mejor solución cercana al óptimo debido a que se dispone de más equipos para realizar la labor y así, hay una mejor asignación de rutas para cada uno de ellos. Este escenario resulta ser más caro, sin embargo, se cumplen los trabajos de inspección en un menor plazo (equilibrio entre plazos y presupuesto).

Otra observación importante para el BIRP es que los alojamientos (paradas opcionales intermedias) proporcionan un ahorro de tiempo debido a que evita que el equipo vuelva al depósito y, por ende, se continua desde esa parada de descanso la labor de inspección de puentes restantes al siguiente día.

Finalmente, la sensibilización del escenario I y II del BIRP ofrece al tomador de decisiones un conjunto de soluciones eficientes del cual puede elegir la mejor opción dependiendo del presupuesto y tiempo para el trabajo de inspección y mantenimiento de puentes para la zona.

X. Extensiones

Es interesante analizar la posibilidad de incluir en estudios futuros múltiples depósitos o MDVRP al Problema de Ruteo de Inspección de Puentes para ver como varían las soluciones óptimas del BIRP al tener más depósitos o puntos de partida (sin costo) para los equipos que necesitan visitar todos los puentes de un área geográfica. Para esto, resulta conveniente revisar los estudios de (Wang, 2005), que plantea la asignación al inicio del periodo de planificación de los vehículos o equipos al conjunto de depósitos disponibles para un circuito, con el objetivo de simplificar la adaptación del modelo estándar original al nuevo escenario o situación.

Además, se puede incluir ventanas de tiempo en los puentes más críticos o transitables de una zona para un horizonte de planificación, según la información histórica, y así, hacer más interesante el modelo que se plantea según los requerimientos del tomador de decisiones.

También se pueden insertar otros criterios al BIRP como nivel de servicio según los recursos económicos de la organización (pública o privada) que realiza la labor, condiciones del tráfico vehicular como flujo, velocidad y tiempo (como los elementos que entrega la aplicación de tráfico y navegación *Waze* para la toma de decisiones), la capacidad de respuesta en caso de contingencias, etc. Así es como el modelo podría ir pivoteando y evolucionando en el tiempo.

XI. Referencias

- F. BARD, J., HUANG, L., DROR, M., & JAILLET, P. (1998). A branch and cut algorithm for the VRP with satellite facilities.
- Bustos Rosales, A., & Jiménez Sánchez, E. (2014). *Énfasis Logística*. Obtenido de <http://www.logisticamx.enfasis.com/articulos/69225-modelos-un-mejor-ruteo-vehicular>
- Google Maps*. (s.f.). Obtenido de <https://www.google.cl/maps/@-33.0517511,-71.4121957,15z>
- Hernandez Ortiz, Francisco;. (s.f.).
- Huang, S.-H., Huang, Y.-H., Blazquez, C., & Paredes-Belmar, G. (2018). Application of the ant colony optimization in the resolution of the bridge inspection routing problem.
- Peña, A. A. (2009). ENRUTAMIENTO DE VEHÍCULOS CON ENTREGA Y RECOGIDA SIMULTÁNEA CON VENTANAS DE TIEMPO A TRAVÉS DE OPTIMIZACIÓN POR ENJAMBRE DE PARTÍCULAS.
- Rocha , L., González, C., & Orjuela, J. (2011). Una revisión al estado del arte del problema de ruteo de vehículos: Evolución histórica y métodos de solución.
- Salhi, S., & Imran, A. (2013). the multi-depot vehicle routing problem with heterogeneous vehicle fleet: Formulation and a variable neighborhood search implementation.
- Schneider, M., Stenger, A., & Hof, J. (2015). An adaptive VNS algorithm for vehicle routing problems with intermediate stops.
- Structuralia*. (2016). Obtenido de <https://www.structuralia.com/blog/las-inspecciones-de-puentes-carreteros>

Toth, P., & Vigo, D. (s.f.). *Vehicle Routing Problems, Methods, And Applications*.

Wang, A. L. (October de 2005). Multi-Depot Vehicle Routing Problem: A One-Stage Approach.

www.ahoranoticias.cl. (23 de Junio de 2018). Obtenido de
<http://www.ahoranoticias.cl/noticias/nacional/228269-un-muerto-y-seis-heridos-dejo-colapso-en-puente-cancura.html>

XII. Anexos

A continuación, se presenta el modelo del BIRP para escenario I y II parametrizado en AMPL:

```
set N; #bridges
```

```
set M; #acomodation
```

```
set K; #inspection days
```

```
set T; #inspection team
```

#el numero de dias K es menor o igual que el número de días de inspección

```
set Aux:= {i in M, j in M: i!=j};
```

```
param o; #depot
```

```
set Aux2:= {{o}, j in M};
```

```
set Aux3:= {j in M, {o}};
```

```
set Arcs:= {i in N union M, j in N union M: i!=j} diff Aux diff Aux2 diff Aux3;
```

```
set ArcsN:= {i in N, j in N: i!=j};
```

```
param NS:= 10000;
```

```
param KK;
```

```
param MM;
```

```
let KK:=0;
```

```
let MM:=0;
```

set S{1..NS} **within** N **union** M **default** {};

set coord;

set coordenadas **within** coord **cross** coord;

param nodo{coordenadas};

param D; #number of
inspection days

param d{Arcs};

param c{Arcs}; #cost for arc $i,j = f(t)$

param t{Arcs}; #time for arc i,j

param w{i in N union M}; #working time for
bridge i

param f{i in M};
#accomodation fee for one night

param Q; #total working time
for one days

param v; #cost of
dispatching one inspection team

param xcoord{i in N union M};

param ycoord{i in N union M};

param q{i in N union M};

var x{(i,j) in Arcs, k in K, tau in T: i!=j} **binary** <=1, >=0;

var y{k in K, m in M, tau in T} **binary** <=1, >=0;

var C{k in K, m in M union N, tau in T} >=0, <=10000;

#var C{m in M union N, tau in T} >=0, <=1000000;

minimize COST: **sum**{(i,j) in Arcs, k in K, tau in T}c[i,j]*x[i,j,k,tau] + **sum**{k in K, m in M, tau in T}f[m]*y[k,m,tau]

+ **sum**{i in N, k in K, tau in T:(o,i) in Arcs}x[o,i,k,tau]*v ;#+ **sum**{i in N union M, k in K, tau in T:(i,o) in Arcs}x[i,o,k,tau]*10000

#+ 0.0001***sum**{k in K, m in M union N, tau in T}C[k,m,tau];

s.t. ASIGNA_I {i in N: i!=o}: **sum**{j in M union N, k in K, tau in T: (i,j) in Arcs}x[i,j,k,tau]=1;

s.t. ASIGNA_J {j in N: j!=o}: **sum**{i in M union N, k in K, tau in T: (i,j) in Arcs}x[i,j,k,tau]=1;

s.t. BALANCE_K{m in M, k in K, tau in T}: **sum**{i in N: (i,m) in Arcs}x[i,m,k,tau] = **sum**{j in N: (m,j) in Arcs and k<card(K)}x[m,j,k+1,tau];

s.t. BALANCE_N{ $n \in N, k \in K, \tau \in T: n \neq o$ }: $\sum\{i \in N \text{ union } M: (i,n) \text{ in Arcs}\}x[i,n,k,\tau] = \sum\{j \in N \text{ union } M: (n,j) \text{ in Arcs}\}x[n,j,k,\tau]$;

s.t. ACOM_ACOM_1{ $m \in M, k \in K, \tau \in T$ }: $\sum\{i \in M: (i,m) \text{ in Arcs}\}x[i,m,k,\tau] = 0$;

s.t. ACOM_ACOM_2{ $m \in M, k \in K, \tau \in T$ }: $\sum\{j \in M: (m,j) \text{ in Arcs}\}x[m,j,k,\tau] = 0$;

s.t. DESTINO_N{ $\tau \in T$ }: $\sum\{k \in K, i \in N: (i,o) \text{ in Arcs}\} x[i,o,k,\tau]=1$;

s.t. DESTINO_M{ $\tau \in T$ }: $\sum\{k \in K, i \in M: (i,o) \text{ in Arcs}\} x[i,o,k,\tau]=0$;

s.t. INICIO_N{ $\tau \in T$ }: $\sum\{j \in N: (o,j) \text{ in Arcs}\} x[o,j,1,\tau]=1$;

s.t. INICIO_K{ $\tau \in T$ }: $\sum\{k \in K, j \in N: (o,j) \text{ in Arcs}\} x[o,j,k,\tau]=1$;

s.t. INICIO_M{ $\tau \in T$ }: $\sum\{j \in M: (o,j) \text{ in Arcs}\} x[o,j,1,\tau]=0$;

s.t. LIMIT{k in K, tau in T}: $\sum\{i \text{ in } N, j \text{ in } N: j \neq 0 \text{ and } i \neq j\} t[i,j] * x[i,j,k,tau] + \sum\{p \text{ in } N, i \text{ in } M \text{ union } N: (p,i) \text{ in } \text{Arcs} \text{ and } p \neq 0\} x[p,i,k,tau] * w[p] \leq Q;$

s.t. VER{k in K, m in M, tau in T: $k < \text{card}(K)$ }: $\sum\{j \text{ in } N: (m,j) \text{ in } \text{Arcs}\} x[m,j,k+1,tau] = y[k,m,tau];$

s.t. VER2{k in K, m in M, tau in T}: $\sum\{j \text{ in } N: (j,m) \text{ in } \text{Arcs}\} x[j,m,k,tau] = y[k,m,tau];$

s.t. VER3{k in K, j in N union M, tau in T: $k < \text{card}(K)$ }: $\sum\{n \text{ in } N: n \neq j \text{ and } n \neq 0\} x[n,j,k+1,tau] \leq \sum\{m \text{ in } M\} y[k,m,tau];$

s.t. MTZ{k in K, i in N, j in N union M, tau in T: $(i,j) \text{ in } \text{Arcs} \text{ and } j \neq 0$ }: $C[k,j,tau] \geq C[k,i,tau] + q[j] - 10000 * (1 - x[i,j,k,tau]);$