

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA**



**ESTUDIO DE UN PROBLEMA DE LOCALIZACIÓN
DE SERVICIOS DE EMERGENCIA CON COBERTURA
DE RESPALDO**

POR

LUISA NALLELI CORAZÓN DELGADO GONZÁLEZ

**COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRÍA EN CIENCIAS EN INGENIERÍA DE SISTEMAS**

OCTUBRE, 2018

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA
SUBDIRECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO**



**ESTUDIO DE UN PROBLEMA DE LOCALIZACIÓN
DE SERVICIOS DE EMERGENCIA CON COBERTURA
DE RESPALDO**

POR

LUISA NALLELI CORAZÓN DELGADO GONZÁLEZ

**COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRÍA EN CIENCIAS EN INGENIERÍA DE SISTEMAS**

OCTUBRE, 2018

Universidad Autónoma de Nuevo León
Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica
Subdirección de Estudios de Posgrado

Los miembros del Comité de Tesis recomendamos que la Tesis «Estudio de un problema de localización de servicios de emergencia con cobertura de respaldo», realizada por el alumno Luisa Nalleli Corazón Delgado González, con número de matrícula 1289610, sea aceptada para su defensa como requisito parcial para obtener el grado de Maestría en Ciencias de Ingeniería de Sistemas.

El Comité de Tesis



Dr. Roger Z. Ríos Mercado
Director



Dra. Iris Abril Martínez Salazar
Revisor



Dr. Mario César López Locés
Revisor

Vo. Bo.



Dr. Simón Martínez Martínez

Subdirección de Estudios de Posgrado



San Nicolás de los Garza, Nuevo León, julio 2018

“Bienaventurado el hombre que halla la sabiduría,
Y que obtiene la inteligencia;
Porque su ganancia es mejor que la ganancia de la plata,
Y sus frutos más que el oro fino.
Más preciosa es que las piedras preciosas;
Y todo lo que puedes desear, no se puede comparar a ella.
Largura de días está en su mano derecha;
En su izquierda, riquezas y honra.
Sus caminos son caminos deleitosos,
Y todas sus veredas paz.
Ella es árbol de vida a los que de ella echan mano,
Y bienaventurados son los que la retienen.”

Proverbios 3.

*A mis padres,
mis raíces fuertes y firmes.
A mis hermanos,
mis socios de aventuras.
A mi esposo,
mi gran compañero e incomparable amigo.
A mis dos pequeños hijos,
Joshua Alberto y Jorge Johan,
regalos de Dios y motores que impulsan mi vida.*

ÍNDICE GENERAL

Agradecimientos	XI
Resumen	XIII
1. Introducción	1
1.1. Planteamiento del problema	3
1.2. Antecedentes	3
1.3. Motivación y Justificación	5
1.4. Objetivos	7
1.5. Contribución	8
1.6. Estructura de la Tesis	8
2. Antecedentes	9
2.1. Datos relevantes sobre la atención de emergencias en México	9
2.1.1. Responsabilidad de las Organizaciones y Dependencias a la atención prehospitalaria	10

2.1.2. Manejo de las unidades móviles tipo ambulancia y técnicos en urgencias médicas	10
2.1.3. Manejo de los técnicos en urgencias	12
2.1.4. Situación y problemática de la atención prehospitalaria de emergencias	13
2.1.5. Datos y Estadísticas importantes de lesiones accidentales . . .	14
2.2. Historia de los modelos de localización de instalaciones de servicios de emergencia	22
2.3. Clasificación de Modelos de Localización de instalaciones de servicios de emergencia	25
2.4. Problema de localización de cobertura de conjuntos	26
2.5. Problema de localización de máxima cobertura	28
2.6. Modelo de localización de máxima cobertura esperada	30
3. Modelos Estudiados	34
3.1. Modelos de localización con cobertura de Respaldo	34
3.1.1. Modelo BACOP1	36
3.1.2. Modelo BACOP2	38
3.1.3. Análisis de los modelos BACOP1 Y BACOP2	40
3.2. Método de solución por ramificación y acotamiento	41
4. Experimentación y Resultados	43
4.1. Instancias de Prueba	43

4.1.1. Tamaño de las instancias	44
4.1.2. Representación de los nodos	45
4.1.3. Generación de la matriz de tiempo	45
4.2. Condiciones experimentales	46
4.3. Trabajo de Experimentación	47
4.4. Experimento 1: Evaluación del parámetro p	49
4.5. Experimento 2: Evaluación del parámetro r	60
4.6. Experimento 3: Evaluación del parámetro θ	72
5. Conclusiones y Trabajo Futuro	83
5.1. Conclusiones	83
5.2. Recomendaciones	84
5.3. Trabajo Futuro	85

ÍNDICE DE FIGURAS

4.1. Evaluación de p – Instancias chicas.	51
4.2. Evaluación de p – Instancias medianas.	52
4.3. Evaluación de p – Instancias grandes.	54
4.4. Evaluación de p – Análisis de regresión en instancias grandes.	55
4.5. Evaluación de p – Tiempo de ejecución.	56
4.6. Código de representación de colores y figuras.	57
4.7. Ilustración de ejemplo – Instancia 17 ($m = 100, n = 20$).	58
4.8. Ejemplo de una solución (instancia 17) – Parámetro $p = 5$	59
4.9. Ejemplo de una solución (instancia 17) – Parámetro $p = 10$	60
4.10. Evaluación de r – Instancias chicas.	63
4.11. Evaluación de r – Instancias medianas.	65
4.12. Evaluación de r – Instancias grandes.	66
4.13. Evaluación de r – Tiempo de ejecución.	68
4.14. Ilustración de ejemplo – Instancia 11 ($m = 100, n = 20, r = 9$).	69
4.15. Ilustración de ejemplo – Instancia 11 ($m = 100, n = 20, r = 20$).	70

4.16. Ejemplo de una solución (instancia 11) – Parámetro $r = 9$	71
4.17. Ejemplo de una solución (instancia 11) – Parámetro $r = 20$	72
4.18. Evaluación de θ – Instancia chica (instancia 27).	75
4.19. Evaluación de θ – Instancia mediana (instancia 15).	76
4.20. Evaluación de θ – Instancia grande (instancia 14).	77
4.21. Evaluación de θ – Tiempo de ejecución.	78
4.22. Ilustración de ejemplo – Instancia 04 ($m = 100, n = 20$).	79
4.23. Ejemplo de una solución (instancia 04) – Parámetro $\theta = 0.1$	81
4.24. Ejemplo de una solución (instancia 04) – Parámetro $\theta = 0.9$	82

ÍNDICE DE TABLAS

2.1. Clasificación de lesiones accidentales según la clasificación internacional de enfermedades.	16
2.2. Porcentaje de las principales lesiones accidentales de causas externas por grupo de edad.	17
2.3. Accidentes de tránsito terrestres en zonas urbanas hasta el año 2016.	18
2.4. Tipos de accidentes de tránsito en zonas urbanas según el último año de registro del INEGI, 2016.	19
4.1. Instancias aleatorias representativas.	44
4.2. Tabla de diseño experimental 1.	50
4.3. Tabla de diseño experimental 2.	61
4.4. Tiempos de ejecución en algunas instancias del experimento 2	68
4.5. Tabla de diseño experimental 3.	74

AGRADECIMIENTOS

Todo inicio tiene un final y toda etapa tiene un ciclo. Hoy por hoy, me encuentro culminando mis estudios de posgrado y me siento profundamente agradecida por todo el proceso vivido.

Quiero agradecer a Dios por darme una familia que me ama y me apoya para seguir caminando hacia adelante. A la vida, por ponerme en el camino de alcanzar una meta más y un sueño que poco a poco se torna una realidad.

Agradezco al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT), a la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica (FIME) y a la Universidad Autónoma de Nuevo León (UANL) por otorgarme la beca de estudios y apoyo de manutención para poder realizar mis estudios y también por todas las atenciones que se me brindaron durante mi etapa académica de maestría.

Agradezco principalmente a los seres humanos que me dieron la vida, que son mis padres, ellos han sido mis baluartes fuertes, en donde sé que siempre encontraré un cálido refugio, a decir verdad, no hay manera de agradecerles por todo lo que me han dado. A cada uno de mis hermanos, Eva, Leslie, Daniel, Joanna y Justine, mis compañeros de infancia y mis cómplices en esta aventura de la vida, por darme siempre los ánimos necesarios para seguir esforzándome y no rendirme. No puedo dejar de agradecer a mis principales motores Joshua y Johan, por sus sonrisas que me impulsan y a mi esposo Jorge por caminar conmigo en esta etapa llena de retos, por entenderme en múltiples ocasiones, por desvelarse conmigo en la realización de mis tareas y proyectos y por apoyarme pacientemente, sin ti no hubiera sido posible

haber llegado hoy hasta aquí, por tanto, mi más grande reconocimiento para ti.

Quiero agradecer a todos los que conforman el cuerpo académico de PISIS, a cada uno de mis profesores, cada uno de ustedes han dejado una huella imborrable en mi formación. Un agradecimiento especial a la Dra. Yasmín Ríos ya que con sus clases inspiraba en mi seguir buscando respuestas a través del conocimiento de la ciencia, al Dr. Vincent Boyer que desde el inicio del semestre confió en mi capacidad estudiantil y me alentó a seguir investigando. A la Dra. Ada Álvarez que fungió además de mi profesora como mi tutora, con su carácter y firmeza aprendí que debemos dar siempre lo mejor de nosotros en lo que hacemos, a la Dra. Iris Martínez de la que recibí siempre una actitud positiva y alegre en cada consejo que pudo darme, desde que me entrevistó para ingreso al posgrado. A la Dra. Lucero Ozuna por su disposición de aclarar oportunamente mis dudas. Al coordinador, Dr. Arturo Berrones quien me ayudó dirigiendo todo el proceso de entrada al posgrado. Especialmente agradezco a mi director de tesis, el Dr. Roger Ríos, a quien admiro por su gran calidad humana y su innato sentido del humor, él es parte fundamental de que me encuentre ahora concluyendo el posgrado y este trabajo de tesis, un profundo y sincero agradecimiento por transmitirme sus conocimientos científicos y gastronómicos a mí y a todos los integrantes de la Dead Optimizers Society (DOS), Michel, Mario, Gaby, Samuel y Yessi a quienes recordaré siempre con gran cariño. Gracias a todos mis compañeros de clases y amigos Luis, Evely, Gaby, Astrid, Mayra, Víctor y a mis compañeros de generación Valery, Anaid, Missael, Pepe, Juan Pablo y muy especialmente a Citlali por todas esas pláticas enriquecedoras y darme también tu amistad sincera y a ti Adrian por transmitirme de tu cultura y de tu alegría, te convertiste en un gran amigo para mí. Llegar a la culminación de mi ciclo de maestría me deja un gran aprendizaje. Sin lugar a dudas, esta experiencia retadora es la brecha que encaminará nuevos proyectos y metas por alcanzar.

“Tan absurdo y fugaz es nuestro paso por el mundo que solo me deja tranquila el saber que he sido auténtica, que he logrado ser lo mas parecido a mi misma que he podido.” F. Kahlo

RESUMEN

Luisa Nalleli Corazón Delgado González.

Candidato para obtener el grado de Maestría en Ciencias en Ingeniería de Sistemas.

Universidad Autónoma de Nuevo León.

Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica.

Título del estudio: ESTUDIO DE UN PROBLEMA DE LOCALIZACIÓN DE SERVICIOS
DE EMERGENCIA CON COBERTURA DE RESPALDO.

Número de páginas: 91.

Los modelos de optimización para localización de instalaciones de servicios de emergencia (ambulancias) son formulaciones matemáticas que ayudan como recurso valioso a la toma de decisiones. Estos modelos son de suma importancia, ya que ayudan a los tomadores de decisiones a planificar de manera óptima las instalaciones con las que dispone a ser ubicadas.

Uno de los problemas de localización más relevantes es el de máxima cobertura (*Maximal Covering Location Problem*), el cual consiste en determinar la mejor ubicación de instalaciones de servicios de emergencia que aseguren la mayor proporción de demanda cubierta en los sitios de demanda con un determinado número de ambulancias disponibles, desarrollado por Church y ReVelle [8]. Para resolver el problema de máxima cobertura, han sido desarrollados algunos modelos de localización que en su forma original buscan maximizar la cantidad de población de

demanda cubierta. El estudio que se realizó en este trabajo de tesis está enfocado en resolver el problema de máxima cobertura utilizando los modelos de localización deterministas de cobertura de respaldo propuestos por Hogan y ReVelle [20]. Estos modelos consisten en agregar adicionalmente servicios de emergencia a los sitios de demanda, para proporcionar una cobertura más amplia a tales sitios y asegurar una mejor cobertura.

Uno de los objetivos principales de este trabajo de tesis es mostrar la utilidad que tienen los modelos de cobertura de respaldo. De tal manera que se busca analizar y evaluar el comportamiento de tales modelos. Para el trabajo de experimentación, se probaron un conjunto de instancias de distintos tamaños creadas bajo un diseño experimental. Se diseñaron experimentos para los cuales se resuelven los modelos y fueron probados para diferentes valores de sus parámetros principales. Lo anterior con la finalidad de observar su desempeño con la variación de sus parámetros. En este trabajo presentamos los resultados de los experimentos realizados.

Se analiza la sensibilidad de la solución como función del radio de cobertura, se analiza también como cambia la solución en función del número de ambulancias disponibles. Además se analiza cómo cambia la solución en función a un parámetro θ , el cual mide la suma ponderada de dos términos en la función objetivo, la cobertura simple y la cobertura de respaldo. Los modelos de cobertura de respaldo, que son modelos de programación entera, fueron resueltos en este estudio con el método de ramificación y acotamiento de CPLEX en el modelador algebraico GAMS, que los manda llamar a resolver. La contribución de este trabajo es el estudio de los modelos de localización con cobertura de respaldo para el cual se realizó un análisis llevado a cabo de la observación de los resultados de la experimentación efectuada. Con este análisis se busca realizar importantes recomendaciones de uso a los tomadores de decisiones.

Firma del director: _____

Dr. Roger Z. Ríos Mercado

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

La ciencia provee valiosas herramientas para apoyar a la sociedad en la toma de decisiones. La investigación de operaciones es una de esas herramientas valiosas que aporta métodos que apoyan a los tomadores de decisiones. La optimización, que forma parte de la investigación de operaciones, pretende mejorar el funcionamiento en que un proceso, actividad o trabajo es realizado. La forma en que se optimiza es mejorando los resultados a través del uso eficiente de los recursos o criterios involucrados.

Una importante área de apoyo a la toma de decisiones es la localización ó ubicación de instalaciones. Las decisiones de localización forman parte de un proceso de elección de lugares para establecer instalaciones. La importancia de la adecuada ubicación de instalaciones se deriva del impacto del costo que tienen. Cada instalación representa un recurso de costo económico que se considera sumamente importante. Una positiva influencia económica en una área determinada hará un impacto sobre los costos relacionados a sus finanzas. Kilkenny y Thisse [25] hablan sobre la distribución espacial en la localización relacionada a la actividad económica. Debido a la pretensión de usar eficientemente las instalaciones como un recurso valioso e importante, es que se necesitan metodologías de apoyo que intervengan en la distribución geográfica correcta de dichas instalaciones.

La optimización contribuye por medio de los modelos de localización a encontrar soluciones para los problemas de decisiones de localización. Los modelos de localización de instalaciones juegan un papel importantísimo ayudando a determinar ubicaciones óptimas. En palabras sencillas, los modelos de localización son capaces de encontrar lugares geográficamente exactos. A partir de estas ubicaciones encontradas se minimizan o maximizan factores de particular interés. Los sitios que los modelos de localización establecen, son los mejores espacios en una zona geográfica tales que cumplen con la disminución o aumento de estos factores. Uno de los factores que se buscan optimizar comúnmente en los modelos de localización de instalaciones es el ahorro de costos de traslado entre ubicaciones, de tal manera que podamos disminuir tiempo y/o distancia entre el traslado de las mismas.

Cuando hablamos de localización de instalaciones, en términos generales, nos referimos a cualquier tipo de instalación que deseemos ubicar. Más específicamente, si hablamos de instalaciones para el sector empresarial, quizá podamos poner algunos ejemplos comunes, tales como la ubicación de sus plantas de trabajo, sus almacenes para inventarios ó maquinarias de ensamble. Si nos referimos al sector educativo, entonces hablaríamos de la ubicación de escuelas para enseñanza o de bibliotecas de estudio. En el caso particular de localización de instalaciones de servicios de emergencia, nos referimos a la ubicación de ambulancias médicas, estaciones de bomberos, etc.

Los modelos de localización dedicados a los servicios de emergencia, entre los que destacan su aplicación en la localización de ambulancias, han atraído e impactado a la comunidad científica. Es evidente que los modelos de localización aplicados a servicios de emergencia realizan coberturas para sitios que tienen demanda de atención urgente. Por tal motivo, es necesario admitir el hecho que, realizar una sola cobertura para estos sitios, puede no ser suficiente. Los modelos de localización con cobertura de respaldo son de especial interés para el presente trabajo de investigación de tesis. En las estructuras de estos modelos, podemos encontrar clásicamente el uso de parámetros importantes. Los parámetros dentro de las formulaciones de

cobertura de respaldo son usados para definir un valor particular y ofrecer diferentes alternativas en las soluciones de los modelos. Es interesante analizar las soluciones que dan los modelos en razón de la variación de sus parámetros.

1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El problema planteado consiste en lo siguiente. Se cuenta con un determinado número de instalaciones de emergencia para ubicar y además, dos conjuntos de sitios, uno de los conjuntos contiene los sitios con demanda de servicio; el otro conjunto contiene los sitios en donde es posible ubicar dichas instalaciones de emergencia. Se desea determinar una configuración óptima de ubicación para estas instalaciones de tal manera que se cubra la mayor cantidad de demanda posible. Una cobertura se establece cuando un sitio de demanda tiene una instalación cercana, de tal manera que una instalación de emergencia pueda llegar en un tiempo igual o menor a un radio establecido, para brindarle servicio. Este problema fue propuesto por Church and ReVelle [8] y es conocido como el Problema de Localización de Máxima Cobertura (MCLP, por sus siglas en inglés *Maximal Covering Location Problem*). El problema de máxima cobertura es una base de los modelos de cobertura de respaldo. Los modelos de cobertura de respaldo buscan una cobertura doble para los sitios de demanda, de tal manera que se proporcione una cobertura adicional en situaciones en que puedan necesitarse. Para el problema de doble cobertura fueron estudiados los modelos BACOP1 y BACOP2 de Hogan y ReVelle [20]. Estos modelos de cobertura de respaldo tienen parámetros importantes que se analizan en este trabajo de tesis.

1.2 ANTECEDENTES

A lo largo de las últimas cinco décadas, han surgido diversos modelos de localización para la decisión de ubicar instalaciones de emergencia. Un caso particu-

larmente importante son los modelos para ubicar ambulancias. Las ambulancias son usadas para proporcionar servicios en el área de salud. Con ellas se da atención a pacientes que necesitan atención médica urgente.

La historia del surgimiento de la atención médica atendida por ambulancias es remota. Ésta se inició con el primer transporte de un paciente a un servicio de atención en salud. El uso de ambulancias comenzó con el traslado de pacientes graves para llevarlos a los servicios de atención de salud. Para fines de los traslados se utilizó la carreta como transporte.

El concepto de atención prehospitalaria, nombre con el que se conoce a los servicios inmediatos que se le dan a una persona en situación de emergencia, nace en México a finales del siglo XX [38]. En México, la Secretaria de Salud por medio del Consejo Nacional para la Prevención de Accidentes (CONAPRA) [9] define la atención prehospitalaria como “atención de la urgencias médicas otorgada a la persona cuya condición clínica se considera que pone en peligro la vida, un órgano o su función, con el fin de lograr la limitación del daño y su estabilización orgánico funcional, desde el primer contacto hasta la llegada y entrega a un establecimiento para la atención médica con servicio de urgencias”.

En la década de 1970, surgen por primera vez en Estados Unidos los modelos de localización enfocados en la ubicación de instalaciones de servicios de emergencias, es a partir de esta fecha, que nace un período que estuvo marcado por un crecimiento en la tecnología informática. El crecimiento tecnológico se ve reflejado en el modelado y sofisticación algorítmica, en el desempeño del trabajo de optimizadores, en el uso de la programación matemática y en la utilización de software en varios niveles que ayudan principalmente en la toma de decisiones [6]. La literatura que conocemos sobre sistemas de posicionamiento de ambulancias, que a sido desarrollada a partir de ahí, ha tenido una gran evolución. En el Capítulo 2 se revisa con más detalle la evolución de los modelos propuestos en la literatura para la localización de ambulancias.

El enfoque dirigido a la colocación de instalaciones de servicios de emergencia abre una nueva oportunidad en el campo científico para plantear interrogantes necesarias sobre factores involucrados y que son de gran interés en esta área.

1.3 MOTIVACIÓN Y JUSTIFICACIÓN

Actualmente, en México no ha ocurrido un uso generalizado de los modelos de localización para servicios de emergencia. Es necesario realizar estudios sobre los beneficios que la utilización de los modelos de localización podrían aportar en el país.

En países como Estados Unidos, por ejemplo, el uso y aprovechamiento en utilizar e implementar modelos de localización a sido totalmente determinante. Nuestro país vecino muestra grandes avances en la implementación y la teoría de la localización. Para ellos resulta fundamental aprovechar los recursos que la ciencia nos brinda. Desde la perspectiva de la optimización, los modelos de localización resultan no solo atractivos, sino necesarios.

Estados Unidos cuenta con un sistema altamente capaz y reconocido en atención médica de emergencia (EMS por sus siglas en inglés, *Emergency Medical Services*) [1]. EMS es un sistema complejo y su tarea es coordinar toda la atención médica de emergencia necesaria. Este sistema provee altos estándares de calidad y una gran organización. Un principio común establecido para sus servicios de emergencia es que una respuesta más rápida puede hacer una diferencia sobre la salud del paciente. De acuerdo con Shah [40], basado únicamente en estadísticas de lesiones accidentales traumáticas y cardiovasculares, los estándares necesarios para que los pacientes sean atendidos dentro de un tiempo de respuesta inmediato son ya establecidos. Por ejemplo, un estándar comúnmente aceptado del EMS es el tiempo de respuesta de 8 minutos, es decir, el personal del EMS debe llegar a un paciente dentro de los 8 minutos desde el momento en que se realizó la llamada de emergencia,

el cual se establece que se cumpla para el 90 % de las situaciones de emergencia.

En un artículo reciente, Blanchard et al. [4] realizan un estudio acerca de tiempos de respuesta de los servicios médicos de emergencia y mortalidad en zonas urbanas, donde cuestionan el tiempo estándar de 8 minutos para atender una emergencia. El análisis destaca la necesidad de realizar más investigaciones sobre quién puede beneficiarse de la respuesta rápida y cuál es el tiempo de respuesta óptimo. De dicho artículo podemos deducir que la investigación que los autores realizan es basada en el gran interés que se tiene acerca de la importancia en los tiempos establecidos como respuesta estándar. Incluso exploran el beneficio que puede resultar en tiempos menores o iguales a 7.59 minutos, los cuales pueden marcar la diferencia entre aquellos pacientes que recibieron rápida atención, para convertirse en pacientes hospitalizados. En el campo de la investigación para mejora continua, Estados Unidos ha conseguido logros importantes en estudios de metodologías y ciencias aplicadas para optimizar tiempos de respuestas de llegada y tiempos de traslados cortos. Conociendo acerca de los altos niveles y exigencias de nuestro país vecino y sus destacados avances estableciendo estándares de alta calidad, podemos pensar en contribuir también en nuestro país para una organización de emergencias más controlada.

La principal motivación para la realización de este trabajo de tesis es el poder aportar investigación que ayude a mejorar el sistema actual de salud y a las organizaciones dedicadas a emergencias. La justificación se deriva de que en México actualmente esta práctica es muy poco conocida. Con esta investigación, se espera contribuir a mejorar la situación actual de las organizaciones del sector salud del país, respecto al servicio de atención a pacientes mediante ambulancias.

Este trabajo también permitirá demostrar que la optimización, como un recurso que la ciencia nos ofrece, puede ayudar a obtener ventaja sobre el sistema de emergencias ya existente, lo cual resulta no solo importante, sino vital para la sociedad en que hoy vivimos.

Resulta interesante el análisis de los resultados de este trabajo, validando que es posible brindar servicios de ubicación óptimos en las situaciones donde los afectados en una emergencia tienen como necesidad primordial recibir atención en el menor tiempo posible.

1.4 OBJETIVOS

El objetivo general de esta tesis es probar la gran utilidad que puede brindar el uso de los modelos deterministas con cobertura de respaldo para la decisión de localización de instalaciones de servicios de emergencia, con la finalidad de incentivar en nuestro país y región su uso e implementación. Se busca dar a conocer la utilidad de los modelos de localización de cobertura de respaldo para tomar decisiones de ubicación de ambulancias médicas. Se pretende que esta investigación beneficie a las organizaciones de salud y recurran al uso de los modelos de localización como herramienta o recurso importante.

Los objetivos específicos de este trabajo son los siguientes:

- Crear un conjunto de instancias de prueba para estudiar el comportamiento de los modelos de cobertura de respaldo.
- Realizar un análisis de los modelos de localización deterministas de cobertura de respaldo.
- Estudiar el comportamiento de las soluciones del modelo de cobertura de respaldo de acuerdo a los resultados de su función objetivo.
- Llevar a cabo un análisis de sensibilidad de algunos parámetros importantes en los modelo de cobertura de respaldo.

1.5 CONTRIBUCIÓN

La Contribución del presente trabajo de investigación es el estudio de los modelos de cobertura de respaldo mediante las evidencias resultantes y las gráficas de análisis de sensibilidad llevadas a cabo.

1.6 ESTRUCTURA DE LA TESIS

En el Capítulo 2 se presentan datos de gran importancia sobre los servicios de emergencia y estadísticas de accidentes en México, la historia del surgimiento de los modelos de localización, los tipos de modelos de localización de instalaciones de servicios de emergencia más conocidos en la literatura. Se describen los problemas deterministas de localización de cobertura de conjuntos, el problema de máxima cobertura y el problema de máxima demanda esperada. En el Capítulo 3 se detallan y plantean los dos tipos de modelos deterministas de cobertura de respaldo estudiados y su respectivo análisis. Se describen brevemente el método de ramificación y acotamiento, CPLEX y GAMS. En el Capítulo 4 se presenta el trabajo experimental sobre los modelos y los objetivos del estudio, así como el análisis y discusión de los resultados. Finalmente, en el Capítulo 5 se presentan las conclusiones finales de la presente tesis y las recomendaciones pertinentes.

CAPÍTULO 2

ANTECEDENTES

En este capítulo presentamos la literatura existente sobre datos relevantes acerca de la atención de emergencias, donde se presenta la situación y problemática de las organizaciones de servicios de emergencias incluyendo las estadísticas de accidentes de más impacto en México. Otra parte de este capítulo presenta el surgimiento de los modelos de localización de instalaciones y el camino hacia el enfoque dedicado a los servicios de emergencia. También se exponen los tipos de problemas de localización que existen y sus clasificaciones. Se aborda el problema de cobertura de conjuntos. Finalmente se presenta el problema de máxima cobertura, mismo que resuelven los modelos de localización de cobertura de respaldo.

2.1 DATOS RELEVANTES SOBRE LA ATENCIÓN DE EMERGENCIAS EN MÉXICO

El Consejo Nacional para la Prevención de Accidentes (CONAPRA) en México presenta datos importantes desde las últimas década, acerca de la importancia de la atención prehospitalaria que se lleva a cabo en nuestro país. Estos datos, que más adelante se discuten, son datos relevantes de indicadores sobre estadísticas de accidentes en nuestro país. Además, se argumenta la necesidad de atención en prácticas

sobre posicionamiento de instalaciones de emergencia.

2.1.1 RESPONSABILIDAD DE LAS ORGANIZACIONES Y DEPENDENCIAS A LA ATENCIÓN PREHOSPITALARIA

La atención prehospitalaria que se lleva a cabo en nuestro país es llevada a cabo por organismos e instituciones públicas y privadas.

La Secretaría de Salud es la dependencia del poder ejecutivo que se encarga primordialmente de la prevención de enfermedades y promoción de la salud de la población en México [18]. Ante la carencia de un sistema de urgencias responsable de coordinar recursos ante emergencias, contingencias y desastres, la Secretaria de Salud creó el Centro Regulador de Urgencias Médicas (CRUM), el cual es una instancia coordinadora única de atención prehospitalaria de urgencias médicas.

Entre las tareas de responsabilidad asignadas a el CRUM, esta la de recibir las situaciones de emergencia. El CRUM se encarga de enviar al sitio de la urgencia la ambulancia disponible que se encuentre más cercana para dar la atención inmediata de acuerdo a la gravedad del paciente y además coordina el traslado del servicio de emergencia al hospital que resulte más conveniente. El CRUM tiene tareas de coordinación las 24 horas del día [22].

2.1.2 MANEJO DE LAS UNIDADES MÓVILES TIPO AMBULANCIA Y TÉCNICOS EN URGENCIAS MÉDICAS

La buena administración de las unidades móviles (ambulancias) juega un papel principal en la prestación de los servicios de emergencia. Éstas se deben regir por las normas establecidas por la Secretaria de Salud.

La prestación de servicios de atención médica por medio de ambulancias en el territorio nacional está sujeta a la Norma Oficial Mexicana NOM-034-SSA3-2013 [38]. Bajo esta norma se establecen ciertos requisitos y características mínimas que deben tener las ambulancias, así como su personal, al realizar alguna o la totalidad de acciones de traslado de pacientes.

Entre los requisitos que la norma establece acerca de las ambulancias, están los siguientes:

De las ambulancias de traslado:

- “Se debe contar con un operador de ambulancia Técnico en Atención Médica Prehospitalaria (TAMP), capacitado en conducción de vehículos para traslado de pacientes ambulatorios y en su caso, un copiloto TAMP para la atención del usuario”.

De las ambulancias de urgencias básicas o avanzadas:

- “Deben contar con un operador de ambulancia y al menos un copiloto, ambos TAMPs.”
- “Los TAMPs deben estar capacitados de acuerdo con la capacidad operativa de la ambulancia, descritas en los puntos 4.1.3 y 4.1.4, de esta norma.”

Actualmente, la CONAPRA sigue trabajando en la incorporación de reglas a las que deben estar sujetos los aspirantes a técnicos profesionales en la atención médica prehospitalaria, en relación a su evaluación y certificación. El que se puedan establecer medidas y reglas necesarias que promuevan la atención durante emergencias rápida y oportunamente es lo que se espera y desea dentro de las organizaciones de salud, que dirigen la atención prehospitalaria en México.

2.1.3 MANEJO DE LOS TÉCNICOS EN URGENCIAS

Para dar asistencia de servicios médicos prehospitalarios de servicios de urgencia y atención a lesiones, existen centros y escuelas donde se capacitan a técnicos en urgencias y atención prehospitalaria, comúnmente conocidos como paramédicos.

En marzo del 2015 en el Diario Oficial de la Federación [13] se publica el decreto que reforma el artículo 79 de la Ley General de Salud, en donde se especifica que en el campo de la atención médica prehospitalaria se requiere de un diploma legalmente expedido y registrado por autoridades educativas competentes, para ejercer actividades técnicas y auxiliares.

Entre los cursos de capacitación con los que debe contar un técnico en urgencias están los siguientes:

- Evaluación del paciente.
- Primeros auxilios básicos.
- Atención de urgencias respiratorias, cardiovasculares neurológicas, gastrointestinales, urológicas, endocrinas, hematológicas, inmunológicas, ginecológicas y psiquiátricas.
- Manejo de hemorragias y lesiones físicas (lesiones de tejidos blandos, cara y cuello, de cabeza y columna, de tórax, abdominales, genitourinarias, ortopédicas).
- Atención de urgencias ambientales y de desastre.
- Levantamiento y movilización de pacientes.
- Asistencia de shock trauma y reanimación.
- Operación de transporte.
- Rescates especiales.

Los anteriores cursos son extraídos del temario para la preparación y capacitación de un técnico en urgencias médicas de la Cruz Roja Mexicana [10].

2.1.4 SITUACIÓN Y PROBLEMÁTICA DE LA ATENCIÓN PREHOSPITALARIA DE EMERGENCIAS

La atención prehospitalaria de atención de emergencias que se lleva a cabo en México es llevada a cabo por organismos e instituciones públicas y privadas.

La Cruz Roja Mexicana es una de las principales y más importantes instituciones dedicadas al servicio de emergencias en nuestro país. Esta institución apoya a la ciudadanía prestando auxilio a la población que se encuentre en riesgos de accidentes o en situaciones de desastres. La Cruz Roja Mexicana obtiene sus recursos económicos de la beneficencia pública, por medio de las donaciones voluntarias de la sociedad para poder subsistir. Ya que el mantenimiento de esta institución recae principalmente en los fondos económicos de la beneficencia, hoy en día existe una problemática fuerte por la falta de recursos financieros y apoyo de las autoridades de las entidades bajo las que se rige, además de la escasa participación voluntaria.

Según lo expuesto por los dirigentes a cargo, entendemos que cada salida de una ambulancia representa para las instituciones un costo, además de todos los gastos de recursos implicados que se requieren para su debido funcionamiento. Si bien es cierto que reciben apoyos de la sociedad o empresas privadas, la Cruz Roja no obtiene recursos financieros por parte del gobierno. Como consecuencia a esta situación, en los últimos años, la Cruz Roja Mexicana ha cerrado algunas de sus delegaciones alrededor del país, pese a la demanda de la población en las zonas de atención correspondientes.

Según la CONAPRA, la situación de los servicios de urgencias médicas ha sido precaria [38]. Además del tema financiero, otra problemática que afronta es debida a

su estructuración, que se asume que se ha hecho sin realizar una adecuada planeación y coordinación. La CONAPRA atribuye que la responsabilidad de la situación no estructurada recae en las organizaciones del sector público, de beneficencia, del sector privado, de organizaciones no gubernamentales, así como en el personal voluntario. Además la misma institución declara que las organizaciones antes mencionadas han desempeñado sus labores con una distribución que no va de acuerdo a las necesidades de la población.

Se conoce que el grupo mayoritario que ejerce la prestación de servicios de atención prehospitalaria carece de formación formal educativa y un porcentaje alto de ellos requieren de capacitación para ser evaluados como técnicos profesionales en urgencias médicas y obtener su certificación. Algunas de las consecuencias de la falta de coordinación y planeación han propiciado duplicidad en las atenciones, gastos excesivos innecesarios de recursos, pérdidas graves en sus operaciones, altos costos y falta de cobertura [38].

Debido a toda esta situación en las organizaciones o dependencias prestadores de atención de emergencias, el sistema de atención a emergencias no ha funcionado como un sistema articulado sino como un conglomerado, el cual se encuentra disperso [38]. Podemos inferir con lo anterior que la falta de educación formativa y estrategias de planeación y organización en el área de emergencias es lo que deriva consecuencias negativas en la atención médica de urgencias, que en general afecta a la sociedad mexicana.

2.1.5 DATOS Y ESTADÍSTICAS IMPORTANTES DE LESIONES ACCIDENTALES

Algunos datos de la CONAPRA nos revelan que se considera a las enfermedades cardiovasculares como la primera causa de muerte entre la población general, seguida por las complicaciones con la enfermedad de la diabetes. Esta información

también puede cotejarse con los datos del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) que presentan hasta el año 2016 [24].

La vulnerabilidad es un concepto importante considerado por la Secretaría de Salud. Este concepto tiene que ver con los riesgos expuestos ante una situación de emergencia, los recursos necesarios para enfrentar tal situación y finalmente sus consecuencias. El concepto de vulnerabilidad se le atribuye a “aquellos grupos de personas, organizadas o no, que por sus condiciones permanentes o temporales se encuentran en condiciones de riesgo, inseguridad, indefensión y desventaja” [39]. Según la Secretaría de Salud, entre los grupos más vulnerables de sufrir una lesión accidental en una población se encuentran los niños y adultos mayores, ya son en estas etapas, en las que se carece de habilidades y niveles para manejar un ambiente inseguro [36].

Las lesiones accidentales son uno de los principales motivos de atención médica en los servicios de salud de emergencias. Una lesión accidental de causa externa se define como “cualquier daño o impedimento corporal específico e identificable, resultado de una exposición aguda a energía térmica, mecánica, eléctrica o química o de la ausencia de elementos esenciales como el calor y el oxígeno” [36]. De acuerdo a la intencionalidad con la que se presentan las lesiones accidentales según su causa externa, la CONAPRA las clasifica en intencionales o no intencionales. De las primeras se dice que son aquellas en las que hay una acción humana realizada de forma premeditada y destinada a causar un daño, ya sea autoinfligido (suicidio) o provocados a otras personas (agresión o violencia). En el caso de las lesiones no intencionales, no se presenta intencionalidad, ya sea de forma implícita o explícita, de causar un daño, por lo que tradicionalmente se les conoce simplemente como lesiones accidentales [36].

En la Tabla 2.1 presentamos una clasificación de las principales causas de lesiones accidentales y su código de identificación, de acuerdo a la clasificación internacional de las enfermedades. Aunque las lesiones asociadas al transporte son

también lesiones accidentales, éstas se consideran más adelante con datos obtenidos directamente del INEGI.

Tabla 2.1: Clasificación de lesiones accidentales según la clasificación internacional de enfermedades.

No.	Causa	Código
1	Caídas	W00-W19
2	Ahogamiento y sumersión	W65-W74
3	Obstrucción de la respiración	W75-W84
4	Envenenamiento por sustancias	X40-X49
5	Exposición al fuego humo y llamas	X00-X09
6	Contacto con calor y sustancias calientes	X10-X19
7	Corriente eléctrica, radiación y temperatura, presión del aire y ambientes externos	W85-W99
8	Efectos adversos de tratamientos médicos	Y40-X89
9	Transporte	V01-V99X
10	Exposición a fuerzas mecánicas	W20-W52, W64
11	Animales y plantas venenosos	X20-X29
12	Mordedura de animal o lesión con plantas	W53-W63
13	Exposición a fuerzas de la naturaleza	X30-X39
14	Exceso de esfuerzo viajes y privación	X50-X57
15	Exposición accidental a otros factores y a los no especificados	X58-X59

La CONAPRA presenta datos muy importantes donde da a conocer que las lesiones accidentales llegan a ser la primera causa de muerte y discapacidad en las edades de nivel estudiantil de preescolar, escolar y en las etapas productivas de la vida [38]. Las lesiones accidentales se presentan con mayor frecuencia durante la infancia y adolescencia desde los 0 a 19 años y en adultos mayores de 60 años en adelante [36]. En el año 2012 fueron la primera causa de muerte en niños entre 5 y 9 años con 352 casos y una tasa porcentual de 3.1% [37].

En la Tabla 2.2 se presentan datos de porcentajes de las principales lesiones

accidentales en México, clasificadas por la causa externa y el grupo de edad en la que se presenta, según el informe nacional en la base de datos de la Encuesta Nacional de Salud y Nutrición (ENSANUT) [12]. Las lesiones accidentales de tránsito no se tomaron en cuenta para la información de porcentajes que se presenta en la tabla. Podemos observar en la tabla que las caídas son el tipo de lesión más frecuente en todos los grupos de edad y se presenta con más frecuencia en edad de niños hasta 14 años y en adultos mayores de 60 años.

Tabla 2.2: Porcentaje de las principales lesiones accidentales de causas externas por grupo de edad.

Tipo de accidente/Grupo de edad	<1	1-4	5-9	10-14	15-19	20-59	60<	Total
Caídas	94.69	70.08	71.98	75.15	59.25	64.41	90.84	70.50
Exposición a fuerzas mecánicas	0.00	12.88	20.37	16.57	26.89	23.12	5.68	18.98
Quemaduras	5.31	9.51	2.12	1.91	3.45	1.56	0.15	2.25
Contacto animal	0.00	0.09	1.06	0.45	1.21	0.86	0.21	0.71
Ahogamiento obstrucción de vías aéreas	0.00	3.09	0.72	0.84	0.24	1.27	0.00	0.96
Envenenamiento	0.00	0.57	0.14	0.63	1.01	0.16	0.00	0.34
Exposición a corriente eléctrica o radiación	0.00	0.96	0.14	0.00	0.54	0.65	0.00	0.41
Otras lesiones accidentales	0.00	2.83	3.47	4.46	7.42	7.98	3.12	5.85

Las muertes y discapacidades por lesiones de accidentes viales o de tránsito, son un gran e importante problema de salud pública en México. Sus consecuencias físicas y emocionales tienen un gran impacto en los costos sanitarios, sociales y económicos.

Este creciente problema tiene consecuencias sociales y económicas que generan pérdidas a las víctimas, a sus familias y a la población en su conjunto, debido al costo de los tratamientos y de la disminución o pérdida de la productividad, ya sea por muerte o por discapacidad [37].

En México los accidentes de tránsito en zonas urbanas y suburbanas presentan una alta demanda. Tan solo durante el año 2016 se registraron un total de 360,051 accidentes de tránsito en las zonas urbanas del país. De estos datos se puede desprender que cada día hay aproximadamente un promedio de casi 1,000 accidentes de

tránsito en el país, algo así como 42 sucesos por hora o un accidente cada 2 minutos. De acuerdo a datos estadísticos que presenta el INEGI, cada año en promedio más de 37 mil mexicanos pierden la vida a causa de algún tipo de accidente, de los cuales, las lesiones accidentales de tránsito son la causa más alta [37].

En la Tabla 2.3 se presenta la información de datos de accidentes de tránsito en zonas urbanas y suburbanas, correspondiente a los últimos 10 años de registro, en el territorio mexicano. En la tabla se clasifican los accidentes por año de ocurrencia y según la clase, “Solo daños”, “Fatal” y “No Fatal” [23]. Se considera “Solo daños” el accidente vial en el que no hubo muertos y heridos, solamente ocurrieron daños materiales a vehículos y/o propiedades del estado. Se considera “Fatal” a el accidente vial en el que resultan pérdidas de vidas humanas (muertos), puede haber heridos y consecuentemente daños materiales. En el caso de “No Fatal” comprende el accidente de tránsito en el que no se presenta pérdida de vidas humanas, pero sí lesionados (heridos) y daños materiales. Como se puede observar en estos datos, aunque los accidentes totales se han presentado en ligero descenso, se sigue manteniendo un alto volumen de registro de accidentes. Los datos que se presentan en la tabla son obtenidos en su totalidad del INEGI [23].

Tabla 2.3: Accidentes de tránsito terrestres en zonas urbanas hasta el año 2016.

Año	Solo daños	Fatal	No fatal	Total
2007	363,091	5,456	107,732	476,279
2008	356,451	5,777	104,207	466,435
2009	322,432	5,960	100,075	428,467
2010	327,262	5,671	94,334	427,267
2011	293,700	5,716	87,769	387,185
2012	299,405	4,737	86,269	390,411
2013	298,218	4,412	83,142	385,772
2014	295,857	4,168	80,548	380,573
2015	304,072	4,024	73,970	382,066
2016	288,213	3,994	67,844	360,051

El INEGI presenta datos sobre víctimas y heridos en los accidentes de tránsito. En el último año de registro (2016) se notificaron un total de 97,614 heridos en los accidentes de tránsito y 4,559 de víctimas fatales [23]. En la Tabla 2.4 se recopila la información de los tipos de accidentes de tránsito en zonas urbanas y suburbanas del país por su causa, clasificados por el sexo de la persona responsable o no identificados, por posible fuga, después del accidente [23]. Podemos observar en los datos que en los accidentes registrados hay una gran mayoría identificados como responsables de sexo hombre y los accidentes de tránsito con más alto índice son las colisiones con vehículo automotor, con objeto fijo y con motocicleta.

Tabla 2.4: Tipos de accidentes de tránsito en zonas urbanas según el último año de registro del INEGI, 2016.

Tipo de accidente	Hombre	Mujer	N/I	Total
Colisión con vehículo automotor	179,469	40,716	15,813	235,998
Colisión con peatón (atropellamiento)	9,188	1,577	2,597	13,362
Colisión con animal	1,104	81	167	1,352
Colisión con objeto fijo	32,163	5,214	9,843	47,220
Volcadura	6,185	776	1,586	8,547
Caída de pasajero	1,732	196	209	2,137
Salida del camino	5,773	721	1,504	7,998
Incendio	209	24	76	309
Colisión con ferrocarril	215	20	35	270
Colisión con motocicleta	25,901	3,849	3,142	32,892
Colisión con ciclista	3,960	507	640	5,107
Otro	3,602	422	835	4,859
Total	269,501	54,103	36,447	360,051

Después de analizar las estadísticas sobre accidentes en el que se presentan lesiones para ser atendidas médicamente, surgen ciertas preguntas de interés. ¿Cuántos de los accidentes ya registrados se atendieron oportuna y adecuadamente en el tiempo necesario?, ¿cuántas de las lesiones accidentales presentaron complicaciones como

discapacidad o fatalidad por no recibir la atención en el tiempo necesario?, ¿existen metodologías que se usen y ayuden a que los accidentes futuros se puedan atender con mejores tiempos de respuesta? Estas preguntas de interés justifican la investigación de la ciencia en el campo de la investigación de operaciones. El desarrollo y aplicación de modelos de investigación de operaciones, en particular, de localización de servicios de emergencia, sirven como posibles herramientas que analicen y respondan a algunas de éstas y otras interrogantes importantes.

A continuación enunciamos datos muy importantes sobre la seguridad vial, emitidos por la Organización Mundial de la Salud (OMS) [30]:

- Cada año los accidentes de tránsito causan la muerte de aproximadamente 1.3 millones de personas en todo el mundo.
- Los peatones, los ciclistas y los conductores o pasajeros de vehículos motorizados de dos y tres ruedas se conocen colectivamente como usuarios vulnerables de vía pública y representan la mitad de todas las muertes por accidentes de tránsito en todo el mundo.
- A medida que aumenta la velocidad media de un conductor, también aumenta la probabilidad de accidentes y consecuencias del mismo. Solo 47 países, que representan el 13 % de la población mundial, tienen leyes alineadas con las mejores prácticas sobre la velocidad, en zonas urbanas.
- Conducir bajo los efectos del alcohol con una concentración en sangre (CAS) mayor a 0.05 g/dl aumenta el riesgo de sufrir un accidente de forma significativa. La OMS recomienda un CAS inferior a 0.05 g/dl para la población en general.
- Usar un casco de buena calidad puede reducir el riesgo de muerte en un 40 % y de lesiones graves en un 70 % aproximadamente. Solo 44 países que representan el 17 % de la población mundial, tienen leyes sobre el uso del casco por motociclistas.

- Usar el cinturón de seguridad conlleva una reducción del 45 % al 50 % del número de traumatismos mortales y no mortales entre los ocupantes de los asientos delanteros y del 25 % al 75 % entre los ocupantes de los asientos traseros.
- El acceso a una atención de emergencia eficaz y oportuna tras un accidente de tránsito salva vidas y reduce el riesgo de discapacidad entre los lesionados.

Entre las soluciones clave que propone la OMS, están el establecer un sistema de atención de emergencia en donde se destaque el establecimiento de números de servicios con accesos universales, vinculados a servicios de prestación de asistencia prehospitalaria de emergencia en los centros de salud. Además, propone la capacitación de todos los profesionales sanitarios de primera línea, en atención básica de emergencia y también la promoción de la formación de los primeros intervinientes no profesionales, en los lugares donde los sistemas formales sean limitados. Esto nos habla de la preocupación de la OMS, por crear un mensaje de conciencia al mundo, en crear sistemas bien estructurados para la rápida atención médica y capacitación de los paramédicos, etc.

Finalmente y aunque se tiene el conocimiento de que las lesiones accidentales pueden ser prevenidas o controladas, existen en nuestro país pocos programas dirigidos a la población que asuman el cargo de informar y controlar sobre éstas. Son pocos los programas encargados de hacer evaluaciones y métricas que analicen los tiempos necesarios para la atención de los servicios de emergencia. Es necesario hoy en día impulsar a las dependencias a trabajar en la investigación de metodologías para la reducción de traslados y/o procurar que éstos tiempos sean estrictamente los necesarios.

2.2 HISTORIA DE LOS MODELOS DE LOCALIZACIÓN DE INSTALACIONES DE SERVICIOS DE EMERGENCIA

Establecer buenas decisiones de ubicación de instalaciones es muy importante ya que éstas pueden derivar en resultados positivos y de gran beneficio. Lo anterior se menciona a partir de la teoría de localización ya conocida en la literatura que establece que cualquier decisión de ubicación que definan los tomadores de decisiones dentro de las organizaciones, influye radicalmente en el traslado y/o contacto entre el cliente y la instalación.

Existen una diversidad de trabajos que introducen y clasifican problemas de localización, desde modelos clásicos a más recientes. Para tal efecto, referimos al lector a los trabajos recientes de: ReVelle y Eiselt [32], Klose y Drexel [26], Şahin y Süral [34], Farahani et al. [14], Bruno, Cerulli y Gentili [7], Melo, Nickel y Saldanha-Gama [27], Farahani et al. [15] y Prodhon y Prins [31]. En el resto de la sección, nos enfocamos en los trabajos de localización más relacionados con la presente tesis.

Toregas et al. [42] introducen un modelo para un problema de localización como un problema de programación entera, en el cual establecieron conjuntos de demanda y conjuntos potenciales de ubicación. Church y ReVelle [8] proponen para localizar servicios de emergencia, el modelo para el problema de máxima cobertura (MCLP) para cubrir la mayor cantidad de demanda posible de un conjunto de sitios, teniendo como factor de costo importante, la cantidad de instalaciones de emergencia que se tengan disponibles para ubicar. Estos modelos de localización mencionados, son de los primeros modelos importantes referentes a cobertura y tales abrieron la brecha al nacimiento de modelos con enfoque a servicios de emergencia.

Para darle mayor peso y utilidad a los modelos de localización, los modelos que preceden comienzan a encaminarse en la aplicación de instalaciones de servicios de emergencia y son encausados a resolver problemas de ubicación para estaciones

de bomberos, departamentos de policías, así como ambulancias.

Entre los modelos de localización aplicados a servicios de emergencia tenemos a Schilling et al. [35] quienes proponen modelos de localización de equipo (Team/FLEET, por sus siglas en inglés) aplicados a servicios de instalaciones de bomberos, en donde se considera que existen situaciones en las que se requieren servicios especiales, en cuyo caso el modelo plantea poder ubicar dos tipos de instalaciones, uno que brinde servicios básicos primarios y otro los servicios especiales. Ball y Lin [2] proponen el modelo confiable (Rel-P, por sus siglas en inglés) aplicado a vehículos de servicios de emergencias. Los autores realizan una extensión del modelo de cobertura de conjuntos (LSCM). En su trabajo, los autores toman en cuenta la probabilidad que cierto sistema pueda fallar y por tanto, toman consideraciones de naturaleza estocástica. Pueden revisarse algunos trabajos de investigación más recientes sobre modelos de localización aplicados a servicios de emergencia de los autores Moeini, Jemai y Sahin [28] y Goldberg [19].

Considerando situaciones más realistas, surgen los modelos de localización probabilísticos, incorporando la incertidumbre que se da de forma natural, en los sistemas que se forman de estos problemas. Daskin [11] desarrolló el modelo de máxima demanda cubierta esperada, uno de los primeros modelos probabilísticos en el cual se plantea analizar un control sobre la demanda que pueda presentarse. Establece un sistema de conjuntos de nodos en donde es posible localizar un número k de instalaciones en un mismo nodo dado un parámetro de p instalaciones. ReVelle y Hogan [33] propusieron para el problema de localización de máxima disponibilidad los modelos MALPI y MALPII. El objetivo de estos modelos es cubrir la mayor cantidad de demanda posible utilizando la mínima cantidad de ambulancias posibles, consideran una probabilidad asociada a la disponibilidad de atención de una instalación de emergencia .

Gendreau, Laporte y Semet [17] desarrollaron el modelo de doble estándar (DSM, por sus siglas en inglés), un modelo probabilístico de localización de ambu-

lancias para maximizar la demanda cubierta dentro de dos proporciones de radio de cobertura, estableciendo a estos, espacios diferentes de porcentajes de probabilidad para cumplir el objetivo.

Los modelos de localización de instalaciones han sido comparados en distintos análisis y bajo determinadas circunstancias, tanto los que son propuestos para los sectores públicos como para los privados. Múltiples artículos, trabajos de investigación y análisis sobre localización de servicios de emergencias con enfoque a ambulancias han sido publicados. Entre los trabajos más reconocidos se encuentra el de Brotcorne, Laporte y Semet [6] quienes realizan una recopilación y análisis de los trabajos de localización de servicios de emergencia más importantes. En dicho artículo, los autores discuten acerca de los primeros modelos que se desarrollaron, cómo fueron las primeras formulaciones de éstos y de cómo poco a poco se fueron introduciendo características cada vez más realistas, lo cual propició que las técnicas de solución también evolucionaran. Lo anterior además desencadena el desarrollo de nuevos modelos de localización dinámicos cuyo objetivo es la reubicación de servicios de emergencia en ciertos periodos de tiempo.

Con enfoques más complejos surgen los modelos de localización dinámicos. Uno de los primeros trabajos dinámicos fue el propuesto por Gendreau, Laporte y Semet [17], quienes desarrollaron el modelo dinámico de doble estándar (DDSM, por sus siglas en inglés) el cual consiste principalmente en la reubicación en tiempo real para un problema de flotillas de ambulancias. Los autores de este modelo dinámico toman en cuenta consideraciones sobre la demanda de las llamadas que requieren atención con más prioridad que otras. Además toman en consideración el número de veces que es usada cada ambulancia para así, dar prioridades de uso de las mismas.

Se atribuye la razón del interés en los enfoques de análisis de la teoría de la ubicación, consecuente a la complejidad cada vez mayor de los problemas sociales y urbanos que existían, además de los planteamientos cualitativos tradicionales. Según Toregas y ReVelle [41], lo anterior originó que las formulaciones resultaran cada vez

menos aplicables debido a la magnitud de los problemas y que como consecuencia derivó hacia un movimiento natural para los planificadores, el pasar al análisis.

Los modelos de localización de servicios de emergencia se pueden diferenciar debido a sus características, es decir, la estructura del modelo se adecúa en dependencia de las restricciones y en función a los criterios que se evalúan.

2.3 CLASIFICACIÓN DE MODELOS DE LOCALIZACIÓN DE INSTALACIONES DE SERVICIOS DE EMERGENCIA

Los modelos de localización de instalaciones con aplicaciones en servicios de emergencia, pueden clasificarse de acuerdo a su estructura, en tres tipos:

- **Deterministas:** Son los modelos en los que se conoce la información de los datos y los parámetros de entrada. En estos modelos, si se introducen los mismos datos de entrada con los mismos parámetros, producirán siempre la misma salida. Para estos modelos no se considera incertidumbre o azar, son estáticos. Son los modelos más utilizados por los tomadores de decisiones en la planificación de ubicaciones, ya que si se emplean desde el inicio, son parte importante de una estrategia de ubicación.
- **Probabilistas:** Son los modelos en los que se considera que existe incertidumbre o probabilidad en sus datos y/o parámetros de entrada, por tal motivo existe variabilidad en los datos de salida del modelo. Son modelos con estructuras más complejas, son utilizados para ubicar instalaciones en un sistema, tomando en cuenta operación y disponibilidad.
- **Dinámicos:** En los modelos dinámicos se consideran características muy realistas para los problemas de localización, su estructura es muy compleja ya que además de considerar incertidumbre dentro de sus datos y parámetros de entrada, toma en cuenta proporcionar disponibilidad amplia, además estar presente

la necesidad de la reubicación de las instalaciones a lo largo de cierto periodo de tiempo, lo cual asegura una disponibilidad muy alta.

De acuerdo en un análisis de los modelos de localización existentes, Brotcorne, Laporte y Semet [6] mencionan que los modelos deterministas ignoran consideraciones estocásticas y pueden ser muy útiles e importantes para las primeras etapas de la planeación de localización. Los modelos probabilistas son desarrollados para operar como un sistema de colas y reflejan el hecho de que existe la posibilidad de falta de disponibilidad en la respuesta de atención en determinadas circunstancias. Los modelos dinámicos desarrollados más recientemente han sido formulados para ser capaces de crear reubicaciones a través del tiempo en el mismo día, con el fin de proveer una mejor cobertura.

2.4 PROBLEMA DE LOCALIZACIÓN DE COBERTURA DE CONJUNTOS

El Problema de Localización de Cobertura de Conjuntos (LSCM, por sus siglas en inglés: *Location Set Covering Model*) propuesto por Toregas et al. [42] se define formalmente como sigue. Sea un conjunto de nodos o puntos de demanda V , los cuales necesitan ser atendidos o cubiertos y además un conjunto de nodos o puntos potenciales W , en donde se pueden ubicar las instalaciones. Suponemos que existe una demanda a_i para cada punto $i \in V$ la cual se asume es finita. Se conoce además un tiempo t_{ji} que es el tiempo más corto de trasladarse desde un punto potencial $j \in W$ hacia un punto de demanda $i \in V$. Decimos que un punto $i \in V$, está cubierto por un sitio $j \in W$, si y solo si $t_{ji} \leq r$, donde r es un radio de cobertura que se define previamente, para establecer la distancia o tiempo de respuesta máximo como límite. Se denota como W_i al conjunto de sitios dentro de r que cubren los puntos de demanda i tal que $W_i = \{j \in W : t_{ji} \leq r\}$ aquellos nodos potenciales j dentro del conjunto W_i que tienen un tiempo menor o igual al radio de cobertura definido.

La variable de decisión x_j binaria se define como:

$$x_j = \begin{cases} 1, & \text{si se asigna una instalación en el punto } j \in W; \\ 0, & \text{si no se asigna una instalación en el punto } j \in W. \end{cases}$$

El modelo se plantea como sigue:

Modelo LSCM

$$\text{Minimizar} \quad f = \sum_{j \in W} x_j \quad (2.1)$$

$$\text{sujeto a} \quad \sum_{j \in W_i} x_j \geq 1 \quad i \in V \quad (2.2)$$

$$x_j \in \{0, 1\} \quad j \in W \quad (2.3)$$

Para este problema, se tiene como función objetivo (2.1) minimizar el número de instalaciones que se necesitan para cubrir todos los puntos de demanda. Las restricciones (2.2) establecen que cada punto de demanda $i \in V$ debe estar cubierto al menos una vez por una instalación. Las restricciones (2.3) nos hablan de la naturaleza binaria de las variables x_j . La formulación del modelo para el problema de cobertura de conjuntos, es un modelo de programación lineal entera, presentada originalmente por Toregas et al. [42].

La estructura del modelo asume que para todos los puntos de demanda y de localización, así como la mínima distancia o tiempo entre cualquier par de puntos es conocida. En el modelo también se asume que t_{ji} es un número finito. Aparece por primera vez el concepto de máxima cobertura de servicio, para delimitar el radio de cobertura límite en relación al tiempo que se desea delimitar. El costo de ubicar una instalación de emergencia, es el factor importante que resulta del planteamiento de este modelo, ya que se busca utilizar la mínima cantidad posible que asegure una

cobertura total. La estructura simple que existe en este modelo es particularmente importante, lo que resulta ser práctico y ventajoso a la hora de implementar.

2.5 PROBLEMA DE LOCALIZACIÓN DE MÁXIMA COBERTURA

El problema de Localización de Máxima Cobertura (MCLP, por sus siglas en inglés: *Maximal Covering Location Problem*) consiste en ubicar instalaciones de emergencia que permitan atender la mayor cantidad posible de demanda de una población. Aludiremos el término de ambulancias a las instalaciones de emergencia ya que como hemos justificado anteriormente, hacemos referencia a las mismas mediante su aplicación.

Partimos de dos conjuntos establecidos, un conjunto de nodos o puntos V , con una cantidad de demanda, los cuáles necesitan ser atendidos dentro de una cierta distancia r definida como tiempo máximo de respuesta y además un conjunto de nodos o puntos potenciales W , en donde resulta posible ubicar las ambulancias. Un punto $i \in V$, está cubierto por un sitio $j \in W$, si el tiempo entre el punto potencial j y el punto de demanda i es un tiempo menor o igual que r ($t_{ji} \leq r$), el cual es el máximo tiempo de respuesta que se predefine para el modelo.

El modelo que desarrollaron Church y ReVelle [8] para resolver el problema de localización de máxima cobertura parte del supuesto que una ambulancia debe brindar atención rápida dentro de un rango de cobertura de tiempo o distancia límite.

Un factor muy importante en el planteamiento de este modelo, es que toma en cuenta las instalaciones de emergencia a ubicar, es decir, el modelo dispone solamente de un número determinado de ambulancias que se tengan disponibles, un número determinado de ambulancias el cual se predefine como parámetro del modelo. Debido

a este parámetro p , que establece cantidad, podemos anticipar con naturalidad que no se podrá realizar la cobertura total de cada sitio i de demanda, pero la formulación del modelo buscará cubrir aquellos sitios que tengan la mayor demanda, dentro de un tiempo considerado deseable y con el número de ambulancias disponibles.

Parámetros:

r = radio de cobertura que establece el tiempo de respuesta máximo límite.

W_i = conjunto de sitios potenciales que cubren al punto $i \in V$, $W_i = \{j \in W : t_{ji} \leq r\}$.

t_{ji} = tiempo más corto en trasladarse desde un punto j a un punto i ; $i, j \in V$.

a_i = cantidad de demanda en el punto $i \in V$.

p = cantidad de ambulancias a ubicar.

Como variables de decisión tenemos la variable x_j binaria que nos indica:

$$x_j = \begin{cases} 1, & \text{si se asigna una ambulancia en el punto } j; \\ 0, & \text{si no se asigna una ambulancia en el punto } j. \end{cases}$$

La variable de decisión y_i es una binaria que nos indica si el punto i se cubre de la siguiente manera:

$$y_i = \begin{cases} 1, & \text{si el punto de demanda } i \text{ es cubierto por al menos una ambulancia;} \\ 0, & \text{de otro modo.} \end{cases}$$

El modelo se plantea como sigue:

Modelo MCLP

$$\text{Maximizar} \quad f = \sum_{i \in V} a_i y_i \quad (2.4)$$

$$\text{sujeto a} \quad \sum_{j \in W_i} x_j \geq y_i \quad i \in V \quad (2.5)$$

$$\sum_{j \in W} x_j = p \quad (2.6)$$

$$x_j \in \{0, 1\} \quad j \in W \quad (2.7)$$

$$y_i \in \{0, 1\} \quad i \in V \quad (2.8)$$

La función objetivo (2.4) expresa que se debe maximizar la cantidad de demanda cubierta. Las restricciones (2.5) nos dicen que se considera un punto de demanda i cubierto solo si existe una ambulancia en el sitio j del conjunto W_i que lo cubra. La restricción (2.6) limita a establecer solamente la cantidad de ambulancias que se tengan. Las restricciones (2.7) y (2.8) nos expresan la naturaleza binaria de las variables x_j y y_i

2.6 MODELO DE LOCALIZACIÓN DE MÁXIMA COBERTURA ESPERADA

Tal como se introdujo para los modelos de cobertura de respaldo para brindar una cobertura adicional, es importante poder analizar cuando un sistema puede tener una demanda alta y poder trabajar sobre el mismo, dadas las circunstancias.

El control que se tiene sobre la demanda en un sistema puede cambiar de un momento a otro. Bajo esta teoría, resultaría interesante analizar la tendencia probabilística de dicho sistema, el cual se plantea debido a la incertidumbre que se da naturalmente. Debido a esto, múltiples investigaciones han surgido en torno a buscar satisfacer estos cambios en un sistema.

Un modelo probabilista que resuelve el problema de localizar instalaciones según la demanda que pueda esperarse, es el Modelo de Localización de Máxima Cobertura Esperada (MEXCLP, por sus siglas en inglés: *Maximum Expected Co-*

vering Location Model) propuesto por Daskin [11]. Fue planteado para un sistema con un conjunto de nodos de demanda y uno de nodos potenciales donde es posible ubicar k ambulancias en un mismo nodo de las p ambulancias totales.

El MEXCLP tiene la estructura base del modelo tradicional del problema de máxima cobertura y además incorpora la probabilidad de que una ambulancia pueda o no dar servicio a un punto de demanda. De esta manera, el modelo asume que hay una probabilidad q de que una ambulancia no este funcionando o no pueda responder una llamada, esta probabilidad se asume que es conocida para todas las ambulancias.

En este modelo se usa el parámetro p que indica las ambulancias disponibles a ubicar. Dada la formulación del modelo, más de una ambulancia puede ser ubicada en el mismo sitio. Se puede entonces definir que la probabilidad de que el nodo $i \in V$ esté cubierto por k ambulancias disponibles es $1 - q^k$.

Bajo los supuestos anteriormente señalados, el número de ambulancias que estarán disponibles siguen una distribución binomial. Es decir, si el nodo $i \in V$ está cubierto por k ambulancias, la demanda cubierta esperada correspondiente, está dada por:

$$E_k = a_i(1 - q^k),$$

donde a_i es la demanda en el punto $i \in V$. Finalmente la contribución marginal de la k -ésima ambulancia esperada es:

$$E_k - E_{k-1} = a_i(1 - q)q^{k-1}.$$

Para este modelo se define la variable y_{ik} de la siguiente manera:

$$y_{ik} = \begin{cases} 1, & \text{si el punto de demanda } i \text{ es cubierto por } k \text{ ambulancias;} \\ 0, & \text{en otro caso.} \end{cases}$$

Siguiendo la misma estructura de parámetros :

r = radio de cobertura que establece el tiempo de respuesta máximo límite.

W_i = conjunto de sitios potenciales que cubren el punto $i \in V$, $W_i = \{j \in W : t_{ji} \leq r\}$.

t_{ji} = tiempo más corto en trasladarse desde un punto j a un punto i ; $i, j \in V$.

a_i = cantidad de demanda en el punto $i \in V$.

p = cantidad de ambulancias a ubicar.

Modelo MEXCLP

$$\text{Maximizar} \quad f = \sum_{i \in V} \sum_{k=1}^p a_i (1-q) q^{k-1} y_{ik} \quad (2.9)$$

$$\text{sujeto a} \quad \sum_{j \in W_i} x_j \geq \sum_{k=1}^p y_{ik} \quad i \in V \quad (2.10)$$

$$\sum_{j \in W} x_j \leq p \quad (2.11)$$

$$x_j \in \{0, 1, \dots, p\} \quad j \in W \quad (2.12)$$

$$y_{ik} \in \{0, 1\} \quad i \in V \quad (2.13)$$

Se tiene como función objetivo a cumplir (2.9) el maximizar la demanda cubierta esperada. Por tanto se tiene que para maximizar la función objetivo, la contribución marginal esperada multiplica las variables y_{ik} que resulten con el valor unitario. Las restricciones (2.10) nos indican que cada sitio i deberá estar cubierto por igual número de ambulancias k disponibles es decir ambos lados de la ecuación con igual valor numérico cubriendo el sitio i . Las restricciones (2.11) se usan para establecer que el total de p ambulancias disponibles a ubicar. La restricciones (2.12) y (2.13) nos hablan de la naturaleza de las variables de decisión.

MEXCLP fue resuelto con una heurística desarrollada por sus propios autores, como un método de solución que llega a obtener soluciones que no garantizan ser

óptimas, aunque la diferencia entre una solución óptima a las que ellos encontraron con la heurística resultó ser pequeña, de acuerdo a los autores.

CAPÍTULO 3

MODELOS ESTUDIADOS

En este capítulo se plantean los modelos de localización con cobertura de respaldo BACOP1 Y BACOP2, desarrollados por Hogan y ReVelle [20] que se estudian en la presente tesis. Se explica también brevemente su resolución mediante CPLEX y GAMS.

3.1 MODELOS DE LOCALIZACIÓN CON COBERTURA DE RESPALDO

Los modelos de cobertura se han utilizado en muchas aplicaciones de planificación que introdujeron a principios de los años setenta. La idea principal de los modelos de localización de cobertura de respaldo es primeramente cubrir o proteger ciertos puntos de demanda con el requisito adicional de agregar una cobertura extra por si el primer servidor llega a fallar. Según un estándar de distancia, del cual se miden las ubicaciones, estos modelos se han diseñado para asignar instalaciones de emergencia (ambulancias) en las posiciones en una red establecida, con el objetivo de lograr la disponibilidad de sus servicios con el menor costo de distancia o tiempo.

Una ubicación adecuada que garantiza la presencia de una instalación dentro de un estándar de distancia es un objetivo ya razonable y justificado; sin embargo,

en el caso de vehículos o unidades de emergencia que emanan y fluyen dentro de una red, donde se localizan, parecen justificados criterios adicionales que se encarguen de una mejor disponibilidad temporal del servicio.

El manejo eficiente de las instalaciones de emergencia (ambulancias) que pueden responder a una sola llamada a la vez, puede requerir una cobertura de respaldo en áreas de alta o mayor demanda para lograr mantener un nivel de servicio más uniforme.

El vehículo de emergencia (ambulancia), tiene una capacidad límite en términos de atención de llamadas por día y a su vez solo es posible que pueda manejar solo una llamada a la vez. La capacidad limitada de la ambulancia aunada a la naturaleza estocástica de la demanda pueden ocasionar que la cobertura se deteriore durante lapsos o períodos de alto volumen de trabajo. Es decir, las coberturas que existen en el sistema en un cierto periodo de tiempo, podrían no ser suficientes durante momentos de gran demanda. Incluso es posible inferir que una segunda llamada que surge dentro de un mismo rango de cobertura, con un momento de diferencia, puede no tener una unidad de respuesta dentro del estándar de distancia y por lo tanto se consideraría como no cubierta. Es por lo anterior, que los modelos con cobertura de respaldo pueden solucionar problemas de localización con la necesidad de una cobertura que sea amplia.

A continuación se enlistan algunos de los motivos principales para tener una cobertura de respaldo:

- Cuando una ambulancia tiene la responsabilidad de trasladarse hacia un punto de demanda que le solicita atención, ocasiona que ciertos puntos de demanda que tenían la cobertura de dicha ambulancia se queden desprotegidas es decir, ya no estén cubiertos.
- Puede ocurrir que las unidades móviles tipo ambulancia no estén disponibles para brindar la atención a un punto de demanda, dada alguna circunstancia de

falla en la unidad. Esto también amerita la necesidad de una cobertura doble.

- Puede acontecer que en ciertas circunstancias se presentara más de una necesidad de atención, en un mismo punto de demanda. En este caso sería necesario considerar tener más de una ambulancia con la finalidad de dar la atención a ambas necesidades en el punto requerido.

El poder utilizar una cobertura doble o de respaldo a la mayor cantidad de población posible resulta muy benéfico para proteger la cobertura de las variaciones de la disponibilidad de la unidad móvil (ambulancia).

El primer modelo de cobertura de respaldo incorpora aspectos del problema de localización de cobertura de conjuntos (LSCM) para su formulación y el de máxima cobertura (MCLP), ya que el objetivo busca maximizar la demanda. Éstos se explican a continuación.

3.1.1 MODELO BACOP1

El modelo de cobertura de respaldo, introducido por Hogan y ReVelle [20] como BACOP1, es un modelo de localización determinista que se desarrolló resaltando como prioridad a buscar, la segunda cobertura de un punto o nodo.

BACOP1 es formulado como un modelo de programación entera mixta. Los puntos que necesitan ser atendidos (demanda) se representan en un conjunto $V = \{1, 2, \dots, n\}$ y los puntos potenciales de ambulancias se representan en un conjunto $W = \{1, 2, \dots, m\}$.

A cada punto de demanda se le asocia una cierta cantidad de demanda a_i .

Parámetros:

r = tiempo de respuesta también conocido como radio de cobertura.

W_i = conjunto de sitios potenciales que cubren al punto $i \in V$, $W_i = \{j \in W : t_{ji} \leq r\}$.

t_{ji} = tiempo más corto en trasladarse desde un punto j a un punto i ; $i, j \in V$.

a_i = cantidad de demanda en el punto $i \in V$.

p = cantidad de ambulancias disponibles para ser ubicadas.

La variable binaria de decisión u_i nos indica si el punto i se cubre dos veces, de la siguiente manera:

$$u_i = \begin{cases} 1, & \text{si el punto de demanda } i \text{ es cubierto por al menos dos ambulancias;} \\ 0, & \text{en otro caso.} \end{cases}$$

La variable entera x_j nos indica la cantidad de ambulancias asignadas en el sitio j .

$$x_j \in \mathbb{Z}^+ = \{0, 1, 2, \dots\}$$

Formalmente a continuación:

Modelo BACOP1

$$\text{Maximizar} \quad f = \sum_{i \in V} a_i u_i \quad (3.1)$$

$$\text{sujeto a} \quad \sum_{j \in W_i} x_j - u_i \geq 1 \quad i \in V \quad (3.2)$$

$$\sum_{j \in W} x_j = p \quad (3.3)$$

$$x_j \in \mathbb{Z}^+ \quad j \in W \quad (3.4)$$

$$u_i \in \{0, 1\} \quad i \in V \quad (3.5)$$

Este primer modelo de cobertura de respaldo, sencillamente tiene como función objetivo a cumplir (3.1) el maximizar la demanda cubierta dos veces. Las restricciones (3.2) representan dos condiciones. Primero, el caso $u_i=0$ implica que cada punto de demanda i debe ser cubierto al menos una vez. Segundo, cuando $u_i=2$, esto obliga

a que haya al menos dos ambulancias cubriendo dicho punto. En otras palabras, (3.2) establece la relación entre las variables x_j y u_i . Las restricciones (3.3) establecen que hay p ambulancias disponibles. Las restricciones (3.4) y (3.5) establecen la naturaleza de las variables de decisión.

Una formulación alterna de este mismo modelo, resultaría si además de lo ya establecido, se considera tener otro conjunto de sitios de demanda i diferentes de W_i , y quisiéramos que los puntos estuvieran cubiertos dentro de una nueva cobertura estándar. Este nuevo estándar de cobertura debe ser más pequeño que el r cobertura ya establecido, ya que de lo contrario, el segundo conjunto de restricciones sería completamente redundante y la formulación colapsaría hacia su forma original.

3.1.2 MODELO BACOP2

Existen casos en los que la demanda para diferentes sitios es en gran medida alta, por lo tanto, la cobertura de respaldo resultaría aplicable para estas situaciones. Pero, por otro lado, se tienen altos costos que implicaría el establecer instalaciones de servicio que aporten una cobertura extra. Con esta motivación, Hogan y ReVelle [20] proponen el modelo de cobertura de respaldo BACOP2.

BACOP2 es otro modelo de localización determinista, el cual basa su idea principal en combinar dos objetivos en una función ponderada. Un término de la función mide las asignaciones de los puntos de demanda con la primera cobertura, el segundo término de la función mide las asignaciones de los puntos con la cobertura doble. Esto se establece asignando a cada objetivo una ponderación específica, que se determina en dependencia de las necesidades que se tengan por lograr. Es de esperarse que soluciones adecuadas al modelo proporcionen cobertura de respaldo a las áreas de alta demanda y la cobertura simple a las áreas de menor demanda. Es recomendable hacer un análisis previo a la decisión de cual será la ponderación tanto para la primera o doble cobertura.

El BACOP2 se construyó extendiendo la formulación del BACOP1, y sigue la misma estructura de conjuntos e igual notación de parámetros.

Se introdujo el parámetro de ponderación $\theta \in [0, 1]$ que es el factor de peso que pondera ambos componentes de la función objetivo.

Se agrega a este modelo la variable binaria y_i definida así:

$$y_i = \begin{cases} 1, & \text{si el punto de demanda } i \text{ es cubierto una vez, por una ambulancia;} \\ 0, & \text{en otro caso.} \end{cases}$$

De igual forma que el BACOP1, la variable u_i denota la doble cobertura:

$$u_i = \begin{cases} 1, & \text{si el punto de demanda } i \text{ es cubierto por dos ambulancias;} \\ 0, & \text{en otro caso.} \end{cases}$$

Modelo BACOP2

$$\text{Maximizar} \quad f = \theta \sum_{i \in V} a_i y_i + (1 - \theta) \sum_{i \in V} a_i u_i \quad (3.6)$$

$$\text{sujeto a} \quad \sum_{j \in W_i} x_j - y_i - u_i \geq 0 \quad i \in V \quad (3.7)$$

$$u_i - y_i \leq 0 \quad i \in V \quad (3.8)$$

$$\sum_{j \in W} x_j = p \quad (3.9)$$

$$x_j \in \mathbb{Z}^+ \quad j \in W \quad (3.10)$$

$$y_i, u_i \in \{0, 1\} \quad i \in V \quad (3.11)$$

Este segundo modelo de cobertura de respaldo, tiene como función objetivo a cumplir (3.6) la maximización de la suma ponderada de la cobertura simple y de respaldo. Las restricciones (3.7) establecen la relación entre las variables x_j , y_i y u_i . Si un nodo i está cubierto solo una vez ($y_i = 1$, $u_i = 0$) esto fuerza a que haya al menos

una ambulancia asignada. Si el nodo se cubre dos veces ($y_i = 1, u_i = 1$) entonces habría dos ambulancias asignadas. Las restricciones (3.8) aseguran que solo puede proporcionarse al nodo i la cobertura adicional si antes existe la primera cobertura. La restricción (3.9) nos indica que la cantidad total de ambulancias disponibles. Las restricciones (3.10) y (3.11) nos hablan de la naturaleza de las variables de decisión.

3.1.3 ANÁLISIS DE LOS MODELOS BACOP1 Y BACOP2

Aunque claramente se observa que en BACOP2 se tienen dos metas como objetivos por cumplirse y existe un enfoque de jerarquía que implica que uno de los objetivos se podría establecer con mayor prioridad que otro, tales objetivos no entran en conflicto uno con el otro y como consecuencia no puede verse como un modelo de optimización multiobjetivo. De hecho las metas están correlacionadas. Un verdadero problema multiobjetivo, desarrolla una solución de compromiso entre los objetivos y permite al responsable de la toma de decisiones, el evaluar las compensaciones y determinar la importancia relativa de cada objetivo, tal como Hogan y ReVelle [20] comentan.

La formulación de los modelos BACOP1 Y BACOP2 mantienen consistencia en su estructura tal como los modelos localización para el problema de máxima cobertura o el modelo para el problema de cobertura de conjunto. Ambos modelos siguen los objetivos originales establecidos y adicionalmente piensan en la incorporación de una cobertura adicional. Sin duda, su naturaleza hace de los modelos de cobertura de respaldo grandes modelos que ayudan en el servicio que se pueda presentar para un sistema.

3.2 MÉTODO DE SOLUCIÓN POR RAMIFICACIÓN Y ACOTAMIENTO

Para resolver problemas de programación entera o programación entera mixta, el método más popular y tradicional es el método de ramificación y acotamiento (B&B, por sus siglas en inglés: *Branch and Bound*). B&B es un algoritmo que trabaja a través de una serie de pasos, relajando el modelo de programación entera para establecer límites o cotas, superiores e inferiores para la función objetivo y también nuevas restricciones para las variables. Va creando ramificaciones como subproblemas con nuevos nodos para explorar posibles soluciones en ellos, hasta encontrar la solución óptima del problema original entero. El enfoque del algoritmo se basa en el principio de que el conjunto total de soluciones factibles se pueden dividir en pequeños subconjuntos de soluciones. Tal como Wolsey [43] lo define en su libro, es una técnica de divide y vencerás. Wolsey comenta que para un problema de programación entera se utiliza comúnmente el método de ramificación y acotamiento en el cuál la relajación de programación lineal proporciona los límites. Actualmente existen implementaciones del método que pueden utilizarse para fines académicos y de investigación.

GAMS/CPLEX

Para la solución de los modelos abordados en esta tesis, se utilizó GAMS como lenguaje de modelación algebraica y el módulo GAMS/CPLEX como el optimizador que aplica ramificación y acotamiento.

CPLEX es una biblioteca de métodos para resolver diferentes tipos de problemas de optimización. CPLEX es estado del arte en este campo. En particular el módulo GAMS/CPLEX es una interfaz que permite modelar el problema en GAMS y desde ahí manda llamar los métodos de CPLEX para resolver el problema entero

mixto.

También es posible utilizar un sistema de interfaz o modelador, el cual pueda permitir al usuario interactuar con el optimizador de una manera más fácil y eficaz. GAMS [5] es un modelador algebraico, es decir, un sistema de modelado de alto nivel que consiste en un compilador de lenguaje y optimizadores integrados de alto rendimiento. Este modelador está diseñado para modelar problemas de optimización enteros lineales, no lineales, mixtos y aplicaciones complejas de modelado a gran escala. Actualmente contiene un portafolio de más de 25 optimizadores diferentes.

CAPÍTULO 4

EXPERIMENTACIÓN Y RESULTADOS

En este capítulo se presenta la descripción de las instancias de prueba para los experimentos propuestos, el objetivo de cada uno y la discusión de los resultados.

4.1 INSTANCIAS DE PRUEBA

El diseño de las instancias fue pensado con la pretensión de acercarnos a la realidad de como funcionan los sistemas de localización de ambulancias. Para llevar a cabo experimentación y análisis de los modelos de cobertura de respaldo, se crearon conjuntos de instancias representativas de prueba.

Una red o sistema de localización se presenta de maneras muy variadas. Debido a lo anterior, los datos no se conocen ni se asumen. Es decir, no es posible poder tener un estándar que los ejemplifique generalmente. Sabiendo esto, las instancias fueron creadas de tamaños variados con la finalidad de observar el comportamiento con distintos datos.

Una instancia representa para este estudio una red de localización. En muchos métodos y experimentos de investigación se utilizan datos aleatorios, principalmente en el área de la estadística y existe toda una teoría de probabilidad acerca de los experimentos aleatorios a su alrededor. Esta teoría establece que un cierto experimento

aleatorio, construido bajo un mismo conjunto aparente de condiciones iniciales puede presentar resultados diferentes.

Se introdujo para este estudio la aleatoriedad en las instancias creadas, la cual permite que los datos en los experimentos sean variados. Además se pretende su uso para evitar influir intencionalmente sobre los datos. Ingolfsson, Budge y Erkut [21] mencionan que al usar la aleatoriedad se llega a un modelo de localización de ambulancias más realista.

4.1.1 TAMAÑO DE LAS INSTANCIAS

Cada instancia contiene los datos de los conjuntos principales de puntos de demanda y puntos potenciales de ubicación. Tales datos representan los conjuntos de nodos V de demanda, además de la demanda a_i de cada uno de ellos y W el conjunto de puntos potenciales. Estos conjuntos ejemplifican una red de localización.

El tamaño de las instancias se encuentra en la Tabla 4.1. Para tres tipos de tamaño se establecen las cantidades de nodos que contiene cada conjunto dentro de una instancia. Se crearon un total de 90 instancias de prueba.

Tabla 4.1: Instancias aleatorias representativas.

Tamaño de instancia	Chicas	Medianas	Grandes
$ V $	100	1,000	10,000
$ W $	20	200	1,000
Total de instancias	30	30	30

4.1.2 REPRESENTACIÓN DE LOS NODOS

Un sitio es representado por un punto en un plano de coordenadas (x, y) . Este punto representa la ubicación geográfica dentro de una red. Todos los puntos se generaron aleatoriamente de acuerdo a una distribución uniforme discreta en el intervalo $[0, 100]$. De esta manera, todos los puntos generados representan la red completa. La demanda a_i del conjunto V , es también generada aleatoriamente y se determinó fijarla así para representar una distribución de demanda uniforme con números enteros en el intervalo $[1, 25]$ para cada instancia.

4.1.3 GENERACIÓN DE LA MATRIZ DE TIEMPO

La distancia más corta entre dos puntos ubicados en el plano cartesiano se midió utilizando la distancia euclidiana. La razón principal de esta elección, fue para utilizar la misma métrica que la de los modelos de la literatura considerados para este trabajo de investigación. Esta distancia es usada en numerosos análisis de investigaciones recientes y casos de estudios sobre problemas de localización de ambulancias. ReVelle y Eiselt [32] señalan su uso en diferentes formulaciones en su análisis sobre localización. Morohosi [29] considera esta distancia en un caso de estudio de problemas óptimos de ambulancias.

A partir de las coordenadas (x, y) de cada punto $i \in V$ y de cada punto $j \in W$ se calcula el tiempo entre los puntos potenciales j hacia los puntos de demanda i . Donde $|W| = n$ y $|V| = m$.

$$(t_{ji}) = \begin{bmatrix} t_{11} & t_{12} & \dots & t_{1m} \\ t_{21} & t_{22} & \dots & t_{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ t_{n1} & t_{n2} & \dots & t_{nm} \end{bmatrix}$$

Con la matriz generada, se procede a la construcción del conjunto W_i , el cual se obtiene analizando la condición de cobertura $W_i = \{j \in W : t_{ji} \leq r\}$. El cual depende del valor del radio de cobertura r que se esté probando.

4.2 CONDICIONES EXPERIMENTALES

GAMS versión 24.9.1 se usó como el modelador algebraico que manda resolver las instancias con el optimizador CPLEX. Cada una de las instancias fueron generadas aleatoriamente en un lenguaje de programación de C++ en el entorno Dev-C++ versión 5.11, el cual tiene los compiladores Mingw y TDM-GCC. Todas las instancias generadas se encuentran disponibles por parte de la autora.

La resolución de los modelos por el optimizador CPLEX versión 12, resuelve los modelos como Programas Enteros Mixtos Lineales (MILP, por sus siglas en inglés). Como criterios de finalización de la ejecución del optimizador, se establecieron los siguientes: un tiempo límite de 10800 segundos o un Intervalo de Optimalidad Relativa (IOR) de .01 %. Para cada uno de los experimentos se utilizó un procesador Intel(R)CPU N2840 con 2.16GHz con 4 GB en RAM, en una PC con plataforma de Sistema Operativo Windows 10 de 64 bits.

4.3 TRABAJO DE EXPERIMENTACIÓN

Para realizar un estudio del comportamiento de los modelos de localización con cobertura de respaldo presentados en el Capítulo 3, BACOP1 y BACOP2, se recurre a realizar 3 experimentos para estudiar el desempeño que tienen estos modelos. Los experimentos 1, 2 y 3 analizarán los parámetros p , r y θ , respectivamente. Para cada experimento se realizó un diseño experimental.

Los experimentos fueron diseñados para ser probados en las instancias de prueba que fueron construidas. Cada uno de los experimentos tiene objetivos generales y preguntas de interés particular. Los resultados que se extraen de los experimentos son los que nos conducen a poder efectuar una evaluación más amplia acerca del comportamiento de tales modelos.

Como se mencionó anteriormente, en las estructuras de los modelos de localización de cobertura de respaldo podemos encontrar clásicamente el uso de parámetros. Los parámetros son muy útiles como argumentos que pueden tomar diferentes valores. Los valores que tomen los parámetros cambian el estado de una red de localización. Estos cambios representan las diferentes situaciones en que podría encontrarse dicha red. La existencia de los parámetros en la estructura de formulación de los modelos de localización de cobertura de respaldo aportan un soporte necesario que da lugar a la diferenciación dentro del entorno de una red. Los parámetros pueden ser usados para obtener ventaja en las variaciones.

Para este estudio se lleva a cabo un análisis de sensibilidad de varios de los parámetros de los modelos. Esto ayudará a los responsables de la toma de decisiones a tener una idea clara acerca de qué tan sensible resulta el modelo con respecto a dichas variaciones.

Entre los objetivos generales de este estudio está el poder validar la eficiencia de los modelos de cobertura de respaldo. La eficiencia se mide en relación con su

funcionamiento al encontrar soluciones, ya sea factibles u óptimas.

La medición de tiempo de ejecución que toma el método de solución en resolver un modelo tiene a su cargo un rol sumamente importante. Esta medición aporta resultados precisos de su rendimiento en rapidez o lentitud. También proporciona una importante medida de comparación frente a otros modelos.

La otra medición es la calidad de la solución. Midiendo la eficiencia y realizando análisis de sensibilidad de parámetros permitirá dar una recomendación acerca de los modelos.

Cada experimento realizado tiene su propio diseño de uso de parámetros. En cada experimento se manipula un parámetro específico. Se realizan para cada experimento las mediciones correspondientes de acuerdo a las condiciones experimentales ya mencionadas.

En cada experimento se resuelven los tres tamaños de instancias. Como se mencionó en el capítulo anterior, el modelo de localización de cobertura de respaldo BACOP2 es llevado a implementación en cada una de las instancias de prueba. El modelo BACOP 1 se implementa únicamente en el experimento 3 maximizando la cobertura doble, con el parámetro $\theta = 0$.

Se plantean para este estudio cinco preguntas importantes a partir de los resultados de los experimentos para evaluar generalmente el modelo de cobertura de respaldo. El trabajo experimental va encaminado a responder estas interrogantes.

1.- ¿Por qué podríamos decir que los modelos de localización de cobertura de respaldo cumplen con el propósito de su desarrollo?

2.- ¿Es posible asumir que los modelos de localización de cobertura de respaldo garantizan optimalidad siempre que sean implementados?

3.- ¿Cómo influye el tamaño de los conjunto de las instancias en las soluciones obtenidas?

4.- ¿Qué se puede decir acerca de la sensibilidad del uso de los parámetros?

5.- ¿Cual sería la fundamentación general para recomendar a los tomadores de decisiones el uso aplicación de los modelos de localización de cobertura de respaldo?

A continuación se presentan y se describen cada uno de los experimentos.

4.4 EXPERIMENTO 1: EVALUACIÓN DEL PARÁMETRO

p

Este primer experimento es llevado a cabo para mostrar que sucede al realizar variación en el uso del parámetro p . El parámetro p fija la cantidad de ambulancias disponibles que se establecen a la hora de resolver cada instancia. Cuando se aumenta o disminuye este parámetro sin duda habrá cambios en la demanda cubierta para cada red. Además de medir la función objetivo alcanzada, también se medirán los tiempos de ejecución. Para este experimento, probaremos resolver para cada conjunto de instancias, el modelo BACOP2.

Criterio de parada del experimento 1: Para cada instancia se establece un tiempo límite de 10800 segundos o un gap (IOR) de 0.01 %.

Objetivos generales

- 1.-Evaluar el impacto que tiene el parámetro p en la resolución del modelo, en la calidad de la solución y el tiempo de cómputo.
- 2.-Analizar la sensibilidad en el uso del parámetro p actuando sobre los tres conjuntos de instancias.

Preguntas de interés particular:¿Qué beneficio se obtendría de la variación del parámetro p y esto a qué se encuentra asociado?

En la Tabla 4.2 se presenta el diseño experimental para este experimento. En la tabla se especifican los valores de los parámetros que se asignaron para ser probados

en los tres tipos de instancias. Como se aprecia los parámetros r y θ están fijos. El parámetro θ se fija en 0.5 para tener un equilibrio entre los dos términos de la función objetivo del modelo.

Tabla 4.2: Tabla de diseño experimental 1.

Parámetro/Tam. Instancia	Ch	M	G
p	5,6,7,8,9,10	10,12,14,16,18,20	10,15,20,25,30
r	10	10	10
θ	0.5	0.5	0.5

La Figura 4.1 muestra la gráfica de análisis de sensibilidad del parámetro p del valor alcanzado de la función objetivo para el experimento 1 al resolver el conjunto de instancias chicas.

La función que representa cada línea en la gráfica muestra los valores máximos, promedio y mínimos obtenidos. En el eje x se tienen los valores del parámetro p que fueron probados en el experimento. En el eje y de la gráfica se tienen valores representativos de medición de la función objetivo.

Como se puede observar en la Figura 4.1 a medida que el parámetro p fue incrementando su valor, la función objetivo crece de manera lineal. Como podemos observar, se aprecia una mayor linealidad en la función promedio que sigue el recorrido de aumento de p . Este comportamiento es esperado, ya que incrementar valores de p en este experimento significa aumentar el número de ambulancias disponibles y se logra alcanzar a cubrir mayor demanda. Por tanto concluimos que el parámetro p resulta ser sensible. En todo el conjunto de instancias chicas se encontraron soluciones que garantizan no estar alejadas de la solución óptima más del 0.01 % indicativo del intervalo de optimalidad relativa y en tiempos menores a 1 milisegundo. Lo anterior nos dice que la eficiencia del modelo para resolver instancias chicas es bueno, al poder encontrar soluciones óptimas rápidamente.

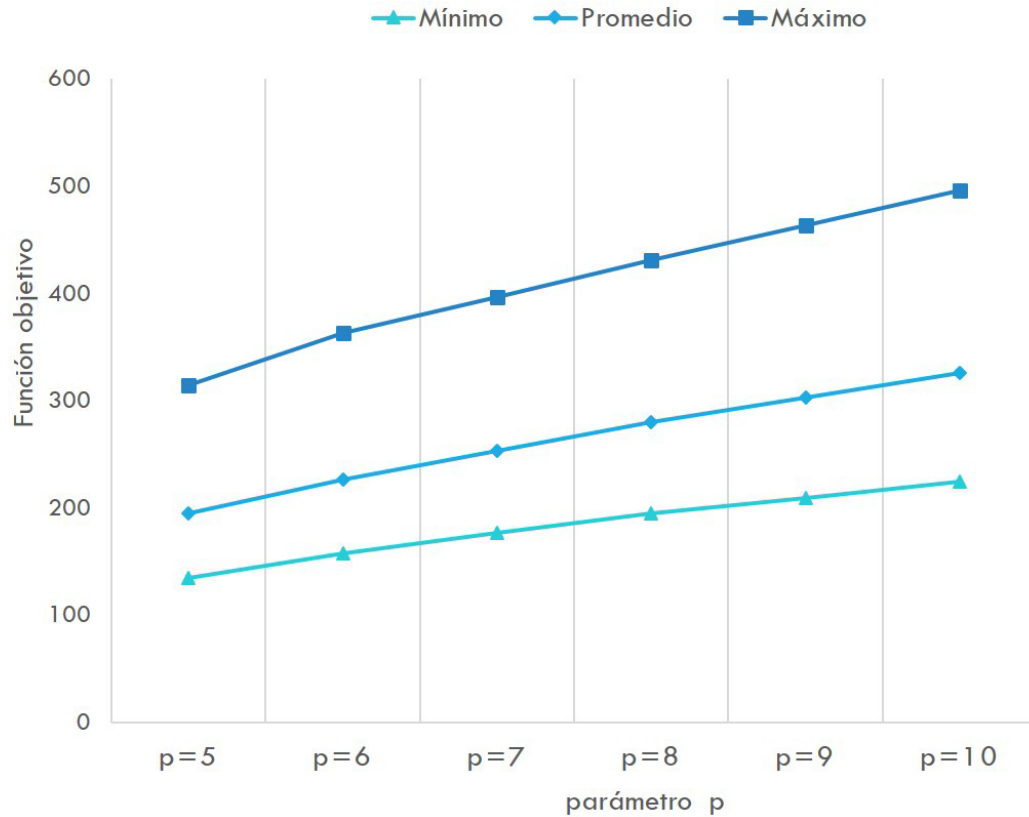


Figura 4.1: Evaluación de p – Instancias chicas.

La Figura 4.2 muestra la gráfica de análisis de sensibilidad del parámetro p del valor alcanzado de la función objetivo en el experimento 1 al resolver el conjunto de instancias medianas.

La función que representa cada línea en la gráfica muestra los valores máximos, promedio y mínimos obtenidos. En el eje x se tienen los valores del parámetro p que fueron probados en el experimento. En el eje y de la gráfica se tienen valores representativos de medición de la función objetivo.

Observamos en la Figura 4.2 que a medida que el parámetro p aumenta su valor, la función objetivo crece de manera lineal. Se puede apreciar una mayor linealidad en la función promedio que sigue el recorrido de aumento del parámetro. Al igual que en las instancias chicas, este comportamiento es esperado. Si se incrementan

los valores de p , también aumenta el número de ambulancias disponibles y se logra cubrir mayor demanda. Por tanto también concluimos que el parámetro p resulta ser sensible en su uso. En todo el conjunto de instancias medianas se encontraron soluciones que garantizan no estar alejadas de la solución óptima más del 0.01 % indicativo del intervalo de optimalidad relativa, todas ellas se resolvieron en tiempos menores a 1 milisegundo. Concluimos que el modelo es capaz de encontrar soluciones óptimas para las instancias medianas de manera eficiente y con una evidente rapidez, lo cual resulta ser muy favorecedor.

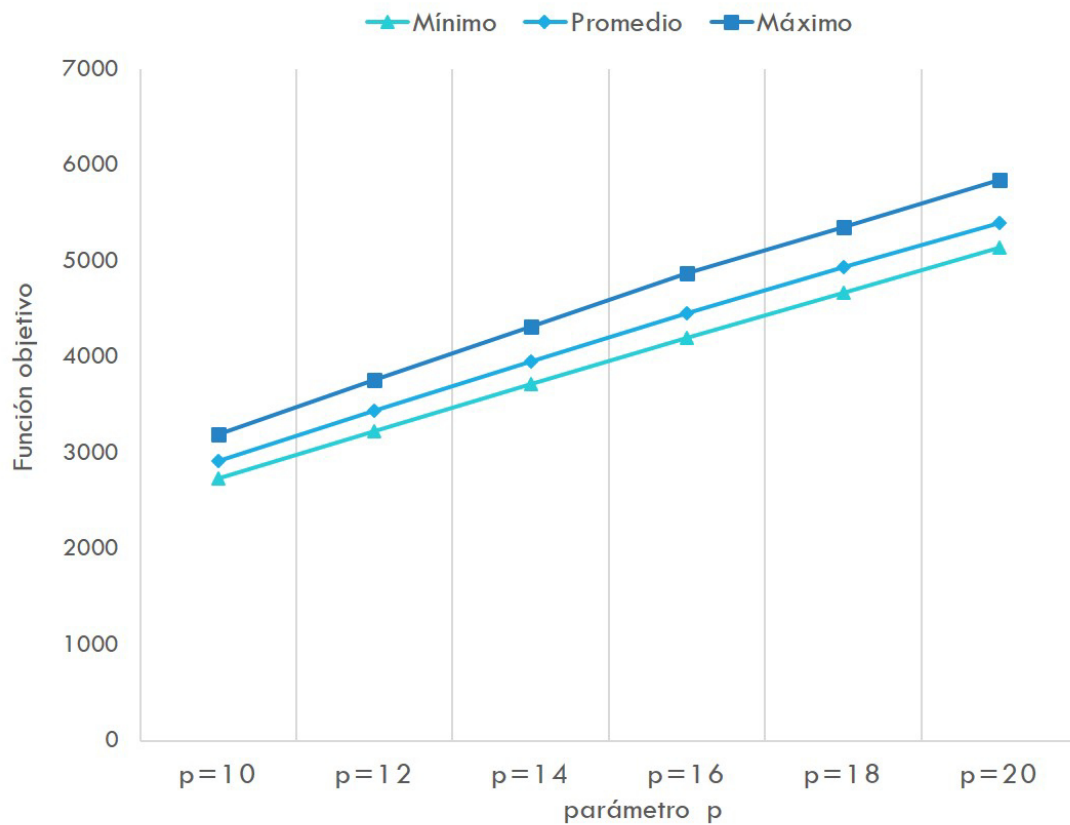


Figura 4.2: Evaluación de p – Instancias medianas.

La Figura 4.3 muestra la gráfica de análisis de sensibilidad del parámetro p del valor alcanzado de la función objetivo en el experimento 1 al resolver el conjunto de instancias grandes. La función que representa cada línea en la gráfica muestra los valores máximos, promedio y mínimos obtenidos. En el eje x se tienen los valores

del parámetro p que fueron probados en el experimento. En el eje y de la gráfica se tienen valores representativos de medición de la función objetivo.

Podemos apreciar en la Figura 4.3, que a medida que el parámetro p aumenta su valor, la función objetivo se encuentra creciendo linealmente. Es posible apreciar una mayor linealidad evidente en la función promedio de la trayectoria de p , particularmente en este conjunto de instancias. De igual forma que en las instancias chicas y medianas, este comportamiento es esperado. Si se incrementan los valores de p aumentará el número de ambulancias disponibles y se logra cubrir mayor demanda. Por tanto se concluye que el parámetro p resulta ser sensible en sus uso. En todo el conjunto de instancias grandes se encontraron soluciones que convergieron hacia soluciones que garantizan no estar alejadas del óptimo más del 0.01 % indicativo del intervalo de optimalidad relativa. Lo cual sugiere un muy buen desempeño del modelo al resolver las instancias del conjunto grande.

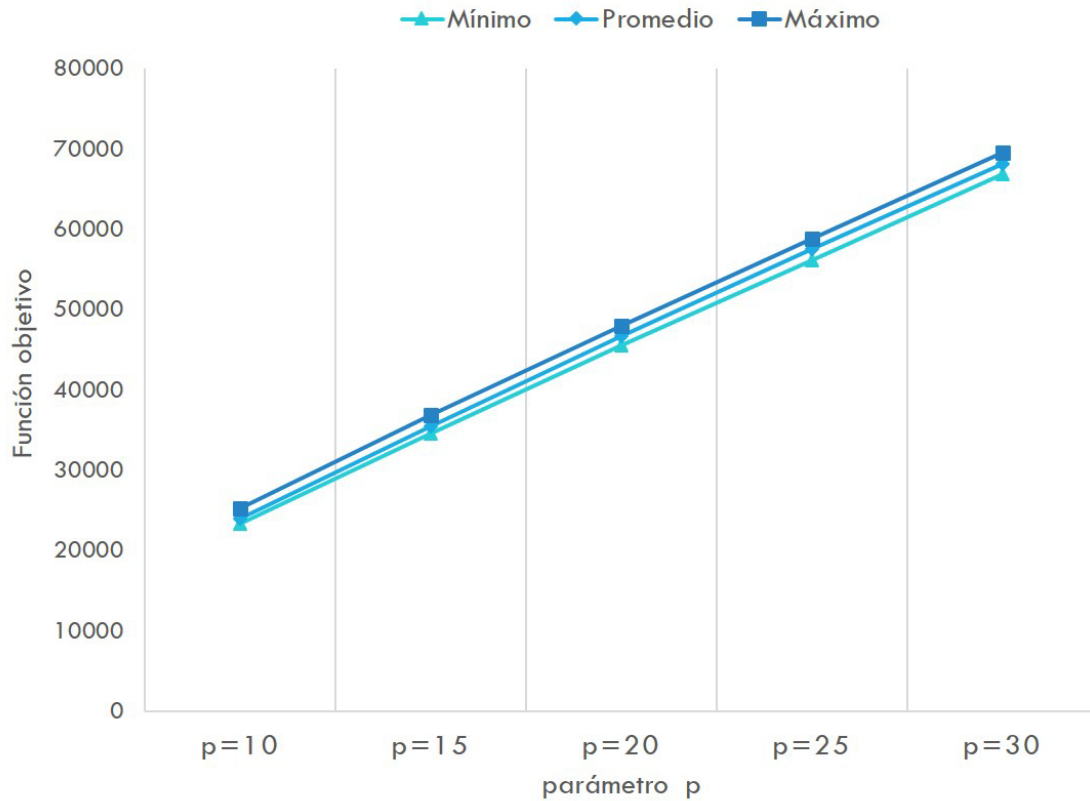


Figura 4.3: Evaluación de p – Instancias grandes.

La Figura 4.4 presenta un análisis de regresión lineal con respecto al desempeño promedio de los resultados de la Figura 4.3. Podemos apreciar en esta gráfica la función de trayectoria lineal promedio y una línea de puntos cercana a ella. Esta última línea mencionada, es la línea tendencia de la regresión. Por el tamaño de la gráfica, es posible apreciar ligeramente que la línea de trayecto no está totalmente superpuesta con la línea tendencia. Esto último es porque los datos no hacen un recorrido totalmente lineal. Esta gráfica nos ayuda a calcular el valor de la ecuación de regresión. Si dividimos la pendiente entre la elevación de la recta se obtiene el aumento sobre p de la función objetivo. Este último fue calculado y está asociado a la función objetivo en el aumento por cada valor de p . El impacto es muy significativo ya que traduciendo este resultado, se conoce que por cada ambulancia más que se

tenga para ubicar, se puede cubrir en promedio 2,206.4 de demanda. Esto resulta ser de beneficio para tomarse en consideración por los tomadores de decisiones.

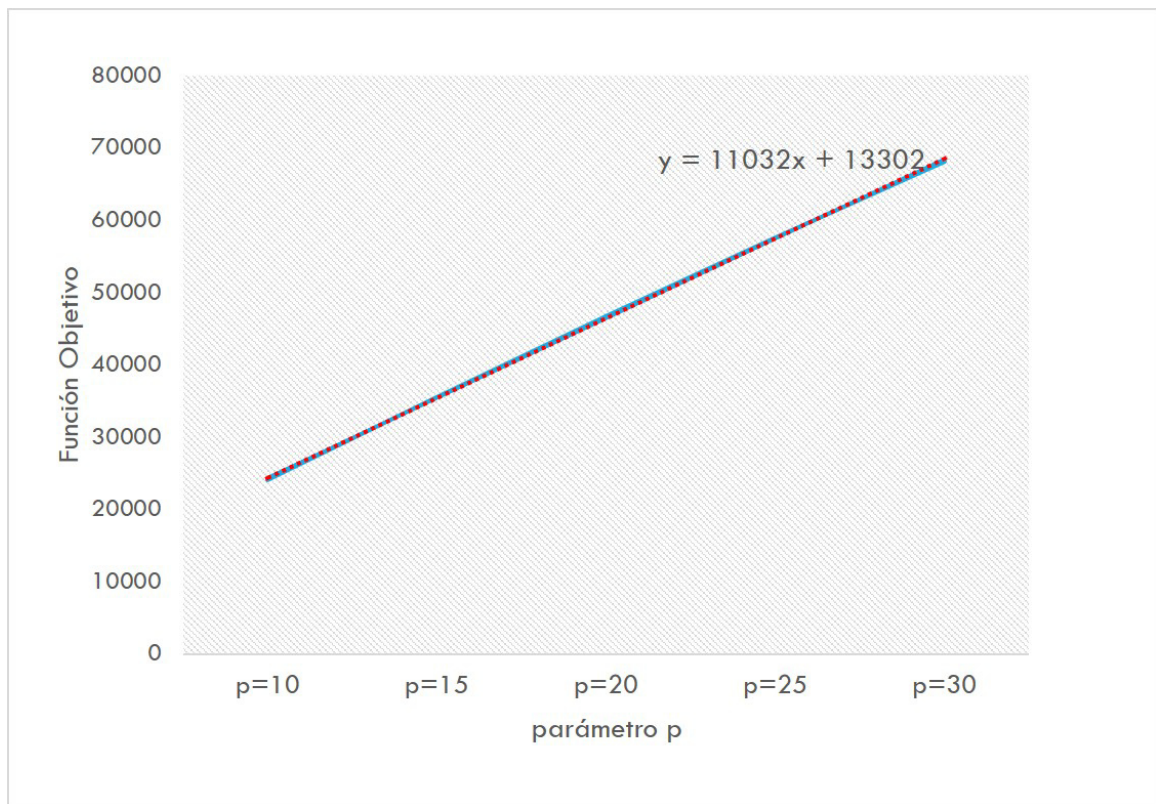


Figura 4.4: Evaluación de p – Análisis de regresión en instancias grandes.

En la Figura 4.5 se muestra la gráfica de tiempos de ejecución en que se resolvieron las instancias grandes. La función que representa cada línea en la figura muestra los valores máximos, promedio y mínimos obtenidos. En el eje x se tienen los valores del parámetro p que fueron probados en el experimento para este conjunto de instancias. En el eje y se tienen valores de tiempo de resolución en segundos. Como se puede apreciar en la Figura 4.5, los valores máximos de tiempos de ejecución se obtuvieron entre 20 y 25 segundos en un valor de p de 30. Esto indica que los tiempos de resolución son muy pequeños para resolver instancias de tamaño grande. Esto refleja que el modelo es ágil para ofrecer soluciones óptimas rápidamente ya que tarda en solucionar muy pocos segundos. Es notable además que el modelo es

sensible en el uso del parámetro p .

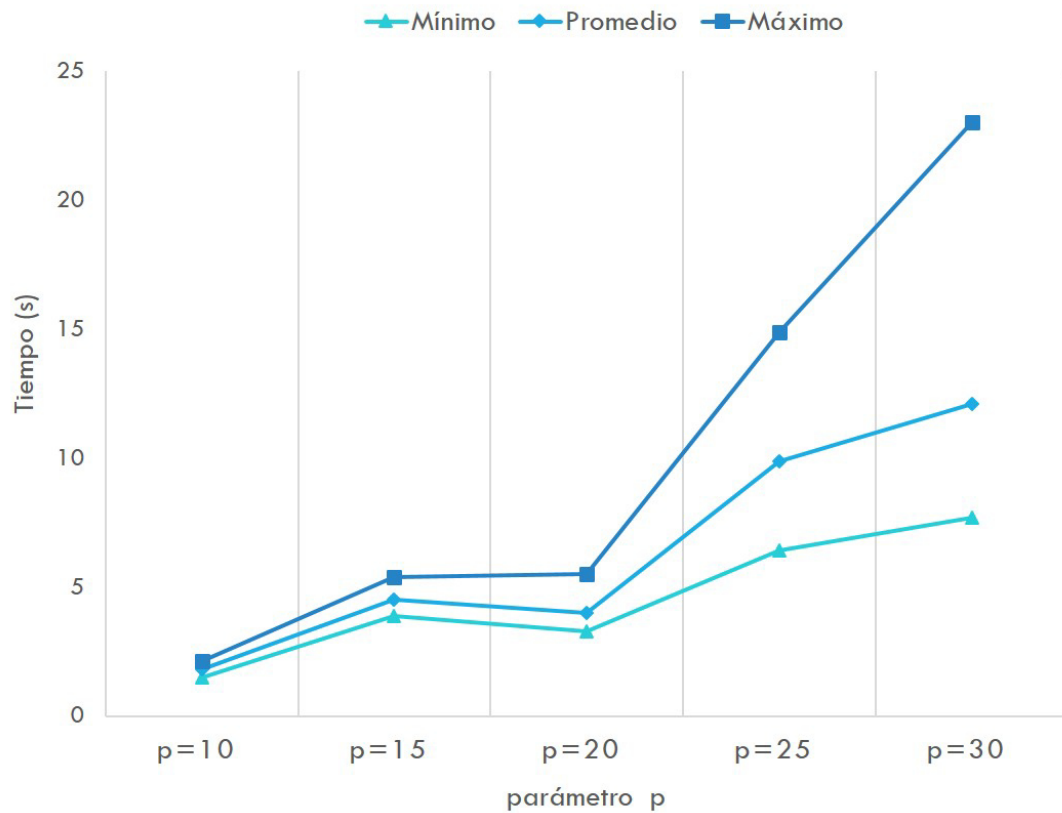


Figura 4.5: Evaluación de p – Tiempo de ejecución.

Cabe resaltar que en este experimento no se mostraron gráficas de tiempos de ejecución de los conjuntos de instancias pequeñas y medianas ya que, estos conjuntos se resolvieron en tiempos menores a 1 milisegundo, lo cual resulta imperceptible para fines relevantes en el análisis.

conjunto V	●
conjunto W	●
radio de cobertura	□
2 ambulancias	●
nodos con alta demanda	●
nodos cubiertos	●
1 ambulancia	●

Figura 4.6: Código de representación de colores y figuras.

En la Figura 4.6 tenemos la notación de código de colores y figuras para las ilustraciones de las Figuras 4.7, 4.8 y 4.9.

En la Figura 4.7 tenemos un ejemplo de una instancia representativa (instancia 17) del conjunto chico, con dimensión de los conjuntos $|V| = 100$ y $|W| = 20$ el cual ejemplifica un sistema de localización. Tal como se muestra en el código de colores y figuras en la notación de la Figura 4.6, los puntos negros representan el conjunto V , los puntos de mayor tamaño son aquellos que tienen mayor demanda. Los puntos azules representan el conjunto W . Los círculos en color morado representan el radio de cobertura establecido. Se puede observar en la Figura 4.7 la distribución geográfica de los puntos potenciales y los puntos de demanda. Los puntos potenciales rodeados por los círculos en color morado inferen el alcance que tiene el radio de cobertura establecido, de tal manera que los puntos de demanda (negros) que se encuentran dentro del círculo son los que se consideran que estarían cubiertos si una ambulancia fuera colocada en el punto potencial de su alcance.

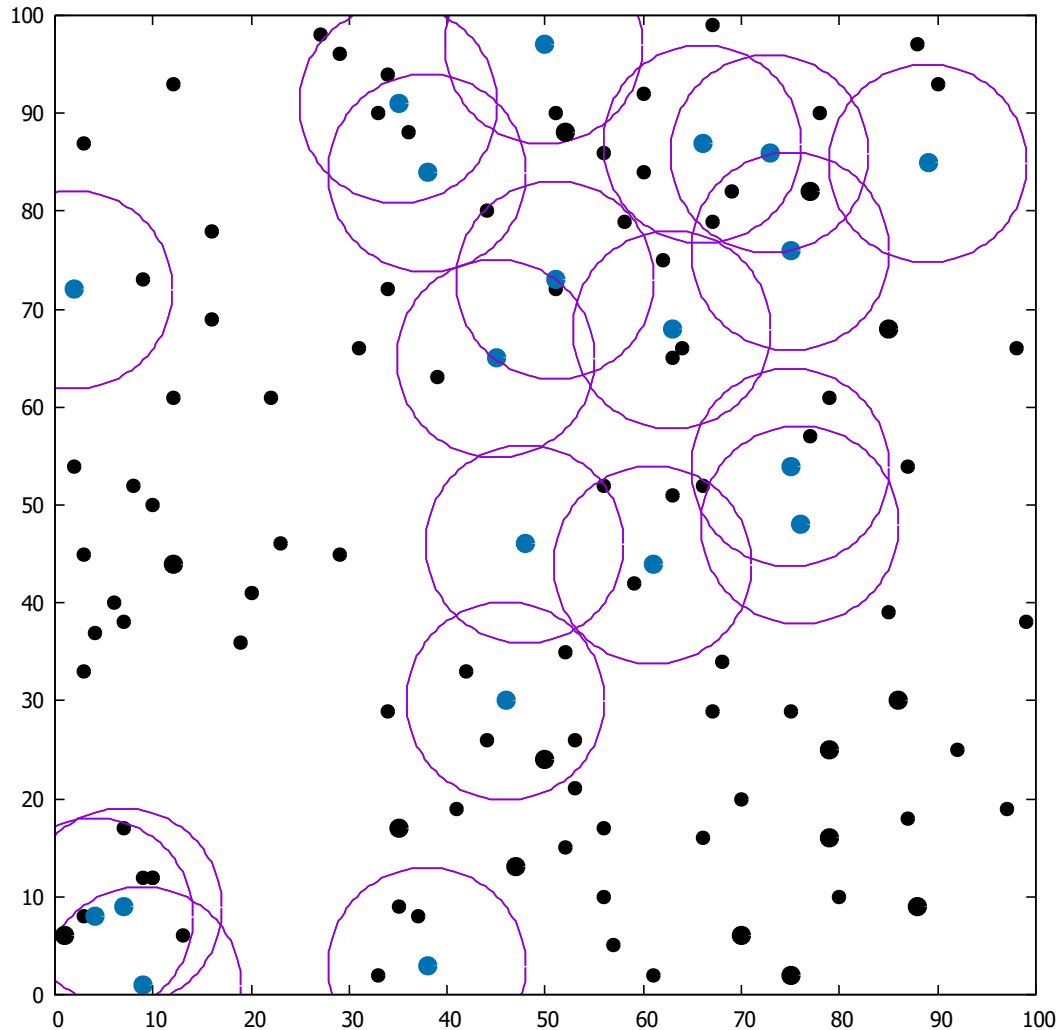


Figura 4.7: Ilustración de ejemplo – Instancia 17 ($m = 100$, $n = 20$).

En las Figuras 4.8 y 4.9 se muestran dos soluciones correspondientes a la instancia de la Figura 4.7. En estos ejemplos se varió únicamente el parámetro p . En ambas figuras tenemos el mismo diseño de parámetros tal como se definió en los experimentos, las dimensiones de los conjuntos de demanda y potenciales son de $m = 100$ y $n = 20$, respectivamente. Como se mencionó en la figura anterior, acerca de la notación, la representación de los puntos es de forma similar, los puntos potenciales (color azul) y puntos de demanda (color negro). La solución que se muestra en las Figuras 4.8 y 4.9 es colocar dos ambulancias en los puntos potenciales que se observan totalmente en color rojo y una ambulancia en aquellos puntos rojos cuyo

contorno es color azul. Los puntos en color amarillo son los nodos de demanda que se encuentran cubiertos por las ambulancias establecidas. Podemos observar en la Figura 4.8 la variación del parámetro $p = 5$ y en la Figura 4.9 un $p = 10$. Podemos apreciar como varía el sistema con respecto al cambio de valor del parámetro p alcanzando una función objetivo de 189.5 y 280, en las Figuras 4.8 y 4.9, respectivamente.

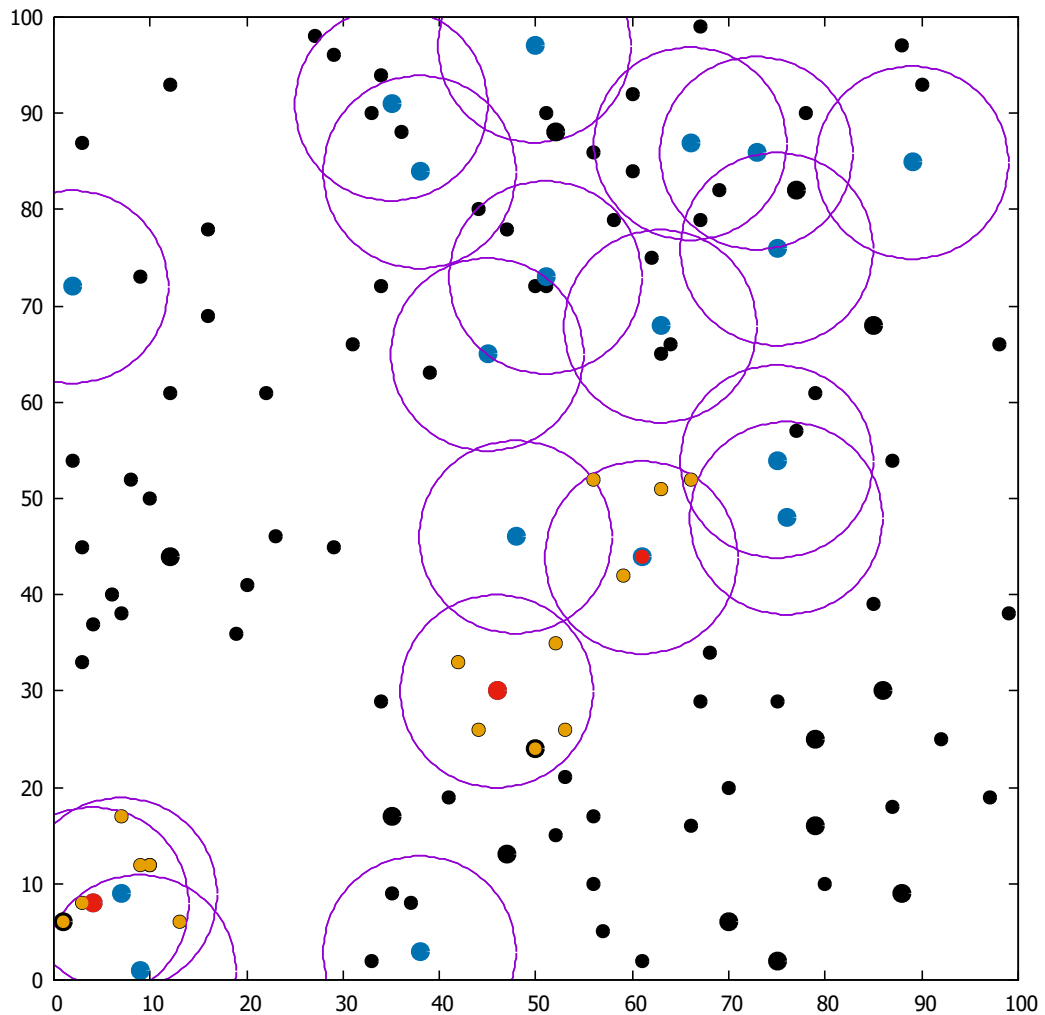


Figura 4.8: Ejemplo de una solución (instancia 17) – Parámetro $p = 5$.

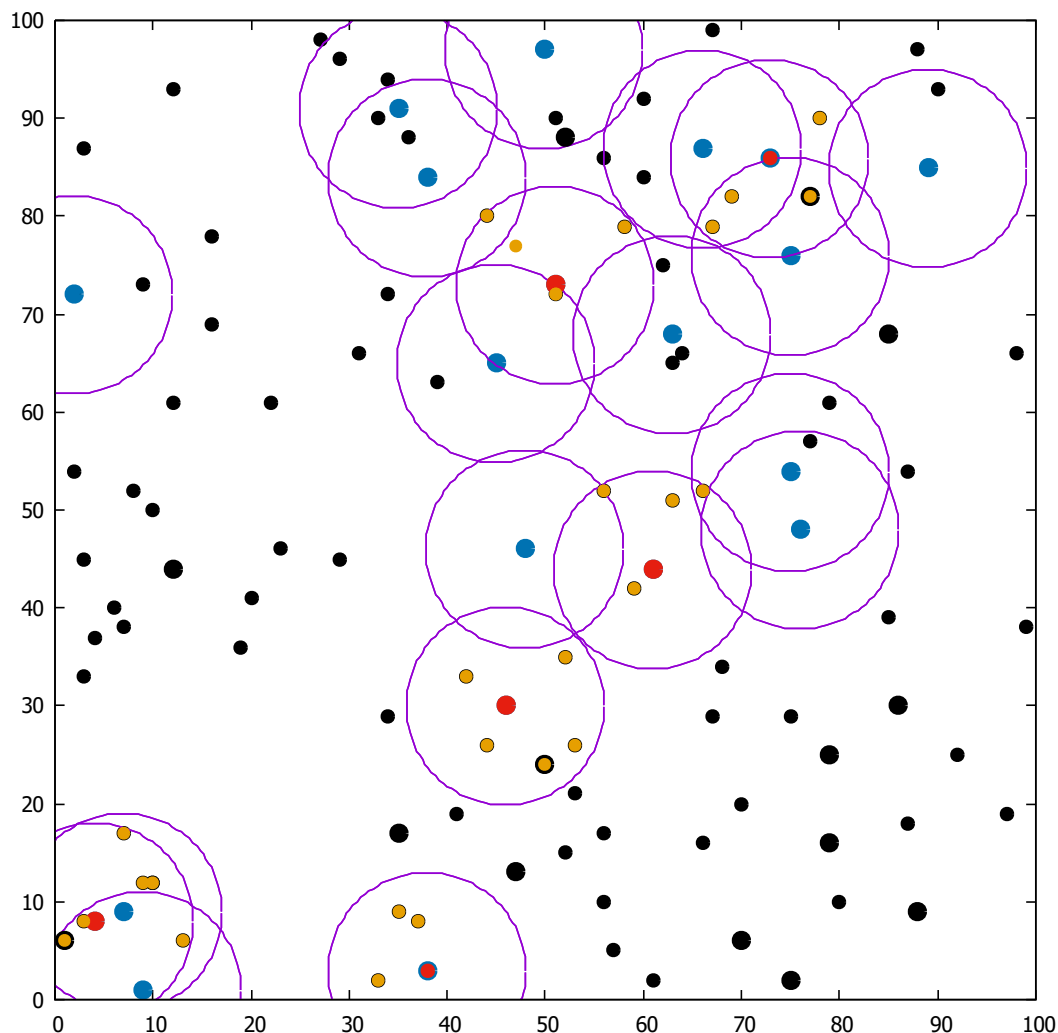


Figura 4.9: Ejemplo de una solución (instancia 17) – Parámetro $p = 10$.

4.5 EXPERIMENTO 2: EVALUACIÓN DEL PARÁMETRO

r

El experimento 2 es realizado para observar y analizar el impacto que tiene la variación del parámetro r . El parámetro r fija el rango de distancia que se necesita para realizar una cobertura de servicio. Cuando se manipula este parámetro, la de-

manda total cubierta, de acuerdo a la función objetivo, resulta afectada. Se resuelve el modelo BACOP2 para este experimento. Se miden los tiempos de ejecución y las función objetivo para cada conjunto de instancias en este experimento.

Criterio de parada del experimento 2: Para cada instancia se establece un tiempo límite de 10800 segundos o un gap (IOR) de 0.01 %.

Objetivos Generales:

- 1.-Evaluar el impacto que tiene el parámetro r en la resolución del modelo, en la calidad de la solución y el tiempo de cómputo.
- 2.-Analizar la sensibilidad en el uso del parámetro r actuando sobre los tres conjuntos de instancias.

Preguntas de interés particular: 1.-¿Qué se puede decir sobre el impacto de incrementar o disminuir el parámetro r en este experimento?

En la Tabla 4.3 se presenta el diseño experimental. En la tabla se especifican los valores de los parámetros que se asignaron para ser probados en los tres tipos de tamaño de instancia. El parámetro r que es el de particular interés, se establece con valores asignados entre 8 y 20 minutos, el 8 es el estándar de tiempo mínimo, 20 es un equilibrio entre el máximo aceptado en zonas urbanas(10) y el máximo aceptado en zonas rurales (30), tal como mencionan Brotcorne, Laporte y Semet [6]. De acuerdo a Fitch [16], lograr atender el 90 % de las llamadas urgentes en zonas urbanas en 9 minutos es una práctica común en América del Norte.

Tabla 4.3: Tabla de diseño experimental 2.

Parámetro/Tam.Instancia	Ch	M	G
r	8,10,12,14,16,18,20	8,10,12,14,16,18,20	8,10,12,14,16,18,20
p	10	20	30
θ	0.5	0.5	0.5

La Figura 4.10 muestra la gráfica de análisis de sensibilidad del parámetro r del valor alcanzado de la función objetivo para el experimento 2 en el conjunto

de instancias chicas. La función que representa cada línea en la gráfica muestra los valores máximos, promedio y mínimos obtenidos. En el eje x se tienen los valores del parámetro r que fueron probados en el experimento. En el eje y de la gráfica se tienen los valores de medición de la función objetivo.

Como podemos apreciar en la Figura 4.10, la función objetivo promedio creció a medida que el parámetro r fue incrementando su valor de manera casi lineal hasta un cierto valor de r . El comportamiento que sigue este parámetro resulta predecible ya que a medida que aumentamos el rango del parámetro r la capacidad de aceptar nodos que cumplan con el estándar de cubrimiento también incrementa y por tal motivo, al realizar cubrimientos mayores, la función objetivo crece. Por tanto, esta trayectoria nos habla de la sensibilidad del uso del parámetro r . En todo el conjunto de instancias chicas se encontraron soluciones que garantizan no estar alejadas del óptimo más del 0.01 % indicativo del intervalo de optimalidad relativa. Las soluciones de este experimento para este conjunto de instancias, fueron halladas en tiempos menores a 1 milisegundo, esto nos habla del buen desempeño del modelo en términos de velocidad de solución. Bajo los resultados en este conjunto de instancias, podemos decir que el modelo es sensible en el uso del parámetro r .

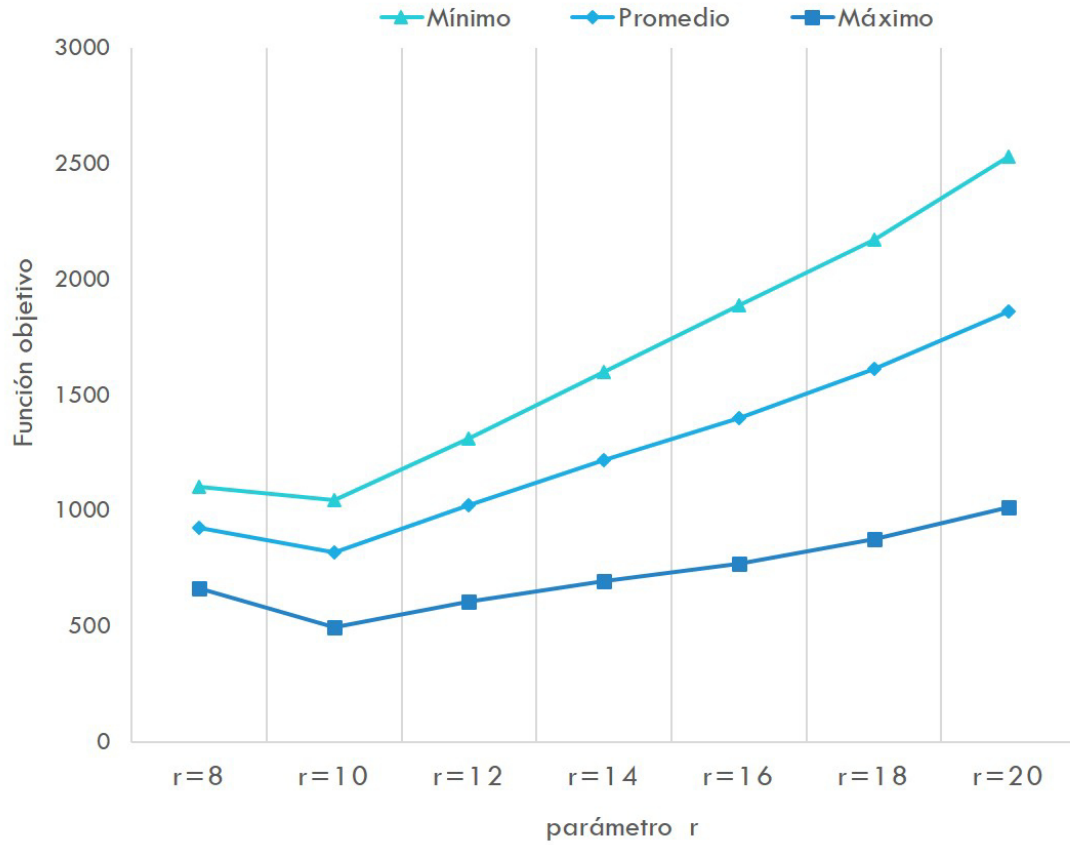


Figura 4.10: Evaluación de r – Instancias chicas.

La Figura 4.11 muestra la gráfica de análisis de sensibilidad del parámetro r del valor alcanzado de la función objetivo para el experimento 2 en el conjunto de instancias medianas. La función que representa cada línea en la gráfica muestra los valores máximos, promedio y mínimos obtenidos. En el eje x se tienen los valores del parámetro r que fueron probados en el experimento. En el eje y de la gráfica se tienen los valores de medición de la función objetivo.

Como podemos apreciar en la Figura 4.11, la función objetivo promedio se encuentra realizando una trayectoria casi lineal. El trayecto casi lineal promedio que ejerce en el aumento del parámetro es esperado, ya que a medida que el parámetro r aumenta su valor, significa que incrementamos la capacidad de aceptar nodos que

cumplan con un estándar mayor de cubrimiento, por tal motivo, al realizar mayores cubrimientos, es de esperarse que la función objetivo crezca. Casi al finalizar la trayectoria, en los últimos valores probados ($r = 18$ y $r = 20$) se puede apreciar un comportamiento ligeramente semi-recto. Como se mencionó anteriormente, este último comportamiento en la trayectoria puede deberse a que al aumentar el valor de r y como se mencionó anteriormente, llegamos a cubrir una mayor cantidad de nodos, por lo que es de esperarse que la trayectoria comience a converger a una línea recta debido a que llegará un cierto valor de r con el que sea posible alcanzar a cubrir todos los nodos. Los resultados nos indican que el modelo es sensible en el uso del parámetro r . En todo el conjunto de instancias medianas se encontraron soluciones que garantizan no estar alejadas del óptimo más del 0.01 % indicativo del intervalo de optimalidad relativa. En cada una de las soluciones, de igual forma que en las instancias chicas, las soluciones fueron encontradas en un tiempo menor a 1 milisegundo. Lo que permite concluir que el modelo es altamente eficiente en resolver las instancias del conjunto mediano hasta la optimalidad.

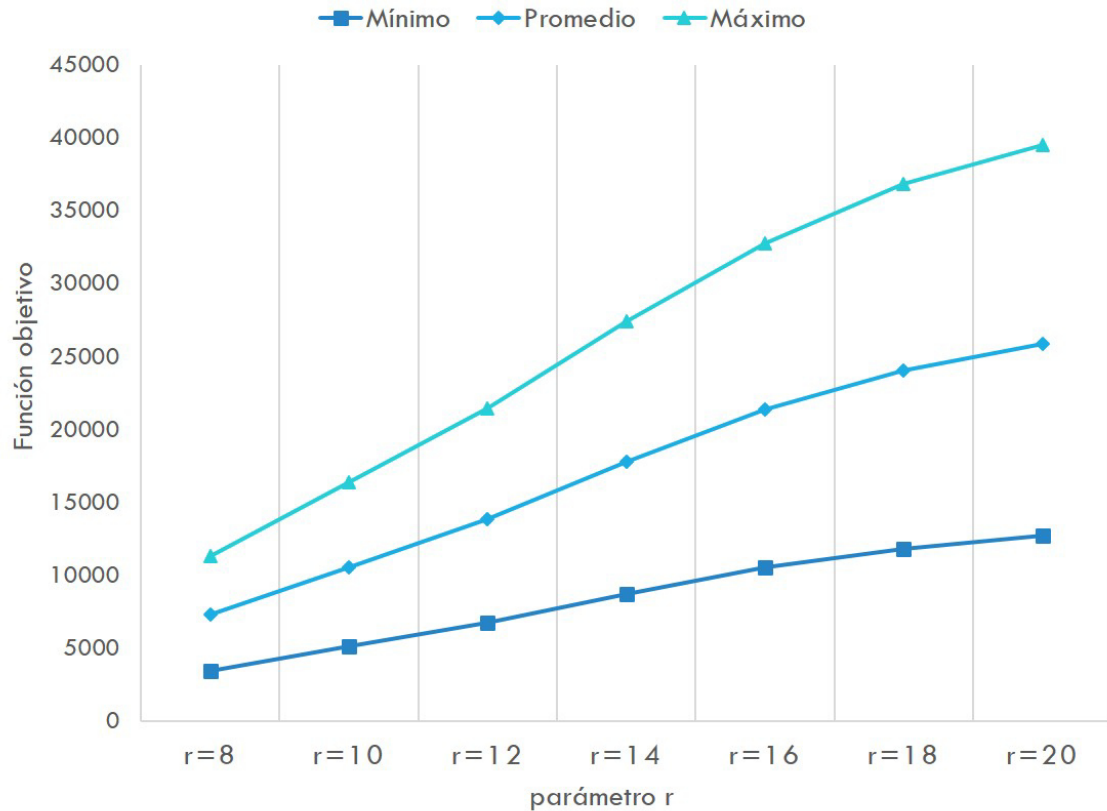


Figura 4.11: Evaluación de r – Instancias medianas.

La Figura 4.12 muestra la gráfica de análisis de sensibilidad del parámetro r del valor alcanzado de la función objetivo para el experimento 2 del conjunto de instancias grandes. La gráfica muestra los valores máximos, promedio y mínimos obtenidos. En el eje x se tienen los valores del parámetro r que fueron probados en el experimento. En el eje y de la gráfica se tienen los valores de medición de la función objetivo. Como podemos apreciar en la Figura 4.12, la función objetivo promedio presenta un comportamiento lineal hasta un cierto r . Podemos observar en la gráfica, de manera muy similar que en las instancias medianas, en los últimos valores probados a partir de $r = 16$ se puede apreciar un comportamiento más evidentemente recto y que además se aprecia constante. Este último comportamiento en la trayectoria puede deberse a que al aumentar el valor de r llegamos a cubrir una

gran cantidad de nodos, que es de esperarse que la trayectoria comience a converger a una línea recta, debido a que llegará a un cierto valor de r en que sea posible alcanzar a cubrir todos los nodos. El trayecto casi lineal promedio es esperado, ya que a medida que el parámetro r aumenta su valor, significa que estamos incrementando la capacidad de aceptación de nodos que cumplen con un estándar mayor de cubrimiento por lo que se espera que la función objetivo también aumente. Los resultados nos indican que el modelo es sensible en el uso del parámetro r . En todo el conjunto de instancias grandes, al igual que en las instancias chicas y medianas se encontraron soluciones que garantizan no estar alejadas del óptimo más del 0.01%. Lo que permite concluir que el modelo es capaz de encontrar los valores óptimos de las instancias del conjunto grande en un tiempo razonable.

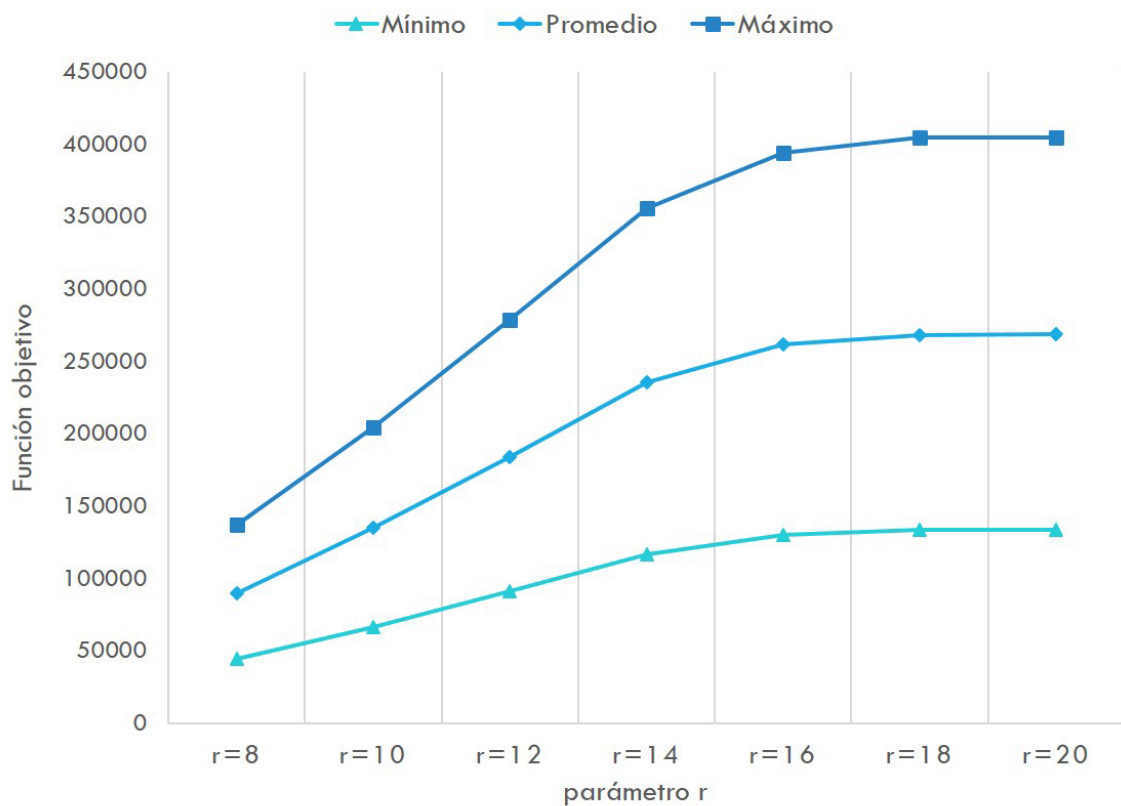
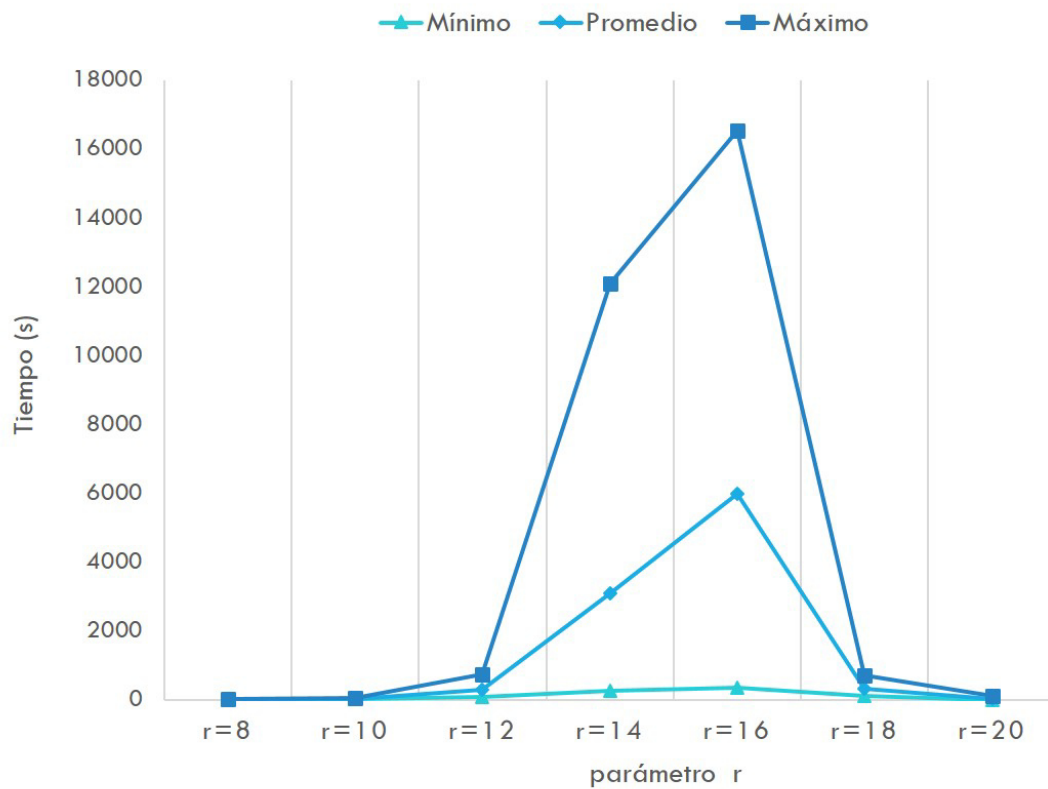


Figura 4.12: Evaluación de r – Instancias grandes.

En la Figura 4.13 se muestra la gráfica de tiempos de ejecución en que se resolvieron las instancias grandes. La función que representa cada línea en la figura muestra los valores máximos, promedio y mínimos obtenidos. En el eje x se tienen los valores del parámetro r que fueron probados en el experimento para este conjunto de instancias. En el eje y se tienen valores de tiempo de resolución en segundos. Como se puede apreciar en la Figura 4.13, observamos que el tiempo promedio de ejecución también crece hasta valores máximos de $r=14$ y $r=16$, en promedio 4000 y 6000 segundos, respectivamente, después converge nuevamente a resolver en pocos segundos. La justificación de este comportamiento puede atribuirse a que para valores a partir de $r=18$ la solución de la relajación lineal está en promedio alejada de la solución óptima para cada instancia de este tamaño en no más del 3.5%. Podemos apreciar en la Tabla 4.4 en la cual tenemos dos ejemplos de instancias grandes, resolviendo el modelo con diferentes valores de r , podemos observar como la cota en el nodo raíz se encuentra en las dos instancias, en un valor de $r = 16$ alejada en un 2.92% y 2.72% (IOR) de la solución óptima. En el caso de $r = 18$ se encuentra alejada en un 0.01% y 0.13% (IOR), por último en el caso de $r = 20$ se encuentra en no más de 0.01% (IOR) de la solución óptima. Se puede deducir entonces que si la cota de la solución relajada esta muy alejada de la solución óptima, esto conducirá a incrementar los tiempos de ejecución. También podemos inferir que al aumentar el valor de r incrementa el número de variables binarias en el modelo. Sin embargo después de un cierto valor de r se pierde el efecto porque ya se pueden cubrir todos los nodos. En este último caso ya se observa un valor de la relajación lineal muy ajustado al óptimo, es por eso que converge muy rápido. Es de esperarse que al seguir aumentando este parámetro para valores mayores a los que fueron probados en el experimento, resulte en una trayectoria recta y constante.

Tabla 4.4: Tiempos de ejecución en algunas instancias del experimento 2

Instancia	Parámetro r (min)	Cota nodo raíz	Solución óptima	Tiempo (seg)	IOR
db_01	16	134655	130826	7607	2.92
	18	134655	134641	135	0.01
	20	134655	134655	2.7	0.01
db_02	16	135050	131462	8830	2.72
	18	135050	134868	160.81	0.13
	20	135050	135050	91	0.01

Figura 4.13: Evaluación de r – Tiempo de ejecución.

Siguiendo con la misma notación de código de colores y figuras en la Figura 4.6 para los ejemplos siguientes de las Figuras 4.14, 4.15, 4.16 y 4.17.

En las Figuras 4.14 y 4.15 tenemos dos ejemplos de una instancia representativa (instancia 11) del conjunto chico, cada una de ellas para diferentes valores

del parámetro r . En la Figura 4.14 un $r = 9$ y en la Figura 4.15 un $r = 20$, con dimensión en ambas de los conjuntos $|V| = 100$ y $|W| = 20$ las cuales ejemplifican un sistema de localización. Siendo acordes a la notación introducida en la Figura 4.6, los puntos negros representan el conjunto V , los puntos de mayor tamaño son aquellos que tienen mayor demanda. Los puntos azules representan el conjunto W . Los círculos en color morado representan el radio de cobertura establecido.

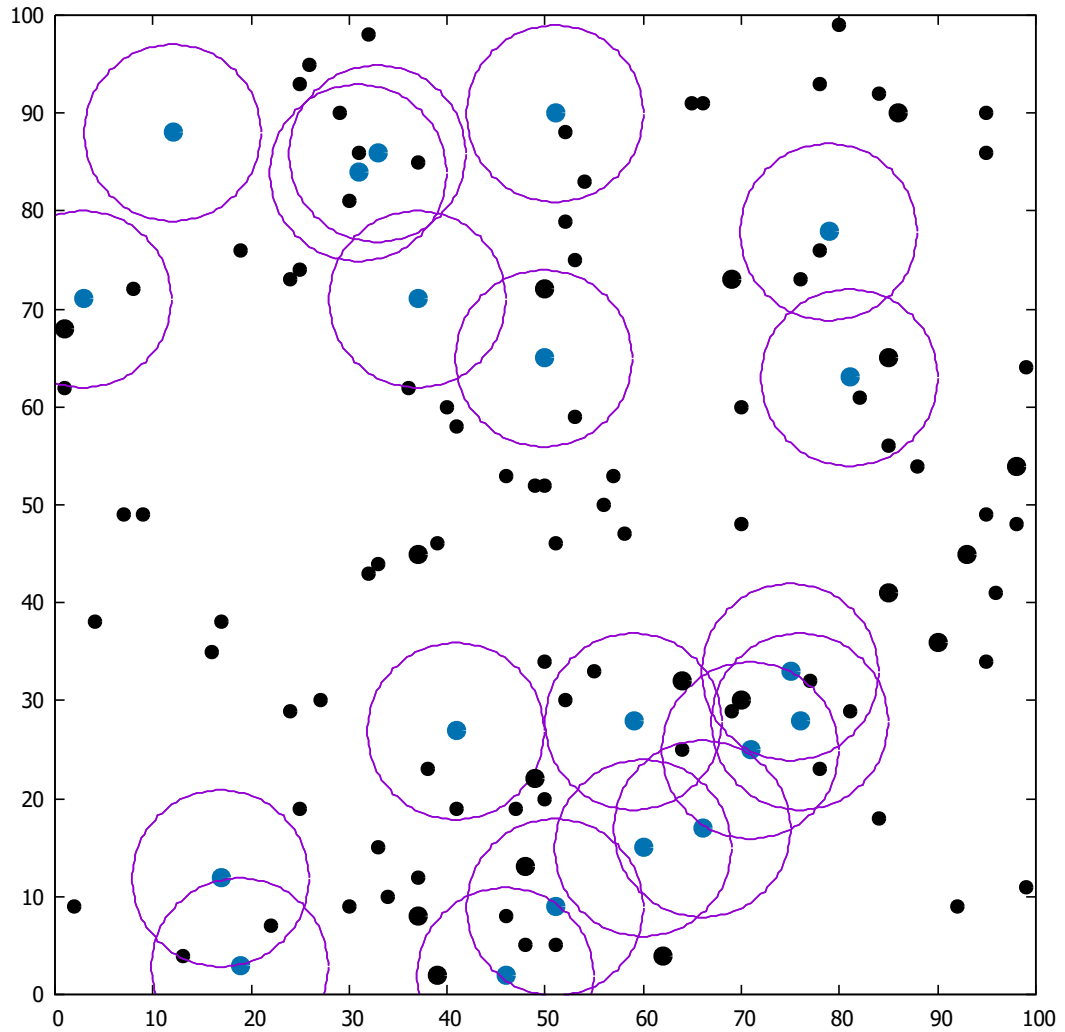


Figura 4.14: Ilustración de ejemplo – Instancia 11 ($m = 100$, $n = 20$, $r = 9$).

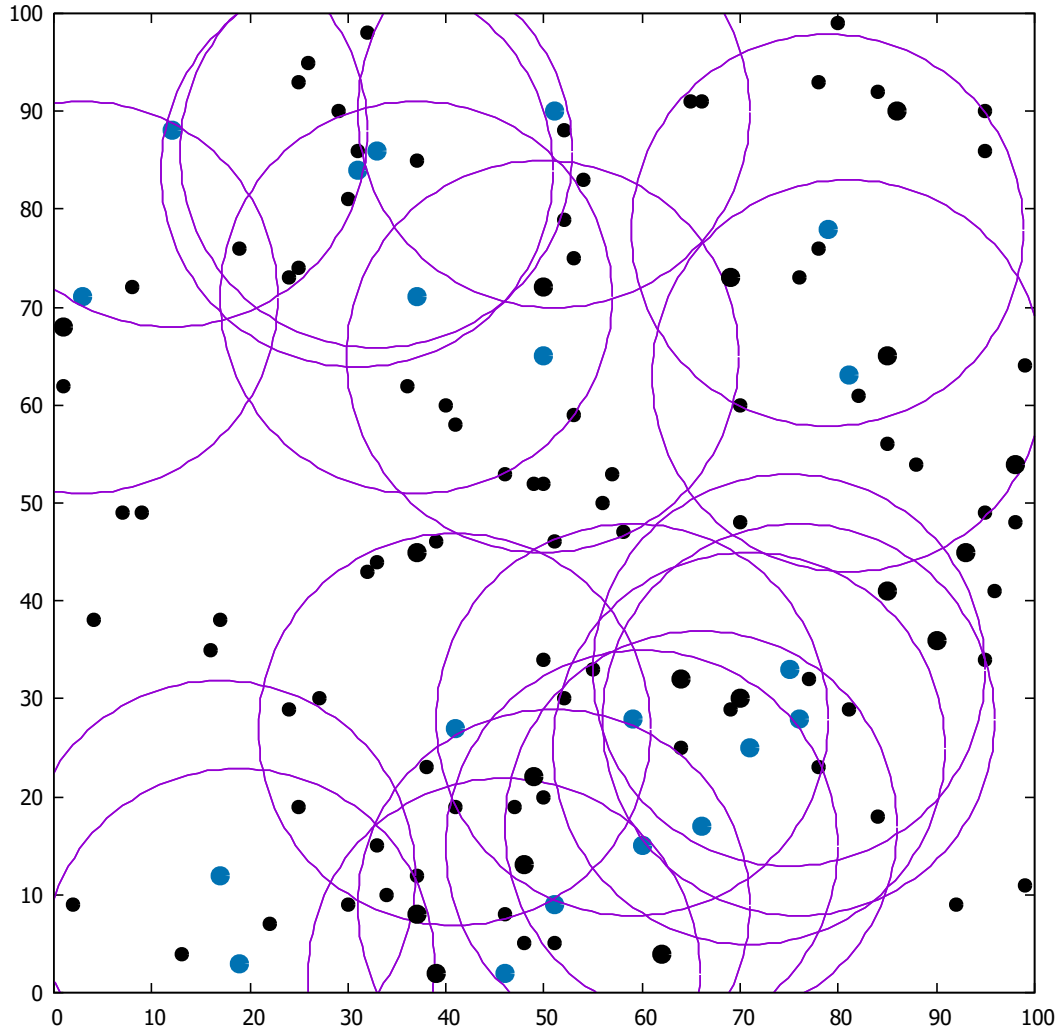


Figura 4.15: Ilustración de ejemplo – Instancia 11 ($m = 100$, $n = 20$, $r = 20$).

En las Figuras 4.16 y 4.17 se muestran las soluciones correspondientes a las instancias de las Figuras 4.14 y 4.15, respectivamente. En estos ejemplos se varió únicamente el parámetro r . En ambas figuras tenemos el mismo diseño de parámetros tal como se definió en los experimentos, las dimensiones de los conjuntos de demanda y potenciales son de $m = 100$ y $n = 20$, respectivamente. Acerca de la notación, la representación de los puntos es similar, los puntos potenciales (color azul) y puntos de demanda (color negro). La solución que se muestra en las Figuras 4.16 y 4.17 es colocar dos ambulancias en los puntos potenciales que se observan totalmente en color rojo. Los puntos en color amarillo son los nodos de demanda que

se encuentran cubiertos por las ambulancias establecidas. Podemos observar en la Figura 4.16 la variación del parámetro $r = 9$ minutos y en la Figura 4.17 un $r = 20$ minutos. Podemos apreciar como varía el sistema con respecto al cambio de valor en el parámetro r alcanzando una función objetivo de 267 y 1015, en las Figuras 4.16 y 4.17, respectivamente.

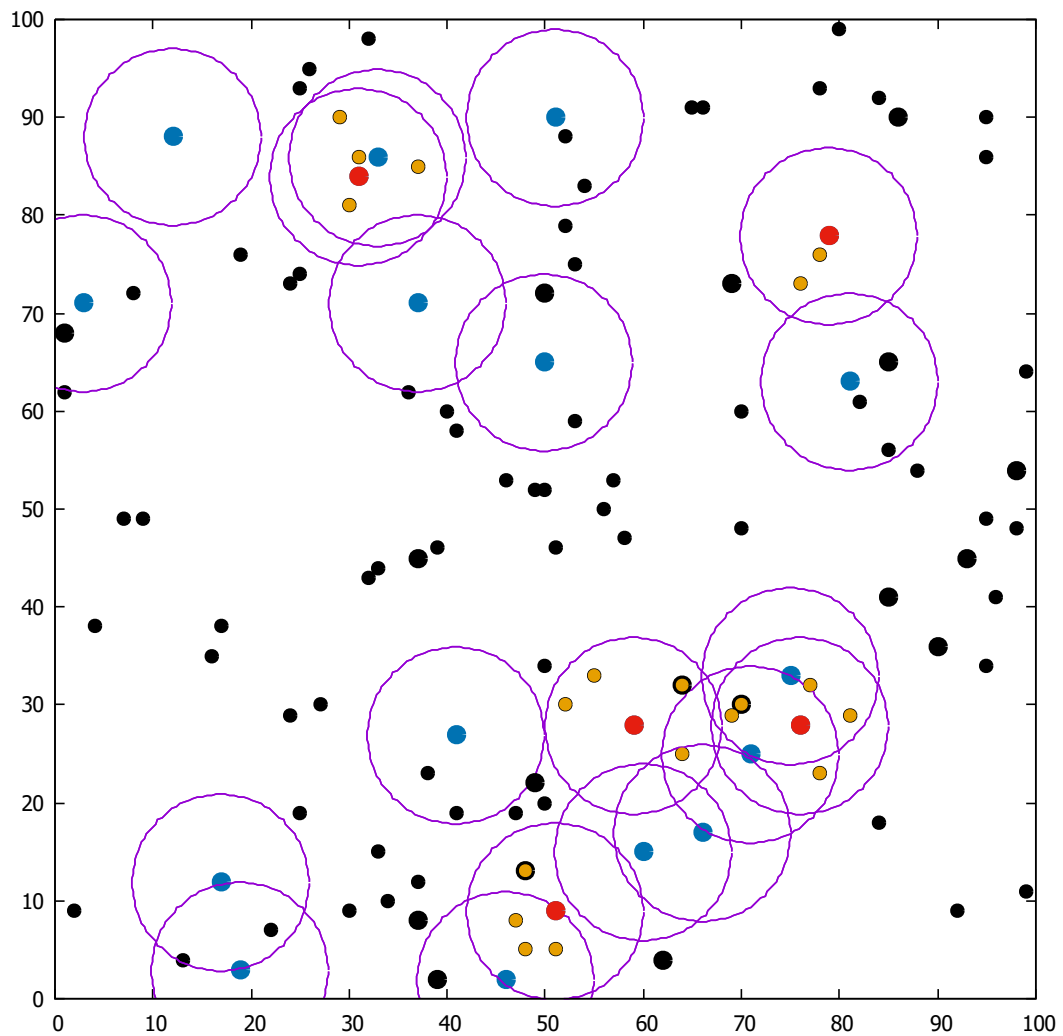


Figura 4.16: Ejemplo de una solución (instancia 11) – Parámetro $r = 9$.

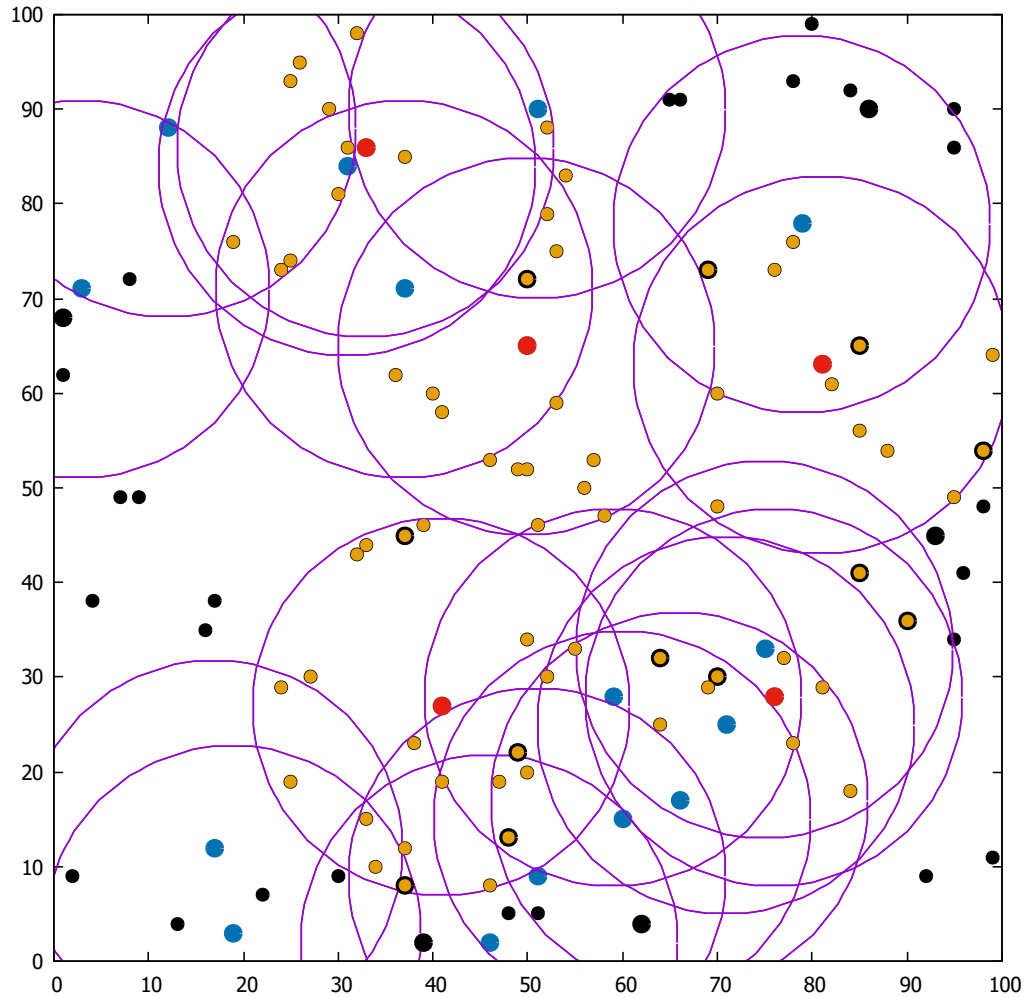


Figura 4.17: Ejemplo de una solución (instancia 11) – Parámetro $r = 20$.

4.6 EXPERIMENTO 3: EVALUACIÓN DEL PARÁMETRO

θ

El experimento 3 se lleva a cabo para observar y analizar el impacto que tiene la variación del parámetro θ . El parámetro θ fija el porcentaje de prioridad del cumplimiento de los dos objetivos del modelo BACOP2. El primero objetivo tiene el propósito de realizar una sola cobertura, el segundo objetivo tiene el propósito de

asignar la doble cobertura. Particularmente es interesante el análisis de este parámetro ya que, como es de esperarse, la demanda cambiará al darle más prioridad de cumplimiento a un objetivo que a otro. El análisis que corresponde a este experimento está relacionado con el impacto que resultaría de esta variación. Este experimento además ayuda a observar si la cobertura de respaldo aporta mejores soluciones de cubrimiento de demanda.

En este experimento se prueban ambos modelos de cobertura de respaldo, BACOP1 y BACOP2. El modelo BACOP2 resolverá todos los conjuntos de instancias, al realizar la variación del parámetro θ . El modelo BACOP1 usa implícitamente un valor de $\theta = 1.0$ en todos los conjuntos de instancias de este experimento.

Criterio de parada del experimento 3: Para cada instancia se establece un tiempo límite de 10800 segundos o un gap (IOR) de 0.01 %.

Objetivos Generales:

- 1.-Comparar a razón de los resultados obtenidos de los experimentos, como impacta el parámetro θ al tomar diferentes valores y determinar aquellos que tienen mayor alcance en la función objetivo del modelo.
- 2.-Analizar mediante las gráficas obtenidas de este experimento, la convergencia hacia soluciones óptimas dentro del límite de tiempo o gap relativo preestablecidos.
- 3.-Analizar la sensibilidad en el uso del parámetro θ actuando sobre los tres conjuntos de instancias.

Preguntas de interés particular: Respecto de la función objetivo general que toma en cuenta ambos objetivos, ¿Cuál es el impacto de establecer una cobertura de respaldo en contra de establecer solamente la primera cobertura? ¿Qué porcentaje de θ demuestra ofrecer mejores soluciones respecto de la función objetivo?

En la Tabla 4.5 se presenta el diseño experimental para este experimento. En la tabla se especifican los valores de los parámetros que se asignaron para ser probados en los tres tipos de instancias.

El parámetro θ probará los valores de 0 a 1 en incrementos de 0.1.

Tabla 4.5: Tabla de diseño experimental 3.

Parámetro/Tam. Instancia	Ch	M	G
θ	0.0, 0.1, 0.2, ..., 1.0	0.0, 0.1, 0.2, ..., 1.0	0.0, 0.1, 0.2, ..., 1.0
p	10	20	30
r	10	10	10

La Figura 4.18 muestra una gráfica con los resultados de una instancia representativa (instancia 27) para el análisis del parámetro θ en el conjunto de instancias chicas. En la gráfica se muestra el valor alcanzado por cada uno de los términos de la función objetivo. En este caso, llamamos F1 al primer término de la función objetivo ($\sum_{i \in V} a_i y_i$) y F2, al segundo término, ($\sum_{i \in V} a_i u_i$). En el eje x se tienen los valores de alcance de F1, que es la que realiza la primera cobertura. En el eje y se tienen los valores de alcance de F2, que es la que realiza la cobertura doble. Esta gráfica en la que se muestra el alcance de un término frente al otro, es similar a un frente de Pareto en el contexto de optimización multiobjetivo. Véase algunos conceptos de referencia en el trabajo de Ben-Tal [3] desarrollado para la toma de decisiones multi-objetivo. Como se puede observar en la Figura 4.18, se encuentra la dispersión de puntos en donde se establecen los valores para el parámetro θ que fueron probados. Se pueden apreciar también algunos resultados monótonos para algunos valores del parámetro. Esta gráfica es muy significativa para la toma de decisiones en dependencia a el porcentaje para el objetivo que se desee priorizar. Es importante considerar que a partir de la decisión de porcentaje de θ que se tome, los escenarios de alcance del objetivo tanto individualmente como total deben examinarse. Por sí sola la gráfica muestra las posibles variaciones en la función objetivo que pueden presentar según se utilice θ . Como podemos apreciar en la Figura 4.18 para los valores de $\theta = 0.0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5$ probados, los resultados de los valores individuales de F1 y F2 obtenidos son iguales, por tanto, la suma ponderada de ambos términos sobre estos valores permanece constante y se reflejan en un solo punto. El modelo resulta ser poco sensible al menos para los valores mencionados del parámetro θ . A

partir de $\theta=0.6$ en adelante se puede apreciar la curvatura de puntos que se forma para los diferentes valores de θ .

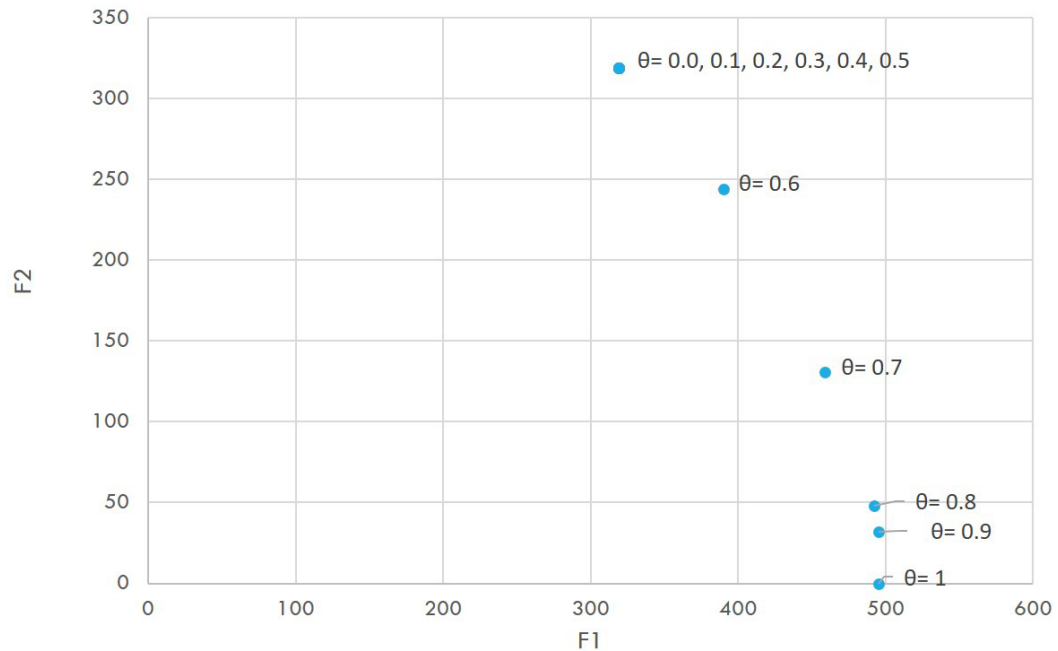


Figura 4.18: Evaluación de θ – Instancia chica (instancia 27).

La Figura 4.19 muestra una gráfica de resultados de una instancia representativa (instancia 15) para el análisis del parámetro θ en el conjunto de instancias medianas. En el eje x se tienen los valores de alcance de F1, que es la que realiza la primera cobertura y en el eje y se tienen los valores de alcance de F2, que realiza la cobertura doble. Como se puede observar en la Figura 4.19, se encuentra la dispersión de puntos en donde se establecen los valores para el parámetro θ que fueron probados. Se pueden apreciar también algunos resultados monótonos para algunos valores del parámetro. La gráfica es muy importante para la toma de decisiones. La gráfica muestra las posibles variaciones en la función objetivo que pueden presentar según se utilice θ . Al igual que en el conjunto de instancias chicas, para valores de $\theta=0.0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5$ probados, los resultados de los valores individuales de F1 y F2 obtenidos son iguales por tanto, la suma ponderada de ambos términos sobre

estos valores permanece constante. De igual forma que para las instancias chicas, resulta inesperado que el parámetro θ ofrezca soluciones constantes en al menos la mitad de los valores probados en el experimento. De lo anterior se desprende que el modelo es poco sensible al menos para los valores antes mencionados del parámetro θ . A partir de $\theta=0.6$ en adelante se logra apreciar la curvatura de puntos que se forma para los diferentes valores de θ .

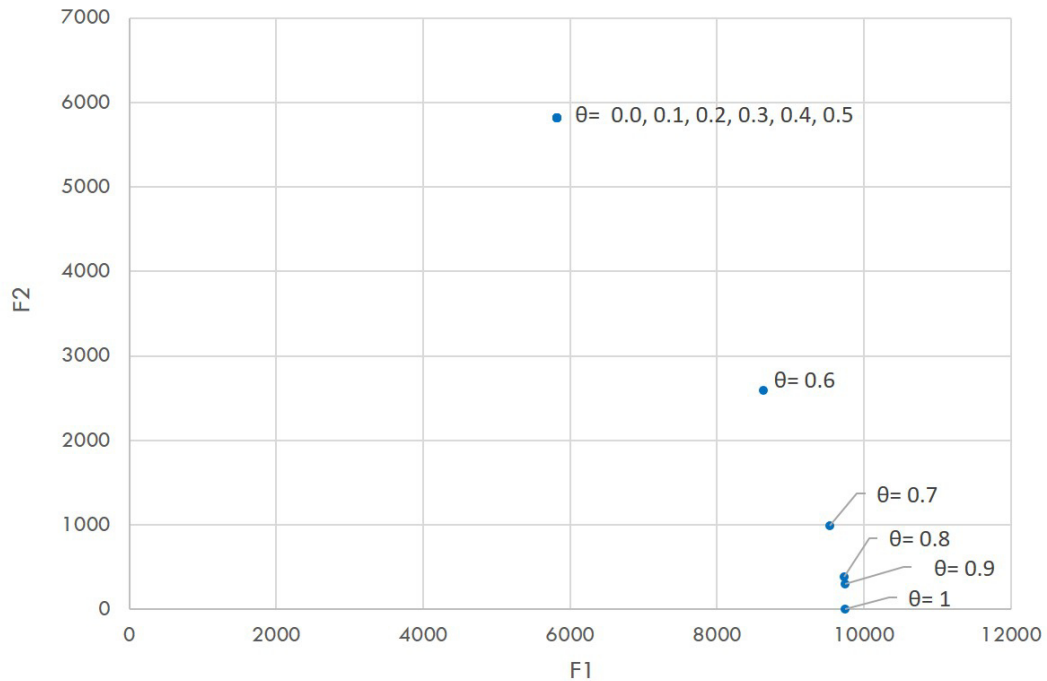


Figura 4.19: Evaluación de θ – Instancia mediana (instancia 15).

La Figura 4.20 muestra una gráfica de resultados de una instancia representativa (instancia 14) para el análisis del parámetro θ en el conjunto de instancias grandes. En la gráfica se está mostrando F1 y F2, al igual que las anteriores. En el eje x se tienen los valores de alcance de F1, que es la que realiza la primera cobertura y en el eje y se tienen los valores de alcance de F2, que realiza la cobertura doble.

Como se puede observar en la Figura 4.20, se encuentra la dispersión de puntos en donde se establecen los valores para el parámetro θ que fueron probados. Se pueden apreciar también algunos resultados monótonos para algunos valores del

parámetro. La gráfica muestra las posibles variaciones en la función objetivo que pueden presentar según se utilice θ . Al igual que en el conjunto de instancias chicas, para valores de $\theta=0.0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5$ probados, los resultados de los valores individuales de F1 y F2 obtenidos son iguales por tanto, la suma ponderada de ambos términos sobre estos valores permanece constante. De igual forma que para las instancias chicas y medianas, resulta inesperado que el parámetro θ ofrezca soluciones constantes en al menos la mitad de los valores probados en el experimento. Por lo que deducimos que el modelo resulta ser poco sensible con el parámetro θ en los valores antes mencionados. A partir de $\theta=0.6$ en adelante se puede apreciar la curvatura de puntos que se forma para los diferentes valores de θ . Así los términos pueden ser evaluados uno con otro y ser considerados a partir de la necesidad del objetivo que se desee maximizar.

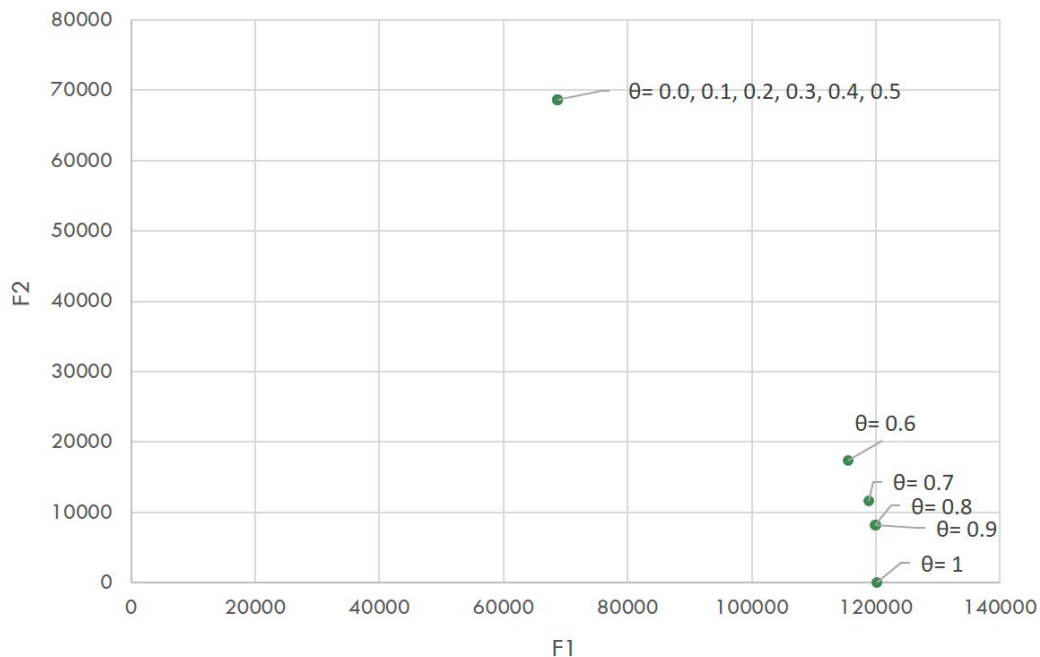


Figura 4.20: Evaluación de θ – Instancia grande (instancia 14).

La Figura 4.21 muestra los tiempos de ejecución para el experimento 3 en el conjunto de instancias grandes. La gráfica muestra los valores máximos, promedio y mínimos obtenidos. En el eje x se tienen los valores del parámetro θ que fueron

probados en el experimento para este conjunto de instancias. En el eje y se tienen valores de tiempo de resolución en segundos.

Como se puede observar en la Figura 4.21, el tiempo de cómputo comenzó a aumentar entre los valores del parámetro $\theta=0.8$, 0.9 y 1 . Es importante mencionar que para la mayoría de las instancias y con estos parámetros en el modelo, se alcanzó a llegar a una solución alejada en no más del 15% (IOR) de la solución óptima en tiempo de milisegundos y con un 9% (IOR) llevó al modelo a su límite de tiempo establecido. Aquellas instancias donde sí se logró converger al óptimo, fue debido a que encontraba la solución incumbente muy rápidamente, por la buena cota de la solución relajada del problema lineal.

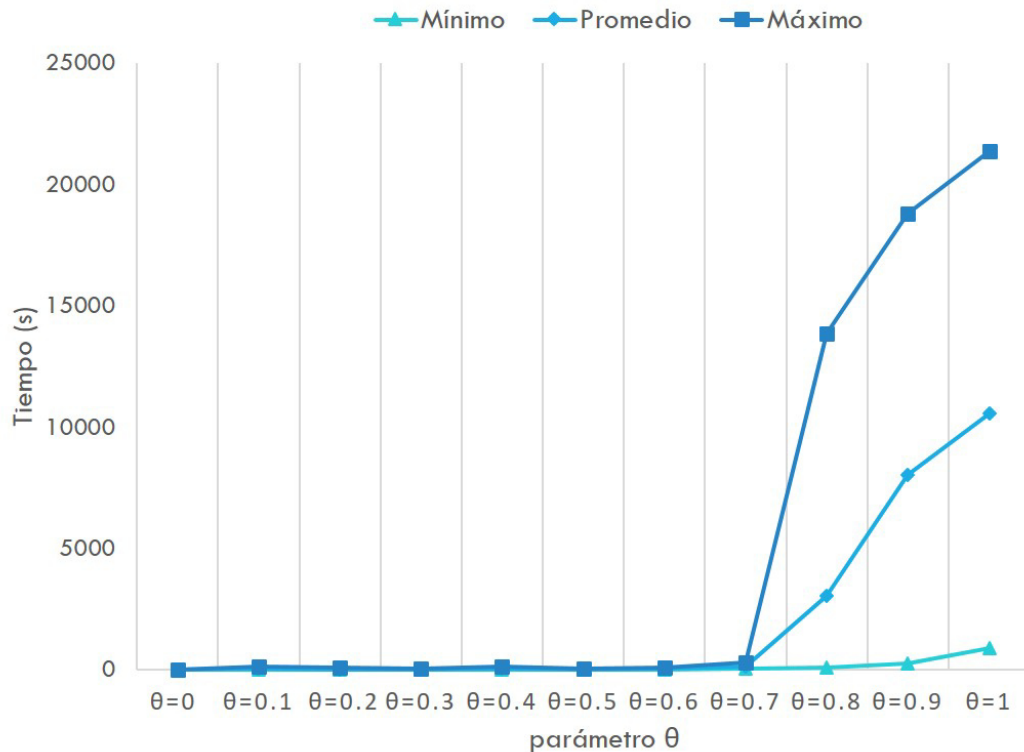


Figura 4.21: Evaluación de θ – Tiempo de ejecución.

Siguiendo con la misma notación de código de colores y figuras en la Figura 4.6 para los ejemplos siguientes de las Figuras 4.22, 4.23 y 4.24.

En la Figura 4.22 tenemos un ejemplo de una instancia representativa (instancia 04) del conjunto chico, con dimensión de los conjuntos $|V| = 100$ y $|W| = 20$ el cual ejemplifica un sistema de localización. De acuerdo con la notación de la Figura 4.6, los puntos negros representan el conjunto V , los puntos de mayor tamaño son aquellos que tienen mayor demanda. Los puntos azules representan el conjunto W . Los círculos en color morado representan el radio de cobertura establecido.

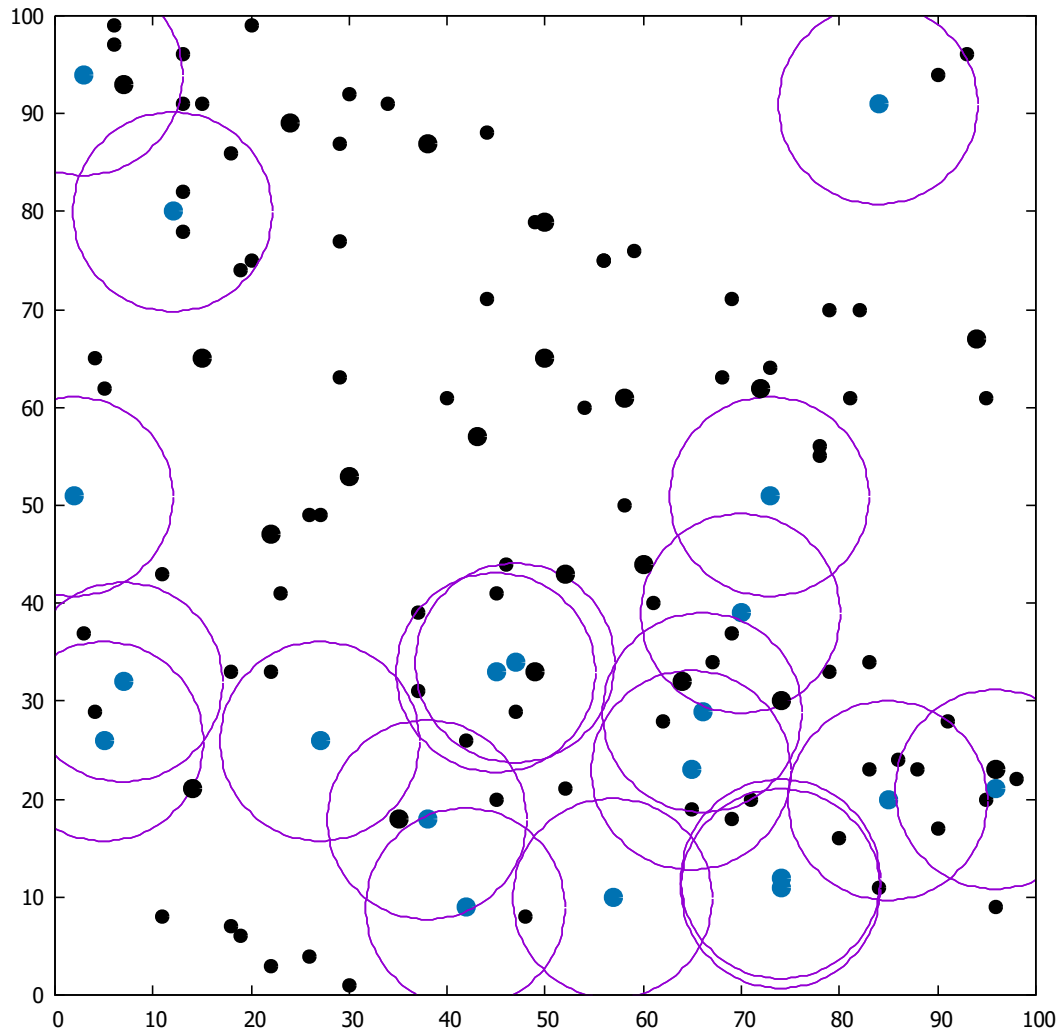


Figura 4.22: Ilustración de ejemplo – Instancia 04 ($m = 100$, $n = 20$).

En las Figuras 4.23 y 4.24 tenemos dos soluciones diferentes para la instancia del ejemplo de la Figura 4.22. En estos ejemplos se varió únicamente el parámetro θ . En ambas figuras tenemos el mismo diseño de parámetros tal como se definió en

los experimentos, las dimensiones de los conjuntos de demanda y potenciales son de $m = 100$ y $n = 20$, respectivamente. Como se mencionó anteriormente, acerca de la notación, la representación de los puntos sigue siendo similar, los puntos potenciales (color azul) y puntos de demanda (color negro) en ambas Figuras 4.23 y 4.24. La solución que se muestra en la Figura 4.23 es colocar dos ambulancias en los puntos potenciales que se observan totalmente en color rojo. La solución que muestra la Figura 4.24 es colocar dos ambulancias en los puntos potenciales que se observan totalmente en color rojo y una ambulancia en aquellos puntos rojos cuyo contorno es color azul. Los puntos en color amarillo son los nodos de demanda que se encuentran cubiertos por las ambulancias establecidas. Podemos observar en la Figura 4.23 la variación del parámetro $\theta = 0.1$ y en la Figura 4.24 un $\theta = 0.9$. Podemos apreciar como varía el sistema con respecto al cambio de valor en el parámetro θ alcanzando una función objetivo de 335 y 450 en las Figuras 4.23 y 4.24, respectivamente.

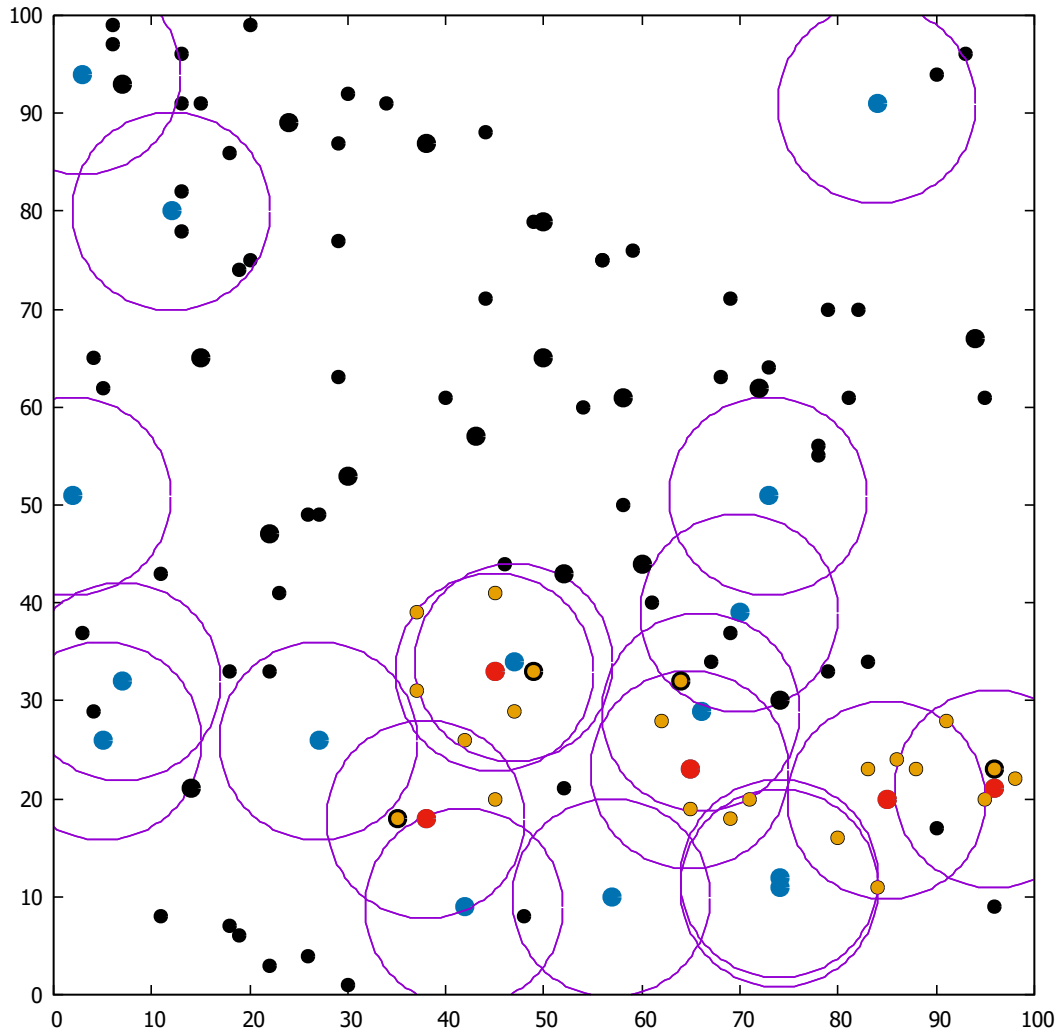


Figura 4.23: Ejemplo de una solución (instancia 04) – Parámetro $\theta=0.1$.

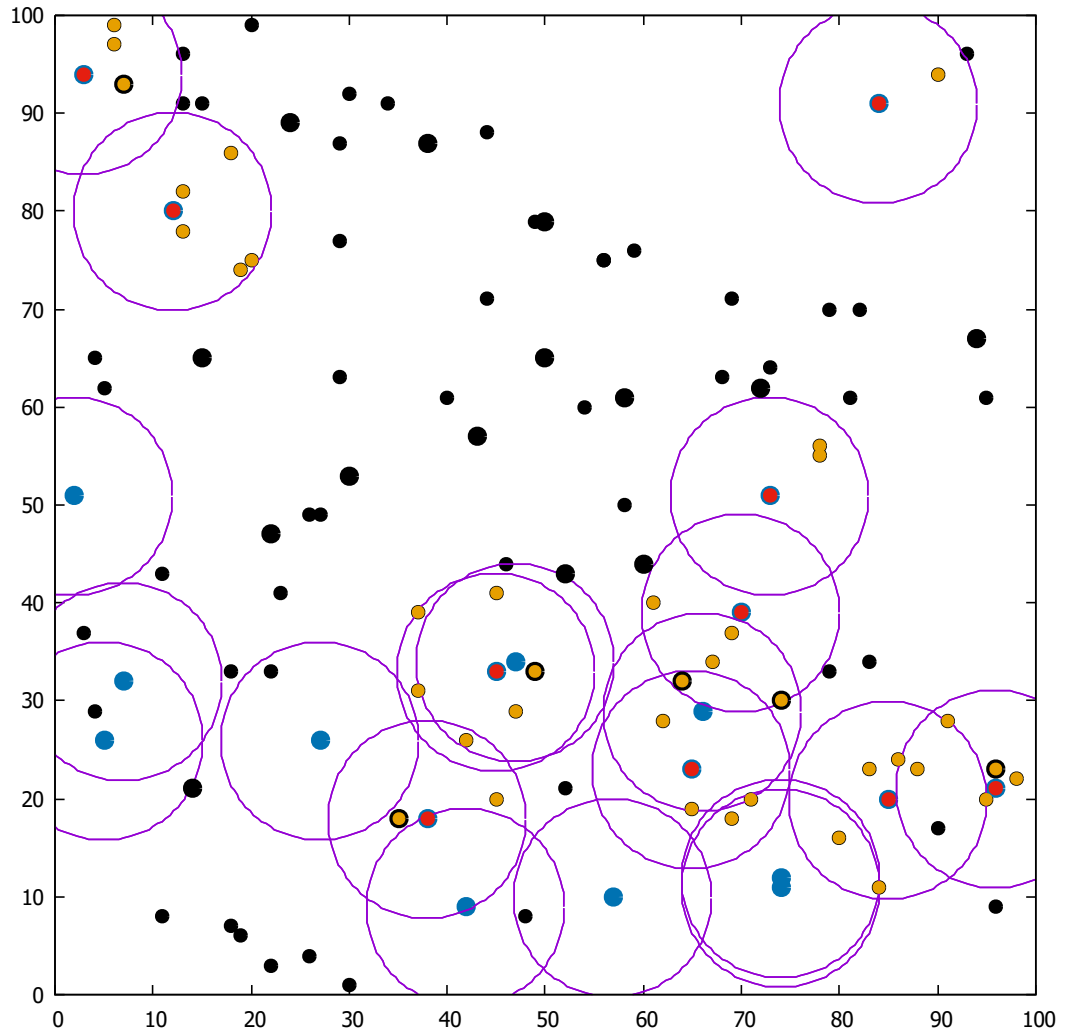


Figura 4.24: Ejemplo de una solución (instancia 04) – Parámetro $\theta = 0.9$.

CAPÍTULO 5

CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

5.1 CONCLUSIONES

A partir de los resultados se puede concluir que, efectivamente, los modelos de localización de cobertura de respaldo cumplen con el propósito general para el cual fueron desarrollados. Se resolvieron satisfactoriamente los tres tamaños de conjuntos de instancias para cada uno de los experimentos efectuados. Se obtuvieron soluciones óptimas muy rápidamente con algunas excepciones en instancias grandes.

Acerca de la garantía de optimalidad de los modelos al ser implementados, podemos decir que sí se asegura, alejada solamente al 1% de la solución óptima, siempre y cuando esté dentro de los tres parámetros probados, con una cardinalidad del conjunto $|V|$ de nodos de demanda de hasta 1,000 y cardinalidad del conjunto $|W|$ de nodos potenciales de hasta 200. Para problemas más grandes de cardinalidad $|V| = 10,000$ nodos y $|W| = 1,000$ también se asegura optimalidad, bajo los parámetros p y r probados. La única excepción ocurrió en el uso del parámetro θ , ya que como se mencionó en el Capítulo 4, no se apreció una diferencia notable al variar ciertos valores de este parámetro θ y algunas instancias quedaron alejadas al 12% de la solución óptima.

En base a los resultados en las gráficas, asentamos que el tamaño del conjunto

de instancias influyó en el tiempo de ejecución. Los tiempos de resolución en el conjunto de instancias grandes aumenta en el uso de los parámetros p , r y θ , más significativamente es estos dos últimos.

Acerca de la sensibilidad podemos decir que el modelo es sensible en el uso de los parámetros p , r y θ . Al ser variados, los parámetros agregan una diferencia en la función objetivo y ésta no afecta el objetivo general de encontrar soluciones óptimas.

5.2 RECOMENDACIONES

Se recomienda sin lugar a dudas el uso e implementación de los modelos de cobertura de respaldo BACOP1 y BACOP2, ya que éstos en la mayoría de los experimentos probados encuentran soluciones óptimas muy rápidamente y en los casos en los que no se alcanzó la optimalidad, como fue el caso de algunas instancias en el experimento 3, el mayor gap (IOR) alcanzado fue de 0.12%. Los tomadores de decisiones pueden tener la certeza de que los modelos de cobertura de respaldo encontrarán soluciones óptimas para diferentes escenarios en dimensión de tamaño de sistemas de localización.

Podemos recomendar ampliamente a los tomadores de decisiones, intentar, en la medida de las posibilidades, incrementar el parámetro p para aumentar significativamente la demanda cubierta. En base a los resultados de los análisis de sensibilidad se puede argumentar el hecho de que mayor cantidad de accidentes pueden ser atendidos, si dispone de una mayor cantidad de ambulancias, ya que al final lo que se busca en el sector salud, es atender mayor proporcionalidad de demanda de accidentes. Cabe mencionar que, una vez identificada la cantidad de demanda total de accidentes, los tomadores de decisiones pueden alcanzar a determinar un valor de p del sea posible atender toda la demanda.

El uso del parámetro r según los análisis, resulta ser sensible. Es importante mencionar que este parámetro requiere de mayor análisis para ser usado, ya que, el

tomador de decisiones debe basar su uso según a la necesidad de atención urgente. Esto implica el hecho de que se busca atención prioritaria. Tal como se mencionó anteriormente [16], atender un accidente en 9 minutos resulta ser un estándar de buena práctica, al menos en el norte de Estados Unidos. Un tiempo aceptable para cubrir un accidente debiese ser analizado cuidadosamente. No se puede simplemente incrementar el valor de este parámetro r por la necesidad de cubrir mayor cantidad de demanda. Esto último resulta ser de controversia por el tema de la inmediatez con la que se expone necesaria la atención médica. Entre menor es la distancia entre una ambulancia y un accidente resulta ser obvio que la atención al paciente será más rápida y por tanto, mucho mejor. Lo que pone al tomador de decisiones ante la responsabilidad de establecer un valor de r buscando equilibrar de manera correcta las necesidades de demanda sin poner en riesgo la rápida atención que se requiere de un solo accidente en particular.

Acerca del parámetro θ , ponemos frente al tomador de decisiones los alcances que tienen los dos términos de la función objetivo. Los resultados de análisis de sensibilidad pueden ayudarle a ver ambos. Para valores de θ entre (0 y 0.5) los resultados de ambas funciones son iguales. No por este hecho el modelo resulta ser insensible en el uso del parámetro. Ya que según la gráfica, darle mayor porcentaje de peso a uno de los objetivos, hará que en este aumente la función objetivo y la otra decrezca. Ambos objetivos son relevantes e importantes. Ambos fueron probados y sus resultados significativos. Tanto la primera cobertura resulta ser relevante como objetivo, así como la de respaldo. Por tanto, el tomador de decisiones deberá analizar cuidadosamente cual de los dos objetivos desea priorizar.

5.3 TRABAJO FUTURO

Como futuro trabajo podemos recomendar para futuros estudios, utilizar otro tipo de distribución para la demanda en el conjunto V . Lo anterior, con la finalidad de ver escenarios distintos de como podría cambiar la sensibilidad de los parámetros

que se probaron si tuvieran una distribución distinta.

Es también recomendable realizar un caso de estudio, en el que se pueda implementar una red de localización real para la cual se analice con antelación el tipo de distribución de datos que presenta y pueda estudiarse bajo esta distribución. Será interesante observar las condiciones del entorno de dicha red.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] S. Al-Shaqsi. Models of international emergency medical service (EMS) systems. *Oman Medical Journal*, 25(4):320–323, 2010.
- [2] M. O. Ball y F. L. Lin. A reliability model applied to emergency service vehicle location. *Operations Research*, 41(1):1–17, 1993.
- [3] A. Ben-Tal. Characterization of pareto and lexicographic optimal solutions. En G. Fandel y T. Gal, editores, *Multiple Criteria Decision Making Theory and Application*, volumen 177 de *Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems*, pp. 1–11. Springer, Berlin, Alemania, 1980.
- [4] I. E. Blanchard, C. J. Doig, B. E. Hagel, A. R. Anton, D. A. Zygun, J. B. Kortbeek, D. G. Powell, T. S. Williamson, G. H. Fick y G. D. Innes. Emergency medical services response time and mortality in an urban setting. *Prehospital Emergency Care*, 16(1):142–151, 2012.
- [5] A. Brooke, D. Kendrick y A. Meeraus. *GAMS: A User's Guide, Release 2.25*. The Scientific Press, San Francisco, EUA, 1992.
- [6] L. Brotcorne, G. Laporte y F. Semet. Ambulance location and relocation models. *European Journal of Operational Research*, 147(3):451–463, 2003.
- [7] G. Bruno, R. Cerulli y M. Gentili. Models, algorithms and applications for location problems. *Optimization Letters*, 10(5):871–873, 2016.
- [8] R. Church y C. ReVelle. The maximal covering location problem. *Papers in Regional Science*, 32(1):101–118, 1974.

- [9] Consejo Nacional para la Prevención de Accidentes, Secretaría de Salud. Atención prehospitalaria de urgencias médicas. URL: <http://conapra.salud.gob.mx/Interior/Atencion.Prehospitalaria.html>. Accesado: 02 Noviembre 2017.
- [10] Cruz Roja Mexicana. ENTUM: Escuela Nacional de Técnicos en Urgencias Médicas. URL: <https://www.cruzrojamexicana.org.mx/entum?estado=GN>. Accesado: 06 Febrero 2018.
- [11] M. S. Daskin. A maximum expected covering location model: Formulation, properties and heuristic solution. *Transportation Science*, 17(1):48–70, 1983.
- [12] Instituto Nacional de Salud Pública. Encuesta nacional de salud y nutrición 2012. URL: <http://ensanut.insp.mx/>. Accesado: 06 Enero 2018.
- [13] Diario Oficial de la Federación. Decreto por el que se reforma el artículo 79 de la Ley General de Salud. URL: http://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5385543&fecha=17/03/2015.
- [14] R. Z. Farahani, N. Asgari, N. Heidari, M. Hosseini y M. Goh. Covering problems in facility location: A review. *Computers and Industrial Engineering*, 62(1):368–407, 2012.
- [15] R. Z. Farahani, M. Hekmatfar, B. Fahimnia y N. Kazemzadeh. Hierarchical facility location problem: An overview of classifications, techniques and applications. *Computers and Industrial Engineering*, 68:104–117, 2014.
- [16] J. Fitch. Response times: Myths, measurement & management. *Journal of Emergency Medical Services*, 30(9):47–56, 2005.
- [17] M. Gendreau, G. Laporte y F. Semet. Solving an ambulance location model by tabu search. *Location Science*, 5(2):75–88, 1997.
- [18] Gobierno de México, Secretaría de Salud. Qué hacemos? URL: <https://www.gob.mx/salud/que-hacemos>. Accesado: 04 Enero 2018.

- [19] J. B. Goldberg. Operations research models for the deployment of emergency services vehicles. *EMS Management Journal*, 1(1):20–39, 2004.
- [20] K. Hogan y C. ReVelle. Concepts and applications of backup coverage. *Management Science*, 32(11):1434–1444, 1986.
- [21] A. Ingolfsson, S. Budge y E. Erkut. Optimal ambulance location with random delays and travel times. *Health Care Management Science*, 11(3):262–274, 2008.
- [22] Instituto de Salud del Estado de México. Centro regulador de urgencias médicas. URL: http://salud.edomex.gob.mx/isem/paginageneral.html?pag_id=at_su_centroreg_urgmedicas. Accesado: 15 Enero 2018.
- [23] Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Accidentes de tránsito. URL: <http://www.beta.inegi.org.mx/temas/accidentes/>. Accesado: 06 Enero 2018.
- [24] Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Principales causas de mortalidad. URL: <http://www.beta.inegi.org.mx/proyectos/registros/vitales/mortalidad/>. Accesado: 05 Enero 2018.
- [25] M. Kilkenney y J.-F. Thisse. Economics of location: A selective survey. *Computers and Operations Research*, 26(14):1369–1394, 1999.
- [26] A. Klose y A. Drexl. Facility location models for distribution system design. *European Journal of Operational Research*, 162(1):4–29, 2005.
- [27] M. T. Melo, S. Nickel y F. Saldanha da Gama. Facility location and supply chain management – A review. *European Journal of Operational Research*, 196(2):401–412, 2009.
- [28] M. Moeini, Z. Jemai y E. Sahin. Location and relocation problems in the context of the emergency medical service systems: A case study. *Central European Journal of Operational Research*, 23(3):641–658, 2015.

- [29] H. Morohosi. A case study of optimal ambulance location problems. En *The 7th International Symposium on Operations Research and Its Applications (ISO-RA '08)*, pp. 125–130, Lijiang, China, Noviembre 2008.
- [30] Organización Mundial de la Salud. 10 datos sobre la seguridad vial en el mundo. URL: <http://www.who.int/features/factfiles/roadsafety/es/>. Accesado: 06 Febrero 2018.
- [31] C. Prodhon y C. Prins. A survey of recent research on location-routing problems. *European Journal of Operational Research*, 238(1):1–17, 2014.
- [32] C. ReVelle y H. A. Eiselt. Location analysis: A synthesis and survey. *European Journal of Operational Research*, 165(1):1–19, 2005.
- [33] C. ReVelle y K. Hogan. The maximum availability location problem. *Transportation Science*, 23(3):192–200, 1989.
- [34] G. Şahin y H. Süral. A review of hierarchical facility location models. *Computers and Operations Research*, 34(8):2310–2331, 2007.
- [35] D. Schilling, D. J. Elzinga, J. Cohon, R. Church y C. ReVelle. The team/fleet models for simultaneous facility and equipment siting. *Transportation Science*, 13(2):163–175, 1979.
- [36] Secretaría de Salud / STCONAPRA. Programa de acción específico: Prevención de accidentes en grupos vulnerables 2013–2018. URL: http://conapra.salud.gob.mx/Interior/Documentos/PAE_GruposVulnerables.pdf, 2014. Accesado: 11 Enero 2018.
- [37] Secretaría de Salud / STCONAPRA. Programa de acción específico: Seguridad vial 2013–2018. URL: http://conapra.salud.gob.mx/Interior/Documentos/PAE_SV.pdf, 2014. Accesado: 11 Enero 2018.

-
- [38] Secretaría de Salud / STCONAPRA. Modelo de atención médica prehospitalaria. México, DF. URL: https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/250824/MODELO_DE_ATENCION_MEDICA_PREHOSPITALARIA.pdf, 2017. Accesado: 05 Enero 2018.
- [39] Senado de la República – Comisión de Atención a Grupos Vulnerables. Programa de trabajo. segundo año de ejercicio de la LXII Legislatura. URL: http://www.senado.gob.mx/comisiones/atencion_grupos/docs/Programa2_LXII.pdf, Septiembre 2013.
- [40] M. N. Shah. The formation of the emergency medical services system. *American Journal of Public Health*, 96(3):414–423, 2006.
- [41] C. Toregas y C. ReVelle. Optimal location under time or distance constraints. *Papers in Regional Science*, 28(1):133–144, 1972.
- [42] C. Toregas, R. Swain, C. ReVelle y L. Bergman. The location of emergency service facilities. *Operations Research*, 19(6):1363–1373, 1971.
- [43] L. A. Wolsey. *Integer Programming*. Wiley, New York, EUA, 1998.

RESUMEN AUTOBIOGRÁFICO

Luisa Nalleli Corazón Delgado González

Candidato para obtener el grado de
Maestría en Ciencias en Ingeniería de Sistemas

Universidad Autónoma de Nuevo León
Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica

Tesis:

ESTUDIO DE UN PROBLEMA DE LOCALIZACIÓN DE SERVICIOS DE
EMERGENCIA CON COBERTURA DE RESPALDO

Nació el 12 de septiembre de 1988 en Monterrey, Nuevo León. Hija del Sr. Juan Delgado Morales y la Sra. Bertha Aida González García. En julio del 2013 se gradúa de la Universidad Autónoma de Nuevo León como Ingeniero Administrador de Sistemas. Inició sus estudios de Maestría en Ciencias en Ingeniería de Sistemas en Agosto de 2016 contando con el apoyo de beca de manutención otorgada por el CONACyT y beca escolar por parte del Posgrado en Ingeniería de Sistemas (PISIS) en la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica (FIME). En el último año, bajo la tutela y dirección del Dr. Roger Z. Ríos Mercado realizó su trabajo de tesis para conseguir el grado de Maestra en Ciencias con especialidad en Ingeniería de Sistemas.