

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

Facultad de Ciencias Naturales y Matemáticas

Modelo de localización para elaboración de un plan de respuesta ante emergencias

PROYECTO INTEGRADOR

Previo la obtención del Título de:

Ingeniero en Logística y Transporte

Presentado por:

Laila Elizabeth Alvear Saá
Adrián Antonio Martín Dahik

GUAYAQUIL – ECUADOR

Año: 2019

DEDICATORIA

El presente proyecto lo dedicamos a
nuestros padres.

AGRADECIMIENTOS

Nuestro más sincero agradecimiento a nuestro tutor Xavier Cabezas, a nuestros padres y a cada uno de nuestros maestros.

DECLARACIÓN EXPRESA

“Los derechos de titularidad y explotación, nos corresponde conforme al reglamento de propiedad intelectual de la institución; *Laila Elizabeth Alvear Saá* y *Adrián Antonio Martín Dahik* damos nuestro consentimiento para que la ESPOL realice la comunicación pública de la obra por cualquier medio con el fin de promover la consulta, difusión y uso público de la producción intelectual”

Laila Elizabeth Alvear Saá

Adrián Antonio Martín Dahik

EVALUADORES

.....
Mgtr. Guillermo Baquerizo

PROFESOR DE LA MATERIA

.....
PhD. Xavier Cabezas

PROFESOR TUTOR

RESUMEN

El presente proyecto de graduación se realizó con el propósito de crear un sistema informático que permita gestionar la óptima inversión de recursos de una ciudad en el ámbito de seguridad, basado en un modelo de localización. La herramienta como tal, permitirá al usuario asistir en la toma de decisiones para la elaboración de un ERP. La teoría actual de los modelos de localización es escasa debido a que es relativamente nueva en el campo de la optimización matemática, de tal forma que la obtención de información histórica es prácticamente inexistente en el tiempo que se desarrolló este proyecto.

Existe un modelo clásico de localización con cobertura de emergencias según su peso o nivel de prioridad (MCLP-PB) y que como máximo asigna una unidad de un tipo específico de vehículo de respuesta, que va a proporcionar la base para implementar modificaciones que van a permitir atender emergencias que requieran más de una unidad y más de un tipo de vehículo específico, minimizando la distancia entre el punto donde se suscita la emergencia y el punto que brinda asistencia.

La programación de este modelo se realizó a través de Xpress Solver para modelar y resolver el problema, y Wolfram Mathematica para observar el ingreso y salida de los datos. Una vez comprobada la factibilidad de los resultados del modelo, se procedió a incrementar el tamaño del problema con el fin de elaborar una tabla comparativa del tiempo de resolución del modelo.

Palabras Clave: Modelo localización, optimización, cobertura, prioridad, ERP.

ABSTRACT

The present graduation project was carried out with the purpose of creating a software that allows managing the optimal investment of a city's resources in the field of security, based on localization models, the tool as such will allow the user to assist in making decisions for the elaboration of an ERP, at the moment the theory of the models of location is scanty because it is relatively new in the field of the mathematical optimization, of such form that the obtaining of historical information is practically nonexistent in time that this project was developed.

Based on a classic location model that allows emergencies covering according to their priority level or weight (MCLP-PB) and that, at the most, assigns a unit of a specific type of response vehicle, this paper introduces a modified location model with priorities that allows to assign more than one unit of a specific type of vehicle and minimize the distance between the emergency point and the assistance location point.

The programming was developed on Xpress Solver to model and solve the problem, and Mathematica for the input and output of the data, once the feasibility of the results of the model was verified, the problem was increased in order to prepare a comparative table of the resolution time of the model.

Keywords: *Location model, optimization, covering, priority, ERP.*

ÍNDICE GENERAL

Contenido

AGRADECIMIENTOS	3
DECLARACIÓN EXPRESA	4
EVALUADORES	5
RESUMEN	6
ÍNDICE GENERAL	8
ABREVIATURAS	10
ÍNDICE DE FIGURAS	11
CAPÍTULO 1	14
1. INTRODUCCIÓN	14
1.1 Descripción del Problema.....	15
1.3 Justificación del problema.....	15
1.4 Objetivos.....	16
CAPÍTULO 2	20
2. Marco Conceptual.....	20
2.1 Heurísticas.....	20
2.2.1.1 Ventajas de una heurística.....	20
2.2.1.2 Desventajas de una heurística.....	20
2.2.2 Metaheurísticas.....	20
2.2.3 Problema de asignación.....	21
2.2.3.1 Modelo del problema de asignación.....	21
2.2.4 Modelos de Localización.....	22
2.2.4.1 Maximum Coverage Location Problem (MCLP). Problema de localización de máxima cobertura.....	22
2.2.4.2 Priority Based Maximum Coverage Location Problem (MCLP-P) Problema de localización de máxima cobertura basado en prioridad.....	23
2.2.4.3 Priority Based Maximum Coverage Location Problem (MCLP-PB).....	24
2.2.5. Emergency Response Plan. (ERP). (Plan de Respuesta ante Emergencias).....	26
2.3 Implementación computacional del modelo de localización MCLP-PB.....	27

2.3.1 Herramientas informáticas utilizadas.....	27
2.3.2 Recursos computacionales empleados.....	27
2.4 Formato de datos de entrada.....	27
2.5 funciones de entrada para el modelo MCLP-PB en Matlab.....	28
2.5.1 Función EW.....	28
2.5.2 Función VDRN.....	29
2.5.3 Función GenerateDataLFE.....	29
2.6 Archivo de salida de mathematica.....	30
2.7 Modelo de localización MCLP-PB en Mosell Xpress.....	31
CAPÍTULO 3	33
3.1 EXPERIMENTOS COMPUTACIONALES.....	33
3.1.1 Simulación n10m20L1 y sus variantes.....	34
3.1.2 Simulación n20m40L1.5 y sus variantes.....	36
3.1.3 Simulación n50m100L3 y sus variantes.....	39
3.1.4 Simulación n100m200L1.5 y sus variantes.....	41
3.1.4 Simulación n150m300L2 y sus variantes.....	44
3.1.4 Simulación n500m1000L3 y sus variantes.....	45
CAPÍTULO 4.....	47
4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	47
4.1 Conclusiones.....	47
4.2 Recomendaciones.....	47
BIBLIOGRAFÍA.....	48

ABREVIATURAS

IO	Investigación de Operaciones, Investigación Operativa
ERP	Emergency Response Plan Plan de Respuesta de Emergencias
EMS	Emergency Medical Services Servicios Médicos de Emergencia
URL	Uniform Resource Locator Localizador de recursos uniforme
MCLP	Maximum Coverage Location Problem Problema de Localización de Máxima Cobertura
MCLP-PB prioridades	Priority Based Maximum Coverage Location Problem Problema de Localización de Máxima Cobertura basado en prioridades
MIP	Mixed-Integer Programming Programación Entera Mixta
VRPTW-P Prioridades	Vehicle Routing Problem Time Windows with Priorities Problema de Ruteo de Vehículos con Ventanas de Tiempo y Prioridades
NP-Hard	Non-deterministic Polynomial-time No polinomial, Tiempo polinomial no determinístico

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 3.1: grafo generado con $Q=3$, $nk=2$, $l=2$, $J=5$	34
Figura 3.2: solución del grafo generado con $Q=3$, $nk=2$, $l=2$, $J=5$	34
Figura 3.3: grafo generado con $Q=2$, $nk=4$, $l=4$, $J=3$	34
Figura 3.4: solución del grafo generado con $Q=2$, $nk=4$, $l=4$, $J=3$	34
Figura 3.5: grafo generado con $Q=3$, $nk=3$, $l=2$, $J=5$	35
Figura 3.6: solución del grafo generado con $Q=3$, $nk=3$, $l=2$, $J=5$	35
Figura 3.7: grafo generado con $Q=1$, $nk=2$, $l=2$, $J=5$	35
Figura 3.8: solución del grafo generado con $Q=1$, $nk=2$, $l=2$, $J=5$	35
Figura 3.9: grafo generado con $Q=4$, $nk=3$, $l=4$, $J=6$	36
Figura 3.10: solución del grafo generado con $Q=4$, $nk=3$, $l=4$, $J=6$	36
Figura 3.11: grafo generado con $Q=5$, $nk=3$, $l=4$, $J=10$	36
Figura 3.12: solución del grafo generado con $Q=5$, $nk=3$, $l=4$, $J=10$	36
Figura 3.13: grafo generado con $Q=4$, $nk=2$, $l=5$, $J=7$	37
Figura 3.14: solución del grafo generado con $Q=4$, $nk=2$, $l=5$, $J=7$	37
Figura 3.15: grafo generado con $Q=7$, $nk=4$, $l=3$, $J=5$	37
Figura 3.16: solución del grafo generado con $Q=7$, $nk=4$, $l=3$, $J=5$	37
Figura 3.17: grafo generado con $Q=6$, $nk=2$, $l=5$, $J=10$	38
Figura 3.18: solución del grafo generado con $Q=6$, $nk=2$, $l=5$, $J=10$	38
Figura 3.19: grafo generado con $Q=5$, $nk=3$, $l=3$, $J=4$	38
Figura 3.20: solución del grafo generado con $Q=5$, $nk=3$, $l=3$, $J=4$	38
Figura 3.21: grafo generado con $Q=10$, $nk=5$, $l=22$, $J=30$	39
Figura 3.22: solución del grafo generado con $Q=10$, $nk=5$, $l=22$, $J=30$	39
Figura 3.23: solución del grafo generado con $Q=12$, $nk=4$, $l=15$, $J=20$	39
Figura 3.24: solución del grafo generado con $Q=12$, $nk=4$, $l=15$, $J=30$	39
Figura 3.25: grafo generado con $Q=15$, $nk=4$, $l=12$, $J=25$	40
Figura 3.26: solución del grafo generado con $Q=15$, $nk=4$, $l=12$, $J=25$	40
Figura 3.27: grafo generado con $Q=17$, $nk=3$, $l=12$, $J=20$	40
Figura 3.28: solución del grafo generado con $Q=17$, $nk=3$, $l=12$, $J=20$	40
Figura 3.29: grafo generado con $Q=10$, $nk=4$, $l=10$, $J=18$	41

Figura 3.30: solución del grafo generado con $Q=10$, $nk=4$, $l=10$, $J=18$	41
Figura 3.31: grafo generado con $Q=15$, $nk=3$, $l=17$, $J=30$	41
Figura 3.32: solución del grafo generado con $Q=15$, $nk=3$, $l=17$, $J=30$	41
Figura 3.33: grafo generado con $Q=13$, $nk=2$, $l=22$, $J=35$	42
Figura 3.34: solución del grafo generado con $Q=13$, $nk=2$, $l=22$, $J=35$	42
Figura 3.35: grafo generado con $Q=30$, $nk=4$, $l=61$, $J=90$	42
Figura 3.36: solución del grafo generado con $Q=30$, $nk=4$, $l=61$, $J=90$	42
Figura 3.37: grafo generado con $Q=55$, $nk=3$, $l=78$, $J=95$	43
Figura 3.38: solución del grafo generado con $Q=55$, $nk=3$, $l=78$, $J=95$	43
Figura 3.39: grafo generado con $Q=80$, $nk=5$, $l=46$, $J=60$	43
Figura 3.40: solución del grafo generado con $Q=80$, $nk=5$, $l=46$, $J=60$	43
Figura 3.41: grafo generado con $Q=25$, $nk=4$, $l=47$, $J=80$	44
Figura 3.42: solución del grafo generado con $Q=25$, $nk=4$, $l=47$, $J=80$	44

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Recursos computacionales empleados.....27

Tabla 2: tabla comparativa de simulaciones.....49

CAPÍTULO 1

1. INTRODUCCIÓN

El presente trabajo se refiere a los modelos de localización, que se pueden definir como modelos de optimización cuyo enfoque es hallar la solución de un problema del mundo real, la cual radica en encontrar la ubicación estratégica de recursos en un espacio determinado. La característica principal de estos modelos es que intentan resolver un problema que en matemáticas se lo cataloga como NP-HARD, lo que implica que puede ser resuelto en un tiempo no determinista. La investigación de este tipo de problemas surgió por el interés de elaborar una herramienta que ayude a nuestro país, Ecuador, en mejorar sus planes de respuesta a emergencias, dado que hace aproximadamente 3 años ocurrió un terremoto de 7,8 grados, y se necesitó de mucha ayuda internacional para manejar la situación que se había generado en el país. Dentro de la planificación del desarrollo urbano se debe incluir un plan detallado de acción ante posibles escenarios de emergencias, sean éstas antrópicas o por influencia de la naturaleza. Un plan de respuesta ante emergencias (ERP, por sus siglas en inglés) son procedimientos desarrollados con este fin: reaccionar de forma inmediata ante algún tipo de peligro, desastre o accidente. Debido al rápido crecimiento poblacional, es necesario analizar constantemente nuevas estrategias que permitan a una comunidad prepararse para enfrentar una situación de crisis, reducir pérdidas humanas y/o económicas, y a su vez recuperarse con el mínimo tiempo y costo posibles.

En la teoría de optimización, los modelos de localización son relativamente nuevos, el artículo académico que inspira como base a esta investigación, **Location and Routing Models for Emergency Response Plans with Priorities/Modelos de localización y ruteo para planes de respuesta de emergencias con prioridades**, es del año 2012, modelo que además de ser estudiado, fue mejorado, ampliando los aspectos que considera al momento

de hallar una solución, consiguiendo así un modelo que no solo considera el radio de atención, sino que además considera minimizar la distancia entre posibles puntos para la ubicación de recursos. Se espera que estos resultados sirvan como guía o referencia para el desarrollo de una segunda fase (VRPTW-P) que permita brindar soporte de manera óptima en la atención de emergencias en nuestro país.

1.1 Descripción del Problema

El crecimiento poblacional y de las zonas urbanas generan un mayor impacto en los escenarios donde surgen emergencias, sean éstas antrópicas o por influencia de la naturaleza, por lo cual surge la necesidad de analizar y desarrollar constantemente mejores modelos de optimización, los cuales tratan de resolver computacionalmente el número de instalaciones de respuesta a emergencias, la cantidad de recursos y la asignación de los mismos, tales como: vehículos de asistencia médica, policial, tránsito, bomberos, entre otros, que se requieren; de tal forma que ningún cliente o usuario se encuentre fuera del rango de atención de dichas instalaciones.

Maximizar la cobertura de los servicios de atención ciudadana de emergencias y minimizar tiempo de respuesta de dichos recursos resumen el propósito de estos modelos, sin embargo, hallar una solución a estos problemas no es tarea sencilla, debido a que los problemas de localización o de máxima cobertura, son problemas NP-hard, lo que significa que hallar la solución óptima requiere restringir las dimensiones del problema y se recomienda el uso los métodos de programación entera mixta o los procedimientos de ramificación y acotamiento para resolverlos.

1.3 Justificación del problema

Toda ciudad o zona urbana debe considerar entre sus objetivos principales de planificación y desarrollo la seguridad de sus habitantes, esto implica el manejo e inversión de una importante cantidad de recursos públicos, con este proyecto se busca crear una herramienta la cual permita optimizar el uso de dichos recursos,

de tal forma que las autoridades competentes tengan un referencia para independientemente del tipo o enfoque en el plan de desarrollo económico, turístico o social que quieran aplicar no descuiden la seguridad de sus habitantes.

De igual forma también buscamos aportar a la teoría de optimización matemática, a través de la implementación de nuestro modelo que permite resolver un problema de localización, el cual es NP-hard, optimizando tanto la cobertura como la distancia en su función objetivo.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo General

Desarrollar un modelo de localización que maximice la cobertura y minimice distancias para un grafo de dado, priorizando los recursos dados para la atención en posibles puntos de emergencia con diferente grado de prioridad de atención

1.4.2 Objetivos Específicos

1. Programar en Xpress el modelo de localización de instalaciones ajustado para atender emergencias prioritarias con parámetros pre-establecidos.
2. Determinar la cantidad mínima de recursos necesarios para maximizar la cobertura de asistencia a emergencias en un grafo dado.
3. Comparar tiempos de resolución con grafos de diferentes tamaños.
4. que se minimice las distancias
5. Conocer el tipo de flota que debe ser asignado a los clientes que asegure la satisfacción de la demanda.
6. Detectar oportunidades de mejora en el proceso de distribución, para volver ágil el proceso de despacho y asegurar la disponibilidad de vehículos.

1.5 Marco Teórico

A continuación, se describen artículos relacionados a la problemática de este trabajo, los cuales otorgan información relevante que será útil para los propósitos de este estudio.

Covering-Location Models for Emergency Situations That Require Multiple Response Units

Modelos de Cobertura y Localización para situaciones de emergencia que requieren múltiples unidades de respuesta.

Origen: Estados Unidos

Fecha: 1990

Resumen:

En este documento se propone un nuevo criterio de cobertura adecuado para dos tipos de aplicaciones: la ubicación de los camiones de bomberos en un área geográfica en la que algunas demandas requieren que los camiones de bomberos estén dentro de un estándar de distancia aceptable para lograr la cobertura; y la ubicación de las ambulancias en un entorno en el que un gran volumen de demanda a menudo conduce a la falta de disponibilidad de la unidad de respuesta más deseable. El conjunto que cubre el problema de ubicación y la máxima problema de ubicación de cobertura se examinan en el marco de modelado propuesto. Se desarrollan las propiedades de estos modelos y se informa sobre la experiencia computacional limitada.

Location and Routing Models for Emergency Response Plans with Priorities.
Modelos de localización y ruteo para planes de respuesta de emergencias con prioridades.

Origen: Estados Unidos

Fecha: 2012

Resumen:

En la planificación de emergencias, la consideración de las prioridades de emergencia es una necesidad. Este documento presenta nuevas formulaciones del problema de ubicación de la instalación (FLP) y del problema de enrutamiento del vehículo con ventanas de tiempo (VRPTW) con consideraciones de prioridad. Nuestros modelos aseguran que las ubicaciones de mayor prioridad se consideren antes que las de menor prioridad, tanto para las decisiones de instalación como de enrutamiento. El FLP se resuelve utilizando un solucionador de MIP, mientras que se desarrolla una metaheurística basada en búsqueda de tabú para la solución del VRPTW. Bajo un conjunto de posibles escenarios de emergencia con recursos de emergencia limitados, nuestros modelos pudieron atender ubicaciones de mayor prioridad mejor que el muy utilizado modelo de problema de ubicación de cobertura máxima (MCLP). También presentamos trabajos preliminares y resultados para un análisis de enrutamiento de ubicación integrado que mejora aún más los resultados del servicio.

Covering models and optimization techniques for emergency response facility location and planning: a review.

Modelos de cobertura y técnicas de optimización para ubicación de instalaciones de atención de emergencias y planificación: una reseña.

Origen: Estados Unidos

Fecha: 2010

Resumen:

Desafortunadamente, dado que las emergencias son parte de nuestras vidas, es crucial planificar y asignar eficientemente los servicios de respuesta a emergencias que brinden un alivio efectivo y oportuno a las personas más necesitadas. Los problemas de asignación de Servicios Médicos de Emergencia (EMS, por sus siglas en inglés) se relacionan con la ubicación de las instalaciones de EMS entre los sitios

potenciales para brindar servicios eficientes y efectivos en un área amplia con demandas distribuidas espacialmente. A menudo es problemático debido a la complejidad intrínseca de estos problemas. Este documento revisa los modelos y las técnicas de optimización para la ubicación y planificación de las instalaciones de respuesta a emergencias en la literatura de las últimas décadas, al tiempo que enfatiza los desarrollos recientes. Presentamos varios modelos de cobertura típicos y sus extensiones ordenadas de simple a compleja, que incluyen el problema de cobertura de conjunto de ubicación (LSCP), el problema de ubicación de cobertura máxima (MCLP), el modelo estándar doble (DSM), el problema de ubicación de cobertura máxima esperada (MEXCLP) y el máximo Disponibilidad de modelos de problema de ubicación (MALP). Además, en este documento también se presentan los desarrollos recientes sobre los modelos de colas de hipercubo, los modelos de asignación dinámica, los modelos de cobertura gradual y los modelos de cobertura cooperativa. Se resumen las técnicas de optimización correspondientes para resolver estos modelos, incluidos algoritmos heurísticos, simulación y métodos exactos.

CAPÍTULO 2

2. Marco Conceptual

En esta sección se detallan las ideas y conceptos básicos que están relacionados con el problema de cobertura analizado en este trabajo.

2.1 Heurísticas

Están diseñadas para encontrar buenas soluciones aproximadas de problemas combinatorios difíciles que de lo contrario no pueden resolverse mediante los algoritmos de optimización disponibles. Una heurística es una técnica de búsqueda directa que utiliza reglas favorables prácticas para localizar soluciones mejoradas. Las primeras generaciones de heurística se basan en la regla de búsqueda codiciosa que dicta que se mejore el valor de la función objetivo con cada movimiento de búsqueda. La búsqueda termina en un óptimo local donde ya no son posibles más mejoras.

2.2.1.1 Ventajas de una heurística

La ventaja de la heurística es que en general determina (buenas) soluciones con rapidez, utilizando reglas de solución simples.

2.2.1.2 Desventajas de una heurística

La desventaja es que la calidad de la solución (con respecto a la óptima) suele desconocerse.

2.2.2 Metaheurísticas

Son una familia de algoritmos aproximados de propósito general. Suelen ser

procedimientos iterativos que guían una heurística subordinada de búsqueda, combinando de forma inteligente distintos conceptos para explorar y explotar adecuadamente el espacio de búsqueda.

2.2.3 Problema de asignación

El problema de asignación es un tipo especial de problema de programación lineal en el que los elementos asignados son recursos que se destinan a la realización de tareas.

2.2.3.1 Modelo del problema de asignación

El modelo matemático para manejar el problema de asignación utiliza las siguientes variables de decisión:

$$x_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{si se asigna } i \text{ para realizar la tarea } j, \\ 0, & \text{si no.} \end{cases} \quad \forall i, j$$

Entonces, cada x_{ij} es una variable binaria (toma valores 0 o 1).

Si se tiene Z como la función de costo total, el modelo del problema de asignación es:

$$\min Z = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n c_{ij} x_{ij}$$

s.a.

$$\sum_{j=1}^n x_{ij} = 1, \text{ para } i = 1, 2, \dots, n.$$

$$\sum_{i=1}^n x_{ij} = 1, \text{ para } j = 1, 2, \dots, n.$$

$$x_{ij} \geq 0, \forall i, j$$

$$(x_{ij} \text{ es binaria}, \forall i, j).$$

2.2.4 Modelos de Localización

Son representaciones más sencillas de la realidad que permiten la identificación de aspectos fundamentales y generalizables de la realidad que se modelizan dejando fuera detalles no esenciales, con el objetivo de analizar alternativas y predecir escenarios. Algunos de los modelos de localización más conocidos son los de Von Thunen, Weber o Christaller.

2.2.4.1 Maximum Coverage Location Problem (MCLP). Problema de localización de máxima cobertura.

El problema de ubicación para máxima cobertura es un problema clásico de la literatura de los problemas de localización (Church y ReVelle 1974). Es de tipo NP-Hard y representa mayor dificultad en su análisis puesto que mientras que un modelo de localización ubica instalaciones en un grafo de vértices y aristas para alcanzar a cubrir una demanda; en el MCLP, el objetivo es encontrar un número determinado de instalaciones en una red para maximizar la cobertura de la demanda en un estándar de tiempo establecido. La fórmula de MCLP ha sido utilizada ampliamente en diversas áreas como: la ubicación óptima de instalaciones, servicios o vehículos de respuesta para emergencias, (Li 2011); redes de comunicación (Lee y Murray 2010); tiendas de retail (Plastria y Vanhaverbeke 2007); sensores de seguridad (Murray 2007).

$$Max Z = \sum_{i \in I} a_i y_i$$

s.a.

$$\sum_{j \in N_i} x_j \geq y_i, \forall i \in I$$

$$\sum_{j \in J} x_j = P$$

$$x_j = (0,1) , \quad \forall j \in J$$

$$y_i = (0,1) , \quad \forall i \in I$$

Donde,

$I =$ denota el set de nodos de demanda;

$J =$ denota el set de ubicación de instalaciones ;

$S =$ denota la distancia establecida como límite por sobre la cual un punto de demanda será considerado no cubierto, este valor puede ser elegido de forma diferente para cada punto de demanda;

$d_{ij} =$ distancia más corta desde el nodo i hacia j ;

$$x_j = \begin{cases} 1, & \text{si una instalación se ubica en el sitio } j ; \\ 0 & \text{si no} \end{cases}$$

$$N_i = \{ j \in J \mid d_{ij} \leq S \};$$

$a_i =$ población a ser atendida desde i ;

$p =$ el número de instalaciones a ser ubicadas

2.2.4.2 Priority Based Maximum Coverage Location Problem (MCLP-P)

Problema de localización de máxima cobertura basado en prioridad.

El modelo clásico MCLP con noción de prioridades (MCLP-P) está definido de la siguiente forma:

Parámetros

Q : Número de instalaciones disponibles para operación,

P^k : Número de vehículos tipo k disponibles para ubicación en instalaciones,

p_i^k : valor de prioridad del punto de emergencia $i \in I$ para el vehículo de tipo k ,

d_i^k : número de instalaciones requeridas para cubrir $i \in I$ con los vehículos de tipo k ,

α_i^k : peso para la emergencia de tipo k en el punto $i \in I$.

Variables de Decisión

$$y_j = \begin{cases} 1 & \text{si una instalación se ubica en } j \in J, \\ 0 & \text{si no.} \end{cases}$$

$$x_j^k = \begin{cases} 1 & \text{si un vehículo de emergencia tipo } k \in K, \text{ es ubicado en una instalación } j \in J, \\ 0 & \text{si no.} \end{cases}$$

$$w_i^k = \begin{cases} 1 & \text{si el punto } i \in I \text{ es cubierto por un vehículo de emergencia tipo } k \in K, \\ 0 & \text{si no.} \end{cases}$$

$$\max \sum_{k \in K} \sum_{i \in I} \alpha_i^k w_i^k$$

s. a. :

$$\sum_{j \in J} y_j \leq Q,$$

$$\sum_{j \in J} x_j^k \leq P^k, \forall k \in K,$$

$$x_j^k \leq y_j, \forall k \in K, \forall j \in J.$$

$$\sum_{j \in J} x_j^k \geq w_i^k, \forall k \in K, \forall i \in I.$$

2.2.4.3 Priority Based Maximum Coverage Location Problem (MCLP-PB)

Este modelo propone una modificación en el planteamiento del modelo clásico de

maximización de cobertura (MCLP), con el objetivo de satisfacer con cobertura adicional la demanda de las ubicaciones predefinidas dentro de los parámetros como prioritarias por encima de otras locaciones que también requieren asistencia o servicio.

$$\min \sum_{k \in K} \sum_{i \in I} \alpha_i^k \left[d_i^k - \sum_{j \in N_i^k} x_j^k \right]^+ \text{ donde, } [f(\cdot)]^+ = f(\cdot) \text{ si } f(\cdot) \geq 0, 0 \text{ sino.}$$

s. a. :

$$1) \sum_{j \in J} y_j \leq Q,$$

$$2) \sum_{j \in J} x_j^k \leq P^k, \forall k \in K,$$

$$3) x_j^k \leq y_j, \forall k \in K, \forall j \in J.$$

Como se puede observar, esta modificación propone una función objetivo no lineal (composición de funciones), por lo cual proponemos un modelo equivalente que resuelve el problema, quedando de la siguiente forma:

$$\min \sum_{k \in K} \sum_{i \in I} \alpha_i^k s_i^k$$

s.a.

$$d_i^k - \sum_{j \in N_i^k} x_j^k \leq s_i^k, s_i^k \geq 0$$

$$\sum_{j \in J} y_j \leq Q,$$

$$\sum_{j \in J} x_j^k \leq P^k, \forall k \in K,$$

$$x_j^k \leq y_j, \forall k \in K, \forall j \in J.$$

Si observamos también la restricción 3) de este modelo, esta nos dice que al momento de asignar vehículos de emergencia de tipo k a la locación j, esta no va a permitir asignar más de uno de estos recursos. Esto representaría un problema, ya que, según las situaciones de crisis, puede que se requieran varios vehículos de emergencia, por ejemplo: En el caso de un incendio, se puede presentar la

demanda de ese punto i como: 1 vehículo de ambulancia y 2 vehículos de bomberos. Por lo cual, para resolver esta limitante, se propone agregar la siguiente variable:

v_{ij}^k : número de vehículos tipo k ubicados en la locación j para cubrir al punto de emergencia i .

y las siguientes restricciones:

5) $\sum_{i \in I} \sum_{j \in J} v_{ij}^k \leq P^k; \forall k \in K$, que reemplaza a 3) para la asignación de varios vehículos.

6) $(1 - y_j)v_{ij}^k = 0; \forall i, j, k$ (Restricción no lineal)

6.1) $v_{ij}^k \leq y_j M; \forall i, j, k$ (Linealización de 6)

Donde 6.1) va a asegurar que no se asignen vehículos si no se abre la instalación j .

2.2.5. Emergency Response Plan. (ERP). (Plan de Respuesta ante Emergencias).

Los planes de respuesta ante emergencias, también llamados “planes de seguridad” o “planes B”, son procedimientos desarrollados para reaccionar de forma inmediata ante algún tipo de peligro, desastre o accidente. La implementación de estas estrategias permite que una comunidad o ciudad pueda estar preparada para enfrentar un evento de peligro, reducir pérdidas humanas y/o económicas, y a su vez recuperarse con el mínimo tiempo y costo posibles. Este tipo de planes requieren que los profesionales de IO desarrollen cada vez más eficientes metodologías para responder con buena calidad de soluciones ante eventos de crisis, en el menor tiempo posible, cumpliendo los estándares y restricciones de los modelos propuestos.

2.3 Implementación computacional del modelo de localización MCLP-PB

2.3.1 Herramientas informáticas utilizadas

Los recursos de software usados en este trabajo se detallan a continuación:

- Mathematica: es un programa utilizado en diferentes áreas aplicativas de la ciencia, tales como la ingeniería, matemática y computación. Para este proyecto fue usado en su versión estudiantil, para la ilustración de los parámetros de modelo propuesto, de los grafos utilizados, el tabulado de los datos que fueron ingresados al modelador de resolución de problemas, y para la ilustración de los resultados.
- FICO Xpress: es un programa solucionador de optimización que permite hallar soluciones a problemas mediante programación lineal, convexa, cuadrática, y de entre mixta. Para este proyecto fue usado en su versión estudiantil para hallar la solución óptima mediante su solucionador de programación entera mixta

2.3.2 Recursos computacionales empleados

Los recursos de hardware se detallan en la tabla 1

Sistema Operativo	Windows 8.1
Procesador	Intel core i7-4510U
Memoria RAM	8 GB

Tabla 1: Recursos computacionales empleados

2.4 Formato de datos de entrada

Los datos de entrada que son aleatorios para nuestro modelo son:

- El peso de prioridad de cada emergencia
- La cantidad de cada tipo de vehículo de atención a emergencias
- La matriz de adyacencia, la de cobertura, y la de distancias

Los parámetros de entrada que se ingresan manualmente en el modelo son:

- La cantidad de nodos - n
- La cantidad de arcos - m
- El radio de cobertura - L
- La cantidad de estaciones de emergencia que se pueden construir - Q
- La cantidad de tipos diferentes de vehículos de asistencia a emergencias - K
- La cantidad de emergencias - I
- Los puntos de asistencia para emergencias – J

2.5 funciones de entrada para el modelo MCLP-PB en Matlab

A continuación, se mostrarán las funciones usadas como input para la generación de datos, y además tabular la data que será usada por el modelador Mosell Xpress

2.5.1 Función EW

Función que obtiene la distancia euclidiana entre nodos generados aleatoriamente:

```
EW[graph_,coor_]:=({
edl=EdgeList[graph];
wgl=ConstantArray[0,Length[edl]];
For[i=1,i<=Length[wgl],i++,
wgl[[i]]=EuclideanDistance[coor[[edl[[i,1]]]],coor[[edl[[i,2]]]]]
];
wgl
});
(*Edge weights*)
```

2.5.2 Función VDRN

Función que obtiene la matriz de cobertura para cada nodo:

```
VDRN[numb_,numbc_]:=({
  r=RandomInteger[{1,numb},1];
  For[i=1,i<=(numbc-1),i++,
    rint=RandomInteger[{1,numb},1][[1]];
    While[MemberQ[r,rint],
      rint=RandomInteger[{1,numb},1][[1]]
    ];
    AppendTo[r,rint]
  ];
  r
});
(*vector of different random numbers*)
```

2.5.3 Función GenerateDataLFE

Función que recopila los datos ingresados, los parámetros y matrices generadas de forma aleatoria creando un archivo de texto "dataLFEExc.dat" de tal forma que el modelador Xpress podrá utilizar para el resolver el problema de localización:

```
GenerateDataLFE[n_, Q_, nK_, nI_, nJ_] := (
  (*Generate Graph*)
  (*a=RandomInteger[{1,IntegerPart[grid]},{n,2}];*)
  a = RandomReal[{1, grid}, {n, 2}];
  gprel =
  RandomGraph[{IntegerPart[n], IntegerPart[m]},
    VertexCoordinates -> a, VertexLabels -> "Name"];
  g = Graph[gprel, EdgeWeight -> EW[gprel, a], VertexSize -> Medium];
  Print[g];
  N[EW[g, a]];
  EdgeList[g];
  VertexList[g];

  If[FileExistsQ["dataLFEExc.dat"] == True,
    DeleteFile["dataLFEExc.dat"];
  OpenAppend["dataLFEExc.dat", PageWidth -> \[Infinity]];

  Print["Weighted Adyacency Matrix: "];
  Print[MatrixForm[
    N[WeightedAdjacencyMatrix[
```

```

g]]]; (*Print Weighted Adyacency Matrix *)
Print[""];
Print["Shortest Distance Matrix: "];
Print[MatrixForm[
  GraphDistanceMatrix[g,
    Method -> "Dijkstra"]]; (*Print Shortest Distance Matrix-*)
Print[""];
vcover =
  GraphDistanceMatrix[g, IntegerPart[L],
    Method -> "Dijkstra"]; (*Cover Matrix*)
Print["Cover Matrix L=", L, ": "];

```

2.6 Archivo de salida de mathematica

Como se mencionó anteriormente en capítulo 2.5, mathematica al finalizar con la generación de grafos y matrices, tabulará la información, la mostrará en un archivo que lo llamará “dataLFExc”, el cual podrá ser leído como un archivo “.txt” para ser usada por el modelador Mosell Xpress y resolver el problema de localización.

A continuación, se muestra un ejemplo del archivo de una del grupo de simulaciones que hicimos y se presentarán en el capítulo posterior:

```

dataLFExc: Bloc de notas
Archivo Edición Formato Ver Ayuda
Q: 3
K: [K1 K2]
P: [16 15]
I: [2 1]
J: [9 5 7 1 10]
demik: [(2,K1) [5 8]
        (2,K2) [1 8]
        (1,K1) [5 8]
        (1,K2) [5 8]]
COVER: [(2) [* 5 * 1 10]
        (1) [* 5 * 1 10]]
dist: [(2,5) 0.964212
        (2,1) 0.377996
        (2,10) 0.188535
        (1,5) 0.754681
        (1,1) 0.
        ]

```

Figura 1: ejemplo de archivo dataLFExc

2.7 Modelo de localización MCLP-PB en Mosell Xpress

A continuación, se mostrará el código del modelo de localización digitado en el modelador Mosell Xpress, los resultados los mostrará Mosell a través, de un archivo que se llamará "Result", que podrá ser leído como un archivo formato ".txt" y será utilizado por mathematica para ilustrar el grafo de la solución obtenida:

```
uses "mmxprs"; !gain access to the Xpress-Optimizer solver
!setparam("XPRS_MIPABSSTOP",0.0)
```

```
declarations
M=1000
Q:real
K,I,J:set of string
P:array(K) of real
dem,alpha:array(I,K) of real
COVER:dynamic array(I) of set of string
```

```
v: array(I,J,K) of mpvar
y: array(J) of mpvar
!s: mpvar
s: array(I,K) of mpvar
```

```
end-declarations
```

```
!Read data from file
```

```
initializations from 'dataLFExc.dat'
Q
K
P
I
J
[dem,alpha] as 'demik'
COVER
end-initializations
```

```
!Create variables that exist
forall(i in I,j in J, k in K) do
create(v(i,j,k))
v(i,j,k) is_integer
end-do
```

```
forall(j in J) do
create(y(j))
y(j) is_binary
end-do
```

```
!*****Objective Function*****
```

```
ObjF:= sum(k in K,i in I) alpha(i,k)*s(i,k)
```

```
(!example that does not minimize the distance from j to i.
```

```
v("3","1","K2")= 2
```

```
v("5","5","K1")= 3
```

```
v("5","5","K2")= 6
```

```
!)
```

```
!*****Constrains*****
```

```
sum(j in J) y(j) <= Q
```

```
!forall(i in I) sum(j in COVER(i)) y(j) >= 1
```

```
forall(k in K) sum(i in I,j in J) v(i,j,k) <= P(k)
```

```
forall(k in K, i in I, j in J) v(i,j,k) <= y(j)*M
```

```
(!
```

```
forall(k in K) do
```

```
    forall(i in I) do
```

```
        forall(j in COVER(i)) do
```

```
            y(j)<=v(j,k)
```

```
        end-do
```

```
    end-do
```

```
end-do
```

```
!)
```

```
(!
```

```
    forall(i in I) do
```

```
        forall(j in COVER(i)) do
```

```
            y(j)<=sum(k in K) v(j,k)
```

```
        end-do
```

```
    end-do
```

```
!)
```

```
forall(k in K,i in I) (dem(i,k)-sum(j in COVER(i)) v(i,j,k)) <= s(i,k)
```

```
exportprob(EP_MIN,"",ObjF)
```

```
minimize(ObjF)
```

```
writeln("Objective Function= ", getobjval)
```

```
forall(i in I,j in J, k in K) writeln("v(",i,",",j,",",k, "): ", getsol(v(i,j,k)))
```

```
forall(j in J) writeln("y(",j,"): ", getsol(y(j)))
```

```
forall(k in K,i in I) writeln("node(",i,",",k, "): ",dem(i,k)-sum(j in COVER(i)) getsol(v(i,j,k)))
```

```
forall(k in K,i in I) writeln("s(",i,",",k, "): ",getsol(s(i,k)))
```

```
fopen("results.dat", F_OUTPUT)
forall(j in J) do
if getsol(y(j))>0 then
    writeln(j)
end-if
end-do
fclose(F_OUTPUT)

end-model
```

CAPÍTULO 3

3.1 EXPERIMENTOS COMPUTACIONALES

A continuación, se mostrarán los resultados obtenidos de todas las simulaciones realizadas las cuales consistieron en fijar los datos de entrada:

- Número de nodos (n)
- Número de arcos (m)
- Radio de cobertura (L)

Para luego realizar 5 variantes de los siguientes parámetros:

- Número máximo de instalaciones para atención de emergencias (Q)
- Número de diferentes tipos de vehículos (nK)
- Puntos de emergencia (I)
- Puntos de asistencia a emergencias (J)

3.1.1 Simulación n10m20L1 y sus variantes

Conjunto de simulaciones con parámetros $n = 10, m = 20, y L = 1$

Simulación $Q = 3, nk = 2, I = 2, J = 5$

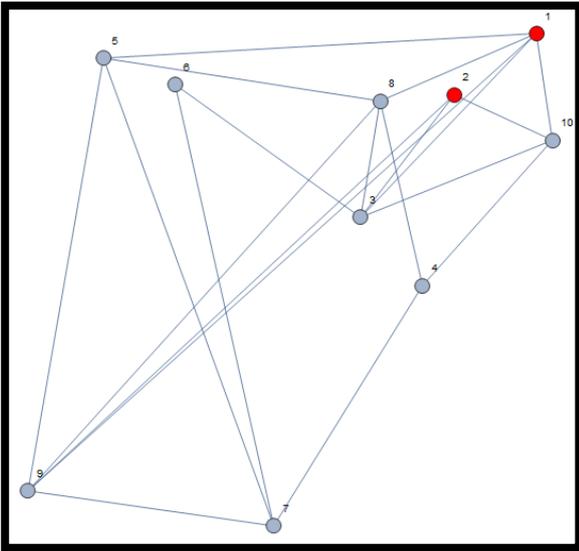


Figura 3.1: grafo generado con $Q=3, nk=2, l=2, J=5$

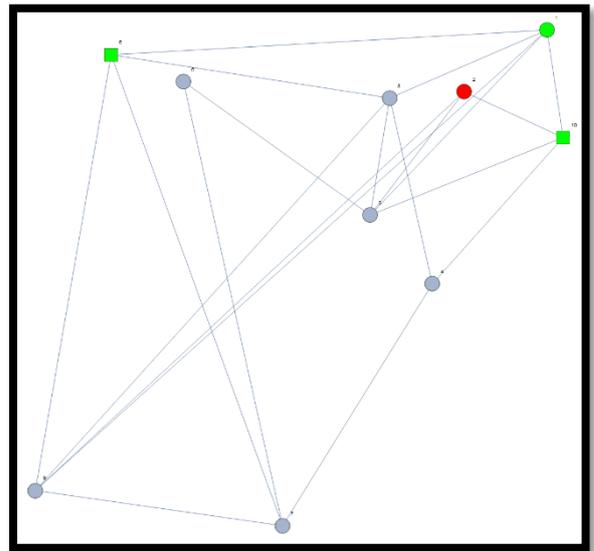


Figura 3.2: solución del grafo generado con $Q=3, nk=2, l=2, J=5$

Simulación $Q = 2, nk = 4, I = 4, J = 3$

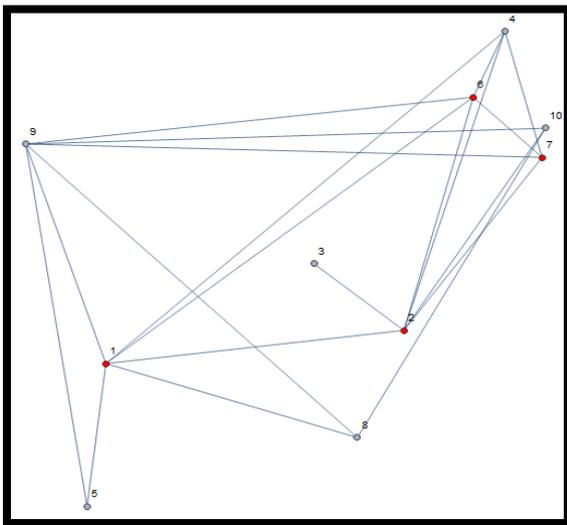


Figura 3.3: grafo generado con $Q=2, nk=4, l=4, J=3$

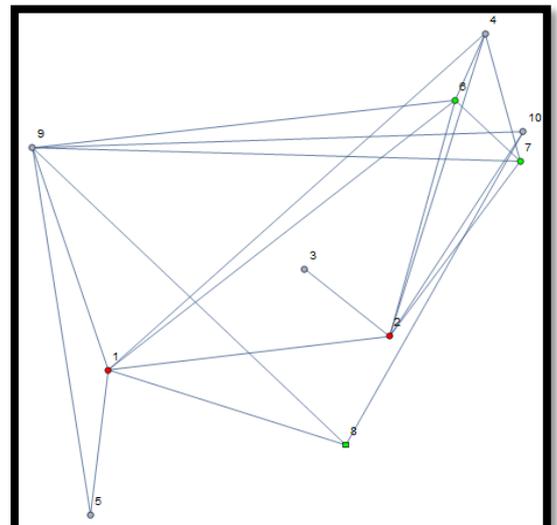


Figura 3.4: solución del grafo generado con $Q=2, nk=4, l=4, J=3$

Simulación $Q = 3, nk = 3, I = 2, J = 5$

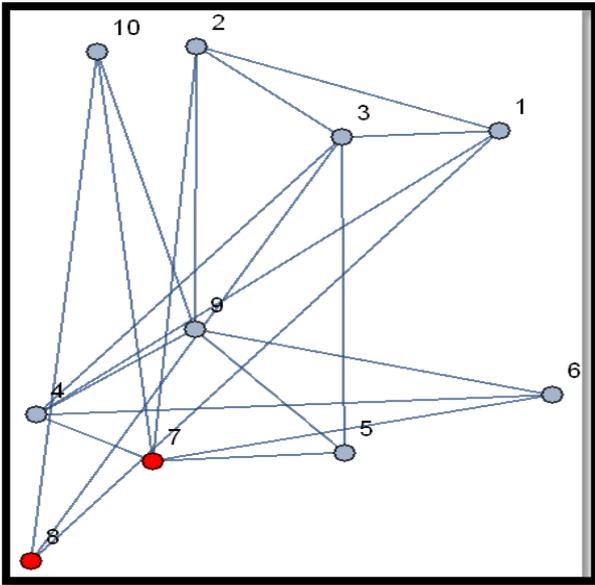


Figura 3.5: grafo generado con $Q=3, nk=3, I=2, J=5$

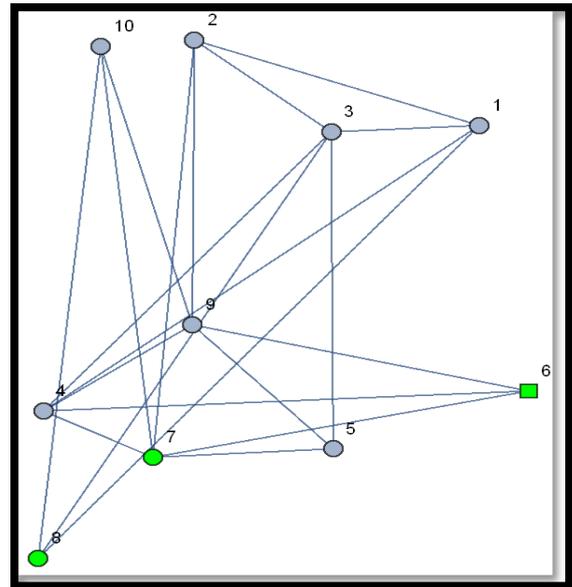


Figura 3.6: solución del grafo generado con $Q=3, nk=3, I=2, J=5$

Simulación $Q = 1, nk = 2, I = 2, J = 5$

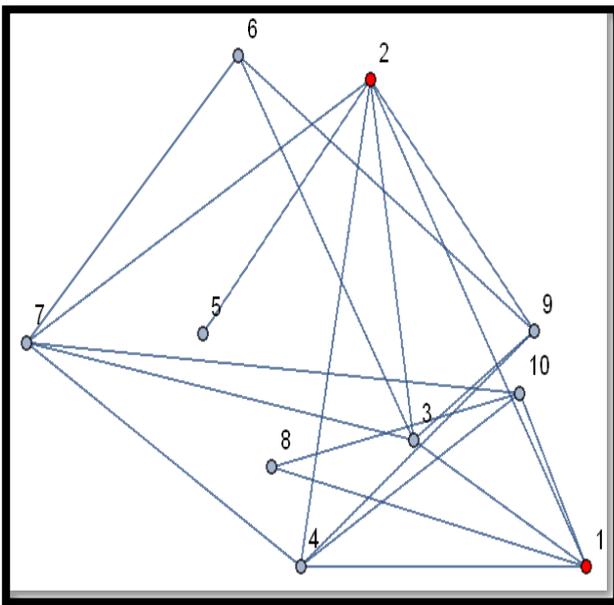


Figura 3.7: grafo generado con $Q=1, nk=2, I=2, J=5$

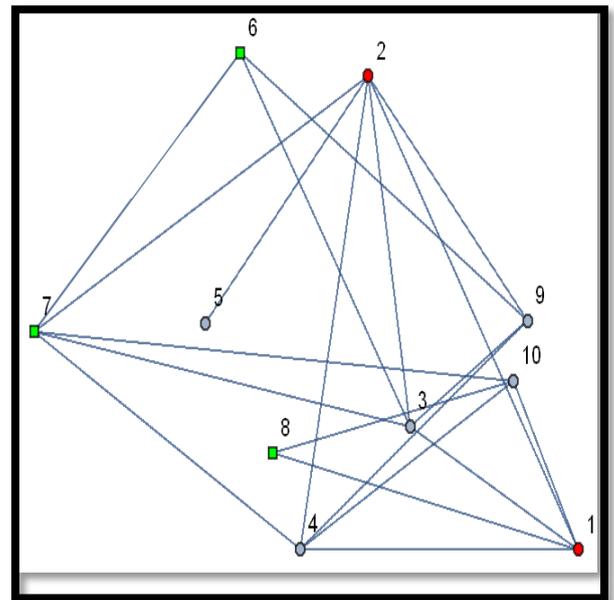


Figura 3.8: solución del grafo generado con $Q=1, nk=2, I=2, J=5$

Simulación $Q = 4$, $nk = 3$, $I = 4$, $J = 6$

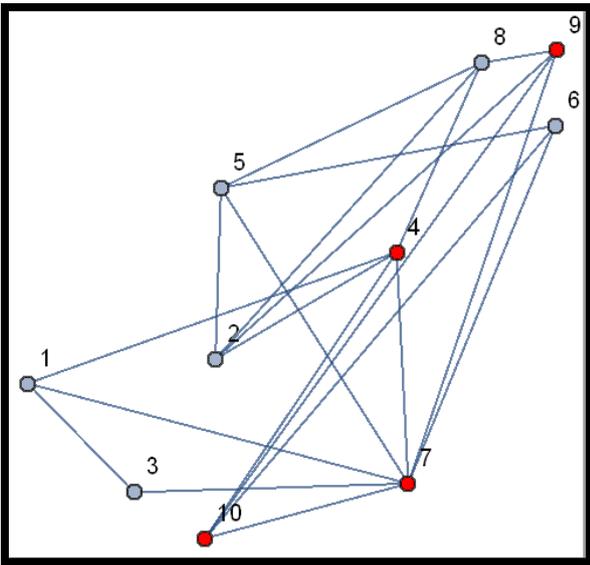


Figura 3.9: grafo generado con $Q=4$, $nk=3$, $I=4$, $J=6$

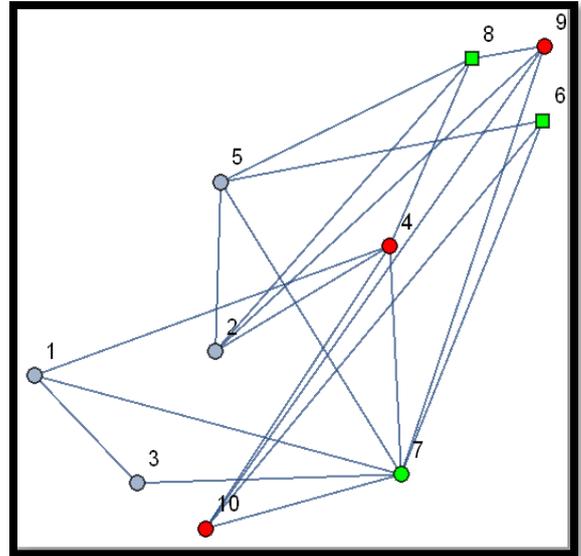


Figura 3.10: solución del grafo generado con $Q=4$, $nk=3$, $I=4$, $J=6$

3.1.2 Simulación n20m40L1.5 y sus variantes

Conjunto de simulaciones con parámetros $n = 20$, $m = 40$, y $L = 1.5$

Simulación $Q = 5$, $nk = 3$, $I = 4$, $J = 10$

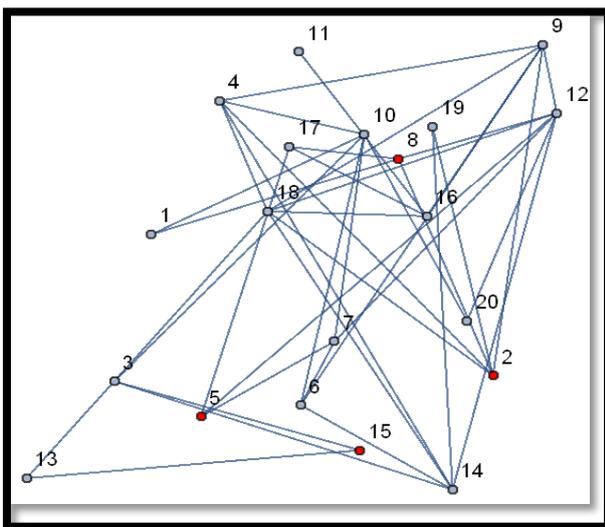


Figura 3.11: grafo generado con $Q=5$, $nk=3$, $I=4$, $J=10$

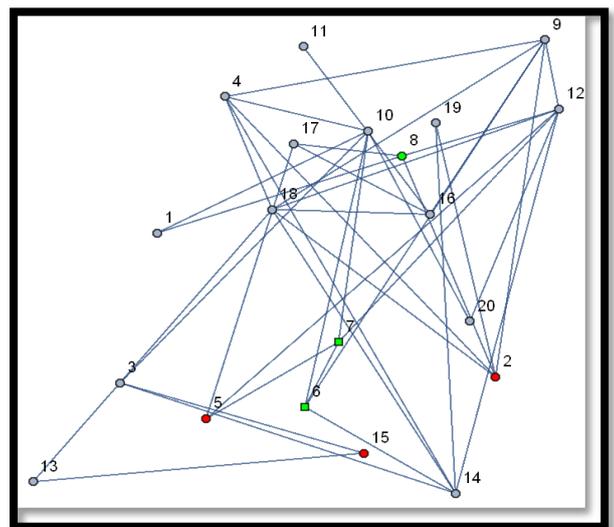


Figura 3.12: solución del grafo generado con $Q=5$, $nk=3$, $I=4$, $J=10$

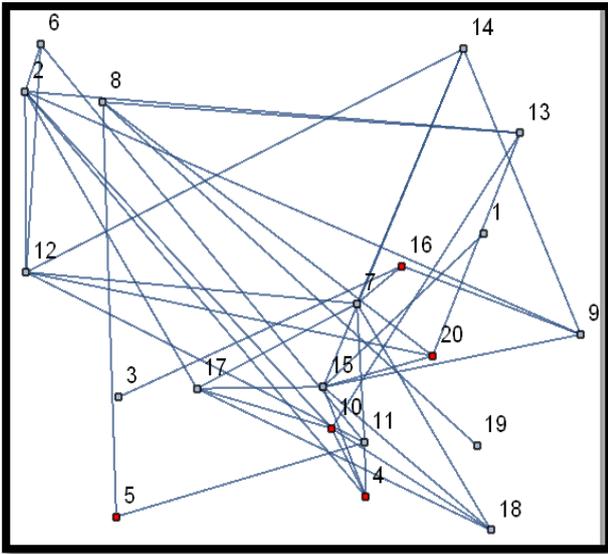


Figura 3.13: grafo generado con $Q=4$, $nk=2$, $l=5$, $J=7$

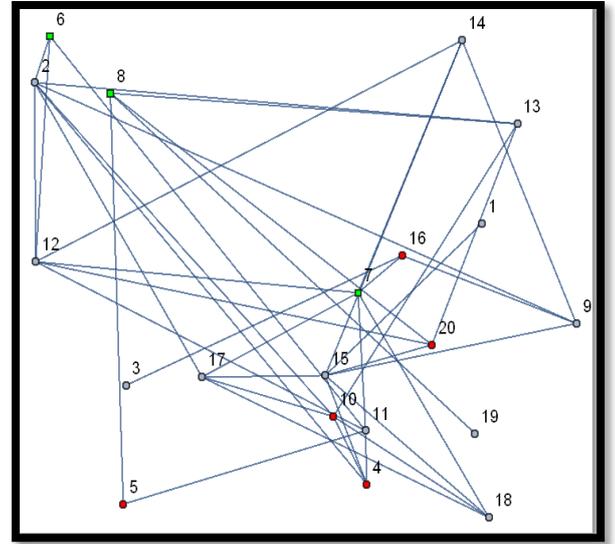


Figura 3.14: solución del grafo generado con $Q=4$, $nk=2$, $l=5$, $J=7$

Simulación $Q = 7$, $nk = 4$, $l = 3$, $J = 5$

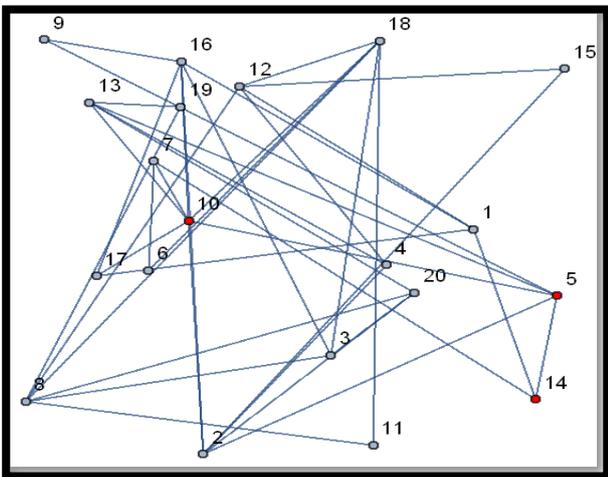


Figura 3.15: grafo generado con $Q=7$, $nk=4$, $l=3$, $J=5$

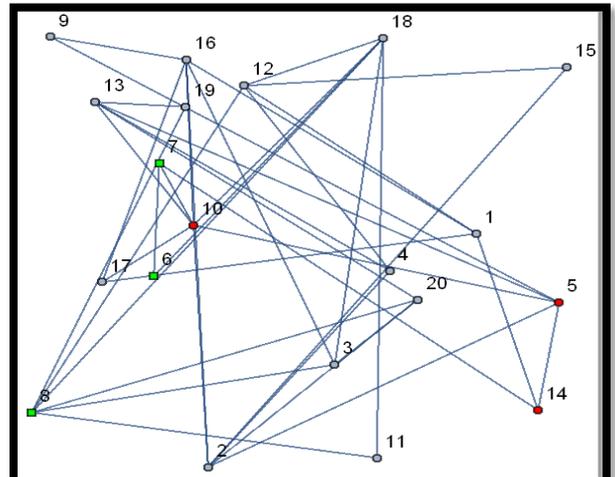


Figura 3.16: solución del grafo generado con $Q=7$, $nk=4$, $l=3$, $J=5$

Simulación $Q = 6, nk = 2, l = 5, J = 10$

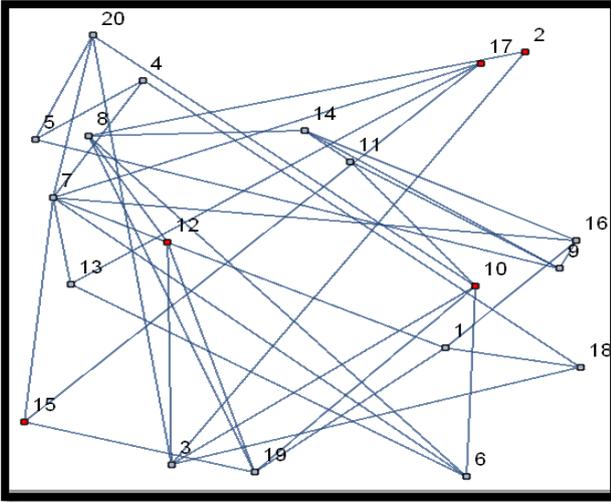


Figura 3.17: grafo generado con $Q=6, nk=2, l=5, J=10$

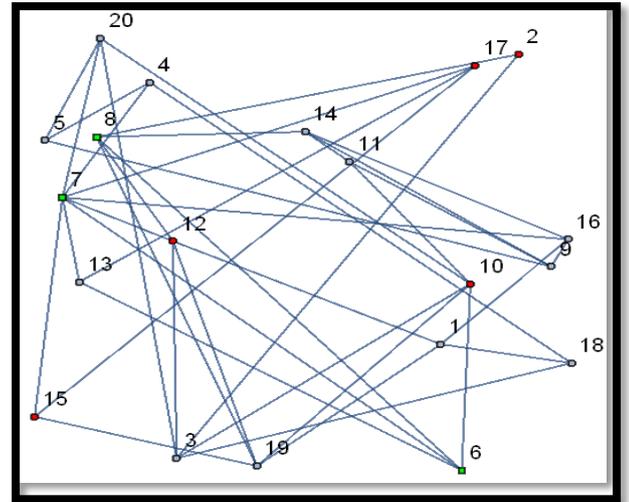


Figura 3.18: solución del grafo generado con $Q=6, nk=2, l=5, J=10$

Simulación $Q = 5, nk = 3, l = 3, J = 4$

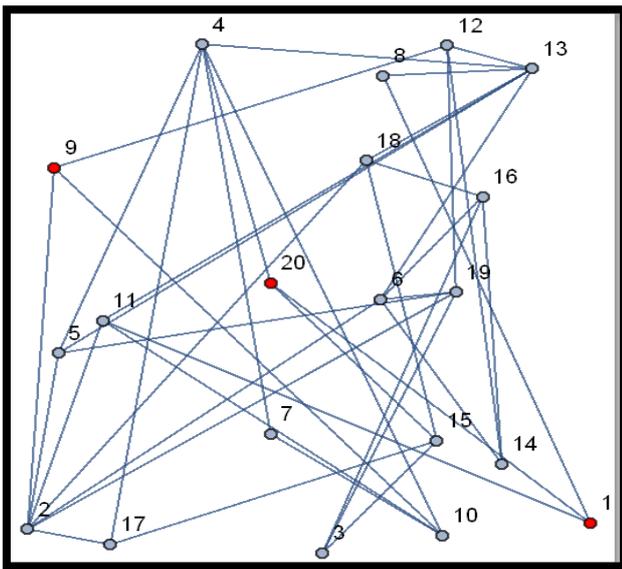


Figura 3.19: grafo generado con $Q=5, nk=3, l=3, J=4$

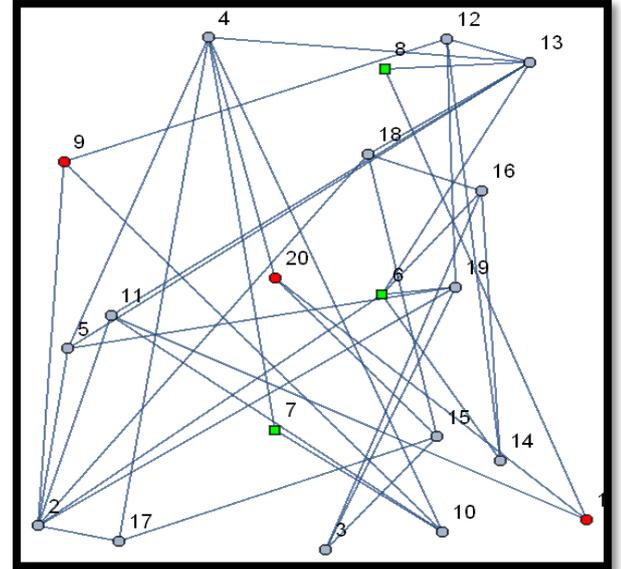


Figura 3.20: solución del grafo generado con $Q=5, nk=3, l=3, J=4$

3.1.3 Simulación n50m100L3 y sus variantes

Conjunto de simulaciones con parámetros $n = 50, m = 100, y L = 3$

Simulación $Q = 10, nk = 5, I = 22, J = 30$

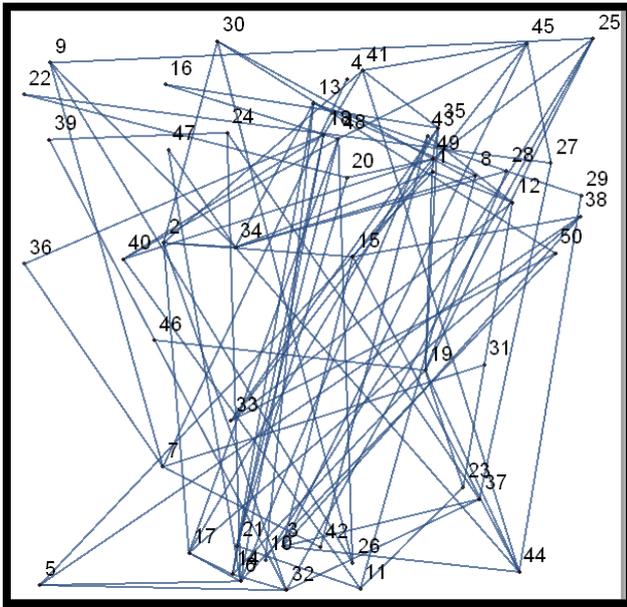


Figura 3.21: grafo generado con $Q=10, nk=5, I=22, J=30$

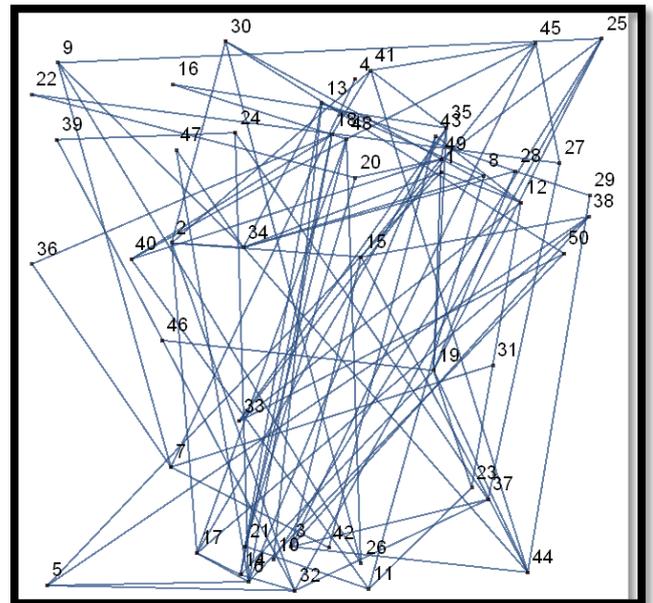


Figura 3.22: solución del grafo generado con $Q=10, nk=5, I=22, J=30$

Simulación $Q = 12, nk = 4, I = 15, J = 20$

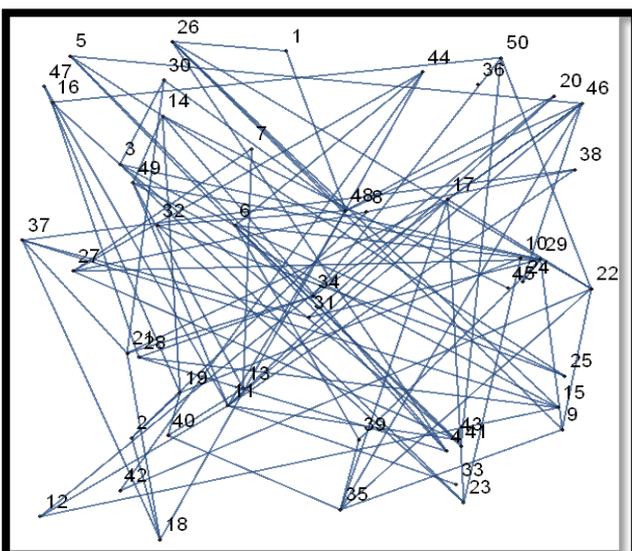


Figura 3.23: solución del grafo generado con $Q=12, nk=4, I=15, J=20$

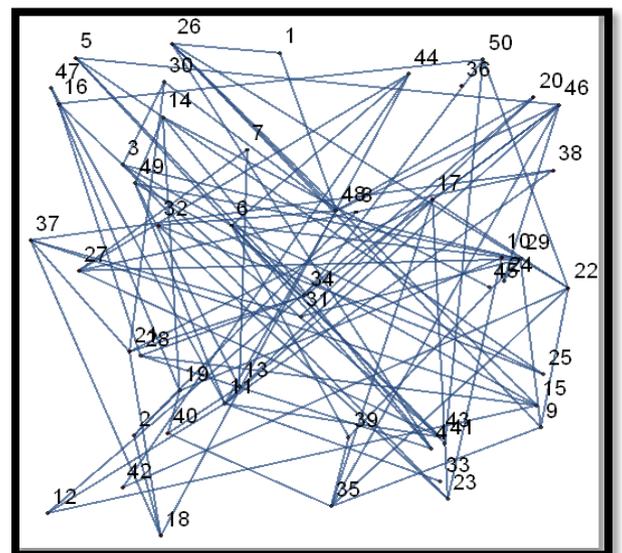


Figura 3.24: solución del grafo generado con $Q=12, nk=4, I=15, J=30$

Simulación $Q = 15, nk = 4, I = 12, J = 25$

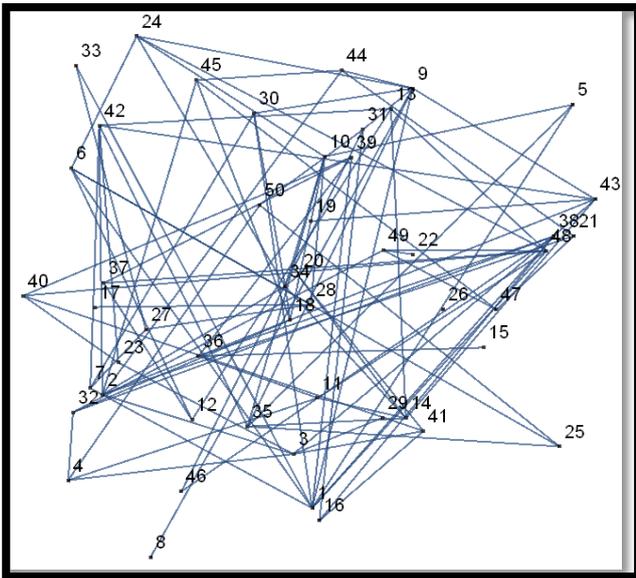


Figura 3.25: grafo generado con $Q=15, nk=4, I=12, J=25$

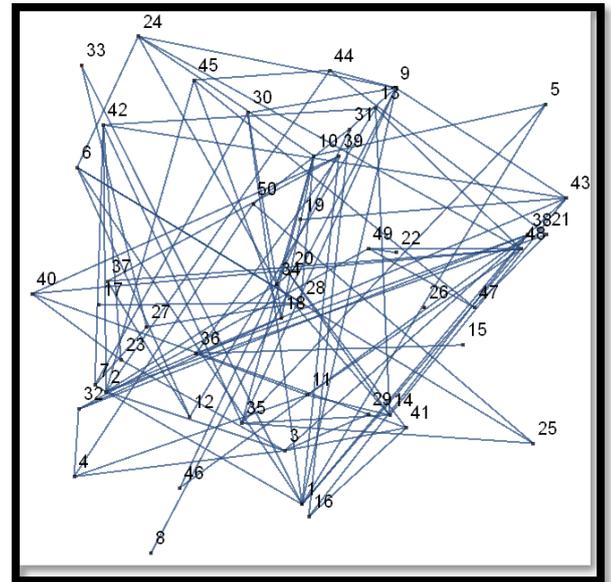


Figura 3.26: solución del grafo generado con $Q=15, nk=4, I=12, J=25$

Simulación $Q = 17, nk = 3, I = 12, J = 20$

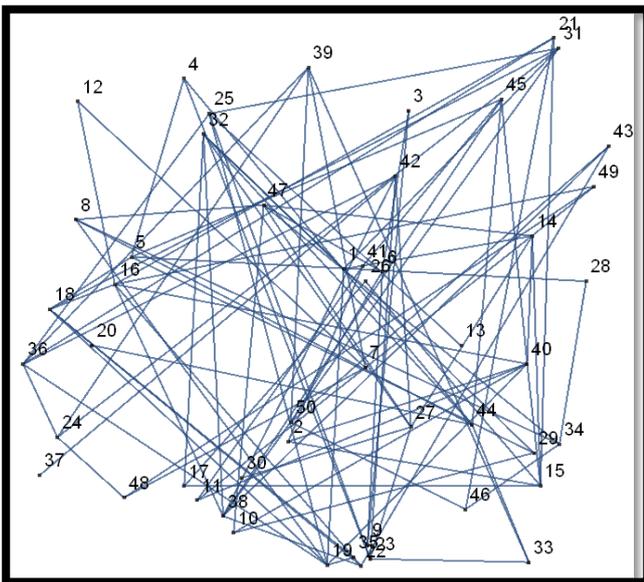


Figura 3.27: grafo generado con $Q=17, nk=3, I=12, J=20$

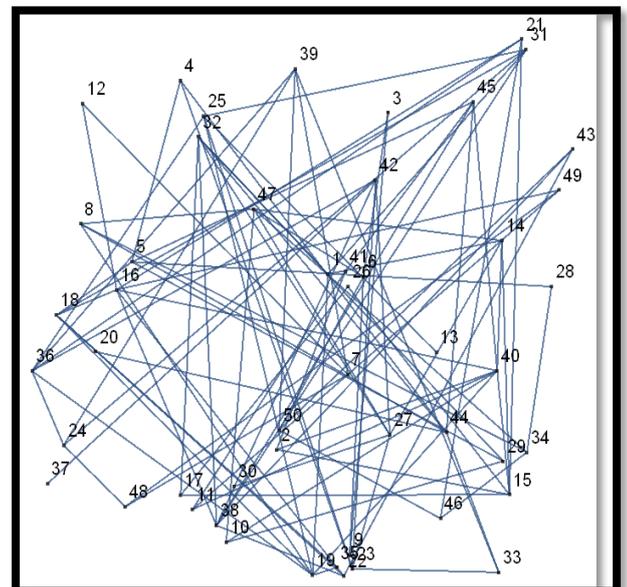


Figura 3.28: solución del grafo generado con $Q=17, nk=3, I=12, J=20$

Simulación $Q = 10, nk = 4, I = 10, J = 18$

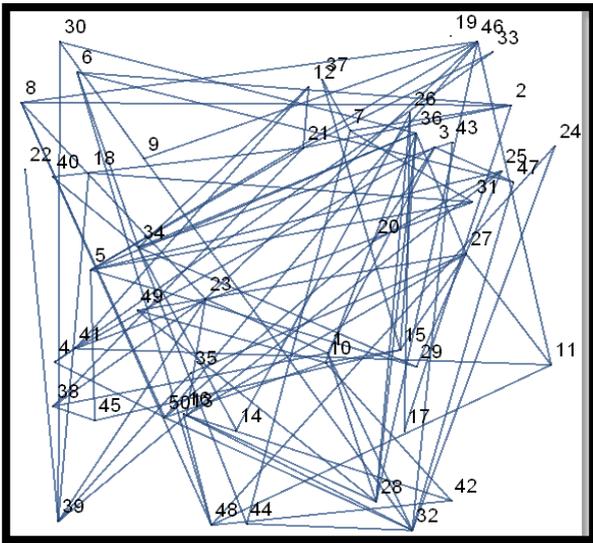


Figura 3.29: grafo generado con $Q=10, nk=4, I=10, J=18$

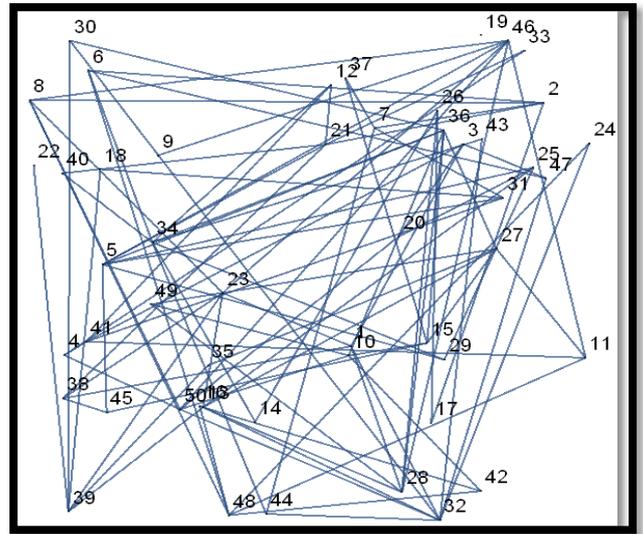


Figura 3.30: solución del grafo generado con $Q=10, nk=4, I=10, J=18$

3.1.4 Simulación n100m200L1.5 y sus variantes

Conjunto de simulaciones con parámetros $n = 100, m = 200, y L = 1.5$

Simulación $Q = 15, nk = 3, I = 17, J = 30$

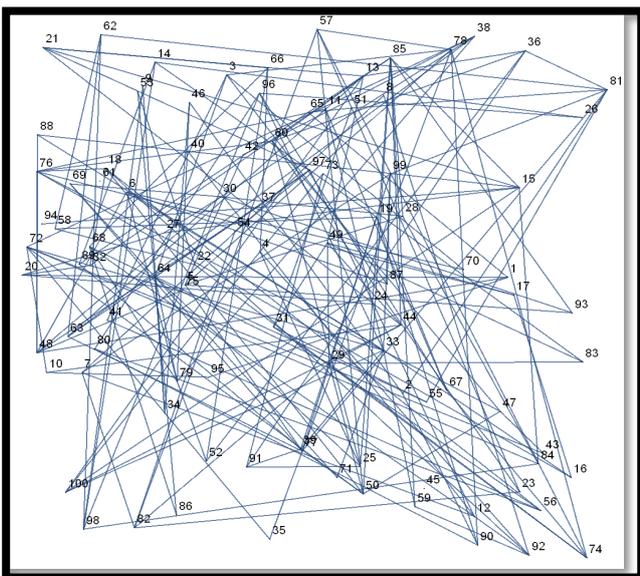


Figura 3.31: grafo generado con $Q=15, nk=3, I=17, J=30$

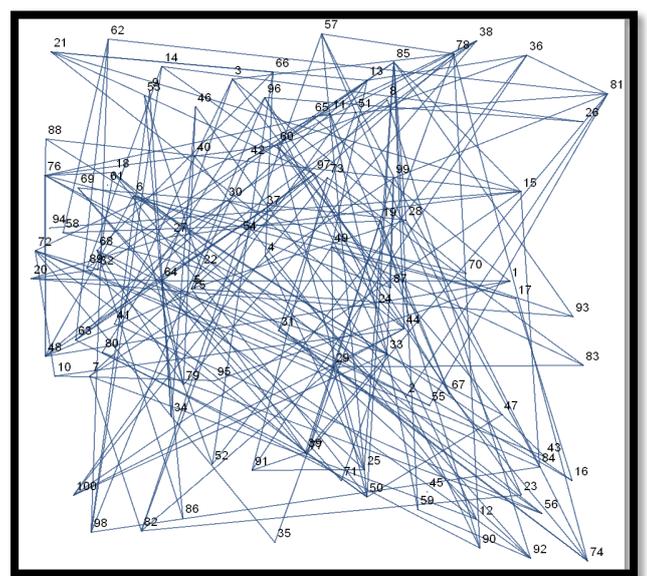


Figura 3.32: solución del grafo generado con $Q=15, nk=3, I=17, J=30$

Simulación $Q = 13, nk = 2, I = 22, J = 35$

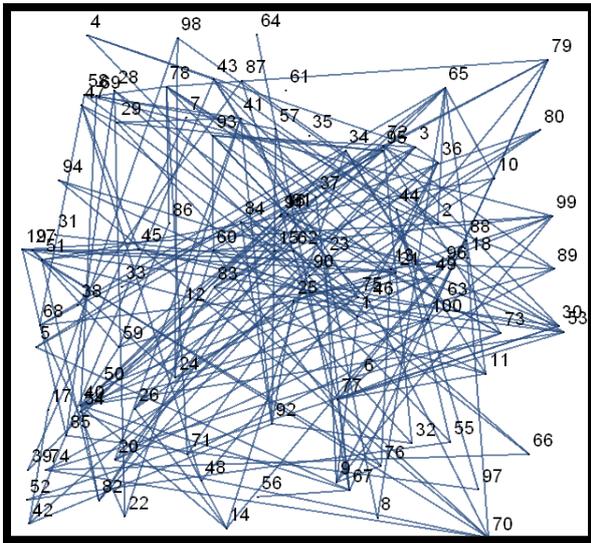


Figura 3.33: grafo generado con $Q=13, nk=2, I=22, J=35$

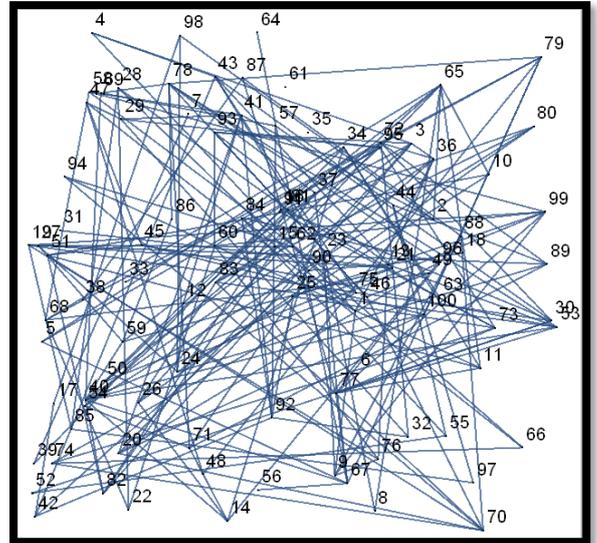


Figura 3.34: solución del grafo generado con $Q=13, nk=2, I=22, J=35$

Simulación $Q = 30, nk = 4, I = 61, J = 90$

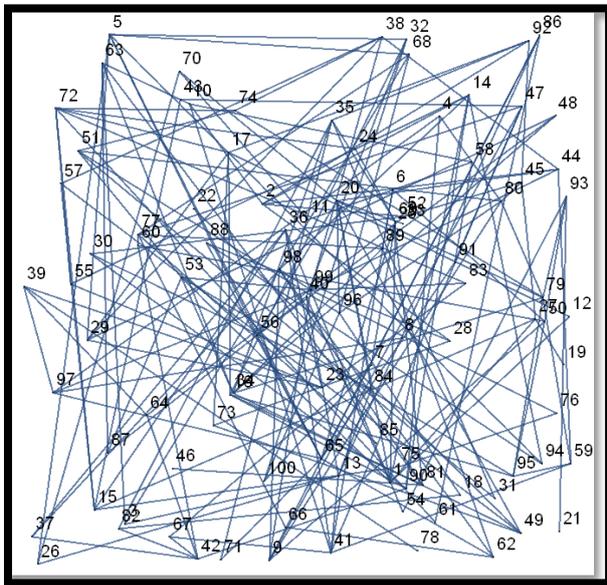


Figura 3.35: grafo generado con $Q=30, nk=4, I=61, J=90$

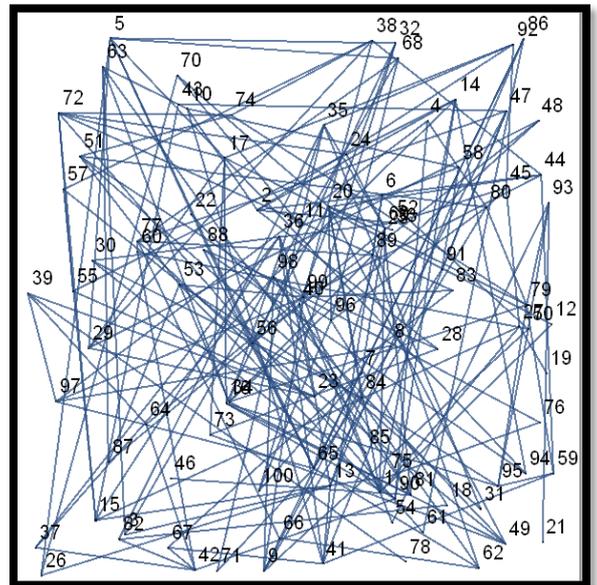


Figura 3.36: solución del grafo generado con $Q=30, nk=4, I=61, J=90$

Simulación $Q = 55$, $nk = 3$, $I = 78$, $J = 95$

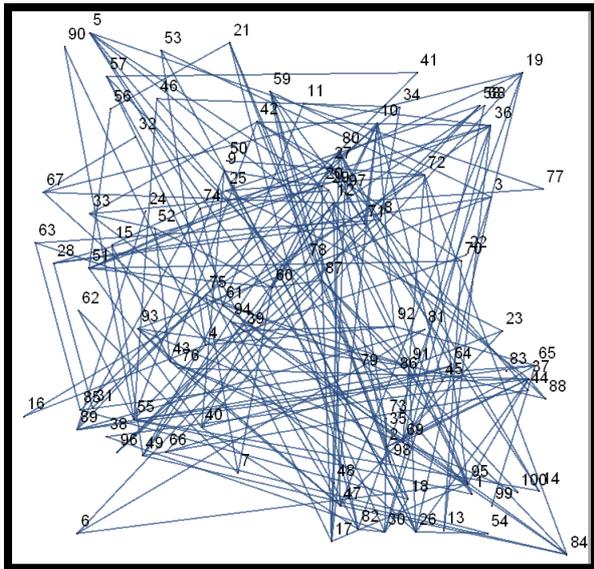


Figura 3.37: grafo generado con $Q=55$, $nk=3$, $I=78$, $J=95$

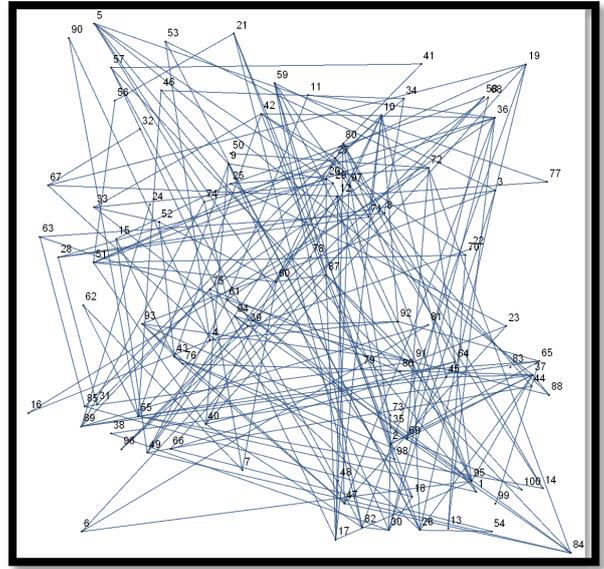


Figura 3.38: solución del grafo generado con $Q=55$, $nk=3$, $I=78$, $J=95$

Simulación $Q = 80$, $nk = 5$, $I = 46$, $J = 60$

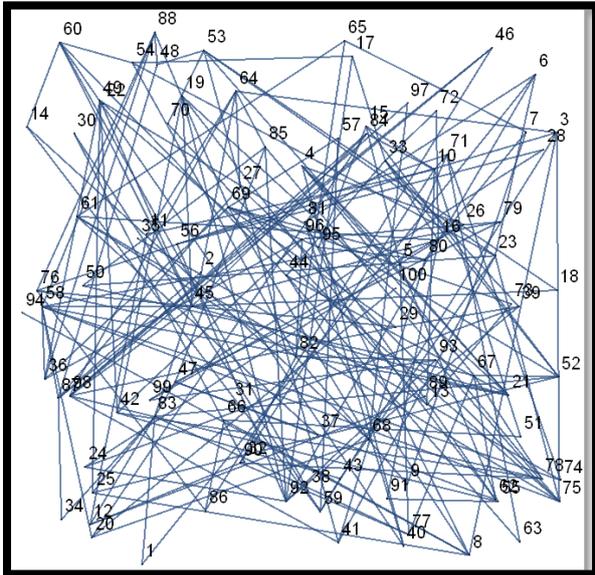


Figura 3.39: grafo generado con $Q=80$, $nk=5$, $I=46$, $J=60$

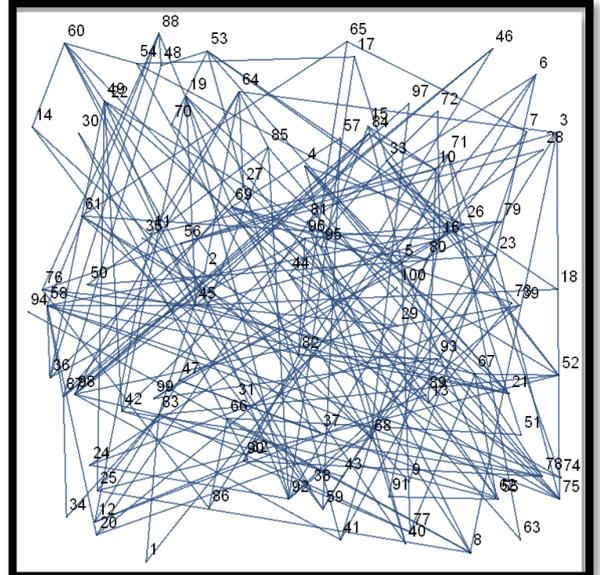


Figura 3.40: solución del grafo generado con $Q=80$, $nk=5$, $I=46$, $J=60$

3.1.4 Simulación n150m300L2 y sus variantes

Conjunto de simulaciones con parámetros $n = 150, m = 300, y L = 2$

Simulación $Q = 25, nk = 4, I = 47, J = 80$

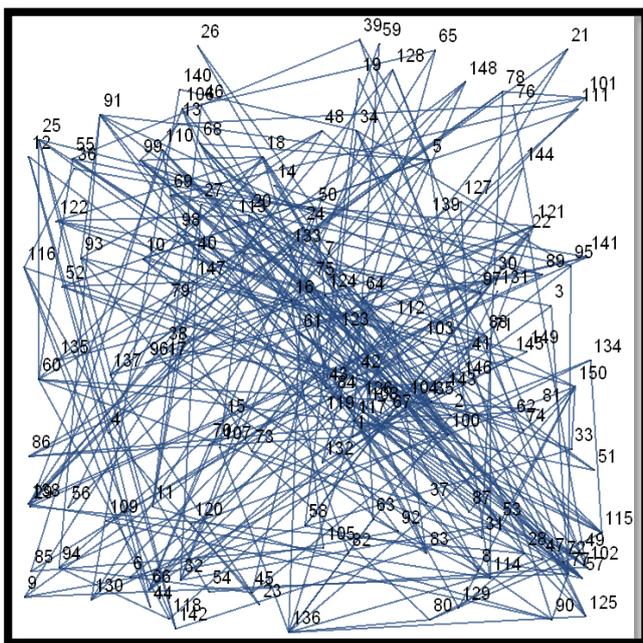


Figura 3.41: grafo generado con $Q=25, nk=4, I=47, J=80$

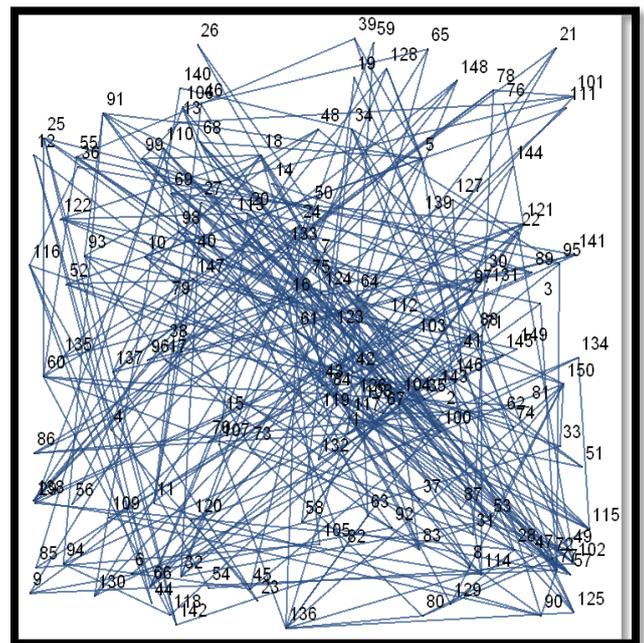


Figura 3.42: solución del grafo generado con $Q=25, nk=4, I=47, J=80$

Como resulta evidente, la observación de las soluciones gráficas provistas por Mathematica al incrementar el número de nodos se dificulta, por lo cual a partir de este ejemplo se procedió a guardar los resultados en tablas y archivos digitales complementarios a este documento.

Simulación $Q = 87, nk = 3, I = 130, J = 35$

Simulación $Q = 150, nk = 6, I = 183, J = 195$

Simulación $Q = 65, nk = 5, I = 160, J = 185$

Simulación $Q = 110, nk = 4, I = 118, J = 160$

3.1.4 Simulación n500m1000L3 y sus variantes

Conjunto de simulaciones con parámetros $n = 500, m = 1000, y L = 3$

Simulación $Q = 57, nk = 2, I = 250, J = 300$

Simulación $Q = 183, nk = 4, I = 391, J = 455$

Simulación $Q = 302, nk = 5, I = 187, J = 250$

Simulación $Q = 275, nk = 6, I = 62, J = 380$

Simulación $Q = 420, nk = 6, I = 21, J = 128$

El tiempo computacional para resolver el problema con las instancias mostradas ($t > 24 \text{ horas}$) se vuelve infactible, por lo cual no fue posible mostrar los resultados.

Grafo y Radio		Parámetros	Simulaciones					Soluciones obtenidas de una de las simulaciones	Tiempo de ejecución promedio (ns)
			1	2	3	4	5		
n m L	10 20 1	Q nK nI nJ	3 2 2 5	2 4 4 3	3 3 2 5	1 2 2 5	4 3 4 6	demik: [(2,K1) [5 8] (2,K2) [1 8] (1,K1) [5 8] (1,K2) [5 8]] COVER: [(2) [* 5 * 1 10] (1) [* 5 * 1 10]]	0
n m L	20 40 1,5	Q nK nI nJ	5 3 4 10	4 2 5 7	7 4 3 5	6 2 5 10	5 3 3 4	demik: [(4,K1) [1 8] (4,K2) [2 8] (4,K3) [3 8] (11,K1) [5 8] (11,K2) [5 8] (11,K3) [2 8] (8,K1) [2 10] (8,K2) [4 10] (8,K3) [3 10] (9,K1) [5 7] (9,K2) [1 7] (9,K3) [5 7]] COVER: [(4) [1 4 * 19 * * * 10 * 9] (11) [* * 20 * * 11 * * 15 *] (8) [1 4 20 19 12 11 6 10 15 9] (9) [1 4 20 19 12 * * 10 15 9]]	0
n m L	50 100 3	Q nK nI nJ	10 5 22 30	12 4 15 20	15 4 12 25	17 3 12 20	10 4 10 18		5s
n m L	100 200 1,5	Q nK nI nJ	15 3 17 30	13 2 22 35	30 4 61 90	55 3 180 95	80 5 46 60		30s
n m L	150 300 2	Q nK nI nJ	25 4 47 80	98 3 142 145	45 5 145 135	10 4 92 130	75 3 89 125		7 min
n m L	200 450 2,5	Q nK nI nJ	49 5 95 150	87 3 130 175	150 6 183 195	65 5 160 185	110 4 118 160		15 min
n m L	500 1000 3	Q nK nI nJ	57 2 250 300	183 4 391 455					2 h y 3 min
n m L	1000 2000 5	Q nK nI nJ	280 6 384 745						∞

Tabla 2: tabla comparativa de simulaciones

CAPÍTULO 4

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1 Conclusiones

1. Se comprueba la factibilidad del modelo de localización realizado, mediante los resultados obtenidos en las simulaciones, donde se pudo hallar solución en tiempos computacionales aceptables. Siendo el caso particular cuando se simuló con el número de nodos igual a 1000, donde se decidió detener la simulación dado que el equipo utilizado permaneció iterando más de 24 horas, lo que de haber obtenido un resultado sería catalogado como tiempo computacional no aceptable.
2. Como se muestra en la tabla 3 se comprueba la complejidad matemática del modelo de localización ya que dado un mayor número de nodos los tiempos de ejecución aumentan, mostrando así una tendencia exponencial.
3. Para problemas de localización grandes el tiempo de ejecución alcanza valores no aceptables, es por esto que la aleatorización para construir los grafos y escenarios de emergencia podrían ser sustituidos con el uso de métodos sistemáticos a través de la programación lineal con restricciones un poco flexibles o relajadas.

4.2 Recomendaciones

1. Se sugiere complementar este trabajo con el desarrollo de un modelo de ruteo VRPTW-P con consideración de prioridades de tal forma que la asignación de recursos se asemeje aún más a la realidad, debido a que impactaría si un tipo de emergencia no puede ser atendida por alguna vía en particular.
2. Se recomienda continuar con simulaciones posteriores a las de este trabajo con un recurso computacional más potente de tal forma que se amplíe el tamaño de grafos que presentan tiempos computacionales aceptables.

3. Finalmente, con el afán de mejorar el modelo de tal forma que pueda ser aplicado en una zona geográfica o área específica, se debería levantar un histórico de emergencia de dicha zona o área para poder simular escenarios más ajustados a la realidad.

BIBLIOGRAFÍA

Rajan Batta y Narasimha Mannur, “Covering-Location Models for Emergency Situations That Require Multiple Response Units” / “Modelos de Cobertura y Localización para situaciones de emergencia que requieren múltiples unidades de respuesta”, Management Science Volumen 36, enero 1990 (https://www.jstor.org/stable/2632092?seq=1#page_scan_tab_contents).

Ali Oran, Kiat Chuan Tan, Boon Hooi Ooi, Melvyn Sim, Patrick Jaillet “Location and Routing Models for Emergency Response Plans with Priorities” / “Modelos de localización y ruteo para planes de respuesta de emergencias con prioridades” ,Future Security, páginas 129 – 140, 2012 (https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-642-33161-9_20).

Xueping Li, Zhaoxia Zhao, Xiaoyan Zhu, Tami Wyatt, “Covering models and optimization techniques for emergency response facility location and planning: a review” / “Modelos de cobertura y técnicas de optimización para ubicación de instalaciones de atención de emergencias y planificación: una reseña” , Mathematical Methods of Operations Research, Volume 74, Diciembre 2011 (<https://link.springer.com/article/10.1007/s00186-011-0363-4>).

Informe “Rendición de cuentas nacional del servicio integrado de seguridad ECU911” del 2016 (<http://www.ecu911.gob.ec/wp-content/uploads/2017/06/PPTRendicionCuentas2016.pdf>).

