

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



**ALGORITMO GENÉTICO MULTIOBJETIVO PARA LA
OPTIMIZACIÓN DE LA DISTRIBUCIÓN DE AYUDA
HUMANITARIA EN CASO DE DESASTRES NATURALES EN EL
PERÚ**

Tesis Para optar por el Título de Ingeniero Informático que presenta el bachiller:

Robert Alonso Aduviri Choque

20112449

Asesor: Ing. Rony Cueva Moscoso

Lima, Marzo de 2018

Resumen

Tema FCI

Tabla de Contenido

Resumen.....	2
Tema FCI	3
Tabla de Contenido	4
Índice de Figuras.....	8
Índice de Tablas.....	8
Capítulo 1. Generalidades.....	9
1.1 Problemática	9
1.2 Objetivos	12
1.2.1 Objetivo general.....	12
1.2.2 Objetivos específicos	12
1.2.3 Resultados esperados	13
1.2.4 Mapeo de objetivos, resultados y verificación	13
1.3 Herramientas y Métodos	17
1.3.1 Python.....	17
1.3.2 Jupyter Lab	17
1.3.3 Visual Studio Code.....	17
1.3.4 AMPL	17
1.3.5 AMPL IDE	18
1.3.6 GNU Linear Programming Kit.....	18
1.3.7 Microsoft Excel.....	18
1.3.8 Kanban	18
1.3.9 Prueba F de Fisher	19
1.3.10 Prueba t de Student	19
1.3.11 Prueba Kolmogorov-Smirnov	19
1.4 Viabilidad	19
1.4.1 Viabilidad Técnica	19
1.4.2 Viabilidad Temporal	20

1.4.3	Viabilidad Económica.....	20
1.4.4	Conclusión	20
1.5	Alcance, Limitaciones y Riesgos	20
1.5.1	Alcance	20
1.5.2	Limitaciones	21
1.5.3	Riesgos.....	21
Capítulo 2.	Marco Legal/Regulatorio/Conceptual/otros	23
2.1	Introducción	23
2.2	Peligros y desastres.....	23
2.3	Gestión del desastre y logística humanitaria	23
2.4	Logística humanitaria en el Perú	25
2.5	Optimización Combinatoria	25
2.6	Optimización de múltiples objetivos.....	26
2.7	Problema de transporte.....	26
2.8	Problema de transbordo.....	26
2.9	Métodos para la solución de problemas de optimización.....	27
2.9.1	Métodos exactos	27
2.9.2	Métodos heurísticos	27
2.9.3	Métodos metaheurísticos	28
2.9.3.1	Algoritmos Genéticos.....	28
Capítulo 3.	Estado del Arte	30
3.1	Investigaciones Académicas	30
3.1.1	Transporte en operaciones de respuesta a desastres (<i>Transportation in disaster response operations</i>)	30
3.1.2	Enrutamiento para esfuerzos de ayuda humanitaria (<i>Routing for relief efforts</i>)	30
3.1.3	Modelos para enrutamiento de ayuda humanitaria: Equidad, eficiencia y eficacia (<i>Models for relief routing: Equity, efficiency and efficacy</i>)	31

3.1.4	Óptima reubicación de stock bajo incertidumbre en operaciones humanitarias post-desastre (<i>Optimal stock relocation under uncertainty in post-disaster humanitarian operations</i>)	31
3.1.5	Planificación óptima multi-objetivo para el diseño de sistemas de distribución de ayuda humanitaria (<i>Multi-objective optimal planning for designing relief delivery systems</i>)	32
3.1.6	Metaheurística bi-objetivo para la planificación de operaciones de ayuda humanitaria en desastres (<i>Bi-objective metaheuristic for disaster relief operation planning</i>)	33
3.1.7	Modelo de optimización multi-criterio para la distribución de ayuda humanitaria (<i>A multi-criteria optimization model for humanitarian aid distribution</i>)	33
3.2	Productos comerciales	34
3.2.1	SimpliRoute.....	34
3.2.2	SAP Transportation Management VSR Optimization	34
3.2.3	Google Optimization Tools	35
3.3	Revisión y discusión.....	36
3.4	Conclusiones	36
Capítulo 4. Definición de la formulación de la función objetivo, restricciones, variables de decisión y parámetros del problema de distribución de ayuda humanitaria		37
4.1	Introducción	37
4.2	Resultado.....	37
4.2.1	Parámetros del problema de optimización.....	37
4.2.1.1	Red de distribución.....	37
4.2.1.2	Horizonte de planificación de la distribución	37
4.2.1.3	Oferta y demanda inicial en los nodos de la red de distribución.....	37
4.2.1.4	Vehículos para el transporte de bienes.....	38
4.2.1.5	Volumen y peso de los bienes	38
4.2.2	Variables de decisión	38

4.2.2.1	Cantidad de vehículos que se movilizan	38
4.2.2.2	Cantidad de bienes que se transportan	39
4.2.3	Variables auxiliares	39
4.2.3.1	Oferta y demanda a lo largo del tiempo	39
4.2.3.2	Consumo de bienes.....	39
4.2.3.3	Vehículos disponibles	39
4.2.4	Función objetivo	40
4.2.4.1	Minimizar demanda actual	40
4.2.4.2	Minimizar costo de transporte	40
4.2.5	Restricciones	41
4.2.5.1	Evitar enviar más bienes de los que se dispone	41
4.2.5.2	Evitar usar más vehículos de los que se dispone	41
4.2.5.3	Evitar sobrepasar la capacidad de los vehículos	42
4.2.5.4	Balance en el inventario	42
4.2.5.5	Balance en la cantidad de vehículos disponibles	43
4.2.5.6	Determinación del consumo	43
4.2.5.7	Actualización de la demanda	43
4.2.5.8	Condiciones iniciales del problema.....	44
4.2.6	Rango de existencia.....	44
4.3	Relación con el objetivo	44
4.4	Validación de la construcción	45
Capítulo 5. Definición de las estructuras que soporten los datos y el algoritmo para la resolución del problema de distribución de ayuda humanitaria.....		50
5.1	Introducción	50
5.2	Resultado.....	50
5.2.1	Variables de decisión	52
5.2.2	Cromosoma	Error! Bookmark not defined.

5.2.3 Estructuras de datos auxiliares	50
5.3 Relación con el objetivo	56
Capítulo 6. Conclusiones y trabajos futuros	59
6.1 Conclusiones	59
6.2 Trabajos futuros	59
Referencias	60
Anexos	a

Índice de Figuras

Figura 1. Representación simplificada del "Continuo de la Virtualidad". Adaptado de (Aguilar & Zapata, 2016).	Error! Bookmark not defined.
---	-------------------------------------

Índice de Tablas

Tabla 1. Ejemplo de tabla [Aquí va la referencia si la tabla no es de elaboración propia.	Error! Bookmark not defined.
--	-------------------------------------

Capítulo 1. Generalidades

1.1 Problemática

A lo largo de los años, la humanidad se ha visto continuamente afectada por la presencia de desastres naturales, como terremotos, tsunamis, erupciones volcánicas, tornados e inundaciones. Dependiendo de la ubicación geográfica, las diversas civilizaciones en el mundo han afrontado determinados tipos de desastres naturales con mayor o menor frecuencia. Mientras que EEUU es continuamente afectada por huracanes, China es afectada por inundaciones y Filipinas es afectada por ciclones. En el caso del Perú, debido a su ubicación en el borde occidental de Sudamérica, la cual es una de las regiones de mayor actividad tectónica en el mundo, conocida como el Cinturón de Fuego del Pacífico, es constantemente afectada por terremotos, deslizamientos de tierra, erupciones volcánicas e inundaciones.



Figura 1. Fenomenología más frecuente en Perú (INDECI, 2016).

Dado que los desastres naturales se caracterizan por su inevitabilidad y por lo difícil de su predicción, se requiere de una ardua preparación para enfrentarlos con la mínima cantidad de daños materiales y principalmente humanos. Dentro de los últimos terremotos acontecidos en Perú, el último terremoto de gran magnitud aconteció en Pisco el 15 de agosto del 2007, con una intensidad de 7.9 grados en la escala de Richter contando con 1294 heridos, 596 víctimas mortales y más de 90,000 casas destruidas.

Dicho desastre permitió evidenciar la calidad de planificación y respuesta, dirigida por el INDECI (Instituto Nacional de Defensa Civil). Lamentablemente, esta se caracterizó por una desafortunada respuesta caótica y falta de coordinación e información, así como la falta de consideración de los distintos tipos de demanda de cada zona, tal como queda expresado en el documento de lecciones aprendidas del INDECI:

“Las necesidades diferenciadas entre los damnificados de la costa y de la sierra resultaron evidentes durante la fase de emergencia: mientras los primeros esperaban ayuda en alimentos, abrigo y techo, los segundos solicitaban principalmente herramientas manuales para reconstruir sus canales de regadío colapsado.”

Asimismo, resultan lamentables las consecuencias adicionales que se pueden generar debido a un mal manejo de la logística por parte del gobierno. Como ejemplo claro, cuando la población pasa tiempo sin conseguir recibir la ayuda que necesita, la tendencia a que se realicen actos vandálicos se ve incrementada, hechos que efectivamente fueron presenciados durante el citado terremoto de Pisco:

“La gente se queja de que no está llegando la ayuda, por eso no hay seguridad. Lo contado por el director de un hospital de Chíncha parece confirmar su dicho. Según el médico Jorge Parrera, el centro de salud que dirige fue atacado por varios civiles que pensaban que ahí se estaban guardando los alimentos que debían ser distribuidos.”

Considerando que se movilizaron más de 14,000 toneladas de ayuda humanitaria, es claro que un planeamiento logístico efectivo y rápido es crucial para el bienestar de la población peruana en casos de desastres. La pregunta es ¿Cómo distribuir la ayuda humanitaria de forma eficiente?

Se sabe que el planeamiento logístico involucra la solución a diversos tipos de problemas de optimización, incluyendo problemas de ubicación de almacenes, diseño de la cadena de suministro, distribución a gran escala, distribución de última milla, evacuación y planeamiento de inventario. En el caso de logística de ayuda humanitaria, se pueden distinguir como características principales el volumen de bienes a transportar ubicados en almacenes que normalmente se encuentran alejados de la zona de desastre, la urgencia de la distribución y la priorización del tipo de bienes que requiera cada zona afectada. Por tales motivos, uno de los problemas más críticos a resolver después de acontecido el desastre es la planificación rápida de distribución a gran escala.

La planificación de distribución presenta un escenario donde existen centros de distribución o almacenes, los cuales contienen bienes que serán movilizados por medios de transporte hacia puntos de demanda, considerando la existencia de puntos intermedios o de transbordo. El total de estas ubicaciones forman la red de distribución. Ahora, una consideración importante para la distribución es que los vehículos están sujetos a restricciones de peso y volumen, los cuales limitan la cantidad de bienes que puedan ser transportados y hacen que la decisión de asignación de bienes a vehículos no sea trivial. Es más, en escenarios de distribución a gran escala, la distribución suele realizarse en horizonte de tiempo de días, lo cual añade una dimensión de complejidad al problema de crear un plan de distribución óptimo. Finalmente, el concepto de optimalidad de un plan de distribución puede estar dado por diversos factores, incluyendo el costo de transporte, la atención de la demanda y los costos de inventario sin utilizar.

Para poder abordar un problema de tal magnitud, durante las últimas décadas se ha visto un incremento en la utilización de métodos computacionales para la resolución de problemas de optimización. En particular, en Norteamérica y Europa, se ha mostrado que el uso de procedimientos automatizados mediante el uso de modelos de optimización para los procesos de planificación de distribución produce ahorros sustanciales (generalmente entre el 5% y 20%) en los costos totales de transporte.

Sin embargo, la aplicación de dichos métodos ha sido aplicada principalmente en la industria, gracias a la gran competitividad presente que impulsa el crecimiento de áreas de investigación y desarrollo par mantener un factor diferencial, mientras que el dominio de las cadenas de suministro de ayuda humanitaria no presenta el mismo nivel de desarrollo. A pesar de ello, en los últimos años se ha podido ver un crecimiento en la investigación relacionada a modelos de optimización en logística de emergencia resaltando principalmente modelos de optimización de ubicación de almacenes y enrutamiento de vehículos.

Al considerar el uso de métodos computacionales para resolver problemas de optimización, un factor importante para evaluar la viabilidad de su uso es el tiempo de ejecución que demande su procesamiento ante instancias que representen escenarios reales del problema. Esto dificulta el uso de métodos exactos, por lo cual se hace necesario utilizar técnicas que requieran un menor tiempo de procesamiento a costa de tener soluciones con valores aproximados al óptimo.

En particular, uno de los métodos aproximados que ha obtenido mejores resultados es el uso de metaheurísticas o métodos de optimización estocástica, los cuales forman parte del estado del arte en resolución de problemas de optimización dada su capacidad de evitar óptimos locales, lo cual sucede frecuentemente con el uso de heurísticas. Dada la cantidad de variables en la formulación del problema, así como los múltiples objetivos de optimización, una metaheurística que se presenta como alternativa ideal son los algoritmos evolutivos o genéticos, debido a que ofrecen la robustez necesaria para afrontar este tipo de problemas.

De esta manera, el presente proyecto de fin de carrera busca desarrollar un algoritmo bioinspirado, como es el algoritmo genético, con el fin de servir como alternativa para abordar el problema de optimización de planificación logística en caso de desastres en el Perú y como propuesta para aliviar las carencias planteadas.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo general

Implementar un algoritmo genético con múltiples objetivos para optimizar la distribución de ayuda humanitaria en caso de desastres en el Perú.

1.2.2 Objetivos específicos

- O 1. Definir la formulación de la función objetivo, restricciones, variables de decisión y parámetros del problema de distribución de ayuda humanitaria.
- O 2. Definir las estructuras que soporten los datos y el algoritmo para la resolución del problema de distribución de ayuda humanitaria.
- O 3. Definir y diseñar la función de aptitud y operadores del algoritmo genético.
- O 4. Implementar el algoritmo genético para la resolución del problema de distribución de ayuda humanitaria.
- O 5. Diseñar e implementar un programa lineal a partir de la formulación del problema de optimización.
- O 6. Diseñar y desarrollar la experimentación numérica para comparar el desempeño del algoritmo genético con el método de programación lineal.
- O 7. Desarrollar la interfaz de usuario para la ejecución y visualización de los algoritmos de optimización.

1.2.3 Resultados esperados

- R 1. Función objetivo, restricciones, variables de decisión y parámetros definidos para el problema de distribución de ayuda humanitaria (O1).
- R 2. Estructuras de datos del algoritmo genético propuesto (O2).
- R 3. Pseudocódigo del algoritmo genético conteniendo la función evaluación de aptitud y los operadores (O3).
- R 4. Algoritmo genético implementado y contenido en un componente reutilizable (O4).
- R 5. Programa lineal formulado e implementado en un lenguaje de modelado para su optimización mediante un solver (O5).
- R 6. Componente de software que contenga el programa lineal y ejecute el solver (O5)
- R 7. Desarrollo de un generador de datos de prueba para los algoritmos de optimización (O6).
- R 8. Análisis de datos de un caso real para generar un caso de prueba basada en un escenario real (O6).
- R 9. Instancia de prueba basada en un escenario real conteniendo información sobre la red distribución, así como la oferta, demanda y tipos de bienes y vehículos a transportar (O6).
- R 10. Instancias de prueba de diferente tamaño generadas aleatoriamente (O6).
- R 11. Informe de evaluación y comparación de tiempo de ejecución y optimalidad de los algoritmos de optimización mediante experimentación numérica (O6).
- R 12. Interfaz de usuario implementada y conteniendo los módulos del algoritmo genético y el programa lineal (O7).

1.2.4 Mapeo de objetivos, resultados y verificación

Objetivo (O1): Definir la formulación de la función objetivo, restricciones, variables de decisión y parámetros del problema de distribución de ayuda humanitaria		
Resultado (R1)	Meta física	Medio de verificación
Función objetivo, restricciones, variables de	Documento	- Definición de función objetivo, restricciones, variables de

decisión y parámetros definidos		decisión y parámetros en el documento
Objetivo (O2): Definir las estructuras que soporten los datos y el algoritmo para la resolución del problema de distribución de ayuda humanitaria		
Resultado (R2)	Meta física	Medio de verificación
Estructuras de datos definidas	Documento	- Definición de estructuras de datos en el documento
Objetivo (O3): Definir y diseñar la función de aptitud y operadores del algoritmo genético		
Resultado (R3)	Meta física	Medio de verificación
Pseudocódigo del algoritmo genético conteniendo la función evaluación de aptitud y los operadores	Documento	- Definición del pseudocódigo de la función de evaluación de aptitud y los operadores del algoritmo genético en el documento
Objetivo (O4): Implementar el algoritmo genético para la resolución del problema de distribución de ayuda humanitaria		
Resultado (R4)	Meta física	Medio de verificación
Algoritmo genético implementado y contenido en un componente reutilizable	Software	- Código del algoritmo genético - Interfaz en consola para ejecutar el algoritmo genético
Objetivo (O5): Diseñar e implementar un programa lineal a partir de la formulación del problema de optimización		
Resultado (R5)	Meta física	Medio de verificación

Programa lineal formulado e implementado en un lenguaje de modelado para su optimización mediante un solver	Software	- Programa lineal formulado e implementado en un lenguaje de modelado para su optimización mediante un solver
Resultado (R6)	Meta física	- Medio de verificación
Componente de software que contenga el programa lineal y ejecute el solver	Software	- Código del componente - Interfaz en consola para ejecutar el solver
Objetivo (O6): Diseñar y desarrollar la experimentación numérica para comparar el desempeño del algoritmo genético con el método de programación lineal		
Resultado (R7)	Meta física	Medio de verificación
Análisis y desarrollo de un generador de datos de prueba para los algoritmos de optimización	Software	- Código del generador de datos - Interfaz en consola para generar datos
Resultado (R8)	Meta física	Medio de verificación
Análisis de datos de un caso real para generar un caso de prueba basada en un escenario real	Documento	- Análisis de los datos utilizados de un caso real describiendo dimensiones del problema de un escenario real
Resultado (R9)	Meta física	Medio de verificación
Instancia de prueba basada en un escenario	Dataset	- Archivo con datos describiendo los datos de

real conteniendo información sobre la red distribución, así como la oferta, demanda y tipos de bienes y vehículos a transportar		entrada de un escenario real del problema de optimización
Resultado (R10)	Meta física	Medio de verificación
Instancias de prueba de diferente tamaño generadas aleatoriamente	Dataset	<ul style="list-style-type: none"> - Archivo con datos describiendo datos de entrada de diferente tamaño para los algoritmos de optimización
Resultado (R11)	Meta física	Medio de verificación
Informe de evaluación y comparación de tiempo de ejecución y optimalidad de los algoritmos de optimización mediante experimentación numérica	Documento	<ul style="list-style-type: none"> - Resultados de evaluación y comparación de tiempo de ejecución y optimalidad de los algoritmos de optimización
Objetivo (O7): Desarrollar la interfaz de usuario para la ejecución y visualización de los algoritmos de optimización		
Resultado (R12)	Meta física	Medio de verificación
Interfaz de usuario implementada y conteniendo los módulos del algoritmo genético y el programa lineal	Software	<ul style="list-style-type: none"> - Código de la interfaz de usuario - Interfaz gráfica para ejecutar los algoritmos de optimización

1.3 Herramientas y Métodos

1.3.1 Python

Python es un lenguaje de programación interpretado, interactivo y orientado a objetos que incorpora módulos, excepciones, tipos de datos dinámicos de muy alto nivel y clases. Python combina poder con una sintaxis bastante clara, así como una gran variedad de librerías que permiten incrementar la eficiencia del programador al escribir programas con el mínimo código necesario, motivo por el cual se ha optado por su uso para implementar el algoritmo genético.

1.3.2 Jupyter Lab

Jupyter Notebook es una aplicación web que permite crear y compartir documentos que contienen código, ecuaciones, visualizaciones y texto descriptivo, lo cual lo hace perfecto como entorno de desarrollo para desarrollar prototipos de programas de forma rápida e incluyendo todos los elementos antes mencionados, lo cual hace la presentación del programa más visual e interactiva. Por tanto, se ha optado por su uso en el proyecto para probar diferentes operadores para el algoritmo genético de forma ágil.

1.3.3 Visual Studio Code

Visual Studio Code es un entorno de desarrollo integrado (IDE) desarrollado por Microsoft que provee inspecciones de código, destaque de errores en tiempo real, sugerencias de correcciones y altas capacidades de navegación sobre todo el código de forma bastante ligera. Por tanto, se ha optado por su uso en el proyecto para implementar el algoritmo final así como la interfaz de usuario que lo contenga.

1.3.4 AMPL

AMPL (A Mathematical Programming Language) es un lenguaje algebraico de modelado usado para describir y resolver problemas de gran complejidad para cómputo matemático de gran escala. Fue desarrollado en Bell Laboratories y soporta docenas de solvers, tanto de código abierto como comerciales, incluyendo CBC, CPLEX, FortMP, Gurobi, MINOS, IPOPT, SNOPT, KNITRO y LGO. Una de las principales ventajas de AMPL es la similitud de su sintaxis con la notación matemática de problemas de optimización. Esto permite una concisa y legible definición de problemas de

optimización. Debido a ello, se ha decidido usarlo en el presente proyecto de fin de carrera para implementar la formulación del problema de optimización.

1.3.5 AMPL IDE

AMPL IDE es un entorno de desarrollo integrado para modelamiento de problemas de optimización, el cual cuenta con un editor de código y consola para la ejecución de diversos solvers para problemas de optimización. Por tanto, se ha optado por su uso en el proyecto para implementar la formulación del programa lineal para resolver el problema de optimización.

1.3.6 GNU Linear Programming Kit

GLPK es un solver de código abierto orientado a resolver problemas de programación lineal de gran escala (LP), así como programación entera mixta (MIP). Cuenta con un conjunto de rutinas implementadas en ANSI C y organizadas en la forma de una librería. Debido a que su uso no requiere una licencia, se utilizará en el proyecto de fin de carrera para realizar la optimización mediante métodos exactos.

1.3.7 Microsoft Excel

Microsoft Excel es una aplicación compuesta de hojas de cálculo desarrollada como parte de la suite Microsoft Office. Posee herramientas de manejo de datos mediante tablas, así como herramientas de visualización y un lenguaje de programación conocido como Visual Basic for Applications. Dado que Microsoft Excel posee funciones estadísticas, se utilizará en el proyecto para realizar la fase de experimentación numérica.

1.3.8 Kanban

Kanban es un framework bastante popular usado para el desarrollo de software de forma ágil. Los principios del framework se basan en aumentar la flexibilidad mediante el uso de una lista de tareas pendientes (backlog) sujeta a priorización a medida avanza el proyecto, así como la reducción de las tareas realizadas en simultáneo para incrementar la eficiencia de cada tarea por separado y reducir la duración de las iteraciones. Asimismo, uno de sus valores principales consiste en la plena visualización de todas las tareas que se vienen haciendo, lo cual es muy útil como mecanismo para tener claro el nivel de avance a cada momento. Por todas estas características, se usará esta metodología ágil para la gestión del proyecto de fin de carrera a lo largo de todas sus fases.

1.3.9 Prueba F de Fisher

La prueba F de Fisher es una prueba de hipótesis estadística en la que el estadístico de prueba presenta una distribución F bajo una hipótesis nula. Se usa frecuentemente para comparar modelos estadísticos que han sido ajustados a un conjunto de datos, con el fin de identificar el modelo que mejor se adapta a la población de la cual se toma una muestra. En el presente proyecto, forma parte de las pruebas a ser realizadas en la sección de experimentación numérica.

1.3.10 Prueba t de Student

La prueba t de Student es una prueba de hipótesis estadística en la cual el estadístico presenta una distribución t bajo una hipótesis nula. Se usa frecuentemente para determinar si dos conjuntos de datos son significativamente diferentes entre sí. En el presente proyecto, forma parte de las pruebas a ser realizadas en la sección de experimentación numérica.

1.3.11 Prueba Kolmogorov-Smirnov

La prueba de Kolmogorov-Smirnov es una prueba no paramétrica para evaluar la igualdad de distribuciones de probabilidad unidimensional y continua. Se usa frecuentemente para evaluar qué tan bien una función de hipótesis encaja con una función empírica. En el presente proyecto, forma parte de las pruebas a ser realizadas en la sección de experimentación numérica.

1.4 Viabilidad

1.4.1 Viabilidad Técnica

Se cuenta con los conocimientos necesarios para alcanzar los objetivos del presente proyecto de fin de carrera. Se cuenta con experiencia previa en la implementación de algoritmos metaheurísticos, así como en desarrollo de software en general, gracias a los diferentes cursos a lo largo de la carrera de Ingeniería Informática, y gracias al aprendizaje autodidacta, donde se ha hecho un extensivo uso de nuevas plataformas y lenguajes de programación.

Asimismo, según lo visto en el estado del arte, existe investigación sobre optimización con múltiples objetivos con el uso de algoritmos metaheurísticos, lo cual servirá de valiosa referencia y guía al momento de desarrollar el proyecto de fin de carrera.

Adicionalmente, se harán uso de buenas prácticas en gestión de proyectos a través del uso de metodologías ágiles, que ya se han aplicado con proyectos anteriores.

Finalmente, es importante mencionar que las herramientas a utilizar son de libre uso o se encuentran instaladas en los equipos de la universidad, por lo cual no habrá inconvenientes debido a licencias de software que puedan obstaculizar el proyecto.

1.4.2 Viabilidad Temporal

1.4.3 Viabilidad Económica

Como se mencionó anteriormente, las herramientas usadas serán de libre uso o estarán disponibles en equipos de la universidad, por lo cual no se incurrirá en costos por licencias.

1.4.4 Conclusión

Se ha podido notar que se cuentan con los conocimientos y herramientas necesarias para poder iniciar el proyecto de fin de carrera. Asimismo, no se requiere realizar una inversión en licencias de software y el período de tiempo es suficiente para desarrollar lo propuesto según los plazos establecidos en el cronograma. De esta manera, se puede apreciar la viabilidad del proyecto, que garantizará que el proyecto de fin de carrera se desarrolle de forma satisfactoria.

1.5 Alcance, Limitaciones y Riesgos

1.5.1 Alcance

Este proyecto de fin de carrera tiene como fin presentar una alternativa de solución al problema de optimización de la distribución de ayuda humanitaria en Perú. Esta solución debe presentar una propuesta de asignación de diferentes cantidades y tipos de recursos a diferentes tipos de vehículos, así como una propuesta de ruta a seguir por cada uno de ellos. Esta propuesta estará alineada a múltiples objetivos, tales como la rapidez de distribución, la equidad de distribución y la reducción del costo del transporte.

A continuación, se procederá a implementar el algoritmo genético que, tomando las consideraciones previamente mencionadas, generará soluciones con un valor cercano al óptimo. Dado que se propone hacer uso del algoritmo después de acontecido un desastre, es importante mencionar que su tiempo de ejecución no debe escapar del orden de los minutos, pues es esencial obtener soluciones rápidas en momentos críticos.

Asimismo, cabe decir que actualmente solo se están considerando vehículos terrestres en la resolución del problema, mas no vehículos aéreos o marítimos.

Finalmente, luego de desarrollar el algoritmo, se procederá a rodearlo de una interfaz gráfica, con el fin de que pueda ser utilizado por un mayor número y una mayor diversidad de personas. Finalmente, se evaluará el desempeño del algoritmo frente a métodos exactos con el fin de demostrar la calidad aceptable de sus resultados, así como la rapidez de su ejecución.

El alcance del proyecto no comprende el desarrollo de un sistema de información que contenga el algoritmo implementado.

1.5.2 Limitaciones

La siguiente lista muestra las limitaciones de este proyecto de fin de carrera:

- La formulación y resultados del algoritmo dependerán de la información que pueda ser recolectada. Para este proyecto, se usará data del INDECI para obtener información sobre ubicaciones geográficas de almacenes y posibles puntos de demanda, así como los diferentes tipos de recursos que forman parte de la distribución de ayuda humanitaria, mientras que la información detallada sobre las cantidades de recursos por cada ubicación se generará aleatoriamente según distribuciones de probabilidad.
- El tiempo de ejecución del algoritmo dependerá de las características del equipo en el cual se ejecuten. Por tanto, es importante realizar la ejecución del algoritmo y el método exacto en el mismo dispositivo. La comparación de tiempos estará basada en la hora del sistema del equipo.

1.5.3 Riesgos

En la siguiente tabla se muestran los riesgos identificados que podrían impactar este proyecto de fin de carrera:

Tabla 2. Matriz de riesgos

Riesgo Identificado	Impacto en el proyecto	Medidas correctivas para mitigar
Mala planificación del proyecto	<ul style="list-style-type: none"> - Entregables presentados fuera de tiempo - Entregables rechazados 	Tener presentes y claros los plazos de entrega para organizarse de acuerdo a ello
Pérdida parcial o total de la información y avances del proyecto	<ul style="list-style-type: none"> - Gran retraso en la presentación de entregables - Posible desaprobación del curso 	Tener un repositorio en línea del proyecto y realizar actualizaciones y respaldos de manera periódica
Enfermedades	<ul style="list-style-type: none"> - Entregables presentados fuera de tiempo - Entregables rechazados 	Tener siempre un margen de tiempo entre la finalización del entregable y la fecha límite para anticipar imprevistos
Mala comunicación con el asesor	<ul style="list-style-type: none"> - Entregables sin corregir - Entregables rechazados - Falta de asesoría de un experto 	Mantener una comunicación constante con el asesor y manifestar inquietudes de forma oportuna
Falta de acceso a la información dependiente de externos	<ul style="list-style-type: none"> - Falta de información para la ejecución del algoritmo 	Gestionar los accesos de forma oportuna, y en caso no se consiga, obtener información de libre disponibilidad o generada personalmente

Capítulo 2. Marco Legal/Regulatorio/Conceptual/otros

2.1 Introducción

En el presente apartado se definirán conceptos que serán de ayuda para entender mejor el problema que se desea resolver, así como la solución propuesta. Se abordarán conceptos de logística humanitaria que permitirán entender el contexto y consideraciones que se tengan con el problema, y posteriormente se abarcarán conceptos de optimización combinatoria, complejidad computacional y los problemas relevantes que forman la base del problema de distribución a resolver, así como los métodos exactos y aproximados que existen para afrontarlos, que comprenden métodos heurísticos y metaheurísticos.

2.2 Peligros y desastres

Un peligro es un evento amenazante o la probabilidad de ocurrencia de un fenómeno potencialmente dañino dentro de un determinado período y área. Puede ser causado tanto por la naturaleza como por el hombre. Una emergencia es una situación que presenta un riesgo inmediato a la salud, vida, propiedad o entorno. Un desastre es la disrupción del normal funcionamiento de un sistema o comunidad, que causa un fuerte impacto en las personas, estructuras y entorno, y supera la capacidad de respuesta. Algunas veces, el declarar o no una emergencia como desastre es una decisión política, pues tiene consecuencias para el involucramiento de terceras personas en la intervención

2.3 Gestión del desastre y logística humanitaria

La respuesta ante un desastre es un proceso complejo que involucra extrema presión sobre el tiempo, gran incertidumbre y muchos agentes involucrados. También involucra la participación de un número de entidades autónomas para la mitigación, preparación, respuesta y recuperación ante diversos peligros para la sociedad. Los agentes involucrados difieren dependiendo del tipo de desastre, las consecuencias del desastre y el lugar donde acontece, debido a la vulnerabilidad, y se pueden clasificar en tres niveles que están directamente relacionados a las consecuencias del desastre:

a. Nivel local: es el primer nivel de respuesta, usualmente a cargo de agencias locales, organizaciones de sociedad civil y defensa civil. Típicamente, este nivel de emergencia no es declarado como desastre.

b. Nivel nacional: el ejército y defensa civil a nivel nacional, organizaciones gubernamentales y ONGs están usualmente involucradas cuando una emergencia está definida como desastre. Algunas veces, organizaciones internacionales también participan a este nivel.

c. Nivel internacional: comprende gobiernos extranjeros y organizaciones intergubernamentales, ONGs internacionales y agencias de las Naciones Unidas. Este nivel es alcanzado cuando la capacidad nacional de respuesta no es suficiente, debido a la magnitud del desastre o a la vulnerabilidad del país, y el gobierno nacional autoriza una operación humanitaria internacional.

Los procesos de toma de decisiones en la gestión de desastres son por tanto extremadamente difíciles, debido a los múltiples actores involucrados y la complejidad de las tareas a realizar. Dentro de dichas tareas, todos los procesos de planificación, implementación y control de almacenamiento y flujo de recursos y materiales, así como información relevante, desde el punto de origen al punto de consumo para el propósito de satisfacer los requerimientos de bienestar y alivio del sufrimiento de personas vulnerables se conoce como logística humanitaria.

Las principales características que diferencian las cadenas de suministro humanitaria en el contexto de gestión de desastres con las cadenas de suministro en negocios son las siguientes:

- Demanda impredecible en términos de tiempo, ubicación geográfica, tipo y cantidad de recursos de demanda.
- Corto tiempo de respuesta y demanda súbita de grandes cantidades de una amplia variedad de productos y servicios.
- Falta de recursos iniciales en términos de suministros, recursos humanos, tecnología, capacidad y financiamiento.
- Presencia de múltiples actores en la toma de decisiones que pueden resultar difíciles de identificar.

Asimismo, se pueden identificar cuatro etapas básicas en el ciclo de la gestión de ayuda humanitaria antes una emergencia:

a. Etapa de mitigación, la cual tiene lugar antes del desastre, y tiene como objetivo desarrollar acciones preventivas que disminuyan los efectos de un posible desastre en el futuro.

- b. Etapa de preparación, donde se aborda la planificación con el objetivo de anticiparse a un posible desastre.
- c. Etapa de respuesta, la cual tiene lugar durante el desastre y los períodos inmediatamente posteriores, e incluyen la valoración inicial del impacto de la crisis y la organización de las acciones de ayuda y atención de damnificados.
- d. Etapa de rehabilitación, la cual acontece después del desastre, y se caracteriza por el alto nivel de interacción con los proyectos de cooperación para el desarrollo con el fin de mejorar la condición de vida de las comunidades afectadas.

2.4 Logística humanitaria en el Perú

Según el Centro Nacional de Estimación, Prevención y Reducción de Riesgo de Desastres (CENEPRED) y el Ministerio de Transporte y Comunicaciones, durante una emergencia se colocan los recursos de personal y materiales a disposición, coordinando con el Instituto Nacional de Defensa Civil (INDECI) las operaciones de ayuda necesaria y aplicando las medidas previstas en un plan preestablecido. Asimismo, dichas organizaciones tienen como responsabilidad evaluar los daños que se pudieran haber ocasionado en las redes viales y habilitar caminos de emergencia en caso se encuentren bloqueados o con estructuras colapsadas.

Actualmente, la cadena de abastecimiento humanitaria en el Perú es gestionada por el Sistema Nacional de Gestión de Riesgo de Desastres (SINAGERD), que es el responsable técnico de coordinar, facilitar y supervisar la formulación e implementación del Plan Nacional de Gestión de Riesgo de Desastres, que comprende los procesos de estimación, prevención, reducción del riesgo y reconstrucción. Asimismo, se encarga de asesorar, elaborar y establecer los lineamientos técnicos y mecanismos para el desarrollo adecuado de los procesos previamente mencionados por los distintos entes públicos y privados que integran el SINAGERD.

2.5 Optimización Combinatoria

La Optimización Combinatoria tiene como objetivo encontrar un objeto óptimo en una colección finita de objetos. Típicamente, dicha colección posee una representación concisa, como una red de transporte, por ejemplo, mientras que el número de objetos es enorme (todas las posibilidades de rutas sobre la red), de tal manera que la estrategia de evaluar todos los objetos uno por uno no es una opción viable.

2.6 Optimización de múltiples objetivos

La optimización de múltiples objetivos aborda un tipo especial de problemas de optimización que involucran más de una función objetivo a ser optimizada simultáneamente. Debido a ello, comúnmente se tiene que tomar cuenta de los sacrificios que se tengan que realizar entre objetivos potencialmente conflictivos, pues para problemas no triviales, no existe solución que alcance el valor óptimo para absolutamente todos los objetivos. Por tanto, usualmente existe un conjunto de soluciones para el caso de múltiples objetivos que no pueden ser comparadas fácilmente comparadas con otras soluciones. Este tipo de soluciones se denominan soluciones no dominadas o soluciones óptimas de Pareto, para las cuales no es posible realizar una mejora en ninguna función objetivo sin sacrificar por lo menos una de las otras funciones objetivo. Mientras que un problema de optimización de un solo objetivo usualmente presenta la siguiente forma:

$$\begin{aligned} \max \quad & z = f(\mathbf{x}) \\ \text{s. t.} \quad & g_i(\mathbf{x}) \leq 0, \quad i = 1, 2, \dots, m \\ & \mathbf{x} \geq 0 \end{aligned}$$

Donde \mathbf{x} es el conjunto de variables de decisión, $f(\mathbf{x})$ es la función objetivo y $g(\mathbf{x})$ son funciones que representan las restricciones del problema, sin pérdida de generalidad, un problema de optimización puede ser formulado como:

$$\begin{aligned} \max \quad & \{z_1 = f_1(\mathbf{x}), z_2 = f_2(\mathbf{x}), \dots, z_q = f_q(\mathbf{x})\} \\ \text{s. t.} \quad & g_i(\mathbf{x}) \leq 0, \quad i = 1, 2, \dots, m \\ & \mathbf{x} \geq 0 \end{aligned}$$

2.7 Problema de transporte

La optimización de múltiples objetivos aborda un tipo especial de problemas de optimización que involucran más de una función objetivo a ser optimizada simultáneamente. Debido

2.8 Problema de transbordo

La optimización de múltiples objetivos aborda un tipo especial de problemas de optimización que involucran

2.9 Métodos para la solución de problemas de optimización

2.9.1 Métodos exactos

Los métodos exactos para abordar problemas de optimización combinatoria comúnmente se basan en resolver la formulación de dichos problemas como programas lineales. Es importante mencionar que, dado que los modelos cuentan con variables enteras, se tienen que considerar métodos de resolución de programación lineal entera mixta, los cuales son los siguientes:

- Algoritmos de ramificación y poda: consiste en recorrer todo el espacio de búsqueda para encontrar la solución, con la mejora adicional de evitar soluciones que se están alejando del valor óptimo
- Algoritmos de ramificación y corte: consiste en realizar una relajación del programa lineal desconsiderando las restricciones de integralidad para generar una solución con métodos para programas lineales comunes, como el método simplex. Posteriormente, se aplica un algoritmo de planos de corte para volver a acotar las restricciones de integralidad
- Algoritmos basados en recubrimiento de conjuntos: consiste en modificar la formulación del programa lineal para adaptarlo en uno basado en el clásico problema de recubrimiento de conjuntos, para resolverlo con métodos aplicables a dicho problema

2.9.2 Métodos heurísticos

Los métodos heurísticos consisten en explotar las características de cada problema en particular para generar soluciones mediante métodos voraces con una calidad aceptable aproximándose al valor óptimo. Una gran ventaja de estos métodos es su simplicidad, lo cual los hace bastante rápidos, permitiéndoles resolver problemas intratables mediante métodos exactos, pero su principal desventaja es el peligro de hallar un óptimo local alejado del global que impida que el algoritmo intente buscar una solución mejor. Como se mencionó anteriormente, dichos métodos dependen del problema a resolver, y en el caso del problema de enrutamiento, programación de tareas o mochila, heurísticas de construcción y heurísticas de mejora son dos de los tipos de heurísticas más usados.

2.9.3 Métodos metaheurísticos

La principal característica y motivación de los métodos metaheurísticos es su capacidad de evitar óptimos locales, debido a que evitan depender totalmente del problema, presentándose como métodos de uso general. Debido a ello, comúnmente obtienen soluciones de mucha mejor calidad que los métodos heurísticos, pero aún siendo aproximados. Sin embargo, la mayor complejidad de estos métodos los hace más lentos, por lo que su requerimiento computacional es mayor. Dentro de los métodos más conocidos se encuentran:

- Algoritmos Genéticos
- Búsqueda Tabú
- Recocido Simulado
- GRASP (Greedy Randomized Adaptive Search Procedure)

2.9.3.1 Algoritmos Genéticos

Un algoritmo genético es una metaheurística y técnica de búsqueda global randomizada que resuelve problemas imitando procesos observados durante la evolución natural. Este paradigma para resolver problemas fue propuesto inicialmente por John Holland en los 70. Un algoritmo genético puro es un método de resolución de problemas que usa poca información sobre el dominio del problema. Por tanto, puede ser aplicado a un amplio rango de problemas holgadamente definidos que no permiten el uso de métodos especializados. En esencia, un algoritmo genético evoluciona una población de cadenas de bits o cromosomas generada aleatoriamente, donde cada cromosoma codifica una solución para una instancia particular. Esta evolución toma lugar a través de la aplicación de operadores que imitan los fenómenos naturales observados en la naturaleza como la reproducción y mutación, los cuales son aplicados a lo largo de un número determinado de iteraciones o generaciones. El esquema del algoritmo es el siguiente:

1. Generar la población inicial
2. Repetir
 - a. Seleccionar dos cromosomas de la población actual
 - b. Generar un nuevo cromosoma a partir de los dos anteriores
 - c. Aplicar una mutación aleatoria al nuevo cromosoma probabilísticamente

d. Reemplazar algún cromosoma de la población actual con el nuevo cromosoma generado

3. Hasta algún criterio de convergencia o máximo número de generaciones

Capítulo 3. Estado del Arte

Debe explicarse el método seguido.

3.1 Investigaciones Académicas

3.1.1 Transporte en operaciones de respuesta a desastres (*Transportation in disaster response operations*)

Djamel Berkoune, Jacques Renaud, Monia Rekik y Angel Ruiz de diferentes universidades e institutos de Canadá desarrollan dos propuestas para resolver el problema de enrutamiento con múltiples productos y múltiples productos que apunta a minimizar la duración total de los viajes: branch-and-bound clásico usando el conocido solver comercial CPLEX con un criterio heurístico de parada, y una construcción heurística rápida para generar soluciones factibles acompañada de un algoritmo genético que usa algunas de las soluciones generadas por el algoritmo heurístico. Los algoritmos fueron probados sobre datasets de tamaño entre 20 y 60. Para las instancias más grandes, el nivel de logro del algoritmo genético sobre el valor objetivo es de 99.28% para una población de 300 individuos durante 300 generaciones en un tiempo de 63 segundos, mientras que el método branch-and-bound alcanzó el valor óptimo en 600 segundos.

3.1.2 Enrutamiento para esfuerzos de ayuda humanitaria (*Routing for relief efforts*)

Ann Campbell, Dieter Vandenbussche y William Hermann de diferentes universidades en Estados Unidos introducen y analizan dos funciones objetivo para el problema del viajante y el problema de enrutamiento, considerando el tiempo de llegada al destino, en orden de calzar con naturaleza humanitaria de la distribución. La primera función objetivo minimiza el máximo tiempo de llegada y la segunda función objetivo minimiza el tiempo promedio de llegada. Los problemas son resueltos mediante heurísticas de inserción y búsqueda local y fueron probados sobre los datasets de acceso en línea Augerat-A, Augerat-B y Golden, los cuales contienen diversas instancias con un tamaño entre 30 y 70 puntos de demanda. Para comparar los resultados, se usó un modelo de programación entera mixta (MIP) que fue ejecutado por 6 horas. Los resultados están disponibles gráficamente, los cuales se muestran a continuación:

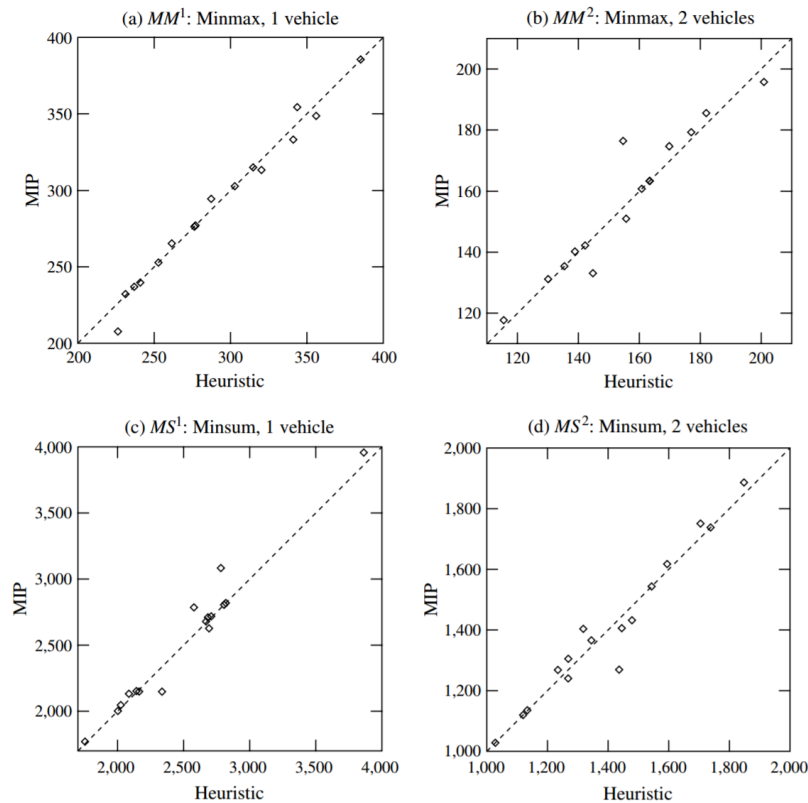


Figura 2. Comparación entre resultados de programación entera mixta y heurística (INDECI, 2016).

3.1.3 Modelos para enrutamiento de ayuda humanitaria: Equidad, eficiencia y eficacia (*Models for relief routing: Equity, efficiency and efficacy*)

Michael Huang, Karen Smilowitz y Burcu Balcik de universidades en Estados Unidos y Turquía proponen tres funciones objetivas para un problema de enrutamiento considerando el costo, velocidad y equidad de distribución. Los tres problemas resultantes son resueltos con diferentes metaheurísticas basadas en GRASP. Los resultados son probados en instancias de tamaño 8 a 10 y se consigue un valor de logro sobre el objetivo principal de 0.87.

3.1.4 Óptima reubicación de stock bajo incertidumbre en operaciones humanitarias post-desastre (*Optimal stock relocation under uncertainty in post-disaster humanitarian operations*)

Alexander Blecken, Beate Rottkemper y Bernd Hellingrath de diferentes universidades de Alemania aplican métodos exactos y heurísticos para afrontar el problema de aprovisionamiento de almacén y flujo de ayuda humanitaria minimizando el costo total. Como método exacto se ejecutó el programa lineal en un solver, y como método

aproximado se usó una heurística basada en un árbol de decisión acompañada de una función de utilidad. Los métodos se aplicaron sobre un dataset compuesto de 6 regiones de Myanmar, con una distribución sobre 13 períodos de tiempo. Los resultados se pueden apreciar en el siguiente gráfico:

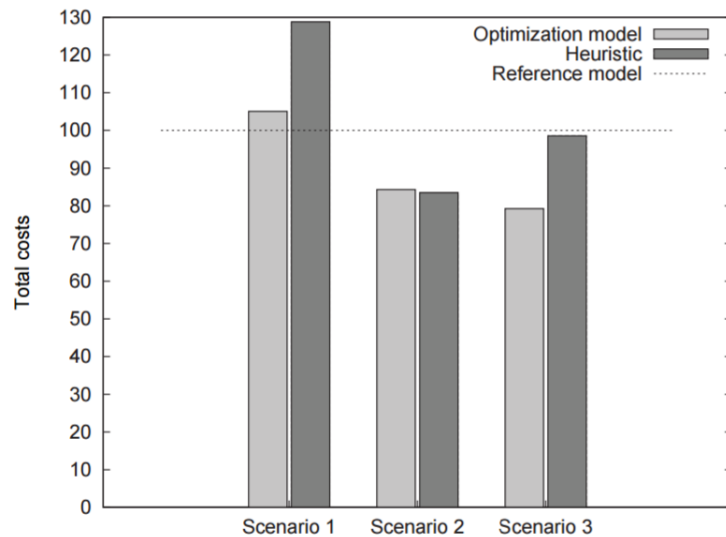


Figura 3. Comparación de costos entre el método exacto y la heurística (INDECI, 2016).

3.1.5 Planificación óptima multi-objetivo para el diseño de sistemas de distribución de ayuda humanitaria (*Multi-objective optimal planning for designing relief delivery systems*)

Gwo Tzeng, Hsin Cheng y Tsung Huang de diferentes universidades e institutos en Taiwan usan una técnica para la resolución de programas lineales multi-objetivo conocida como programación difusa o fuzzy programming para abordar el VRP considerando una optimización sobre múltiples períodos a la vez en su función objetivo, minimizando el costo total en primer lugar, el tiempo de viaje total en segundo lugar, y maximizando la satisfacción mínima durante el período de planeamiento en tercer lugar. El algoritmo fue probado sobre 8 puntos de demanda, 5 puntos de distribución y 4 puntos de transbordo que representan zonas de Taiwan y el ranking de nivel de logro estos tres valores objetivo fue de 0.93, 0.82 y 0.65.

3.1.6 Metaheurística bi-objetivo para la planificación de operaciones de ayuda humanitaria en desastres (*Bi-objective metaheuristic for disaster relief operation planning*)

Pamela Nolz, Karl Doerner, Walter Gutjahr y Richard Hartl de la Universidad de Viena presentan una solución híbrida basada en algoritmos genéticos, búsqueda de vecindario variable y enlace de caminos para abordar un problema multicriterio de distribución de agua afectada por una catástrofe. Los dos criterios contemplados son: la duración del viaje, y el último tiempo de llegada de un vehículo a un punto de demanda. El algoritmo es probado en data real de la provincia de Manabí en Ecuador contando entre 20 y 40 puntos de parada y el nivel de logro estos tres valores objetivo fue de 0.75 y 0.52.

3.1.7 Modelo de optimización multi-criterio para la distribución de ayuda humanitaria (*A multi-criteria optimization model for humanitarian aid distribution*)

Vitoriano Begoña, Teresa Ortuño, Gregorio Tirado y Javier Montero de la Universidad Complutense de Madrid proponen un modelo de doble flujo multi-criterio para abordar el problema de distribución de suministros a la población afectada por un desastre. Criterios como el costo, tiempo de respuesta, equidad de distribución, seguridad y confiabilidad son considerados en conjunto usando un enfoque en programación por objetivos. El modelo fue aplicado durante el terremoto de Haití acontecido en 2010. La red de transporte consistió en 24 nodos y 42 enlaces entre ubicaciones. El resultado se presenta mediante una matriz de recompensa que presenta los niveles de logro de los valores objetivos considerando una prioridad diferente para cada objetivo en cada fila.

Attribute	COST(\$)	TX(min.)	DX	PRI ₁₃	RMN	RG(-ln)	PX	PG(-ln)
COST	35,835.0	141.75	1.0	0.00	0.1	5.83	0.85	11.76
TX	79,204.5	83.85	1.0	0.13	0.1	7.28	0.92	19.32
DX	42,453.0	146.25	0.4	0.60	0.1	7.76	0.92	15.37
PRI ₁₃	39,498.0	141.75	1.0	1.00	0.1	4.32	0.88	12.32
RMN	79,931.5	159.75	1.0	0.90	0.75	2.07	0.92	19.60
RG	69,692.0	124.50	1.0	0.00	0.75	1.43	0.85	11.87
PX	80,000.0	117.00	1.0	0.00	0.1	4.73	0.19	9.08
PG	79,966.0	156.00	1.0	0.00	0.1	4.22	0.66	7.80

Figura 4. Matriz de recompensa para cada objetivo de optimización (INDECI, 2016).

3.2 Productos comerciales

3.2.1 SimpliRoute

SimpliRoute es un ejemplo de productos comerciales modernos, pues se trata de un startup que ofrece una herramienta de planificación de rutas mediante software como servicio basado en interfaces de programación de aplicaciones, o API-based SaaS (Software as a Service). SimpliRoute comenzó en el 2015 y su modelo de optimización considera 4 restricciones en consideración:

- Capacidades de los vehículos
- Diferentes puntos de inicio para los vehículos
- Cambios de conductor
- Ventanas de tiempo para los clientes

Asimismo, cuenta con integración con los servicios Waze y Google Maps, lo cual permite realizar un monitoreo o tracking en tiempo real.

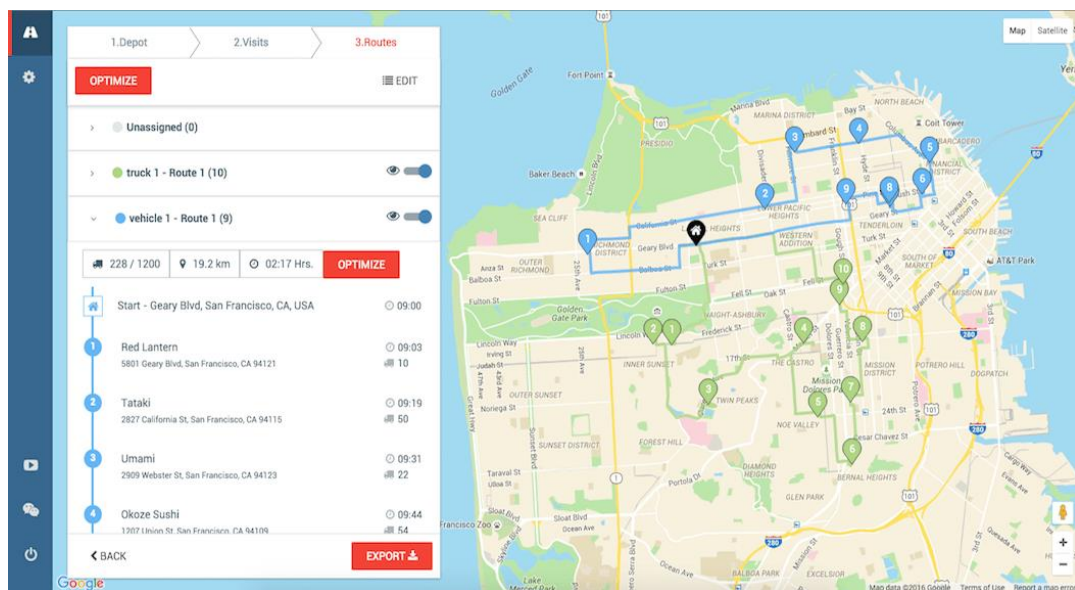


Figura 5. SimpliRoute, ejemplo de interfaz (INDECI, 2016).

3.2.2 SAP Transportation Management VSR Optimization

VSR Optimization es un servicio del módulo de Transportation Management del popular sistema SAP, el cual permite asignar unidades de carga a capacidades, que puedan pertenecer a vehículos, por ejemplo, de un modo eficiente, considerando las siguientes restricciones:

- Capacidades de los vehículos

- Ventanas de tiempo para los vehículos
- Ventanas de tiempo para los clientes
- Tiempo de expiración de productos
- Duración del viaje
- Distancia recorrida
- Cantidad de paradas intermedias

Dado que es parte del mismo ecosistema SAP, la integración con módulos de ventas y de gestión de la cadena de suministro no presenta ningún problema.

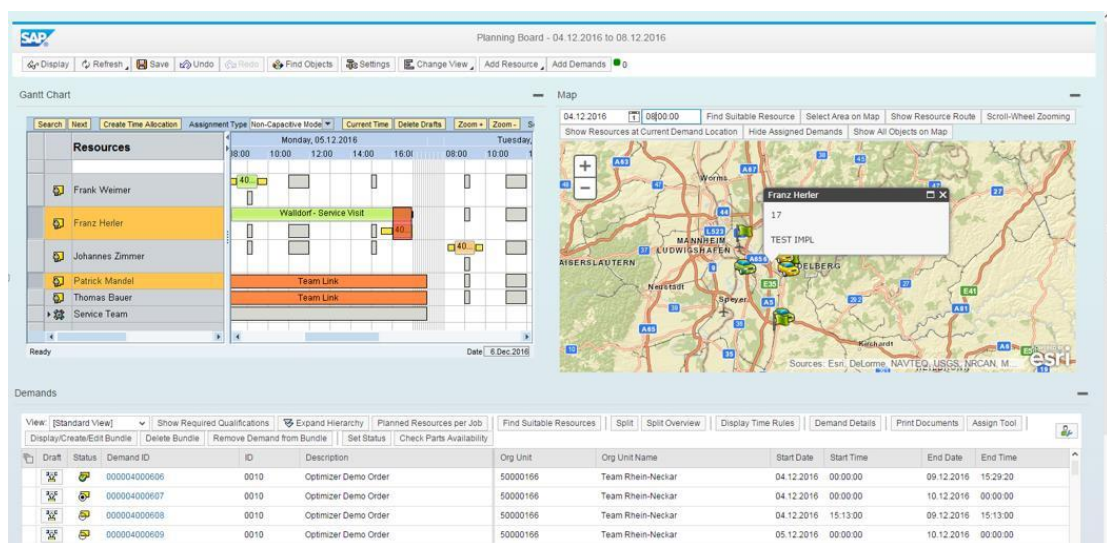


Figura 5. SAP, ejemplo de interfaz (INDECI, 2016).

3.2.3 Google Optimization Tools

Google Optimization Tools es una suite gratuita para problemas de optimización combinatoria, la cual consiste en una interfaz unificada para variados problemas de programación lineal y entera, incluyendo problemas de asignación, empaquetamiento y enrutamiento. El modelo de VRP contempla las siguientes restricciones:

- Capacidad de ubicaciones y vehículos
- Máximo número de ubicaciones a visitar por vehículo
- Restricciones de tiempo y distancia
- Ventanas de tiempo
- Relaciones de precedencia entre pares de ubicaciones

Asimismo, la suite presenta herramientas para la resolución del problema de la mochila o knapsack, que considera como criterios el peso de los productos y el valor de

los productos, así como el problema de programación de tareas o scheduling, que considera tareas secuenciales e indivisibles.

3.3 Revisión y discusión

Se ha conseguido apreciar que los trabajos de investigación sobre optimización de logística humanitaria son variados, y se distinguen por el tipo de optimización que realizan, considerando optimización sobre un objetivo o bien sobre múltiples objetivos. Asimismo, se ha identificado que los métodos más utilizados son las metaheurísticas y los métodos basados en lógica difusa o fuzzy. Finalmente, se ha logrado identificar un conjunto de productos y herramientas comerciales muy conocidos y centrados en la resolución del problema de enrutamiento de vehículos principalmente, así como el problema de la mochila o knapsack.

3.4 Conclusiones

A partir de la revisión de literatura, se ha obtenido un panorama más claro de la investigación y herramientas existentes actualmente, con el fin de tener una referencia al momento de desarrollar el presente proyecto de fin de carrera.

Capítulo 4. Definición de la formulación de la función objetivo, restricciones, variables de decisión y parámetros del problema de distribución de ayuda humanitaria

4.1 Introducción

Para poder desarrollar algoritmos para optimizar la distribución de ayuda humanitaria primero se debe plantear el problema para conocer qué se desea optimizar, qué parámetros describen una instancia del problema, cuáles son las variables que describen una posible solución y cuáles son las restricciones que actúan sobre estas variables

4.2 Resultado

4.2.1 Parámetros del problema de optimización

4.2.1.1 Red de distribución

Uno de los elementos principales del problema es la red de distribución, la cual involucra representar un grafo mediante el número de nodos (K) y aristas entre los nodos, la cual consiste en un conjunto de pares ordenados (j, k) que indican que el nodo j está conectado con el nodo k . En el caso que se está abordando, el cual es distribución a gran escala, los nodos suelen representar distritos conectados por carreteras, siendo la distancia de cada carretera representada por el parámetro ***Distancia_{jk}*** la cual influirá en el cálculo del costo de distribución.

4.2.1.2 Horizonte de planificación de la distribución

Como la distribución de ayuda humanitaria es un proceso que suele abarcar varios días, es necesario un parámetro que acote el horizonte de planificación del problema, la cual queda definida por T que representa el número de períodos (normalmente días).

4.2.1.3 Oferta y demanda inicial en los nodos de la red de distribución

Las condiciones iniciales del problema deben indicar cuánta oferta y cuánta demanda de los bienes de distribución existe en cada nodo en el período cero. Esta oferta y demanda irá cambiando a lo largo del tiempo según las decisiones de transporte que se tomen como resultado del algoritmo de optimización. La oferta de bienes se define por el parámetro ***Inventario_{0k}***, que representa la cantidad de bienes que existe en el nodo k en el período cero, mientras que la demanda de bienes se define por el parámetro

$Demanda0_k$, que representa la cantidad de bienes que se requieren en el nodo k en el período cero.

Para considerar bienes de diferentes tipos, estos parámetros se pueden expandir a **$Inventario0_{ki}$** y **$Demanda0_{ki}$** , que indican la oferta y demanda inicial de bienes de tipo i en el nodo k.

4.2.1.4 Vehículos para el transporte de bienes

Los bienes se movilizarán entre los nodos mediante los vehículos, para los cuales se define la capacidad máxima de bienes que pueden transportar tanto en términos de volumen (**$CapacidadVehV$**) como peso (**$CapacidadVehW$**), así como el costo de transporte por unidad de distancia (**$CostoTransp$**). Asimismo, para saber de cuántos vehículos disponemos en cada lugar, también se establece la cantidad inicial de vehículos disponibles en el nodo k, la cual queda definida por el parámetro **$VehDisponibles0_k$** . A medida que los vehículos se desplacen a lo largo de los períodos, la cantidad de vehículos disponibles en cada nodo irá cambiando a lo largo del tiempo según las decisiones de transporte que se tomen como resultado del algoritmo de optimización.

Para considerar vehículos de diferentes tipos, estos parámetros se pueden expandir a **$CapacidadVehV_v$** , **$CapacidadVehW_v$** , **$CostoTransp_v$** , los cuales indican las capacidades y costos de cada tipo de vehículo, y **$VehDisponibles0_{kv}$** , que indica la cantidad inicial de vehículos disponibles de tipo v en el nodo k.

4.2.1.5 Volumen y peso de los bienes

Para poder restringir la cantidad de bienes que se pueden movilizar en los vehículos, se establecen los parámetros **$Volumen$** y **$Peso$** .

Para considerar bienes de diferentes tipos, estos parámetros se pueden expandir a **$Volumen_i$** y **$Peso_i$** , que indican el volumen y peso de cada bien i.

4.2.2 Variables de decisión

4.2.2.1 Cantidad de vehículos que se movilizan

Los bienes se movilizarán entre los nodos mediante los vehículos, los cuales cambiarán de ubicación a lo largo del tiempo, lo cual origina la variable de decisión que establezca cuántos vehículos serán movilizadas desde el nodo j al nodo k en el período t (**Veh_{jkt}**).

Para considerar diferentes tipos de vehículos, esta variable se puede expandir a **Veh_{jkt}** , que indica el número de vehículos de tipo v que serán movilizados del nodo j al k en el período t .

4.2.2.2 Cantidad de bienes que se transportan

De la misma manera, se requiere una variable de decisión que establezca cuántos bienes serán transportados en los vehículos, lo cual queda origina la variable de decisión que indique cuántos bienes serán transportados en los vehículos desde el nodo j al nodo k en el período t (**$Transp_{jkt}$**).

Para considerar diferentes tipos de vehículos, esta variable se puede expandir a **$Transp_{jkvit}$** , que indica la cantidad bienes de tipo i que serán transportados en vehículos de tipo v desde el nodo j hacia el k en el período t .

4.2.3 Variables auxiliares

4.2.3.1 Oferta y demanda a lo largo del tiempo

A partir de las decisiones de transporte que se tomen, la oferta y la demanda en cada ubicación irá siendo actualizada, lo cual quedará indicado por las variables **$Inventario_{kt}$** y **$Demanda_{kt}$** , las cuales indican cuánto de oferta y demanda existe en el nodo k en el período t .

Para considerar diferentes tipos de bienes, estas variables se pueden expandir a **$Inventario_{kit}$** y **$Demanda_{kit}$** , que indican cuánto de oferta y demanda del bien i existe en el nodo k en el período t .

4.2.3.2 Consumo de bienes

En el momento en que los bienes lleguen al nodo actual, dicho bien será consumido para satisfacer la posible demanda existente, lo cual quedará registrado en la variable **$Consumo_{kt}$** , que indica cuántos bienes se consumen en el nodo k en el período t .

De la misma manera, para considerar diferentes tipos de bienes, esta variable puede ser expandida a **$Consumo_{kit}$** , para indicar el consumo del bien i en el nodo k en el período t .

4.2.3.3 Vehículos disponibles

De una manera análoga al control del inventario de los bienes, se debe tener un control de cuántos vehículos se encuentran en cada ubicación en cada período. Esto queda

representado por la variable ***VehDisponibles_{kt}***, que indica la cantidad de vehículos disponibles en el nodo k en el período t.

Para considerar diferentes tipos de vehículos, esta variable se puede expandir a ***VehDisponibles_{kvt}***, que indica la cantidad de vehículos de tipo v disponibles en el nodo k en el período t.

4.2.4 Función objetivo

4.2.4.1 Minimizar demanda actual

El primer objetivo a considerar en la optimización multiobjetivo está orientado a satisfacer la demanda en los nodos lo más pronto posible. Por ello, el valor que será minimizado es la suma total de la demanda en todos los nodos y períodos. De esta manera, una posible solución que satisfaga la demanda de todos los nodos en 3 días será preferible a una solución que solo satisfaga la demanda de la mitad de los nodos en 6 días. La siguiente expresión indica la suma de la demanda de cada nodo k en todos los períodos t:

$$\sum_{k,t \geq 1} Demanda_{k,t}$$

Para considerar la demanda de diferentes tipos de bienes, esta expresión se puede expandir a:

$$\sum_{k,i,t \geq 1} Demanda_{k,i,t}$$

4.2.4.2 Minimizar costo de transporte

Así como se desea atender la demanda lo más pronto posible, también se debe considerar realizarlo de la manera más eficiente posible, para no desperdiciar recursos que podrían ser utilizados para atender a más nodos. Debido a que el costo de transporte tiende a ser proporcional a la distancia recorrida, el valor total del segundo objetivo de optimización será la suma del costo unitario de transporte (por unidad de distancia) multiplicado por la distancia recorrida de todos los vehículos. De esta manera, una posible solución que llegue a su destino por una ruta más corta será preferible a una solución que movilice a los vehículos por rutas innecesarias. La siguiente expresión indica la suma del costo de transporte unitario por la distancia entre los nodos j y k, multiplicada por la cantidad de vehículos que se desplacen desde j hacia k en el período t:

$$\sum_{j,k,t} CostoTransp * Distancia_{j,k} * Veh_{j,k,t}$$

Para considerar diferentes tipos de vehículos, esta expresión se puede expandir a:

$$\sum_{j,k,v,t} CostoTransp_v * Distancia_{j,k} * Veh_{j,k,v,t}$$

4.2.5 Restricciones

4.2.5.1 Evitar enviar más bienes de los que se dispone

Como en todo problema de transporte, es necesario asegurar que solo se puedan transportar bienes que se encuentren en el inventario. Esto queda descrito por la siguiente restricción, que indica que, en cualquier período t , la suma de la cantidad bienes que sean transportados desde el nodo j hacia los demás nodos adyacentes k (bienes que salen desde j) no debe ser superior al inventario total en el nodo j :

$$\sum_k Transp_{j,k,t} \leq Inv_{j,t} \quad , para todo nodo j y período t$$

Para considerar diferentes tipos de bienes y vehículos, esta restricción se puede expandir a:

$$\sum_{k,v} Transp_{j,k,v,i,t} \leq Inv_{j,i,t} \quad , para todo nodo j, bien i y período t$$

4.2.5.2 Evitar usar más vehículos de los que se dispone

De manera análoga, se debe garantizar que no se intente usar más vehículos de los que se dispone para transportar los bienes. Esto queda descrito por la siguiente restricción, que indica que, en cualquier período t , la suma de los vehículos que sean movilizados desde el nodo j hacia los demás nodos adyacentes k (vehículos que salen desde j) no debe ser superior a la cantidad de vehículos disponibles en el nodo j :

$$\sum_k Veh_{j,k,t} \leq VehDisponibles_{j,t} \quad , para todo nodo j y período t$$

Para considerar diferentes tipos de vehículos, esta restricción se puede expandir a:

$$\sum_k Veh_{j,k,v,t} \leq VehDisponibles_{j,v,t} \quad , para todo nodo j, vehículo v y período t$$

4.2.5.3 Evitar sobrepasar la capacidad de los vehículos

La cantidad de bienes que serán transportados será limitada también por la capacidad de los vehículos que se tengan disponibles, tanto de volumen, como peso. Esto queda descrito por las siguientes restricciones, que establecen que, en cualquier período t , la cantidad de bienes que se transporten de j a k no debe ser superior a la capacidad total de la cantidad de vehículos que se movilicen de j a k :

$$Transp_{j,k,t} * Volumen \leq Veh_{j,k,t} * CapacidadVehV$$

$$Transp_{j,k,t} * Peso \leq Veh_{j,k,t} * CapacidadVehW$$

, para cada par de nodos j, k y período t

Para considerar diferentes tipos de bienes y vehículos, estas restricciones se pueden expandir a:

$$\sum_i Transp_{j,k,v,i,t} * Volumen_i \leq Veh_{j,k,v,t} * CapacidadVehV_v$$

$$\sum_i Transp_{j,k,v,i,t} * Peso_i \leq Veh_{j,k,v,t} * CapacidadVehW_v$$

, para cada par de nodos j, k , tipo de vehículo v y período t

4.2.5.4 Balance en el inventario

El movimiento de los bienes entre los diferentes nodos actualizará el inventario en cada período, generando reglas de balance de inventario. De esta manera, el inventario al comienzo del período t en el nodo k será equivalente al inventario que había al inicio del período anterior $t-1$ menos la cantidad de bienes que se consumieron durante dicho período $t-1$, menos la cantidad de bienes que salieron de la ubicación actual para ser transportados a otros destinos, más los bienes que acaban de llegar de otros lugares (los cuales partieron en $t-1$). Esta regla queda definida por la siguiente expresión:

$$Inv_{k,t} = Inv_{k,t-1} - Consumo_{k,t-1} - \sum_j Transp_{k,j,t-1} + \sum_j Transp_{j,k,t-1}$$

, para cada nodo k y período $t \geq 1$

Para considerar diferentes tipos de vehículos y bienes, esta restricción puede expandirse a:

$$Inv_{k,i,t} = Inv_{k,i,t-1} - Consumo_{k,i,t-1} - \sum_{j,v} Transp_{k,j,v,i,t-1} + \sum_{j,v} Transp_{j,k,v,i,t-1}$$

, para cada nodo k , bien i y período $t \geq 1$

4.2.5.5 Balance en la cantidad de vehículos disponibles

De manera análoga, el movimiento de los bienes entre los diferentes nodos también actualizará la cantidad de vehículos disponibles, generando reglas de balance de vehículos disponibles. De esta manera, la cantidad de vehículos disponibles al comienzo del período t en el nodo k será equivalente a la cantidad de vehículos que había al inicio del período anterior $t-1$ menos la cantidad de bienes que salieron de la ubicación actual para ser movilizarse a otros destinos, más los vehículos que acaban de llegar de otros lugares (los cuales partieron en $t-1$). Esta regla queda definida por la siguiente expresión:

$$VehDisponibles_{k,t} = VehDisponibles_{k,t-1} - \sum_j Veh_{k,j,t-1} + \sum_j Veh_{j,k,t-1}$$

, para cada nodo k y período $t \geq 1$

Para considerar diferentes tipos de vehículos, esta restricción puede expandirse a:

$$VehDisponibles_{k,t} = VehDisponibles_{k,t-1} - \sum_{j,v} Veh_{k,j,v,t-1} + \sum_{j,v} Veh_{j,k,v,t-1}$$

, para cada nodo k y período $t \geq 1$

4.2.5.6 Determinación del consumo

La decisión de cuántos bienes se consumen en un nodo para satisfacer su demanda está limitada por la demanda existente, así como la cantidad de bienes disponibles en ese momento. Esto queda representado por la siguiente restricción:

$$Consumo_{k,t} = \min(Demanda_{k,t}, Inv_{k,t}), \text{ para cada nodo } k \text{ y período } t$$

Para considerar diferentes tipos de productos, la restricción puede expandirse a

$$Consumo_{k,i,t} = \min(Demanda_{k,i,t}, Inv_{k,i,t}), \text{ para cada nodo } k, \text{ bien } i \text{ y período } t$$

4.2.5.7 Actualización de la demanda

El valor del consumo en cada período traerá como consecuencia la reducción de la demanda, para lo cual se tienen las siguientes reglas:

$$Demanda_{k,t} = Demanda_{k,t-1} - Consumo_{k,t-1}$$

, para cada nodo k y período $t \geq 1$

Para considerar diferentes tipos de bienes, esta restricción puede expandirse a:

$$Demanda_{k,i,t} = Demanda_{k,i,t-1} - Consumo_{k,i,t-1}$$

, para cada nodo k , bien i y período $t \geq 1$

4.2.5.8 Condiciones iniciales del problema

Para el período inicial, las variables **Demanda**, **Inventario** y **VehDisponibles** se inicializarán con los parámetros **Demanda0**, **Inventario0** y **VehDisponibles0**, respectivamente:

$$Demanda_{k,0} = Demanda0_k$$

$$Inv_{k,0} = Inv0_k$$

$$VehDisponibles_{k,0} = VehDisponibles0_k$$

, para cada nodo k

Para considerar diferentes tipos de bienes, estas restricciones pueden expandirse a:

$$Demanda_{k,i,0} = Demanda0_{k,i}$$

$$Inv_{k,i,0} = Inv0_{k,i}$$

$$VehDisponibles_{k,i,0} = VehDisponibles0_{k,i}$$

, para cada nodo k y bien i

4.2.6 Rango de existencia

Dado que todas las variables y parámetros a excepción de los parámetros referentes a volumen y peso representan cantidades discretas, el rango de existencia es el conjunto de los números enteros no negativos: $Z_{\geq 0}$. El rango de existencia de los parámetros de volumen y peso es el conjunto de los números reales no negativos: $R_{\geq 0}$.

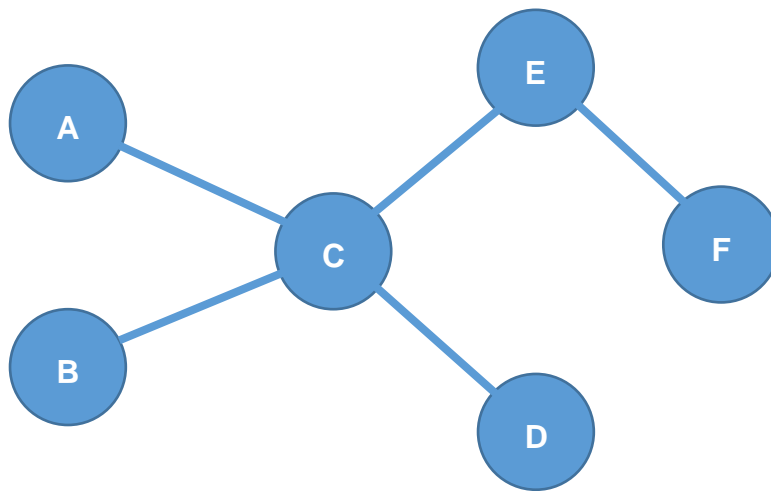
4.3 Relación con el objetivo

Esta formulación describe en su totalidad el problema que se plantea resolver en el proyecto de tesis mediante algoritmos de optimización metaheurísticos y algoritmos de optimización de programas lineales. Para cada uno de los algoritmos, se requerirá adaptar esta formulación según corresponda.

4.4 Validación de la construcción

Con el fin de ejemplificar y realizar una validación de la formulación previamente planteada, se propone el siguiente ejemplo.

Sea la siguiente red de distribución con $K=6$ nodos, tal que la distancia entre cada par de nodos es igual a 5 unidades ($Distancia_{jk} = 5$):



Sea un horizonte de tiempo de 4 días, donde cada día corresponde a un período ($T=4$). La información de inventario y demanda inicial ($t=0$), así como la disponibilidad de vehículos inicial es la siguiente:

Nodo ($k, t=0$)	Inventario (Inv_{k0})	Demanda ($Demanda_{k0}$)	Vehículos Disponibles ($VehDisp_{k0}$)
A	0	0	3
B	40	0	5
C	30	0	0
D	0	20	0
E	0	30	0
F	0	10	0

Sea la capacidad de volumen de los vehículos de 20 unidades (**CapacidadVehV** = 20) y la capacidad de peso de los vehículos de 20 unidades (**CapacidadVehW** = 20). Asimismo, sea el costo de transporte de los vehículos igual a 5 unidades por unidad de distancia (**CostoTransp** = 5). Finalmente, para este ejemplo, sea el peso y volumen de los bienes a distribuir igual a 2 unidades (**Volumen** = 2, **Peso** = 2).

Obsérvese que en este problema será necesario que se envíen vehículos vacíos desde A hacia C, con el fin de recoger y movilizar los bienes de C a los puntos de demanda (D, E, F).

Después de ejecutar algún algoritmo de optimización, obtenemos los siguientes valores para las variables de decisión:

- En $t=0$, enviar 3 vehículos conteniendo 10 bienes cada uno desde B a C, y enviar 3 vehículos vacíos desde A a C.

Veh_{jk0} / Transp_{jk0}	A	B	C
A			3 / 0
B			3 / 30

Esta decisión actualiza las variables auxiliares Inventario, Consumo y Vehículos Disponibles en el siguiente período ($t=1$), según las reglas de balance de inventario. De esta manera, en el ejemplo a continuación **Inv_{B,1}** representa la cantidad de bienes que hay en el nodo B al comienzo del período 1, **Inv_{B,0}** representa la cantidad de bienes que había en el nodo B al comienzo del período 0, **Consumo_{B,0}** representa la cantidad de bienes que se consumen en el nodo B en el período 0 y **Transp_{B,j}** representa la cantidad de bienes que se transportan desde B hacia algún nodo j en el período 0:

$$\begin{aligned}
 Inv_{B,1} &= Inv_{B,0} - Consumo_{B,0} - \sum_j Transp_{B,j,0} + \sum_j Transp_{j,B,0} \\
 &= 40 - 0 - 30 + 0 = 10 \\
 Inv_{C,1} &= Inv_{C,0} - Consumo_{C,0} - \sum_j Transp_{C,j,0} + \sum_j Transp_{j,C,0} \\
 &= 30 - 0 - 0 + 30 = 60
 \end{aligned}$$

En este par de ejemplos se puede ver que el inventario en B se reduce de 40 unidades a 10 unidades debido a que en el período anterior salieron 30 unidades desde B hacia C. De la misma manera, el inventario en C aumenta de 30 a 60 debido a que en el período anterior se movilizaron 30 unidades hacia C desde B.

Nodo (k, t=1)	Inventario (Inv_{k1})	Demanda (Demanda_{k1})	Consumo (Consumo_{k1})	Vehículos Disponibles (VehDisp_{k1})
A	0	0	0	0
B	10	0	0	2
C	60	0	0	6
D	0	20	0	0
E	0	30	0	0
F	0	10	0	0

- En t=1, enviar 2 vehículos conteniendo 10 bienes cada uno desde C a D, y enviar 4 vehículos conteniendo desde C a E.

Veh_{jk1} / Transp_{jk1}	D	E	F
C	2 / 20	4 / 40	

De manera similar, esto actualiza las variables auxiliares:

Nodo (k, t=2)	Inventario (Inv_{k2})	Demanda (Demanda_{k2})	Consumo (Consumo_{k2})	Vehículos Disponibles (VehDisp_{k2})
A	0	0	0	0
B	10	0	0	2

C	0	0	0	0
D	20	20	20	2
E	40	30	30	4
F	0	10	0	0

- Al llegar los vehículos a C y D, se satisface la demanda de estos puntos y quedan sobrando 10 unidades en E, las cuales serán destinadas al nodo F. Finalmente, en $t=2$, enviar 1 vehículo conteniendo 10 bienes desde E a F.

Veh_{jk2} / Transp_{jk2}	D	E	F
E			1 / 10

Nodo (k, t=3)	Inventario (Inv_{k3})	Demanda (Demanda_{k3})	Consumo (Consumo_{k3})	Vehículos Disponibles (VehDisp_{k3})
A	0	0	0	0
B	10	0	0	2
C	0	0	0	0
D	0	0	0	2
E	0	0	0	3
F	10	10	10	1

Finalmente, una vez que los 10 últimos bienes llegan a F y se consumen, se observa que en $t=4$ ya no existe demanda pendiente de atención:

Nodo (k, t=4)	Inventario (Inv _{k4})	Demanda (Demanda _{k4})	Consumo (Consumo _{k4})	Vehículos Disponibles (VehDisp _{k4})
A	0	0	0	0
B	10	0	0	2
C	0	0	0	0
D	0	0	0	2
E	0	0	0	3
F	0	0	0	1

El valor de las funciones objetivo para esta solución es la siguiente:

$$\sum_{k,t \geq 1} Demanda_{k,t} = (20 + 30 + 10) + (20 + 30 + 10) + (10) + (0) = 130$$

$$\sum_{j,k,t} CostoTransp * Distancia_{j,k} * Veh_{j,k,t} = (5 * 5 * 6) + (5 * 5 * 6) + (5 * 5 * 1) = 325$$

En la primera función objetivo se suma el total de la demanda en todos los nodos por cada período, mientras que en la segunda función objetivo se acumulan los costos de transporte por el desplazamiento de todos los vehículos en cada período.

Capítulo 5. Definición de las estructuras que soporten los datos y el algoritmo para la resolución del problema de distribución de ayuda humanitaria

5.1 Introducción

Una vez formulado el problema, debemos definir las estructuras de datos que representarán los parámetros y variables del problema, para que sean utilizadas durante la ejecución del algoritmo genético. Una vez definidas, se presentará la definición del cromosoma a partir de las variables de decisión.

5.2 Resultado

5.2.1 Estructuras de datos para los parámetros iniciales y variables auxiliares del problema

El resumen de la lista de parámetros y variables auxiliares definidas en el capítulo anterior es la siguiente:

- Parámetros
 - **K**: número de nodos en la red de distribución
 - **V**: número de tipos de vehículos
 - **I**: número de tipos de bienes
 - **T**: número de períodos del horizonte de planificación
 - **Distancia_{jk}**: distancia entre los nodos j y k
 - **Demanda0_{ki}**: demanda inicial de bienes de tipo i en el nodo k
 - **Inv0_{ki}**: inventario inicial de bienes de tipo i en el nodo k
 - **CapacidadVehV_v**: capacidad (volumen) de vehículos de tipo v
 - **CapacidadVehW_v**: capacidad (peso) de vehículos de tipo v
 - **CostoTransp_v**: costo de transporte de vehículos de tipo v
 - **VehDisponibles0_{kv}**: cantidad inicial de vehículos de tipo v en el nodo k
 - **Volumen_i**: volumen de los bienes de tipo i
 - **Peso_i**: peso de los bienes de tipo i
- Variables auxiliares
 - **Inv_{kit}**: inventario de bienes de tipo i en el nodo k y período t
 - **Demanda_{kit}**: demanda de bienes de tipo i en el nodo k y período t
 - **Consumo_{kit}**: consumo de bienes de tipo i en el nodo k y período t

- ***VehDisponibles_{kvt}***: cantidad de vehículos de tipo v en el nodo k y período t

Debido a que los primeros cuatro parámetros son escalares (K, V, I, T), su representación será la misma. Asimismo, el parámetro Distancia será representado por una matriz de distancias de dimensiones [K, K]:

Arreglo de reales [K, K] ***Distancia***;

Los parámetros de capacidad y costo de transporte serán agrupados en la clase vehículo:

```
Clase Vehículo {
    Entero idTipoVehiculo;
    Real CapacidadVehV;
    Real CapacidadVehW;
    Real CostoTransp;
}
```

Los parámetros de volumen y peso serán agrupados en la clase bien:

```
Clase Bien {
    Entero idTipoBien;
    Real Volumen;
    Real Peso;
}
```

Ahora, las variables que varíen en el tiempo (***Demanda***, ***Inv***, ***VehDisponibles***, ***Consumo***) serán agrupados en la clase período y se inicializarán con los parámetros correspondientes (***Demanda0***, ***Inv0***, ***VehDisponibles0***) en el período 0:

```
Clase Período {
    Entero idPeríodo;
    Arreglo de enteros [K, I] Demanda;
    Arreglo de enteros [K, I] Inv;
    Arreglo de enteros [K, I] Consumo;
    Arreglo de enteros [K, V] VehDisponibles;
}
```

Finalmente, para agrupar todas las estructuras de datos de los parámetros y variables auxiliares, se ha definido la siguiente clase Problema:

```

Clase Problema {
    Entero K;
    Entero V;
    Entero I;
    Entero T;
    Arreglo de reales [K, K] Distancia;
    Lista<Vehículo> Vehículos;
    Lista<Bien> Bienes;
    Lista<Período> Períodos;
}

```

5.2.2 Variables de decisión y cromosoma

El resumen de las variables de decisión que se formularon en el capítulo anterior es el siguiente:

- **Veh_{jkt}** , que indica la cantidad de vehículos de tipo v que se movilizarán entre cada par de nodos j y k en cada período t .
- **$Transp_{jkvit}$** , que indica la cantidad de bienes de tipo i que se transportan en vehículos de tipo v desde el nodo j hacia k en el período t .

Estas variables de decisión son las que describen una posible solución para el problema de optimización, por lo cual serán parte del cromosoma del algoritmo genético. Los valores posibles de los índices j y k van desde 1 hasta la cantidad total de nodos en la red de distribución (**K**). Los valores posibles del índice v van desde 1 hasta la cantidad total de tipos de vehículos a usarse en el problema (**V**). Los valores posibles del índice i van desde 1 hasta la cantidad total de tipos de bienes a usarse en el problema (**I**). Finalmente, los valores posibles del índice t van desde 0 hasta el número de períodos definido en el horizonte de planificación (**T**).

De manera similar a la sección anterior, las variables se pueden dividir por períodos, de la siguiente manera:

```

Clase Cromosoma {
    Entero idCromosoma;
    Lista<Período_Transporte> Períodos;
}

```

En cada elemento de la lista **Períodos** se podrá ver cuál fue la decisión de transporte (tanto para bienes como vehículos) que se tomó en un período dado. Esta estructura de datos contendrá la información de cuál fue el flujo de transporte de cada tipo de vehículos así como los bienes que llevaba cada vehículo, de la siguiente manera:

```
Clase Período_Transporte {  
    Entero idPeríodo;  
    Lista<Movimiento_Vehículo> Vehículos;  
}
```

Así, el tamaño de la lista **Vehículos** será igual a la cantidad de tipos de vehículos (**V**) que se hayan definido. Cada elemento de la lista **Vehículos** contendrá la información de cuál fue el movimiento de los vehículos en la red de distribución y cuáles eran los bienes que contenían:

```
Clase Movimiento_Vehículo {  
    Entero idTipoVehículo;  
    Lista<Arista> Aristas;  
}
```

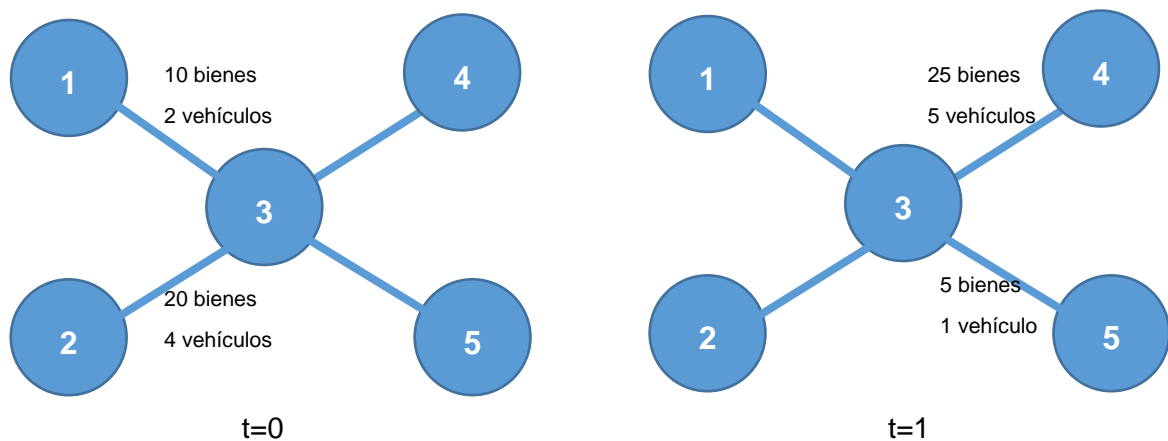
La clase **Movimiento_Vehículo** guarda la información del movimiento de los vehículos de un tipo dado en la red de distribución. Para representar la red de distribución de una manera eficiente se está usando la representación de lista de aristas. En estas aristas se encuentra finalmente la información de las decisiones de transporte:

```
Clase Arista {  
    Entero idNodoOrigen;  
    Entero idNodoDestino;  
    Entero VehículosMovilizados;  
    Arreglo de enteros [I] BienesMovilizados;  
}
```

De esta manera, la clase **Arista** almacena la información del nodo de origen y de destino de dicha arista, así como la cantidad de vehículos movilizados y la cantidad de bienes que se movilaron en dichos vehículos, por cada tipo de bien. Por ello, el tamaño del arreglo **BienesMovilizados** es **I**, que indica el número de tipos de bienes. El valor de la variable **VehículosMovilizados** es equivalente al valor de la variable de decisión **Veh**, mientras que el valor de cada elemento del arreglo **BienesMovilizados** es equivalente

al valor de la variable de decisión **Transp.** Así, **VehículosMovilizados** es un número entero que representa la cantidad de vehículos (de un tipo dado) que se movilizan desde un nodo origen a un nodo destino en un determinado período, mientras que **BienesMovilizados** es un arreglo de enteros que representa la cantidad de bienes (por cada tipo de bienes) que lleva cada vehículo. Estas son las variables principales del cromosoma.

A continuación se presenta un ejemplo de un cromosoma, para un escenario con un vehículo, un tipo de bien de distribución y la siguiente red de distribución en $t=0$ a la izquierda y $t=1$ a la derecha:



En el presente ejemplo se puede ver cómo se decide llevar 10 bienes en 2 vehículos desde el nodo 1 al nodo 3, y 20 bienes en 4 vehículos desde el nodo 2 al nodo 3, todo esto en el período inicial ($t=0$), mientras que en $t=1$ se decide llevar 25 bienes en 5 vehículos del nodo 3 al nodo 4, y 5 bienes en 1 vehículo desde el nodo 3 al nodo 5. Como se mencionó anteriormente, este plan de distribución representa una posible solución al problema de optimización. Para este ejemplo, considere que hay solo un tipo de vehículo y un tipo de bien (para mantener la simplicidad del ejemplo).

Siguiendo la representación de cromosoma definida anteriormente, estas decisiones quedarían representadas de la siguiente manera:

```

cromosoma = Cromosoma {
    idCromosoma = 1;
    Períodos = [ //hay 2 períodos
        Objeto Período_Transporte {
            idPeríodo = 0; // t=0
            Vehículos = [ // solo hay 1 tipo de vehículo
                Objeto Movimiento_Vehículo
            ];
        },
        Objeto Período_Transporte {
            idPeríodo = 1; // t=1
            Vehículos = [ // solo hay 1 tipo de vehículo
                Objeto Movimiento_Vehículo
            ];
        }
    ];
}

```

Ahora, para el período t=0, el valor del objeto ***Movimiento_Vehículo*** sería:

```

Objeto Movimiento_Vehículo {
    idTipoVehículo = 1;
    Aristas = [
        Objeto Arista { // se movilizan 10 bienes del nodo 1 al nodo 3
            idNodoOrigen = 1;
            idNodoDestino = 3;
            VehículosMovilizados = 2;
            BienesMovilizados = [10]; // solo hay 1 tipo de bien
        },
        Objeto Arista { // se movilizan 20 bienes del nodo 2 al nodo 3
            idNodoOrigen = 2;
            idNodoDestino = 3;
            VehículosMovilizados = 4;
            BienesMovilizados = [20];
        },
        ... // y así para las siguientes aristas de la red
    ];
}

```

De manera similar, para el período $t=1$, el valor del objeto **Movimiento_Vehículo** sería:

```
Objeto Movimiento_Vehículo {  
    idTipoVehículo = 1;  
    Aristas = [  
        Objeto Arista { // se movilizan 25 bienes del nodo 3 al nodo 4  
            idNodoOrigen = 3;  
            idNodoDestino = 4;  
            VehículosMovilizados = 5;  
            BienesMovilizados = [25];  
        },  
        Objeto Arista { // se movilizan 5 bienes del nodo 3 al nodo 5  
            idNodoOrigen = 3;  
            idNodoDestino = 5;  
            VehículosMovilizados = 1;  
            BienesMovilizados = [5];  
        },  
        ... // y así para las siguientes aristas de la red  
    ];  
}
```

De esta manera, se puede ver la organización de las estructuras de datos para almacenar las cantidades de vehículos y bienes transportados.

5.3 Relación con el objetivo

Estas estructuras de datos describen cómo serán representados los parámetros y variables descritos en la formulación del problema de optimización. De esta manera, dichas estructuras servirán de entrada para los algoritmos de optimización que vienen a continuación.

Capítulo 6. Diseño del algoritmo genético para el problema de optimización de distribución de ayuda humanitaria

6.1 Introducción

Una vez definidas las estructuras de datos, se procederá a describir el algoritmo genético que será utilizado como método metaheurístico para resolver el problema de optimización de ayuda humanitaria. Para poder realizar la optimización considerando múltiples objetivos, se utilizará una variante conocida como Non-dominating Sorting Genetic Algorithm II (NSGA-II), la cual se describirá posteriormente.

6.2 Esquema general del algoritmo genético

El esquema general del funcionamiento de un algoritmo genético es el siguiente:

1. **AlgoritmoGenético (N: tamaño población, D: tiempo límite, Iter: número de iteraciones)**
2. $P = \text{ConstruirPoblaciónInicial (N)}$
3. $\text{mejor_solución} = []$
4. Repetir
5. $\text{EvaluarAptitud (P)}$
6. Para cada individuo P_i hacer
7. Si $\text{mejor_solución} = []$ o $\text{Aptitud (P}_i) > \text{Aptitud (mejor_solución)}$
8. $\text{mejor_solución} = P_i$
9. $\text{Padre1, Padre2} = \text{SeleccionarPadres (P)}$
10. $\text{Hijo1, Hijo2} = \text{Cruce (Padre1, Padre2)}$
11. $\text{Hijo1, Hijo2} = \text{Mutación (Hijo1), Mutación (Hijo2)}$
12. $\text{Individuo1, Individuo2} = \text{SeleccionarIndividuosAEliminar (P)}$
13. $P = P \cup \{\text{Hijo1, Hijo2}\} - \{\text{Individuo1, Individuo2}\}$
14. Hasta que el tiempo **D** se agote o se llegue al límite de **Iter** iteraciones
15. Retornar mejor_solución

A partir de este esquema, se detallarán las funciones utilizadas por el algoritmo.

6.3 Construcción de la población inicial

Debido a que el cromosoma representa las variables **Veh** y **Transp**, la construcción de cada individuo se da en dos fases: primero asignar la variable **Veh** de forma aleatoria, y luego la variable **Transp** de forma aleatoria.

1. **ConstruirPoblaciónIncial (N: tamaño población)**

2. $VehDisponibles_0 = VehDisponibles0$

3. Para $t = 0$ hasta **T** hacer

4. $Veht = Crea$

6.3.1 Construcción de la variable Veh

Debido a que la variable Veh representa el movimiento de los vehículos a lo largo del tiempo, existe una dependencia temporal, lo cual implica que la variable **Veh_t** se asigne después de asignar la variable **Veh_{t-1}**. Como punto de partida, tenemos el parámetro **VehDisponibles0**, que describe la cantidad inicial de vehículos disponibles en cada nodo. De esta manera, el procedimiento para crear la variable **Veh_t** consistirá en ver cuántos vehículos disponibles hay en **VehDisponibles_t**, decidir de forma aleatoria el valor de **Veh_t**, actualizar la cantidad de vehículos disponibles en **VehDisponibles_{t+1}**, decidir de forma aleatoria el valor de **Veh_{t+1}** y así sucesivamente:

1.

2. $VehDisponibles_0 = VehDisponibles0$

3. Para $t = 0$ hasta **T** hacer

4. $Veht = CrearVariableVehEnT (VehDisponiblest)$

5. Si $t < T$ entonces

6. $VehDisponiblest+1 = ActualizarVehDisponibles ($

7. $VehDisponiblest =$

Tomar decisiones sobre el envío de vehículos de forma aleatoria en cada instante del tiempo. Dependiendo del origen de los vehículos, llenarlos con bienes de manera aleatoria. Repetir para los siguientes instantes de tiempo actualizando las estructuras auxiliares.

6.4 Evaluación de la aptitud

La aptitud es una tupla representada por dos expresiones objetivo.

6.5 Selección

El criterio para ordenar individuos es de acuerdo a la dominancia, los individuos dominantes tienen mayor probabilidad de ser seleccionados. Considerar diversidad para cada capa de Pareto.

6.6 Cruce

El cruce toma decisiones de cada padre de forma aleatoria e intercalada.

6.7 Mutación

La mutación deshace una decisión de transporte (arrastra la actualización, backprop)

6.8 Criterio de parada

Early stopping y tiempo máximo

Capítulo 7. Conclusiones y trabajos futuros

7.1 Conclusiones

7.2 Trabajos futuros

Referencias

- Aguilar, M., & Zapata, C. (2016). Integrating UCD and an Agile Methodology in the Development of a Mobile Catalog of Plants. En M. Soares, C. Falcão, & T. Z. Ahram (Eds.), *Advances in Ergonomics Modeling, Usability & Special Populations: Proceedings of the AHFE 2016 International Conference on Ergonomics Modeling, Usability & Special Populations, July 27-31, 2016, Walt Disney World®, Florida, USA* (pp. 75–87). Cham: Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-41685-4_8
- Krusche, S., & Bruegge, B. (2014). User feedback in mobile development. En *MobileDeLi 2014 - Proceedings of the 2nd International Workshop on Mobile Development Lifecycle, Part of SPLASH 2014* (pp. 25–26). Recuperado a partir de <http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-84921489617&partnerID=40&md5=0198a5715bec4bf6608454ce82f098d2>

Anexos

Los anexos deben ser referenciados desde el documento. Por ejemplo debe existir un párrafo donde se diga que determinada información puede ser vista en el Anexo X

Los anexos pueden numerarse con letras o número de acuerdo a su preferencia.