

**Nota de Aceptación:**

**Proyecto de Diseño Aprobado**, en cumplimiento de los requisitos exigidos por la Pontificia Universidad Javeriana Cali para optar el título de Ingeniero Industrial.



---

HERNÁN CAMILO ROCHA NIÑO  
Decano de la Facultad de Ingeniería y Ciencias



---

JORGE ENRIQUE ÁLVAREZ PATIÑO  
Director Carrera Ingeniería Industrial



---

DANIEL MORILLO TORRES  
Director(a) Proyecto de Diseño



---

FABIÁN ANDRÉS CASTAÑO  
GIRALDO  
Jurado 1



---

CLAUDIA LORENA ARIAS SÁNCHEZ  
Jurado 2

**DE: Daniel Morillo Torres, PhD**

**PARA: Álvaro Figueroa Cabrera, MSc**

**ASUNTO: Aval Última Entrega Proyecto de Diseño II**

**FECHA: 21 de junio de 2021**

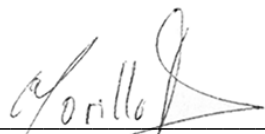
Estimado profesor,

Reciba mi cordial saludo.

Como director del proyecto de diseño identificado con el código 2020206 titulado <*Diseño de Modelo de Ruteo Eficiente para Búsqueda de Minas Antipersona en Colombia*>, avalo el avance realizado por los estudiantes Santiago Gamboa Ortega y Santiago Serna Zapata, plasmado en la última entrega del documento de dicho proyecto.

Agradezco su valiosa atención.

Atentamente,



---

**Daniel Morillo Torres, PhD**  
Profesor del Departamento de  
Ingeniería Civil e Industrial. Facultad  
de Ingeniería



# Diseño de Modelo de Ruteo Eficiente para Búsqueda de Minas Antipersona en Colombia

Santiago Gamboa Ortega<sup>a,c</sup>, Santiago Serna Zapata<sup>a,c</sup>,

Daniel Morillo Torres<sup>b,c</sup>

<sup>a</sup>Estudiante de Ingeniería Industrial

<sup>b</sup>Profesor, Director del Proyecto de Grado, Departamento de Ingeniería Civil e Industrial

<sup>c</sup>Pontificia Universidad Javeriana, Cali, Colombia

---

## Resumen en español

En este documento se contextualiza la problemática de las Minas Antipersona (MAP) en Colombia, y se recopilan eventos contemporáneos que demuestran la persistencia de esta en el país. Tras consultar los Estándares de Desminado Humanitario en el territorio, se plantearon dimensiones importantes para medir el desempeño de esta tarea, que posteriormente fueron respaldados al evaluar los requerimientos de los *stakeholders* del proyecto. Se generaron escenarios que emulan el contexto operacional del desminado, para ejecutar un algoritmo genérico de recorrido sobre estos y así obtener *KPI's* simulados del desempeño actual. Se identificaron oportunidades de mejora del algoritmo actual de ruteo, para revisar literatura relacionada al problema del proyecto y de este modo seleccionar algunas metodologías potenciales que solucionen las insuficiencias del método actual. Se diseñó un modelo que planea rutas en la etapa de Detección e Investigación del Área Peligrosa (AP), de tal forma, que se minimice tanto el riesgo como el costo incurrido por el agente desminador durante el recorrido, y a su vez garantice un cubrimiento completo. Se evaluó el rendimiento de dicho modelo, midiendo los indicadores *KPI* establecidos, evidenciando una mejora significativa respecto a los resultados anteriores.

---

## Abstract

This document contextualizes the problem of Antipersonnel Mines in Colombia (MAP), and contemporary events are compiled that demonstrate its persistence in the country. After consulting the Humanitarian Demining Standards in the territory, important dimensions were raised to measure the performance of this task, which were subsequently supported when evaluating the requirements of the project stakeholders. Scenarios were generated that emulated the operational context of the demining, to run a generic algorithm on these and thus obtain simulated *KPI's* of the current performance. Opportunities for improvement of the current routing algorithm were identified to review literature related to the project problem and thus select some potential methodologies that solve the shortcomings of the current method. A model was designed that plans routes in the Dangerous Area (AP) at Detection and Investigation stage, in such a way that both the risk and the cost incurred by the demining agent during the route are minimized, and in turn guarantee complete coverage. The performance of said model was evaluated, measuring the established *KPI* indicators, showing a significant improvement over the previous results.

*Palabras claves: Desminado Humanitario, Path Planning, Coverage Path, Route Optimization.*

---

## Tabla de contenido

I. PROJECT CHARTER .....	4
II. DEFINIR .....	6
A. Contexto y Justificación .....	6
B. Grupos de Interés .....	9
C. Requerimientos .....	10
1) Restricciones de diseño .....	11
2) Especificaciones de diseño .....	12
3) Leyes, normas y estándares .....	13
III. MEDIR .....	14

A.	Plan de Recolección de Datos.....	14
1)	Asignación de obstáculos a celdas: .....	14
2)	Asignación de riesgo y costo de celdas .....	16
B.	Exploración de Mercado.....	18
IV.	ANALIZAR.....	21
A.	Análisis de Oportunidad .....	21
B.	Revisión de literatura.....	23
C.	Exploración de ideas y selección de alternativa .....	26
D.	Objetivos.....	27
E.	Plan de trabajo (PdT).....	28
V.	DESARROLLO DEL DISEÑO DE LA SOLUCIÓN .....	29
A.	Modelo.....	29
1)	Conjuntos .....	29
2)	Parámetros.....	30
3)	Variables .....	30
4)	Restricciones .....	30
B.	Validación del Diseño Propuesto.....	33
1)	Eliminación de subtours aislados. ....	33
2)	Considerar subtours conectados a la ruta principal .....	37
3)	Considerar arcos usados en la misma dirección en varias ocasiones .....	38
4)	Considerar origen desconocido .....	40
VI.	VERIFICAR .....	41
A.	Medición de Impactos .....	41
B.	Estandarización de la Solución .....	45
C.	Conclusiones.....	45
D.	Recomendaciones .....	46
VII.	GLOSARIO .....	47
VIII.	REFERENCIAS .....	47
IX.	ANEXOS .....	49

## Índice de Tablas

TABLA I.	IDENTIFICACIÓN & PRIORIZACIÓN GRUPOS DE INTERÉS .....	9
TABLA II.	IMPACTO & INFLUENCIA DE GRUPOS DE INTERÉS .....	9
TABLA III.	REQUISITOS DE GRUPOS DE INTERÉS .....	10
TABLA IV.	ACCIDENTES CON MAP ANUALES ENTRE 2016-2020 SEGÚN TIPO DE TERRENO [Modificado de: [5]].	12
TABLA V.	CONSIDERACIONES ESPECIALES PARA LA GENERACIÓN DE OBSTÁCULOS .....	15
TABLA VI.	INDICADORES DE DESEMPEÑO A MEDIR .....	17

TABLA VII. APLICACIONES SOBRE PROBLEMAS SIMILARES .....	18
TABLA VIII. RESULTADOS DE INDICADORES DE DESEMPEÑO .....	21
TABLA IX. INDICADORES OBTENIDOS POR RUTA .....	22
TABLA X. DESCRIPCIONES DE PROBLEMAS TEÓRICOS SIMILARES, MÉTODOS DE SOLUCIÓN .....	24
TABLA XI. RESUMEN REVISIÓN DE LITERATURA .....	24
TABLA XII. COMPARACIÓN PROBLEMAS TEÓRICOS SIMILARES CON EL PROYECTO .....	26
TABLA XIII. PLAN DE TRABAJO .....	28
TABLA XXIX. KPI'S SCP Y VERIFICACIÓN DE METAS .....	43
TABLA XXX. TABLA DE ANEXOS .....	49

## Índice de Figuras

Fig. 1. Zonas pendientes de intervención en Colombia [5].....	7
Fig. 2. Cantidad de accidentes con MAP por departamento en Colombia Período 2016-2020 [Modificado de: [4]].....	8
Fig. 3. Modelo preliminar de la etapa de detección .....	13
Fig. 4. Cuadrícula con obstáculos altamente aglomerados .....	15
Fig. 5. Patrón Cruz (Marrón claro). Patrón Puntual (Negro, Verde Oscuro). .....	16
Fig. 6. Patrón Cuadrado (Azul oscuro). Patrón lineal (Azul Marina, Verde oscuro, Negro). .....	16
Fig. 7. Representación de mina: Mapa de riesgos (Arriba). Mapa de obstáculos (Abajo).....	16
Fig. 8. Mapa de obstáculos .....	17
Fig. 9. Mapa de riesgo y ruta de detección genérica .....	18
Fig. 10. Porcentaje de Área Cubierta .....	20
Fig. 11. Costo Total Porcentual .....	20
Fig. 12. Riesgo Asumido Porcentual .....	21
Fig. 13. Mapa de costo.....	22
Fig. 14. Mapa de riesgo .....	22
Fig. 15. Mapa de rutas .....	22
Fig. 16. Desaprovechar alcance .....	23
Fig. 17. Aprovechar alcance .....	23
Fig. 18. Subtours embebidos. a) Subtour aislado; b) Subtour embebido .....	33
Fig. 19. Dinámica de eliminación de subtours.....	34
Fig. 20. a) Subtour: Arcos efectivos; b) Solución posterior omitida debido a la restricción EAST aplicada al subtour en a).....	35
Fig. 21. Factibilidad de doble arco. a) Solución anterior; b) Solución posterior omitida por restricción con variable $x_{ij}$ .....	36
Fig. 22. a) Ruta sin subtours; b) Ruta con subtours embebidos .....	38
Fig. 23. Infactibilidad de rutas sin subtours embebidos. a) Ruta con subtour embebido; b) Ruta sin subtour .....	38
Fig. 24. Uso de arcos más de una vez. a) Solución óptima; b) Solución factible multi arco; c) Solución factible desfavorable..	39
Fig. 25. a) Ruta óptima con multi arco; b) Ruta óptima con subtours embebidos .....	39
Fig. 26. Origen y final dinámicos .....	40
Fig. 27. Indicador CTP SCP .....	42
Fig. 28. Indicador RAP SCP.....	42
Fig. 29. Comparación de valores objetivo .....	43
Fig. 30. Influencia de Beta. a) Beta= 0.2; b) Beta= 0.5; c) Beta= 0.8; d) Mapa de Riesgo; e) Mapa de Costo .....	44

## Índice de Tablas de anexos

TABLA XVI. BASE DE EVENTOS MAP/MUSE.....	Anexo 1
TABLA XVII. ACCIDENTES CON MAP ANUALES POR DEPARTAMENTO, EN PERÍODO (2016-2020) .....	Anexo 2
TABLA XVIII. SOSPECHAS DE CAMPOS CONTAMINADOS CON MAP POR DEPARTAMENTO, EN PERÍODO (2016-2020) .....	Anexo 2
TABLA XIX. CARACTERÍSTICAS DE TERRENO DONDE OCURRIÓ ACCIDENTE POR MAP, EN PERÍODO (2016-2020) .....	Anexo 2
TABLA XX. PLAN DE RECOLECCIÓN DE DATOS.....	Anexo 4
TABLA XXI. ALGORITMO DOWN-SLOPE.....	Anexo 5
TABLA XXII. INSTANCIAS DE PRUEBA.....	Anexo 7
TABLA XXIII. COMPARACIÓN ENTRE CRITERIOS.....	Anexo 8
TABLA XXIV. COMPARACIÓN BAJO CRITERIO DE COMPLEJIDAD.....	Anexo 8
TABLA XXV. COMPARACIÓN BAJO CRITERIO DE ADAPTABILIDAD.....	Anexo 8
TABLA XXVI. COMPARACIÓN BAJO CRITERIO DE APLICABILIDAD.....	Anexo 8
TABLA XXVI. COMPARACIÓN BAJO CRITERIO DE APLICABILIDAD.....	Anexo 8
TABLA XXVII. MATRIZ DE RESULTADOS AHP.....	Anexo 8
TABLA XXVIII. INSTANCIAS DE PRUEBA SCP.....	Anexo 11

## Índice de Figuras de anexos

Fig. 31. Grafo: Definición y diagramación .....	Anexo 3
Fig. 32. Celdas alrededor.....	Anexo 6
Fig. 33. Movimientos posibles.....	Anexo 6
Fig. 34. Archivos de cada instancia.....	Anexo 12
Fig. 35. Instancia genérica (gráfica).....	Anexo 12
Fig. 36. Estructura de los archivos. a) costmap; b) riskmap.....	Anexo 12
Fig. 37. Apariencia de los archivos de texto. a) costmap; b) riskmap.....	Anexo 12

## I.PROJECT CHARTER

Descripción ( <i>Business case</i> )	Planteamiento del problema ( <i>Problem statement</i> )		
En este documento se contextualiza la problemática de las Minas Antipersona (MAP) en Colombia, y se recopilan eventos contemporáneos que demuestran la persistencia de esta en el país. Tras consultar los Estándares de Desminado Humanitario en el territorio, se hicieron conjeturas sobre dimensiones importantes para el desempeño de la tarea, que posteriormente se confirmaron al evaluar los requerimientos de los <i>stakeholders</i> del proyecto. Se propone diseñar un modelo que permita planear rutas en la etapa de Detección e Investigación del Área Peligrosa (AP), de tal forma, que se minimice tanto el riesgo como el costo incurrido por el agente desminador durante el recorrido, mientras se maximiza el porcentaje de AP cubierta por el agente. Se generaron escenarios que emularan el contexto operacional del desminado, para ejecutar un algoritmo genérico de recorrido sobre estos y así obtener KPI's simulados del desempeño actual. Se identificaron oportunidades de mejora del algoritmo actual de ruteo, para revisar literatura relacionada al problema del proyecto y de este modo seleccionar algunas metodologías potenciales que solucionen las insuficiencias del método actual. Se analizan las metodologías seleccionadas bajo el proceso de evaluación <i>AHP</i> con el fin de determinar aquel modelo de solución base para el posterior diseño de la propuesta del presente proyecto.	Entre 2016 y 2020 se han registrado 318 accidentes con Minas Antipersonales (MAP). De acuerdo con cifras del Batallón de Desminado del Ejército, la relación entre el costo de elaborar una mina y el costo por retirarla es de 1 a 360. Una fuente confidencial describe que las decisiones en las operaciones de desminado se rigen bajo el costo y el riesgo presente en el Área Peligrosa (AP). Dado lo anterior, se propone generar un método que permita planear rutas en la etapa de Detección e Investigación del AP, de tal forma, que se minimice tanto el riesgo como el costo en el que incurre el agente desminador durante el recorrido, mientras se maximiza el porcentaje de AP cubierta por el agente.		
Impacto de los actores ( <i>Stakeholder's business needs</i> )	Restricciones	Especificaciones	Marco legal

<p>Ministerio de Defensa: Respalda el despeje de territorio contaminado por MAP al garantizar seguridad a las labores.</p> <p>Cruz Roja: Vigila y vela por el progreso de las misiones humanitarias de Desminado en todo el globo, garantizando el cumplimiento de los compromisos.</p> <p>DAICMA: Administrador de toda la materia de desminado: desde iniciar los procesos de investigación de campos sospechosos, la aprobación de labores de desminado, educación de la sociedad colombiana en riesgo de MAP, hasta la compilación de los resultados de dichas labores o aspectos relacionados a MAP.</p> <p>F</p> <p>Agentes desminadores: El buen desempeño en su labor afecta la calidad toda la operación de desminado.</p> <p>Grupos armados: La constante práctica de minado obstaculizaría el objetivo Primario de las misiones: descontaminar todo el territorio nacional.</p> <p>Población no combatiente: Genera las alertas de sospecha para la posterior evaluación de zonas peligrosas.</p>	<p>Presupuesto, parámetros de entrada y alcance.</p> <p>Alcance y riesgo.</p> <p>Alcance, Parámetros de entrada, riesgo y tecnología.</p> <p>Alcance, riesgo y tecnología.</p> <p>N/A</p> <p>Presupuesto</p>	<p>Uso eficiente del presupuesto para la guerra contrainsurgente.</p> <p>Reducir los accidentes con MAP de la población no combatiente.</p> <p>Estandarizar prácticas con nuevas tecnologías</p> <p>Difusión del proceso de desminado.</p> <p>Mejores métodos Actualización tecnológica</p> <p>N/A</p> <p>Educación en riesgo de minas; Mejora de seguridad</p>	<p>Decreto 3750 de 2011 (Art. 4 Parágrafo 1; Art. 6; Art. 7; Art. 9)</p> <p>Convención de Ottawa (Art. 6 Parágrafo 3; Art. 16)</p> <p>Decreto 3750 de 2011 (Art. 14)</p> <p>Decreto 007 de 2014</p> <p>Decreto 179 de 2019 (Art. 18)</p> <p>Ley 759 de 2002 (Art. 11; Art. 12)</p> <p>N/A</p> <p>Convenio de Ginebra, Protocolo II, 1949</p> <p>Convenio sobre ciertas armas convencionales, Protocolo adicional II, 1977</p>
--	--	---	---

#### Indicadores de Desempeño (KPI's)

Variable	Actualidad	Meta
Costo Total Porcentual	93%	<93%
Porcentaje de Área Cubierta	99%	=100%
Riesgo Asumido Porcentual	92%	<92%

#### Objetivo general (Goal statement)

Diseñar un modelo de ruteo eficiente para búsqueda de minas antipersona en Colombia que considere los costos incurridos por los desplazamientos en el terreno y el riesgo asumido por el agente que realiza la tarea.

#### Objetivos específicos (Project scope)

- Revisar y evaluar las alternativas de solución identificadas en la revisión de literatura para adaptarlo al problema estudiado.
- Diseñar y adaptar un modelo que permita generar rutas eficientes para la detección de minas antipersona a través de las metodologías exactas o heurísticas.
- Implementar el modelo diseñado mediante un lenguaje de programación con el fin de evaluar las instancias del problema y medir su desempeño respecto a los indicadores establecidos.
- Interpretar los indicadores resultantes del modelo diseñado, contrastándolos con las metas establecidas para cada uno, y así identificar y controlar la incapacidad de la solución.

#### Plan de Trabajo (Project Plan)

#### Equipo de trabajo (Team members)

Actividad	Fecha Inicio	Fecha Fin	Área IISE	Nombre	Rol
Establecer plan de búsqueda de información	1-feb-21	10-feb-21	N/A	Santiago Gamboa Ortega	Gatekeeper
Consolidar la información recopilada	10-feb-21	25-feb-21	11. Information Engineering	Santiago Serna Zapata	Standard Setter
Generar y discutir ideas para el diseño del método exacto	25-feb-21	27-feb-21	9. Engineering Management		
Generar y discutir ideas para el diseño del método heurístico	27-feb-21	2-mar-21	9. Engineering Management		
Modelar la metodología exacta	2-mar-21	6-mar-21	11. Information Engineering		
Estructurar el pseudocódigo del método heurístico	6-mar-21	10-mar-21	11. Information Engineering		
Realizar las modificaciones necesarias a los métodos de acuerdo con la orientación del director	10-mar-21	13-mar-21	11. Information Engineering		
Desarrollar los métodos en el lenguaje de programación más adecuado en cada caso	13-mar-21	27-mar-21	11. Information Engineering		
Realizar pruebas preliminares del funcionamiento de los métodos en las instancias generadas	27-mar-21	31-mar-21	11. Information Engineering		
Realizar los ajustes necesarios a los métodos	31-mar-21	3-abr-21	11. Information Engineering		
Ejecutar pruebas de los métodos sobre las instancias del problema para recopilar resultados de los indicadores	3-abr-21	7-abr-21	5. Quality & Reliability Engineering		
Elaborar las gráficas y tablas necesarias para interpretar la información de los indicadores de desempeño	7-abr-21	10-abr-21	5. Quality & Reliability Engineering		
Comparar los resultados obtenidos con los	10-abr-21	24-abr-21	11. Information Engineering		

métodos con los resultados reportados en la etapa MEDIR					
Realizar las modificaciones necesarias a los métodos de acuerdo con la orientación del director	24-abr-21	1-jun-21	11. Information Engineering		
Consolidar las soluciones exacta y heurística como un modelo integrado	1-jun-21	5-jun-21	14. Systems Design Engineering		

## II.DEFINIR

### A. Contexto y Justificación

Se estima que en la década de los 70's comienzan a aparecer minas antipersona en Colombia, gracias a que INDUMIL, la empresa estatal fabricante de armas, municiones y explosivos, inaugura en 1963 la fábrica de Explosivos Antonio Ricaurte, y en 1968 comienza a proveer de Minas Antipersonal (MAP) al ejército nacional con el fin de proteger batallones y líneas de comunicación [1], [2].

Las Fuerzas Armadas Revolucionarias de Colombia (FARC) y el Ejército de Liberación Nacional (ELN) comienzan a hacer uso de las MAP a mediados de los años 90's para la protección de áreas de cultivos ilícitos, así como para protegerse de las ofensivas de las fuerzas armadas [3]. Por su parte, estos grupos subversivos no utilizaban minas antipersona producidos por la industria militar (a menos que lograran incautar ilegalmente algunas) sino que lograron documentarse en técnicas guerrilleras para la implementación sencilla de Artefactos Explosivos Improvisados (AEI) [1].

Precisamente, fue la alta efectividad de la producción de estos AEI lo que generó el uso elevado de estos dispositivos en el marco bélico. En Colombia desminar es mucho más costoso que instalar MAP [3]. Estas cifras se elevaron en los años 90 y principios de los 2000 [3], cuando las FARC comenzaron a instalar masivamente minas antipersona a lo largo y ancho del territorio nacional, con el fin de reducir el avance paramilitar [1], así como para compensar las diferencias bélicas con los demás agentes armados, que como consecuencia se traducían en pérdida de influencia para ellos.

En Colombia, desde 1990 a octubre de 2020, se han registrado 11.947 víctimas por MAP y Munición sin Explosionar (MSE) de las cuales el 80,5% resultaron heridas, mientras que el 19,5% fallecieron [4]. El problema de contaminación por MAP sigue siendo una amenaza persistente aún en 2020, pese incluso a la desmovilización de ciertos agentes armados causantes de esta problemática. A pesar de los esfuerzos de cooperación internacional en los que participa el propio país en la tarea de desminado, los accidentes siguen siendo la realidad de muchos lugares del territorio nacional [5].

Se han reportado 318 accidentes con minas antipersonal a lo largo del país, como se observa en la Fig. 2, entre el período 2016-2020: 317 ocurrieron en zonas rurales, y tan solo un caso en área urbana (ver Anexo 2: Tabla X). Durante el mismo período, han habido 114 reportes de sospechas de minas antipersona (ver Anexo 2: TABLA VIII), que derivan en la inicialización de los procesos de investigación para descarte o confirmación de zonas sospechosas [6]. Adicionalmente, la Dirección para la Acción Integral contra Minas Antipersonal (DAICMA) sigue programando tareas de desminado humanitario, en el marco del Plan Estratégico 2020-2025 [7]. En la Fig. 1, se pueden observar en rojo las regiones que aún necesitan intervención a octubre de 2019 [7].

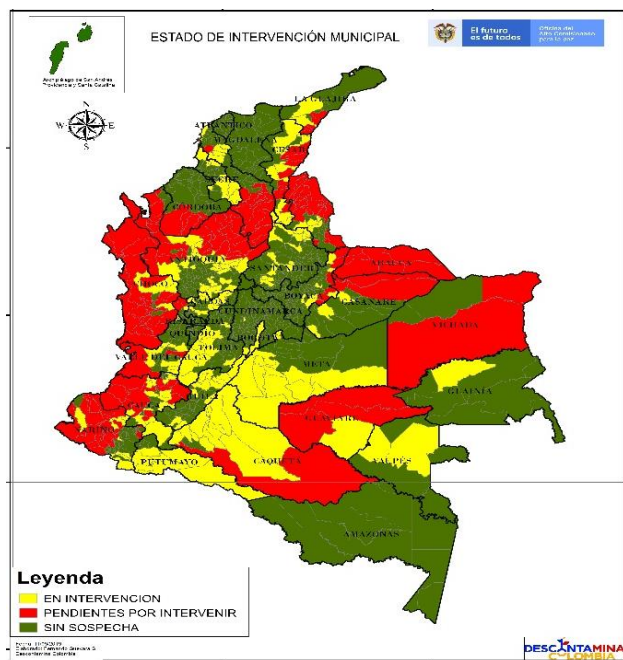


Fig. 1. Zonas pendientes de intervención en Colombia [5]

La labor que se lleva a cabo para descontaminar es arduo y complejo, dado que se deben garantizar el cubrimiento total de la superficie tanto en detección, desminado y el aseguramiento de la calidad [8], pues de lo contrario el riesgo de accidentes futuros sigue vigente. Por lo tanto, para poder transitar con seguridad se debe realizar una búsqueda exhaustiva por la mayor cantidad de terreno posible y para ello, se deben refinar las tácticas que permitan realizar la labor de desminado en el menor tiempo posible y con la mayor eficacia.

Con la erradicación de las MAP, a futuro se podrían observar beneficios como el aumento de la seguridad de la población civil; disminución de la contaminación ambiental; disminución de presupuesto para el desminado humanitario y el cumplimiento de Acuerdos de Paz de La Habana. En términos de mediano plazo, los beneficios incluirían la disminución de accidentes (fatales/no fatales) con MAP; reducción de poder bélico de insurgentes; disminución del alto uso de recursos en desminado humanitario, dado que en Colombia desminar es 360 veces más caro que instalar las MAP según estimaciones del Batallón de Desminado del Ejército [3].

Respecto al problema de optimización, se busca maximizar o minimizar un objetivo; para este caso de desminado, las características del proceso competen el uso del presupuesto para la tarea, la seguridad del personal y el tiempo que se requiera para desminar. El presupuesto al ser un recurso limitado y que está bajo el control de la Organización de Desminado Humanitario (ODH) debe ser tenido en cuenta en el objetivo; por otro lado, el riesgo al que se enfrentan los agentes desminadores también hace parte del objetivo ya que también puede ser controlado usando la metodología adecuada; el tiempo no se considera relevante en la propuesta, pues no es controlable debido a las diferencias de habilidad entre los agentes desminadores. Por otro lado, tanto el costo como el riesgo asumido en el desminado son dimensiones imprescindibles en cualquier decisión sobre el curso de acción a tomar respecto a las operaciones de desminado, de acuerdo con una organización de Desminado Humanitario (que solicitó discreción para difundir información).

La primera conjetura que se puede plantear, dado que coincide en varios documentos investigados, es que una característica fundamental del desminado humanitario debe ser la eficiencia, siendo entendida en el ámbito de la tarea como la relación entre el resultado alcanzado y los recursos utilizados [9]. En pocas palabras, es no cometer ni error tipo I ni tipo II. Con errores tipo I y

tipo II se hace referencia al concepto en estadística inferencial. En el desminado humanitario se presentan las siguientes posibilidades:

- El agente desminador no cava un agujero en zona donde sí había una mina.
- El agente desminador cava un agujero donde sospecha de una mina, y no exista.

La primera situación hace ineficiente al desminado humanitario en el sentido de que se incumple el objetivo: dejar los campos contaminados con MAP libres de presencia de estos artefactos [8], aumentando también la probabilidad de accidentes futuros (sea de civiles o de agentes desminadores en futuras misiones). La segunda situación hace la operación ineficiente porque el delicado procedimiento de cavado de agujeros requiere de una inversión de esfuerzo y tiempo. Aunque la palabra humanitario sugiera que el interés no es el lucro, no por esto deja de ser una actividad financiada con presupuesto. Si el presupuesto escasea, se detienen las misiones de desminado, aumentando sustancialmente la probabilidad de accidentes futuros. No obstante, dentro del alcance del proyecto, la prioridad será disminuir el error tipo I, pues el error tipo II reduce la eficiencia en el aspecto del uso de presupuesto en el proceso de desminado en una fase distinta (Aislamiento e investigación de Señales & Destrucción de artefactos) a la del enfoque del proyecto: Investigación del terreno mediante el uso de detectores. Por su parte, el error tipo I disminuye la eficiencia en el sentido de aumentar el peligro para las personas. Dicho esto, siempre será prioritaria la integridad de estas últimas, por lo que es mejor generar una gran cantidad de sospechas (reducir error tipo I) incluso si el error tipo II aumenta (que tales sospechas fueran falsos positivos). Se debe tener en cuenta que los costos tienen el poder de detener momentáneamente las operaciones de desminado, perpetuando el riesgo de las MAP durante este receso en el que el presupuesto escasea.

Los modelos de optimización necesitan parámetros de entrada que penalicen ciertas decisiones contrarias al objetivo. Para el caso presente, estos parámetros incluyen: el riesgo y el costo característicos de las zonas que conforman el terreno a recorrer por parte del agente desminador. Estos parámetros de entrada son determinados a partir de estudios realizados sobre el terreno, como: topología del terreno, cantidad de vegetación, estudios geológicos, etc.; los cuales obstaculizan la detección realizada por el agente y su herramienta, aumentando el riesgo de la tarea. Determinar tales parámetros del terreno traspasa los límites del proyecto.

Con base en lo anterior, el presente proyecto pretende: diseñar un modelo que genere rutas eficientes para recorrer completamente el área minada en la etapa de detección (Investigación del terreno), buscando minimizar el riesgo al que se ve expuesto el agente que realiza el recorrido y los costos asociados a la tarea. El sistema busca ser diseñado para que solucione instancias del problema que se ajusten a sus supuestos y parámetros. Estos incluyen: un terreno (sea rural o urbano) con su riesgo y el costo de desplazamiento caracterizados; alcance de herramienta de detección conocida; el método requiere recorrer el terreno en su totalidad.

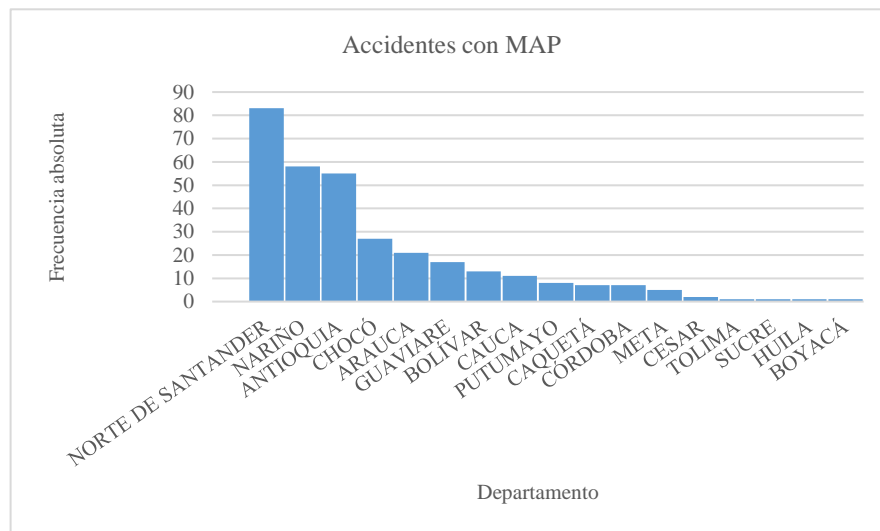


Fig. 2. Cantidad de accidentes con MAP por departamento en Colombia Período 2016-2020 [Modificado de: [4]]

## B. Grupos de Interés

Algunos de las organizaciones y/o instituciones que potencialmente pueden estar interesadas en los resultados de este proyecto son listadas en la TABLA I. En ella, se utilizan algunos criterios que permiten establecer la prioridad en atender las necesidades del grupo de interés que influya en mayor medida sobre el proyecto. De ese modo, se procede a establecer la prioridad de acuerdo con la cantidad de criterios que cumpla el grupo de interés. Entre menor sea el número de prioridad asignado, mayor será su importancia dentro del proyecto.

De forma complementaria, la TABLA II describe los impactos positivos y negativos que tienen los grupos de interés sobre el desarrollo del proyecto, junto a la influencia que tienen sobre la temática desarrollada, al punto en que incluso pueden finalizar el trabajo de ser necesario. Se proveen soportes legales que sujetan a los grupos de interés a deberes relacionados al desminado.

**TABLA I.**  
**IDENTIFICACIÓN & PRIORIZACIÓN GRUPOS DE INTERÉS**

GRUPOS DE INTERÉS	RELACIÓN CON EL PROYECTO						ORDEN DE PRIORIDAD
	Influye en el resultado del Proyecto	Afectado por el Proyecto y/o su resultado	Suministra recursos al Proyecto	Puede tomar decisiones sobre el Proyecto	Aporta conocimientos útiles al proyecto	Tiene influencia legal o normativa en el Proyecto	
Población no combatiente	X	X			X		4
DAICMA – Descontamina Colombia	X	X	X	X	X		2
Agentes desminadores	X	X			X		4
Ministerio de Defensa	X	X	X	X	X	X	1
Grupos armados	X	X			X		4
Cruz Roja		X	X	X	X	X	2
Equipo del proyecto	X		X	X	X		3

**TABLA II.**  
**IMPACTO & INFLUENCIA DE GRUPOS DE INTERÉS**

N°	Grupo de Interés	Impacto		Influencia	
		Positivo	Negativo	Grado	Capacidad de Terminar proyecto
1	Ministerio de Defensa Decreto 3750 de 2011 (Art. 4 Parágrafo 1; Art. 6; Art. 7; Art. 9)	-Respalda el despeje de territorio contaminado por MAP al garantizar seguridad a las labores. -Frena el incremento de MAP al disminuir la influencia bélica de los grupos insurgentes en el territorio.	-Posee el poder de detener (al menos parcialmente) el desminado, en caso de recrudescer el combate militar contra los grupos armados, debido al peligro que representa el fuego cruzado para los agentes desminadores.	Alta	Sí
2	Cruz Roja Convención de Ottawa (Art. 6 Parágrafo 3; Art. 16)	-Garantiza el cumplimiento de los compromisos adquiridos por parte de los estados que ratificaron el tratado de Ottawa. -Vigila y vela por el progreso de las misiones humanitarias de Desminado en todo el globo. -Provee espacios de innovación y desarrollo en materia de Desminado.	N/A	Medio Alta	No
3	DAICMA – Descontamina Colombia Decreto 3750 de 2011 (Art. 14) Decreto 007 de 2014 Decreto 179 de 2019 (Art. 18)	-Monitor nacional que garantiza el cumplimiento de los Compromisos derivados de la ratificación del tratado de Ottawa. -Administrador de toda la materia de desminado: desde iniciar los procesos de	En caso de incompetencia en sus labores, el desminado se complicaría, llevándolo a niveles bajos de eficiencia, que en últimas se traduce en mayor peligro de accidentes con MAP.	Media Alta	Sí

		investigación de campos sospechosos, la aprobación de labores de desminado, educación de la sociedad colombiana en riesgo de MAP, hasta la compilación de los resultados de dichas labores o aspectos relacionados a MAP. -Encargado de la aprobación de labores (terrenos listos para el despliegue de operaciones) pendientes de despeje.			
4	Equipo del proyecto	-Desarrolla/Evalúa las alternativas que podrían mejorar el desempeño de las operaciones de desminado humanitario.	-El mal enfoque de la propuesta/proyecto podría derivar en alternativas de solución infructuosas.	Alta	Si
5	Agentes desminadores Ley 759 de 2002 (Art. 11; Art. 12)	El buen desempeño en su labor afecta positivamente toda la operación de desminado.	Un mal desempeño en su labor malgastaría el presupuesto para el desminado de la nación, deteniendo así misiones en otros lugares.	Baja	No
6	Grupos Armados	N/A	-La constante práctica de minado obstaculizaría el objetivo Primario de las misiones: descontaminar todo el territorio nacional. -Sus ofensivas militares podrían entorpecer la realización de las labores de desminado.	Baja	No
7	Población no combatiente Convenio de Ginebra, Protocolo II, 1949 Convenio sobre ciertas armas convencionales, Protocolo adicional II, 1977	Genera las alertas de sospecha para la posterior evaluación De zonas peligrosas.	N/A	Baja	No

### C. Requerimientos

La TABLA III recopila información relevante sobre las necesidades y expectativas de cada grupo de interés identificado anteriormente. A partir de dichas necesidades, es posible identificar un aspecto o dimensión clave sobre la cuál se desea trabajar en el documento. Dichas dimensiones son traducidas en requerimientos de los cuales se identifican las variables que se deben controlar durante el proceso de desminado, así como ciertas restricciones que delimitan el alcance de este proyecto.

TABLE III.  
REQUISITOS DE GRUPOS DE INTERÉS

GRUPOS DE INTERÉS	VoC (Necesidades, Expectativas, Percepciones y Experiencias)	Dimensión, Imagen o Aspecto Clave	REQUERIMIENTO	VARIABLE	RESTRICCIONES
Ministerio de Defensa	Garantizar la seguridad nacional (concretamente contra MAP)	Desempeño	Uso eficiente del presupuesto para la guerra contrainsurgente (concretamente Desminado Humanitario)	Incurción en costo durante operaciones logísticas de desminado Extensión de área descontaminada	Presupuesto Parámetros de entrada Alcance
DAICMA – Descontamina Colombia	Ejecutar la acción integral contra MAP	Desempeño	Estandarizar prácticas con nuevas tecnologías Difusión del proceso de desminado	Extensión de área descontaminada	Alcance Parámetros de entrada Riesgo Tecnología
Equipo del proyecto	El esfuerzo invertido en el proyecto sea fructífero y contribuya a mejorar la problemática de MAP en Colombia	Desempeño	Planeación eficiente de las actividades críticas del proyecto Definición correcta del alcance	Progreso de actividades (propias)	Tecnología Parámetros de entrada
Población no combatiente	No accidentarse con MAP	Confiabilidad	Educación en riesgo de minas Mejora de seguridad	Extensión de área descontaminada	Presupuesto (El presupuesto destinado al Desminado Humanitario por parte del Ministerio de Defensa, tiene el poder de detener las

					operaciones en caso de escasear).
Agentes desminadores	No accidentarse con MAP	Confiabilidad Desempeño	Mejores métodos Actualización tecnológica	Riesgo asumido en tarea Extensión de área descontaminada	Alcance Riesgo Tecnología
Cruz Roja	Garantizar la protección de la población no combatiente involucrada en conflictos (globalmente)	Confiabilidad	Reducir los accidentes con MAP de la población no combatiente (que representa un derecho violado)	Riesgo asumido por desminadores (en tarea) Extensión de área descontaminada	Alcance Riesgo
Grupos Armados	Desestabilizar la institucionalidad	Desempeño	Con la mínima inversión, hacer el mayor daño bélico posible	N/A	N/A

### 1) Restricciones de diseño

Dado que el proyecto busca minimizar los costos y el riesgo de la operación de detección en el desminado humanitario, son precisamente estos aspectos los que permiten establecer las siguientes restricciones:

**Presupuesto:** las operaciones de desminado requieren financiar sus costos logísticos. Si el presupuesto se hace escaso, las operaciones se detienen dejando vigente la amenaza de accidentes con MAP.

**Riesgo:** la confiabilidad de la detección de zonas con sospecha de presencia de MAP, entra en conflicto con la integridad del agente que recorre el terreno en búsqueda de dichas zonas. Es por esto por lo que la calidad de la detección se ve restringida por la protección de la integridad del agente, debido a que esta última es prioritaria.

**Tecnología:** la introducción de nuevas herramientas en el proceso de desminado ha reemplazado al ser humano en las tareas más peligrosas. La disposición de mejores tecnologías se convierte en una restricción, a causa de que todavía no han sido implementadas y continúan en fase de pruebas [10]. Mejores herramientas eliminarían la restricción del riesgo derivando en mejores resultados respecto a la detección de MAP.

**Alcance:** la propuesta se centra en el desminado humanitario; concretamente, en la etapa de detección. Esto se debe a que, en esta etapa, indiferentemente del tipo de herramienta usada para el monitoreo de la zona, el terreno sospechoso se debe recorrer completamente. Las herramientas usadas en detección, ya sea que requieran operación y proximidad humana (detectores metálicos, auxiliar canino, etc.) o no (Sistemas Aéreos no Tripulados [10]), sólo influyen en la confiabilidad y calidad de los datos para las etapas posteriores. Como las rutas generadas dependen de valores característicos de riesgo y costo en las zonas del terreno a recorrer, la herramienta es indiferente para el modelo en la determinación de tales rutas. La herramienta solo cambiaría el contexto de la propuesta, más no imposibilita su aplicación, dado que afecta el alcance del agente que recorre el terreno en monitoreo. Como este alcance es otro parámetro de entrada del modelo, sigue permitiendo la generalidad del modelo como para ser aplicado en distintas situaciones sin importar la herramienta.

**Parámetros de entrada:** la determinación de rutas eficientes que plantea la propuesta requiere la caracterización de las zonas que conforman el terreno en monitoreo en cuanto a temas topológicos y geológicos, para después determinar los costos de desplazamiento entre zona y zona, y asignar, además, un nivel de riesgo al que se ve sometido el agente al transitar por determinada área. Esta caracterización no está incluida en la etapa de detección, y, por ende, tampoco en el alcance del proyecto. Es el input que permite la inicialización del ruteo.

La razón de su exclusión se debe a que el grado de complejidad de esta caracterización de terrenos minados es tal, que alcanza para una producción investigativa extensa. Además, la investigación en técnicas de monitoreo de campos minados es liderada por la electrónica y la geología computarizada, dado que se estas se fundamentan en señales análogas interpretadas por artefactos diseñados en tales disciplinas [11]. Los autores pretenden contribuir desde el área de optimización y ruteo, por lo que su campo de acción difiere. Por otro lado, la integración de nuevas tecnologías en el desminado humanitario (como el caso de los UAS [10]) aún está en una etapa relativamente joven, con resultados de aplicación limitados; hay pruebas de campo que apenas iniciarían en octubre de 2020 [10]. Para el caso concreto de Colombia, esta caracterización de terrenos aún sigue siendo muy limitada.

En la TABLA IV se muestra el tipo de zona en el que ocurrieron accidentes con MAP entre 2016-2020; el más frecuente es zona “Sin información”. Este campo no indica desconocimiento del lugar del incidente, puesto que la base de datos (ver Anexo I

[5]) presenta las coordenadas. Por el contrario, para evitar imprecisiones técnicas respecto a la caracterización del terreno, se prefirieron registrar bajo esta etiqueta.

TABLA IV.  
ACCIDENTES CON MAP ANUALES ENTRE 2016-2020 SEGÚN TIPO DE TERRENO [Modificado de: [5]].

Característica de Terreno	Accidente con MAP
Sin información	154
Campo	80
Caminos	51
Fincas	14
Cerca ribera de un rio	3
En Cerca edificio residencial	3
Oleoductos	2
Campamentos ilegales	2
Carretera	2
En cerca de instalación militar	2
Escuelas	1
Borde de la carretera	1
Viviendas abandonadas	1
En cerca edificio gubernamental	1
Quebradas	1
<b>Total general</b>	<b>318</b>

## 2) Especificaciones de diseño

El contexto del problema consiste en un agente que se encarga de recorrer completamente el Área Peligrosa (AP) o área Peligrosa Confirmada (APC), estableciendo marcas en las zonas que considere de acuerdo con el instrumento de detección, para indicar la posible presencia de MAP. La propuesta busca determinar el desplazamiento del agente que minimice el costo y el riesgo asociados al desminado procurando recorrer toda el (AP).

El modelo se propone concretamente para la etapa de detección. En esta es indiferente la herramienta utilizada dado que el objetivo sigue siendo recorrer el AP/APC por completo. Para su diseño se tienen las siguientes consideraciones:

- La zona delimitada en el AP/APC es inscrita con rectángulos (celdas) de igual tamaño que representan el espacio para el desplazamiento del agente desminador.
- El área de una celda es igual al área que puede detectar la herramienta usada.
- Cada celda se clasifica de acuerdo con sus características físicas en: *fácil acceso*, *difícil acceso*, *bajo riesgo*, *alto riesgo*; entre otras que presenten razones para asignarse. La anterior cualificación se realiza con base en lo que representa acceder a la celda para el agente y a la naturaleza del obstáculo con la que se identifique cada celda.
- Cada celda categorizada como de alto riesgo, posee un indicador cuantitativo del riesgo que representa para el agente desminador de acuerdo con una escala establecida.
- La magnitud del alcance de detección está basada en la cantidad de subdivisiones alrededor del agente desminador en las que él logre generar una sospecha de MAP sin tener que desplazarse necesariamente; es decir, dependiendo del instrumento de medición descritos en los Estándares Nacionales de Desminado Humanitario la magnitud del alcance será mayor o menor.

- Durante el desplazamiento del agente a través del AP/APC se generan diversos costos relacionados con los parámetros establecidos anteriormente, es decir, dependiendo de la categoría de la celda origen y la categoría de la celda destino, se puede o no incurrir en un costo más elevado.
- Se plantea que el desplazamiento del agente a través de subdivisiones de alto riesgo sea el mínimo necesario para realizar una detección oportuna de MAP. Esto se debe a que en última instancia el modelo debe minimizar el riesgo para el agente.

De acuerdo con lo anterior, el esquema básico del problema que se tratará a lo largo del documento se representa en la Fig. 3

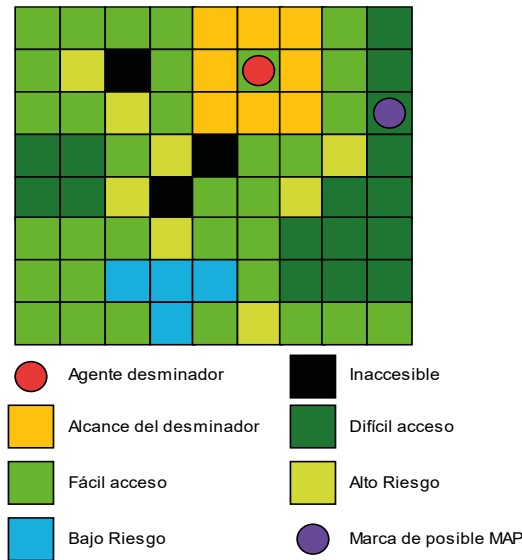


Fig. 3. Modelo preliminar de la etapa de detección

### 3) Leyes, normas y estándares

El director para la Acción Integral Contra las Minas Antipersonal, ejerciendo la autoridad de la que es revestido por el Decreto 672 de 2017, Art. 14, es el encargado de la elaboración y continua revisión de los estándares nacionales de las actividades relacionadas al AICMA, además de velar por la adhesión a norma por parte de las instituciones que realizan labores de desminado humanitario.

El Estándar Nacional de Despeje, en su versión más reciente, adoptado por el director del AICMA el 28 de diciembre de 2017 a través del Acto Administrativo de Adopción de Enmiendas del Estándar Nacional de Despeje, entra en vigor. Este debe ser la norma seguida por las agencias que busquen realizar desminado humanitario en territorio nacional. Este estándar comprende la forma en que los procedimientos de la operación de despeje deben ser llevados a cabo.

Para el desminado humanitario en Colombia de acuerdo con el Estándar Nacional de Despeje, se debe seguir la siguiente secuencia de operaciones [8]:

#### A. Análisis y Evaluación del Riesgo Para Determinar la Técnica a Emplear

El encargado de la conducción de las operaciones debe hacer un análisis de riesgo de la amenaza de acuerdo con los Estudios No Técnicos realizados con antelación, dichos estudios consisten en determinar el peligro en el perímetro basándose principalmente en datos estadísticos sin realizar ninguna intervención física.

#### B. Inspección visual

Se busca establecer si es posible detectar visualmente artefactos explosivos con el objetivo de minimizar los riesgos a los que se someten los recursos.

C. *Remoción de vegetación, maleza y capote, cuando sea necesario*

Cuando las herramientas no puedan ser utilizadas adecuadamente se realiza la remoción de vegetación.

D. *Investigación del terreno mediante el uso de detectores, perros o máquinas*

E. *Marcación de avance durante las operaciones*

F. *Aislamiento e investigación de Señales*

G. *Destrucción de artefactos*

H. *Control de calidad interno*

### **III.MEDIR**

A. *Plan de Recolección de Datos.*

Para analizar el desempeño de las metodologías de planeación de rutas para la etapa de detección/investigación de un Área Peligrosa, estas deben emplearse sobre distintas instancias del problema, con el fin de observar el comportamiento procedimental bajo contextos diversos. Inicialmente, se identificaron dos fuentes potenciales de información: las ODH y referencias documentales de naturaleza similar al presente proyecto. De parte de las ODH, se esperaba recopilar información concerniente a contextos de desminado (específicamente, características de Áreas Peligrosas) para poder abstraerla como instancias de prueba de las metodologías en cuestión; sin embargo, información de tales características no es publicada en la totalidad requerida por el proyecto. Por otro lado, las referencias consultadas (TABLA VII) también evaluaban los métodos propuestos con el uso de instancias; desafortunadamente, las instancias usadas en estos documentos no fueron dispuestas para uso público ni se describe el proceso con el cual se generaron. Como última medida, restaba consultar en la web la existencia de instancias hechas para uso público, pero no se hallaron para el problema particular del proyecto. Dado lo anterior, se concluyó la necesidad de automatizar la generación de instancias propias, que lograsen simular la esencia de un contexto donde se lleve a cabo el desminado. Para consultar la metodología diseñada para la generación de instancias en detalle, revisar Anexo 5.

1) *Asignación de obstáculos a celdas:*

La caracterización de terreno requiere que en él haya varios tipos de obstáculos, y a su vez, cierta concentración de estos. Sin embargo, dada la aleatoriedad con la que se generan las instancias, era posible que se presentaran ciertas peculiaridades que dañasen la representación de los casos de prueba. Estas situaciones se pueden observar en la TABLA V.

TABLA V.  
CONSIDERACIONES ESPECIALES PARA LA GENERACIÓN DE OBSTÁCULOS

Consideraciones Especiales	Descripción
Superposición de obstáculos diferentes	Debido a la ubicación aleatoria de los obstáculos, algunos obstáculos podrían superponerse sobre otros, generando conflicto con la lógica de lo que representan. Para evitar esta superposición, todos los obstáculos de un mismo tipo deben estar ya ubicados previo a la distribución de otro tipo. A esta metodología, el equipo de trabajo la denominó <i>layer focus</i> [12], [13]. Concretamente para el proyecto, se consideraron los siguientes tipos de obstáculos (listados en orden de capa): Suelo Transitado (no tiene obstáculo asociado más sí un costo base al transitar por él); Edificación (abandonada o no), Árbol, Colinas, Poza, Mina, Roca, Arbusto.
Superposición de obstáculos de mismo tipo	Esta consideración busca evitar una alta aglomeración de obstáculos iguales en determinadas regiones del terreno (Fig. 4). Se requiere que las instancias tengan una distribución de obstáculos equilibrada en toda la cuadrícula del mapa. Es así como se decidió garantizar la integralidad de patrones de cada obstáculo. Esto significa no ubicar un obstáculo si al expandir su patrón, corta el patrón de otro obstáculo.
Reducción de rendimiento/imposibilidad de asignación	Se elige una posición aleatoria para generar un obstáculo (dicho punto se llama también semilla de obstáculo). Si esta semilla, o la expansión de su patrón se superponen sobre otro obstáculo, esta se descarta y se busca una nueva posición. Mientras mayor sea la concentración de obstáculos en el terreno, se hace cada vez más improbable lograr expandir un patrón de manera completa sin que se encuentre con algún otro obstáculo. Dado que el algoritmo sigue buscando posiciones aleatorias hasta poder expandir el obstáculo de forma completa, podría llevar a que su tiempo de ejecución crezca de manera considerable, o, en el peor de los casos, permanecer buscando indefinidamente. Para ello se estableció un parámetro de frecuencia de obstáculo que cuantifica la proporción que puede ocupar cierto tipo de obstáculo del área total del terreno que puede ser asignada a obstáculos.

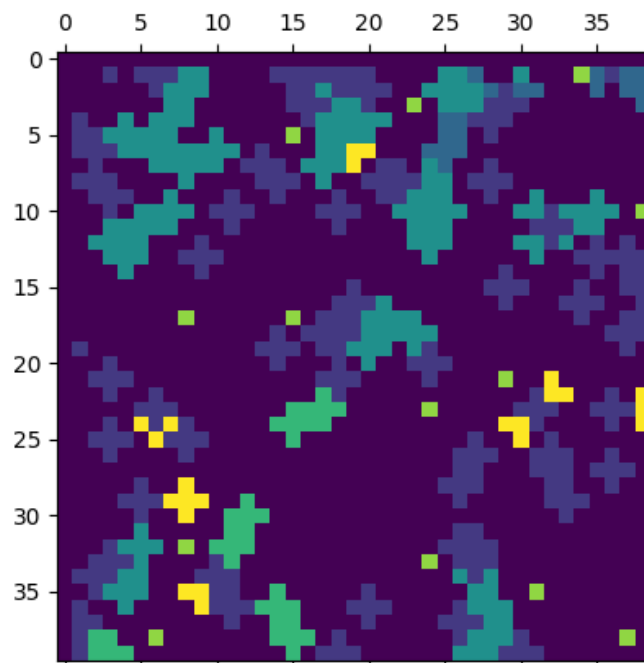


Fig. 4. Cuadrícula con obstáculos altamente aglomerados

Los patrones que tienen los obstáculos son: Patrón *cruz* (Fig. 5), patrón *puntual* (Fig. 5), patrón *cuadrado* (Fig. 6), patrón *lineal* (Fig. 6). Las instancias generadas están integradas por los siguientes obstáculos, según su patrón: *Árbol* (*Cruz*), *Colinas* (*lineal*), *Charco* (*lineal*), *Mina* (*Puntual*), *Roca* (*Puntual*), *Arbusto* (*Lineal*).

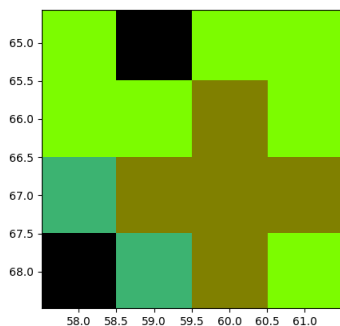


Fig. 5. Patrón Cruz (Marrón claro). Patrón Puntual (Negro, Verde Oscuro).

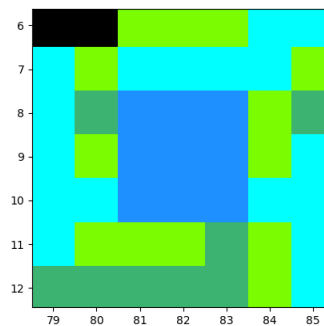


Fig. 6. Patrón Cuadrado (Azul oscuro). Patrón lineal (Azul Marina, Verde oscuro, Negro).

## 2) Asignación de riesgo y costo de celdas

Cada celda tiene asociada dos valores numéricos: el costo de desplazamiento hacia esta, y el riesgo que representa para el que transita por la zona. Su costo puede verse incrementado por dos eventos: la celda es cercana a alguna elevación del terreno, que, aunque dificulta el tránsito por esta, no lo imposibilita; y en caso de que algún obstáculo repose sobre la celda, la naturaleza de este también puede contribuir a la dificultad de tránsito de quien recorre.

La caracterización del riesgo sigue la idea de que mientras más cercana sea una celda a una mina, mayor será el riesgo que representa para quien recorre, de este modo, la posición de la mina posee un valor de riesgo más alto, mientras que se forman *anillos* a su alrededor con un riesgo proporcionalmente menor al máximo (Fig. 7).

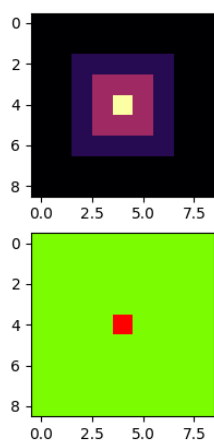


Fig. 7. Representación de mina: Mapa de riesgos (Arriba). Mapa de obstáculos (Abajo).

Los obstáculos usados (en orden de ubicación) se listan a continuación: Edificación, *Árbol*, Pendientes, Charco, Mina, Roca, Arbusto. Una vez realizado el procedimiento anterior, se obtuvieron resultados como en la Fig. 8.

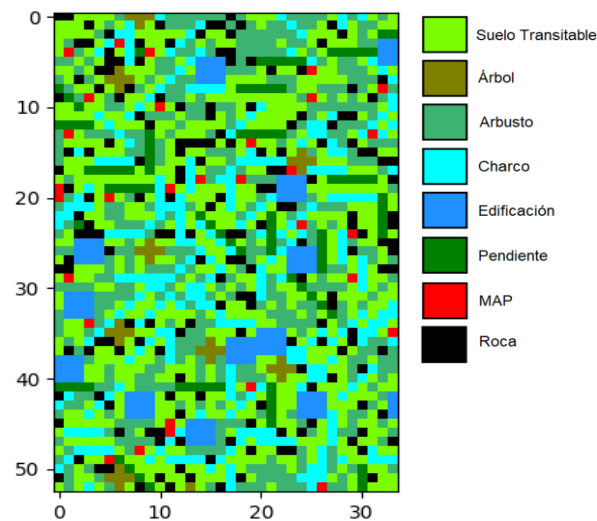


Fig. 8. Mapa de obstáculos

Al momento de establecer los indicadores de desempeño con los que se medirán las rutas de detección propuestas, debe ser considerado que cada instancia es diferente entre sí debido a su generación aleatoria. Por lo tanto, no son admisibles indicadores que sean propios de las instancias, es decir, indicadores absolutos. Para realizar una comparación de desempeño equilibrada entre las instancias, se propusieron indicadores relativos que permitan realizar un análisis considerando múltiples instancias.

De acuerdo con el Plan de Recolección de Datos (Anexo 4). Las variables, así como los indicadores correspondientes para evaluar dichas variables son descritos en la TABLA VI.

TABLA VI.  
INDICADORES DE DESEMPEÑO A MEDIR

Variable	Objetivo	Descripción	Indicador
Incurción en costo durante operaciones logísticas de desminado	Permite cuantificar los recursos invertidos para financiar las operaciones, con el fin de contrastar los gastos que conllevarían realizar dichos procesos (concretamente recorridos del AP) de distintas maneras	Este indicador relaciona el costo total en el que incurrió el agente al recorrer la ruta de detección planteada con el costo total dispuesto en el <i>Área Peligrosa</i> (1). El ejemplo de la Fig. 9 facilita comprenderlo. De esta forma, es posible comparar distintas rutas generadas para una misma instancia, dado que el costo en el que incurre cada ruta depende de la trayectoria que sigue.	Costo Total Porcentual (CTP) $CTP = \frac{\text{Costo Total Incurrido}}{\text{Costo Total}} \quad (1)$
Extensión de área descontaminada	Permite medir el desempeño de las operaciones de desminado actuales	Representa el porcentaje de <i>Área Peligrosa</i> que el agente desminador fue capaz de despejar mediante el método utilizado para recorrer dicha área. Este indicador es crítico pues el objetivo es despejar por completo el <i>Área Peligrosa</i> lo cual representaría que este indicador fuera 100%. Sin embargo, esto no ocurre en todos los casos a causa de la complejidad de la instancia.	Porcentaje de Área Cubierta (PAC) $PAC = \frac{\text{Área despejada}}{\text{Área Peligrosa}} \quad (2)$
Riesgo asumido por desminadores (en tarea)	Permite medir el riesgo al que se enfrenta el agente desminador al realizar su labor de acuerdo con el método usado	Se define como la suma del riesgo total asumido hasta cubrir toda el área sobre el riesgo total dispuesto en la instancia. Su ecuación es similar a (1) y el ejemplo de la Fig. 9 facilita comprenderlo.	Riesgo Asumido Porcentual (RAP) $RAP = \frac{\text{Riesgo Total Asumido}}{\text{Riesgo Total}} \quad (3)$

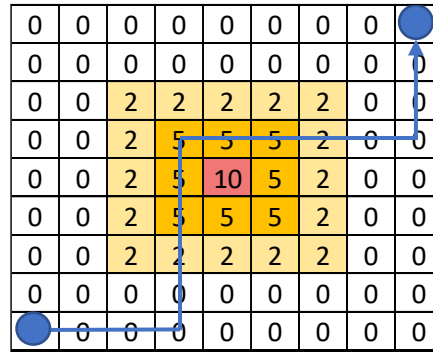


Fig. 9. Mapa de riesgo y ruta de detección genérica

Para el caso representado en la Fig. 9 el indicador RAP es de 35%, ya que la ruta de detección atraviesa por *celdas* que al sumarse sus valores de riesgo dan como resultado 29 unidades de riesgo de un total dispuesto en la instancia de 82 unidades de riesgo.

### B. Exploración de Mercado

Con el fin de justificar la relevancia del problema del proyecto, es necesario recolectar información sobre situaciones que compartan características con la esencia de este documento y así demostrar la vigencia de la problemática y que la solución que se proponga puede llegar a ser aplicada en distintos contextos. Los documentos encontrados buscan dar solución a dilemas en los que un ente debe recorrer una zona específica por completo, principalmente bajo contextos de recolección de alimentos, limpieza de zonas y vigilancia de áreas. En la TABLA VII se muestran las descripciones de dichos documentos, así como sus autores y algunos resultados que se obtuvieron.

TABLA VII.  
APLICACIONES SOBRE PROBLEMAS SIMILARES

Autores y DOI	Título	Problema aplicado	Resultados
Ahmadi, Mazda Stone, Peter (2006) Doi: 10.1109/ROBO T.2006.1641955	<i>A Multi-Robot System for Continuous Area Sweeping Tasks</i> [14]	Determinar un modelo que garantice la adaptación de robots barrenderos bajo circunstancias como la avería de alguno de ellos. Se busca maximizar el tiempo de respuesta de los robots a dichos eventos	Dos robots en una misma área: tiempo de respuesta entre 32 y 33 segundos. Tres robots en una misma área: tiempo de respuesta alrededor de 28 segundos. Cabe destacar que la manera en que el área es distribuida entre los robots, así como el diseño de esta, interviene de manera profunda en el tiempo de respuesta.
René S. Nilsson, Kun Zhou b (2020) Doi: 10.1016/j.biosystemseng.2020.08.007	<i>Method and bench-marking framework for coverage path planning in arable farming</i> [15]	Proponer indicadores de desempeño relacionados con el contexto de la agronomía, que puedan relacionarse con el rendimiento de los algoritmos de cubrimiento máximo. Esto con el fin de que sea posible realizar comparaciones bajo diferentes situaciones de cosecha, y que de ese modo puedan ser resueltas las necesidades particulares de cada granjero.	El área en la que el tractor puede girar oscila entre 1,12 ha y 2,43 ha. El área no cubierta alcanzó los 2442 m <sup>2</sup> El número de trayectos en línea recta que ejecuta un tractor para recolectar varía entre 3 y 95 La cargas y descargas de cosecha de los tractores oscilan entre 3 y 4 veces por instancia El tiempo productivo oscila entre el 46% y el 89%
Kalaivanan Sandamurthy, Kalpana Ramanujam (2019) Doi: 10.1016/j.inpa.2019.04.002	<i>A hybrid weed optimized coverage path planning technique for autonomous harvesting in cashew orchards</i> [16]	Diseñar una ruta de cubrimiento máximo para un caso discreto bajo el contexto de recolección de nueces de la India, ya sea mediante robots o mano de obra convencional. El objetivo de maximizar el porcentaje de cubrimiento de la zona de cultivo mientras se minimiza el porcentaje de convergencia definido como la razón entre la diferencia de un óptimo conocido con el óptimo obtenido con el modelo propuesto, y el óptimo conocido.	Bajo diferentes circunstancias, el porcentaje de convergencia fue de 99,97% y 97,83% para el caso de 48 y 442 nodos respectivamente
Xu, Anqi; Viriyasuthee, Chatavut;	<i>Optimal Complete Terrain Coverage using</i>	Dada una región, se debe determinar el recorrido más eficiente, en términos de tiempo y distancia total, que debe seguir un Vehículo Aéreo No Tripulado, para vigilarla por completo. El recorrido debe evitar obstáculos que pudiesen	Simulando con software especializado, y realizando pruebas de campo con el vehículo aéreo, los autores reportaron lo siguiente: En comparación con otro algoritmo de óptimos locales, el propuesto generó

<p>Rekleitis, Ioannis (2011) ISBN: 9781612843858</p>	<p><i>an Unmanned Aerial Vehicle</i> [17]</p>	<p>estropear el vehículo. El objetivo es la minimización de la distancia recorrida sobre zonas previamente recorridas. Los autores mejoran un algoritmo de <i>Coverage Path Planning</i>, usualmente usado para planificación de recorridos de robots terrestres, extendiéndolo a vehículos aéreos (concretamente no holonómicos), con el fin de hacer eficientes sus recorridos en aspectos tan críticos como el tiempo. Adicionalmente, proponen y evalúan dos tipos de controladores del vehículo para los giros/cambios de dirección, y finalmente contrastarlos. El trabajo busca dejar bases para una integración cooperativa futura de vehículos tanto aéreos, terrestres como acuáticos, en labores de búsqueda y vigilancia.</p>	<p>recorridos con mejoras de 10% en cuanto a tiempo promedio de vuelo y distancia recorrida. Bajo un mismo recorrido, pero variando el controlador del vehículo, reportaron los siguientes indicadores de desempeño: Controlador I: el vehículo cubrió el 66,6% del área total una única vez, y sobrevoló un 28,3%. Dejó 5,1% del área total descubierta. Controlador II: el vehículo cubrió una única vez 35,1% del área total, y sobrevoló un 64,1%. Dejó descubierta un 0,8 % de área total. Se reporta una diferencia del 85% de desempeño entre controladores, puesto que el controlador II genera mayores retornos a zonas ya cubiertas con antelación.</p>
<p>Bremmer, David; Few, David Nielsen, Curtis Walton, Miles  Journal of Mine Action: Vol. 11: Iss. 2, Article 42. (2008)</p>	<p><i>Intelligent Robotic Behaviors for Landmine Detection and Marking</i> [18]</p>	<p>El documento en cuestión enfoca el proceso de detección de minas antipersona y artefactos explosivos como sigue: dada una región delimitada, un robot terrestre con un detector con alcance D, debe seguir un recorrido de forma que todas las zonas de la región sean cubiertas por el detector, mientras esquiva los obstáculos presentes en la misma. Debe marcar con tinte aquellas zonas donde se detecte una mina, así como registrarlas digitalmente en la unidad de control. El robot debía ser diseñado de forma que la maniobrabilidad humana fuera mínima y poco especializada. Además, dado el escaso acceso a conexiones inalámbricas en los contextos futuros donde se pretendía usar el robot, su diseño debía permitirle conocer su posición en todo momento, sin depender en exceso de la georreferenciación. Es por esto por lo que se integra de manera cooperativa un Vehículo Aéreo No Tripulado, el cual, con su mayor calidad y alcance de visión, ayuda a reforzar el sistema de mapeo interno del robot terrestre. A este sistema integrado (incluyendo al operador) se le denomina <i>Autonomous Robotic Countermining System</i>. El objetivo era evaluar la efectividad del sistema de detección en términos de calidad de marcado, y ver el desempeño general del equipo humano-robot-vehículo aéreo.</p>	<p>Se ejecutaron 26 experimentos para poner a prueba el sistema. De un total de 131 minas, el robot detectó correctamente 124 (95%). De las 124 minas detectadas, registró digitalmente 123 con sus coordenadas GPS, y fotografías de la zona. El sistema contraminas solo lanzó un falso positivo en toda la experimentación. Sólo reportó dos veces la misma mina en una ocasión, presentando así una tasa de detección falsa menor al 1%. Cada experimento tuvo una duración promedio de 5.75 minutos <math>\pm</math> 19 segundos (99% confianza). El tiempo promedio de maniobra humana fue menos del 2 % de la duración de toda la prueba (alta autonomía). Para la calidad de marcado, la distancia entre el centro de la mina y la marca hecha por el robot fue medida en 91 ocasiones, evidenciando error promedio de marcado equivalente a 12.67 cm <math>\pm</math> 8.56 cm.</p>

Se diseñó e implementó un generador de instancias que crea varios casos de prueba de un terreno (Área Peligrosa para el caso de desminado) de forma aleatoria. Estos terrenos delimitan cierta área dividida en celdas cuadradas uniformes. Por ende, el terreno es modelado como una cuadrícula. Las celdas se asocian con un obstáculo que penaliza el tránsito a través de ella mediante un costo y un riesgo relacionado al tipo de obstáculo. Tal costo busca caracterizar la dificultad de desplazamiento entre celdas, bien sea por sus características geográficas (relieve, elevación, estabilidad) que dificultan el tránsito del agente, el riesgo por la cercanía de alguna MAP, o ambas. Suponga que el agente está recorriendo el área sospechosa, y de su posición actual hacia el frente hay una gran elevación. Se presupone que un mayor esfuerzo físico se lleva a cabo. Y si, además, en los alrededores hubiese alguna MAP, el costo no sólo comprendería la dificultad de su movimiento, sino también el alto riesgo de la locación donde pretender ir.

Como se mencionó anteriormente, la información requerida para medir el desempeño del método actual de desminado en términos de los indicadores propuestos no pudo ser recopilada; por ende, se ejecutó el algoritmo *down-slope* con el fin de simular recorridos de detección sobre las instancias de prueba, obteniendo así mediciones de los indicadores. La descripción del algoritmo *down-slope* puede consultarse en el Anexo 6.

Se sugirió que debían generarse al menos diez instancias para cada una de las siguientes dimensiones: 10x10, 20x20, 30x30, 40x40, 50x50 y 60x60 (celdas), para un total de sesenta casos de prueba. Se quiso corroborar la estimación anterior con un cálculo más fundamentado, como lo es el tamaño de muestra. Sin embargo, dado que no se encontró un referente en la literatura mediante el cual establecer parámetros con los cuales realizar la estimación del número de instancias de forma que fuera consistente y precisa, se reconsideró esta idea y se concluyó lo siguiente: la esencia del tamaño de muestra es equilibrar el costo de obtener datos representativos con la precisión de indicadores inferenciales; sin embargo, en el presente proyecto, la generación de instancias no supone mayor dificultad. Por ende, se optó por generar un número de instancias preventivamente grande y variado, con el fin de proteger la precisión de los indicadores de la incertidumbre de un tamaño de muestra adecuado.

Sin embargo, el número de instancias que se pretendía tuvo que ser reducido, debido a que, en etapas posteriores, obtener ciertos valores de las instancias de 50x50 y 60x60 excedían las capacidades computacionales disponibles. Por ello, de las sesenta y ocho instancias creadas, se evaluaron un total de cuarenta y ocho instancias: dieciocho de 10x10, diez de 20x20, diez de 30x30 y diez de 40x40.

De ese modo, se pueden evidenciar los resultados de los indicadores propuestos al utilizar el método down-slope en las instancias creadas en la Fig. 10, Fig. 11 y Fig. 12.

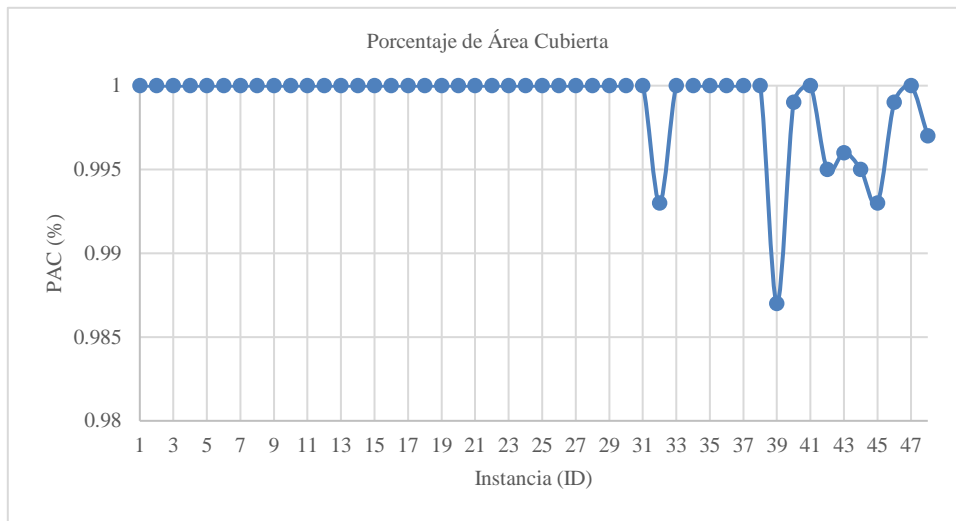


Fig. 10. Porcentaje de Área Cubierta

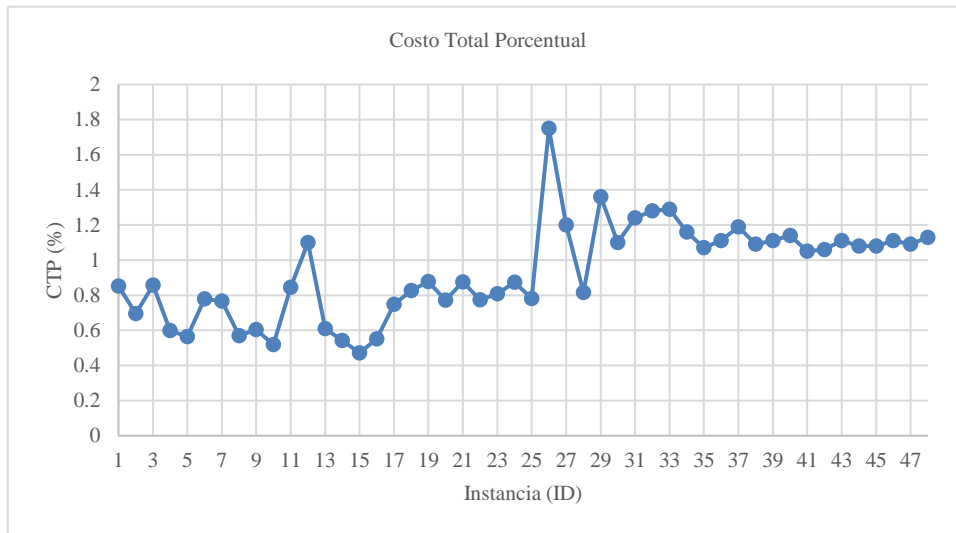


Fig. 11. Costo Total Porcentual

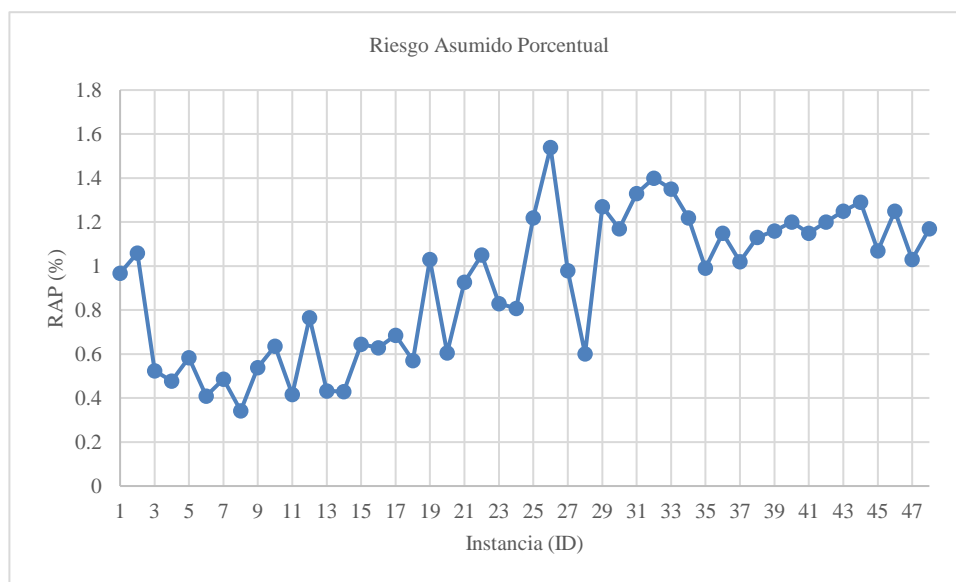


Fig. 12. Riesgo Asumido Porcentual

De acuerdo con la TABLA VIII, el indicador PAC promedia un 79,02% de cubrimiento de los terrenos, mientras el valor ideal es que tienda a ser cercano al 100%. La principal causa de este déficit es el algoritmo usado para evaluar las instancias (*down-slope*), el cual funciona bajo un enfoque Online, por lo cual desconoce todas las regiones y elementos dentro del mapa hasta que los percibe con su alcance. Esto conlleva a que no esté al tanto de regiones sin cubrir pues desconoce su ubicación. Dada su falta de información a priori sobre el mapa, este no puede planear una ruta que asegure el cubrimiento del mapa de manera global desde un principio, sino que, sobre la marcha, va determinando sus desplazamientos con una regla heurística similar al vecino más cercano (*Nearest Neighbour*).

TABLA VIII.  
RESULTADOS DE INDICADORES DE DESEMPEÑO

Indicador	Actualidad	Meta
CTP	93%	< 93%
PAC	99%	= 100%
RAP	92%	< 92%

De acuerdo con lo anterior, se concluye que una característica a mejorar en el método es el proceso de planeación de rutas, de manera que se evite tanto la falta de cubrimiento en ciertas regiones del mapa (que es lo que está impactando al PAC), como desplazamientos que concluyan en ciclos cerrados dentro del mapa que hacen que se finalice el recorrido con altos costos incurridos, y un cubrimiento bajo.

#### IV. ANALIZAR

##### A. Análisis de Oportunidad

En la sección pasada se estimaron los valores de los indicadores, todos ellos alejados del valor ideal. Sin embargo, no se podía asegurar qué tan alejados se encuentran de los valores óptimos. En esta sección se mostrará cómo al cambiar el criterio del método actual, el valor de los indicadores cambia, demostrando que existe un problema de toma de decisiones. Para ello se presenta una instancia de 8x8 a modo de ejemplo, que será resuelta tanto por el algoritmo actual como por un algoritmo análogo con una metodología de desplazamiento distinta. En las Fig. 13, Fig. 14; **Error! No se encuentra el origen de la referencia.** y Fig. 15

se representan los mapas de costo, riesgo y la estructura de las rutas respectivamente. Para simplicidad del ejemplo, los únicos obstáculos presentes son rocas cuyas celdas se ven de color negro, y una MAP de color rojo, con el fin de poder hallar los indicadores CTP, RAP y PAC que se obtienen con cada ruta. La ruta R1 fue diseñada a partir del algoritmo *down-slope*, mientras que la ruta R2 es producto de una modificación del algoritmo antes mencionado, en el cual, se tiene conocimiento de las zonas que no han sido transitadas. Los indicadores asociados a las rutas se evidencian en la TABLA IX.

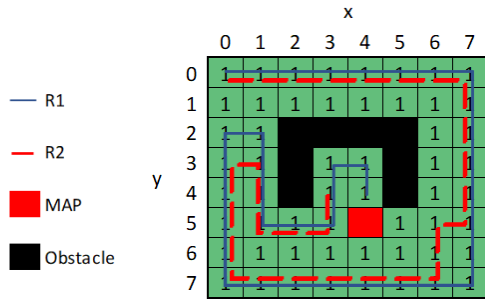


Fig. 13. Mapa de costo

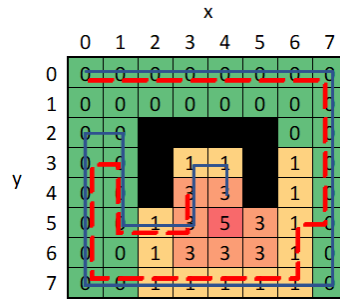


Fig. 14. Mapa de riesgo

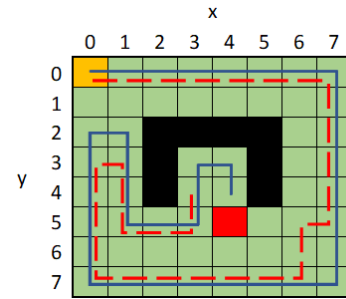


Fig. 15. Mapa de rutas

TABLA IX.  
INDICADORES OBTENIDOS POR RUTA

Ruta	Riesgo	Costo	CTP	RAP	PAC	N° Pasos
R1	17	38	69,09%	43,59%	100%	38
R2	14	33	60,00%	35,90%	100%	33

Comparando los indicadores de cada ruta presentados en la TABLA IX, se aprecian mejores resultados por parte de la ruta R2, siendo que esta requiere menos pasos para cubrir completamente el terreno, y a la vez, incurriendo en menos costo por desplazamiento y menos riesgo para el agente.

La diferencia entre los desempeños de ambos recorridos se debe a cómo se determinan los movimientos posibles desde cierta posición. El algoritmo *down-slope* decide hacia qué celda moverse, desde donde se encuentra el agente, únicamente sobre el conjunto de celdas adyacentes que su alcance abarca. Es por esto por lo que cabe la posibilidad de que el agente, mientras se aproxima hacia cierta zona del terreno previamente cubierta, no se percate de ello sino hasta que su alcance entre en contacto con alguna celda de tal zona, incurriendo en costos innecesarios (o incluso riesgo) por dichos movimientos. Esto se aprecia en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, en la zona comprendida por las celdas (0,2) y (1,2). En esta porción del mapa, la ruta R1 realiza un giro justamente estando adyacente a las celdas (0,1) y (1,1) las cuales fueron previamente cubiertas por el alcance cuando el agente realizaba los primeros pasos de la ruta la cual inicia en (0,0). Por su parte, la ruta R2 no visita celdas que su alcance ya abarcó.

Se concluye que el agente que realiza el recorrido no posee ningún medio a través del cual reforzar su regla de decisión del movimiento siguiente además de su propio alcance. Cuando este recorre el mapa, aquellas celdas que su alcance deja de abarcar, regresan a ser inexistentes para él. Adicionalmente, dado que sólo tiene permitido realizar movimientos rectilíneos, siempre que inicia un recorrido en alguna celda en la frontera del mapa, este seguirá avanzando sobre el borde hasta encontrarse con el primer obstáculo, desaprovechando así la utilidad de su alcance para cubrir más celdas sin realizar pasos adicionales. Este alcance fuera de límite se evidencia en la Fig. 16. En esta, el agente comienza su ruta en la esquina inferior izquierda (celda amarilla) y continúa a través del borde inferior hasta alcanzar el límite derecho del mapa. Dado que el alcance está compuesto por las ocho celdas alrededor de la posición del agente, cuando este transita por una frontera, hay una porción del agente que rebasa los límites del mapa (celdas verdes).

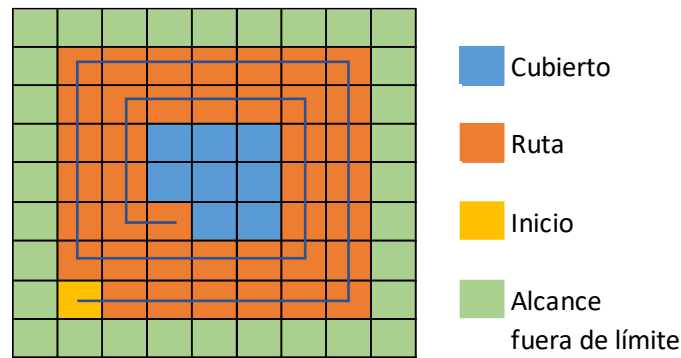


Fig. 16. Desaprovechar alcance

Un proceso de recorrido que mejoraría lo anterior es ejemplificado en la Fig. 17 donde sólo se desborda el alcance al inicio del recorrido, y en el trayecto posterior se recorren aquellas celdas que permiten aprovechar el cubrimiento del alcance. Esto conlleva a que la longitud del trayecto necesaria para cubrir el terreno por completo sea menor, disminuyendo a su vez lo costos incurridos en el desplazamiento y el riesgo asumido en la tarea.

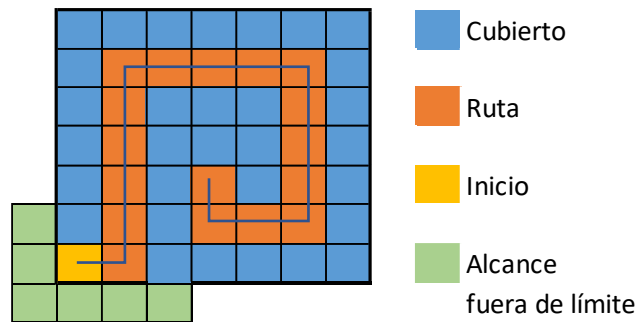


Fig. 17. Aprovechar alcance

Sin embargo, las Fig. 16 y Fig. 17 es usada para ilustrar esta clase de recorrido sencillo, puesto que, en la práctica, las instancias sobre las cuales se prueban los modelos están integradas por un gran número de distintos obstáculos (algunos de los cuales no son franqueables) por lo que este patrón de recorrido tan ideal se hace infactible, lo que conlleva a decidir entre varias posibilidades de movimiento que derivan en trayectorias que pueden impactar los objetivos de distintas maneras, dadas las relaciones conflictivas inherentes de beneficio - costo (*trade-offs*) entre estos.

Para ilustrar lo anterior, considerarse las rutas consolidadas en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** Ambas i nician en la celda (0,0). Comienzan a avanzar paralelamente con el borde superior del mapa hasta alcanzar la esquina superior derecha (celda (7,0)). El agente comienza a descender paralelo con el borde derecho del mapa hasta la celda (7,5), que es cuando las rutas se bifurcan. La ruta R1 desciende hasta la esquina inferior derecha y continúa paralela con el borde inferior hasta llegar a la esquina inferior izquierda, asumiéndose en esta trayectoria, un riesgo de cinco puntos. La ruta R2, por su parte, desvía su curso una celda a la izquierda para posteriormente descender y hasta el borde inferior y reencontrarse con la ruta R1 en la esquina inferior izquierda. En este movimiento el agente se expuso a un riesgo de siete puntos. Esta leve desviación, producto del mecanismo de desplazamiento mejorado en el algoritmo *down-slope*, pareciera perjudicar más que mejorar: llegados a este punto, ambos recorridos, con un progreso similar, ya difieren en cuanto a los indicadores objetivos. Por un lado, la ruta R1 ha asumido menos riesgo que la ruta R2, pero esta última ha cubierto una celda con la que más adelante R1 incurrirá en más riesgo (celda (5,5)). Es por esto por lo que se hace necesario diseñar un método que construya rutas progresivamente, a medida que toma decisiones de movimientos que integren los indicadores y objetivos de una manera holística, que en últimas conlleve a una buena solución (en lo posible, óptima). De esta manera, aquellas decisiones que en determinada etapa de la construcción de la ruta parecieren cuestionables (como el ejemplo anterior), a posteriori sean de beneficio para el resultado final.

### B. Revisión de literatura

Según la información revisada, la investigación por parte de las organizaciones de desminado humanitario más importantes del planeta se enfocan casi que exclusivamente en la dimensión tecnológica en las operaciones [10]. Adicionalmente, la búsqueda de

bibliografía realizada por el equipo hasta el momento no ha logrado encontrar algún modelo o problema cuyas características y supuestos teóricos se adapten completamente a la descripción del problema que el proyecto busca solucionar. En la TABLA X, se presenta una recopilación de problemas relacionados al del presente proyecto.

TABLA X.  
DESCRIPCIONES DE PROBLEMAS TEÓRICOS SIMILARES, MÉTODOS DE SOLUCIÓN

Problema	Descripción	Métodos
<b>Asymmetric Traveling Salesman Problem</b> [19]	Dado un <i>grafo dirigido</i> (ver Anexo 3) o no dirigido con un conjunto de nodos (representan localidades/ciudades en su aplicación más conocida) y un conjunto de arcos que conectan los nodos, dichos arcos poseen un costo/peso, asociados al transporte entre los nodos que conecta el arco. El objetivo consiste en encontrar el recorrido (conjunto de arcos) que lleven a todos los nodos del grafo exactamente una vez, retornando al nodo de partida ( <i>ciclo Hamiltoniano</i> ) [19].	Métodos exactos: - <i>AP-Based Branch-and-Bound</i> - <i>Additive Branch-and-Bound</i> - <i>Branch-and-Cut Approach</i>  Heurísticas: - <i>Nearest Neighbor &amp; Greedy</i> - <i>Cycle Cover</i> - <i>Local Search</i> - <i>Repeated Local Search</i>
<b>Covering Tour Problem</b>	Se tiene un <i>grafo no dirigido</i> con un conjunto de nodos. Este a su vez está dividido en tres subconjuntos de nodos: visitables, obligatorios, alcanzables. Los nodos visitables son aquellos que tienen arcos que los hacen asequibles desde otros nodos. Los nodos obligatorios son aquellos que pertenecen al conjunto de los visitables, y que, por motivos de restricción del problema, deben estar incluidos en el recorrido del grafo. Finalmente, los nodos alcanzables son aquellos que no están conectados con arcos a ningún nodo; sin embargo, están ubicados a cierta distancia de los nodos visitables, de forma que, al pasar por estos últimos, los nodos alcanzables puedan considerarse como <i>cubiertos</i> [20], [21]. Cada arco posee un costo/peso asociado al desplazarse por los nodos que conecta. El objetivo consiste en determinar un recorrido de mínimo costo/peso total sobre un subconjunto de los nodos alcanzables, que incluya todos los obligatorios y todos los alcanzables sean cubiertos retornando al nodo de inicio ( <i>ciclo Hamiltoniano</i> ).	Metodología propuesta en [20]: 1. Modelación de problema a través de Programación Lineal Entera. 2. Resolución con algoritmo exacto <i>Branch-and-Cut</i> , junto a heurística combinada*.  *Heurística combinada: <i>GENIUS</i> y <i>Set Covering PRIMALI</i> .
<b>Online Shortest Path (OSP)</b> [22]	Dado un <i>grafo dirigido acíclico</i> [ver Anexo 3], conformado por un conjunto de nodos y un conjunto de arcos cuyos costos/pesos asociados pueden variar dinámicamente de manera arbitraria (generalmente adversa), dado que estos pesos están caracterizados parcialmente al principio, y en el peor de los casos completamente desconocidos. Cuando se conoce parcialmente el grafo, se estima la ruta más corta con esta información entre un nodo origen y un nodo destino. Sin embargo, conforme se recorre el grafo, el conocimiento sobre los costos/pesos de los arcos hacia los nodos adyacentes se actualiza, alterando el grafo, y, por ende, la ruta óptima. El objetivo entonces es determinar, al momento de llegar a un nuevo nodo (que es cuando se actualiza la información del grafo), el nodo adyacente al cual dirigirse, minimizando la diferencia entre el recorrido óptimo original y el recorrido resultante de los cambios paulatinos que adquirió el grafo [22].	Modificación del algoritmo <i>Bandit Shortest Path</i> . <i>Restricted Multi-Armed Bandit Problem Algorithm</i> [22].
<b>Milling Problem/Lawn Mowing Problem</b>	Se tiene una región plana (polígono convexo, o la unión de polígonos convexos conectados de alguna forma) la cual representa un área que debe de ser cubierta por otro Polígono de Tamaño Definido (PTD), mientras imprime su marca en cada zona del área que ya recorrió evidenciando su cubrimiento (ejemplo: se tiene un jardín con abundante césped. Una podadora, al pasar por el césped, deja su marca debido al volumen que eliminó). Precisamente la situación ejemplo sobre podar el césped fue la que inspiró la formulación de este problema, conocido como <i>Lawn Mowing Problem</i> . Un problema estrechamente relacionado es el <i>Milling Problem</i> el cual difiere con el anterior en que permite al PTD salir de la región, mientras que el <i>Milling</i> no. El objetivo es determinar un recorrido en que el PTD cubra toda la región, minimizando los cambios de dirección [23].	Metodología propuesta en [23] para el <i>Lawn Mowing</i> : Descomposición de región en zonas. Cálculo <i>Minimum Spanning Tree</i> (MST) de cada zona. Enlazamiento de componentes en MST global con algoritmo <i>Kruskal-like Greedy</i> .
<b>k-Watchmen Problem (KWP)</b>	Se tiene una región poligonal (sea compacta o parcialmente hueca) y un conjunto de k guardias. Cada guardia se caracteriza por tener un alcance de "visibilidad", el cual es un polígono cuyo centro es el mismo guardia, donde su área representa el espacio a la redonda que el guardia puede observar desde su posición. Se debe determinar la ruta de los k guardias, de forma que la región poligonal sea completamente vigilada. Las funciones objetivo, con las cuales se mide la optimalidad de la (s) ruta(s), suelen ser dos: la minimización de la ruta más larga; la minimización de la sumatoria de las rutas de los guardias [24].	Heurística propuesta por los autores para generar rutas para k guardias, las cuales permiten la vigilancia completa de un polígono (agujerado o no). Propuesta en [24].

TABLA XI.  
RESUMEN REVISIÓN DE LITERATURA

Título	Autor (es)	Objetivo	Método	Resultados	Aporte al Proyecto
<i>Safest path adversarial coverage</i>	R. Yehoshua, N. Agmon,	Proponer y evaluar metodologías de solución para el problema del cubrimiento máximo, a partir	Se plantean dos algoritmos heurísticos: <i>Spanning-Tree Adversarial Coverage</i> (STAC) y <i>Greedy Safest Adversarial Coverage</i>	Bajo diversas condiciones propuestas, finalmente se concluye que STAC tiende a alcanzar un mayor	Los algoritmos propuestos en este documento pueden proveer una

<p>(Industria: Robótica) (Tipo: Documento académico)</p>	<p>and G. A. Kaminka (2014) [25]</p>	<p>de un enfoque donde en el entorno del robot se presentan obstáculos que pueden detenerlo. De este modo, el objetivo principal es encontrar la ruta de cubrimiento máximo más segura.</p>	<p>(GSAC). STAC consiste en visitar primero las celdas seguras y luego las peligrosas maximizando el porcentaje de cubrimiento antes de que el robot impacte por primera vez con una celda peligrosa; por otra parte, GSAC dirige al robot hacia las áreas seguras cercanas que aún no hayan sido cubiertas mediante la generación de rutas alternativas que representen el menor riesgo para el robot.</p>	<p>cubrimiento esperado mientras que GSAC genera rutas con una menor incursión en riesgo.</p>	<p>estructura general para construir un método que tenga en cuenta tanto la seguridad en la ruta como el cubrimiento del área.</p>
<p><i>A Solution to Vicinity Problem of Obstacles in Complete Coverage Path Planning</i> (Industria: Robótica) (Tipo: Documento académico)</p>	<p>C. Luo, S. X. Yang, D. A. Stacey, and J. C. Jofriet (2002) [26]</p>	<p>Evaluar la efectividad del algoritmo propuesto basado en el funcionamiento de las redes neuronales, para solucionar el problema del cubrimiento máximo de un robot barrendero.</p>	<p>Los nodos se caracterizan por poseer un valor negativo en caso de ser un obstáculo; positivo, si es un nodo no visitado; cero, si es un nodo ya visitado. De ese modo, se emula el comportamiento de las neuronas con cargas que generan el dinamismo del modelo. Gracias a ese planteamiento, el robot se adapta a los nodos que están adyacentes a él, así, está programado a dirigirse siempre a los nodos cuyo valor es positivo.</p>	<p>El algoritmo planteado es capaz de recorrer por completo el medio por el que se desplaza, evitando los obstáculos. El modelo no considera la optimización de ninguna función global de costo ni tampoco contempla el previo conocimiento del entorno.</p>	<p>El modelo planteado otorga un punto de partida sobre la construcción de un método que recorra siempre el entorno donde se desplaza.</p>
<p><i>Spiral-STC: An On-Line Coverage Algorithm of Grid Environments by a Mobile Robot</i> (Industria: Robótica) (Tipo: Documento académico)</p>	<p>Yoav Gabriely; Elon Rimon. (2003) [27]</p>	<p>Diseñar un algoritmo competitivo* (competitive ratio) para solucionar el online coverage path: Un robot con una herramienta sensorial de alcance D debe cubrir un área (cuadrícula de <math>n \times n</math> celdas de tamaño D), completamente, esquivando obstáculos estacionarios, y siguiendo la ruta más corta posible. El robot desconoce por completo el ambiente, y es en medio del proceso de cubrimiento que descubre sus características. *Un algoritmo es competente si la solución a cualquier instancia (la ruta output) es un múltiplo entero de la solución offline (cuando se posee con información previa del mapa).</p>	<p>Discretización de terreno en cuadrículas de tamaño D. Mejora del existente <i>2D-Spiral-Spanning Tree Coverage</i>.</p>	<p>Mejora de competitividad en comparación al algoritmo Depth-First Search, además de mejores soluciones. Mientras otros algoritmos requieren usar recursos externos, como lo son: pebbles y trazas feronómicas, el propuesto en el documento únicamente usa recursos del robot en el proceso. El Spiral STC resuelve cualquier cuadrícula plana (instancia) en tiempo lineal (<math>O(n)</math>), generando rutas de longitud máxima <math>(n+m)D</math>, y se demuestra que es worst-case optimal. Este algoritmo finalmente quita la limitación de su predecesor, el cual resolvía únicamente instancias de tamaños muy específicos. Garantiza el cubrimiento de TODA celda libre de obstáculo que sea alcanzable desde la celda INICIO.</p>	<p>La metodología aquí expresa garantiza un objetivo crítico: cubrir, en lo posible, la totalidad del terreno (cuadrícula). Sin embargo, este algoritmo es online, por lo que tal vez no se ajuste muy bien al proyecto presente.</p>
<p><i>Optimal Complete Terrain Coverage using an Unmanned Aerial Vehicle</i> (Industria: Robótica, Automatización, Vigilancia) (Tipo: Documento académico)</p>	<p>Anqi Xu; Chatahut Viriyasuthe e; Ioannis Rekleitis. (2011) [17]</p>	<p>Adaptar un algoritmo de cubrimiento de terreno para ser usado en vehículos aéreos. Este debe generar rutas que permitan al vehículo aéreo cubrir completamente una región, mientras evade obstáculos que lo puedan dañar. La ruta debe minimizar el cubrimiento repetido de zonas en la región. El vehículo aéreo debe retornar donde empezó.</p>	<p>Se representa la región integrada por obstáculos como una imagen en dos dimensiones. Esta se descompone en regiones más simples (celdas) usando el algoritmo <i>Boustrophedon Cellular Decomposition</i> (BCD). Previo a la ejecución de BCD, los autores proponen una serie de reglas empíricas para mejorar las celdas que genera, y por ende, mejorar las trayectorias. Se determina el circuito euleriano para visitar las celdas haciendo uso de programación lineal. Con el algoritmo Seed Spreader, tomando en cuenta el alcance de visión del</p>	<p>Mejora en comparación al modelo de cubrimiento heurístico de óptimo local (celda vecina más cercana). Optimalidad de ruta en términos de minimización de recubrimientos.</p>	<p>Demostración de uso de programación lineal en la determinación de recorridos eulerianos.</p>

			vehículo, se determinan las trayectorias que seguirá este dentro de cada celda.		
<i>Coverage Path Planning under the Energy Constraint (Industria: Robótica) (Tipo: Documento académico)</i>	Minghan Wei and Volkan Isler (2018) [28]	Plantear un modelo de cubrimiento máximo considerando restricciones de energía durante el recorrido. En este caso se asume que el consumo de energía del robot es proporcional a la distancia recorrida. El objetivo principal consiste en minimizar bien sea el número de rutas como minimizar la suma de las distancias de las rutas	Los movimientos del robot son rectilíneos. Puede realizar tres tipos de desplazamiento: avance, donde el robot se traslada a la celda no visitada más cercana a través de la ruta más corta; seguimiento, en el que el robot se desplaza sobre el contorno sobre el que se sitúa y posteriormente se traslada a lo largo de los contornos no revisados más cercanos a la estación de recarga; retirada, donde el robot regresa a la estación de recarga a través de la ruta más corta. El algoritmo dirige al robot hacia la celda más lejana mediante avance, luego sigue el contorno mediante seguimiento; cuando la energía es suficiente para regresar a la estación de recarga el robot hace retirada.	Para el caso de minimizar el número de rutas, el rango del algoritmo ofrece hasta cuatro rutas. Mientras que, para minimizar la suma de las longitudes de las rutas, el algoritmo obtiene hasta ocho unidades de distancia	La metodología utilizada plantea el concepto de un punto de recargo o de encuentro si se prefiere. Por lo tanto, sería necesario replantear el alcance del presente proyecto con el fin de adaptar el algoritmo presentado en este documento ya que actualmente el agente no cuenta con un punto de reunión o algo similar

### C. Exploración de ideas y selección de alternativa

Con base en la revisión de literatura, es necesario identificar aquellas características compartidas por los problemas recopilados en la TABLA X y la descripción del problema del presente proyecto, con el objetivo de orientar la selección de alternativas de solución hacia aquellas cuyas consideraciones y supuestos las hagan aplicables en el proyecto. La comparación entre los problemas investigados con el problema del proyecto es realizada en la TABLA XII.

TABLA XII.  
COMPARACIÓN PROBLEMAS TEÓRICOS SIMILARES CON EL PROYECTO

Problema	Comparativa con el proyecto
<i>Asymmetric Traveling Salesman Problem [19]</i>	Tanto este modelo como el problema del proyecto se abstraen con un grafo no dirigido asimétrico. En ambos, los arcos poseen un peso asociado al transitar a través de ellos. El objetivo en ambos consiste igualmente en minimizar la longitud total de los arcos del recorrido. Sin embargo, los planteamientos difieren en que el proyecto busca generar una ruta donde el nodo origen es distinto del nodo destino siendo el último desconocido.
<i>Covering Tour Problem</i>	Este modelo coincide con el problema del proyecto en que los nodos del grafo que representa el problema no requieren necesariamente ser visitados en su totalidad, dado que algunos se pueden considerar cubiertos al visitar algún nodo que esté a una distancia específica. Además, el proyecto también contempla el garantizar el cubrimiento total de todos los nodos (ya sea visitándolos o cubriéndolos al visitar un nodo a una distancia específica).
<i>Online Shortest Path[22]</i>	Este modelo y el problema del proyecto difieren en la abstracción que representa el problema, puesto que el primero usa un grafo dirigido acíclico. Además, en el planteamiento del proyecto, las características del grafo que describe el problema (nodos, arcos y sus pesos) son inalterables, mientras que OSP se representa por un grafo susceptible a cambios. La naturaleza del objetivo también difiere ya que OSP busca minimizar la diferencia entre la ruta óptima estática y la ruta dinámica obtenida; mientras que planteamiento del proyecto minimiza el peso del recorrido del grafo. A su vez el proyecto también busca establecer una ruta.
<i>Milling Problem/Lawn Mowing Problem</i>	Ambos operan sobre una abstracción icónica del problema, al representarlo como una región poligonal. A pesar de esto, este modelo requiere una región convexa mientras que el planteamiento del proyecto permite discontinuidades (obstáculos) en la región. Igualmente, el planteamiento del proyecto contempla un PTD caracterizado a partir del alcance de la herramienta del agente desminador. La naturaleza del objetivo es completamente similar exceptuando la característica que busca minimizar: cantidad de cambios de dirección.
<i>k-Watchmen Problem</i>	Ambos operan sobre una abstracción icónica del problema, al representarlo como una región poligonal (sea compacta o con huecos). Tanto el planteamiento del proyecto como el KWP consideran algún ente con un alcance de área asociado (visibilidad para KWP y alcance de la herramienta del desminador para el proyecto) con la cual cubre la región mientras avanza por esta. En ambos casos, se debe determinar la ruta a través de la región para así cubrirla en su totalidad; salvo que, en el KWP, cuando hay más de un vigilante ( $k > 1$ ), se generan $k$ rutas.

Ninguno de los problemas anteriores se ajusta completamente al del proyecto. Sin embargo, algunos sobresalen por su alta afinidad. Tal es el caso de los siguientes: *Assymetric Traveling Salesman Problem*, *Covering Tour Problem* y *k-Watchmen Problem*. Como se mencionó en algunas comparativas de la TABLA XII, estos problemas buscan generar recorridos (tours), y el problema del proyecto, dada su naturaleza contextual, no necesita que el agente que recorre el terreno regrese al lugar donde inició su desplazamiento. Por demás, tomando en cuenta los problemas listados, fue posible reorientar la búsqueda hacia el área aún más específica de la planeación de rutas (*Path Planning*), concretamente, de cubrimiento máximo. Tal búsqueda resultó en la recopilación documental de la TABLA XI. A partir de este listado, se escogieron procedimientos considerados útiles por los

miembros del equipo ya que contaban con la información sobre los criterios de complejidad, adaptabilidad y aplicabilidad, descritos a continuación:

- Complejidad: (Significado de Ciencias de computacionales) incremento del número de operaciones necesarias para culminar el algoritmo conforme crece el tamaño de los datos de entrada. Este criterio está estrechamente ligado con el tiempo de procesamiento del algoritmo.
- Adaptabilidad: (Desde el punto de vista de quien implementa) dificultad de reestructuración del algoritmo/modelo con el fin de adaptarlo a los requisitos propios del proyecto.
- Aplicabilidad: (Desde el punto de vista del usuario) grado de especialización de la solución (genérica o restringida). Se entiende por especialización, como la gama de distintas situaciones que pueden ser abstraídas por determinado modelo, de acuerdo con su naturaleza y supuestos, haciéndolo aplicable. Cuando un modelo puede aplicarse a diversas situaciones se considera genérico; mientras que, si el rango de aplicaciones es muy pequeño, la solución se considera especializada o restringida.

Se sometieron las siguientes alternativas al Análisis de Jerarquía Analítica (AHP):

- *Spanning-Tree Adversarial Coverage*
- *Greedy Safest Adversarial Coverage*
- *Spiral Spanning Tree Covering*
- *Mixed Integer Linear Programming*
- *Depth First Search*

Bajo los siguientes criterios:

- Complejidad: incremento del número de operaciones necesarias para culminar el algoritmo conforme crece el tamaño de los datos de entrada.
- Adaptabilidad: dificultad de reestructuración del algoritmo con el fin de adaptarlo a los requisitos propios del proyecto.
- Aplicabilidad: grado de especialización de la solución (genérica o restringida).

El desarrollo completo de la metodología AHP se presenta en el Anexo 8. En la TABLA se muestra el resultado final de la evaluación. Se aprecia que la mejor alternativa según la metodología es Mixed Integer Linear Programming con un 25%.

#### *D. Objetivos*

##### **Objetivo General**

Diseñar un modelo de ruteo eficiente para búsqueda de minas antipersona en Colombia que considere los costos incurridos por los desplazamientos en el terreno y el riesgo asumido por el agente que realiza la tarea.

##### **Objetivos específicos**

- Revisar y evaluar las alternativas de solución identificadas en la revisión de literatura para adaptarlo al problema estudiado.
- Diseñar y adaptar un modelo que permita generar rutas eficientes para la detección de minas antipersona a través de las metodologías exactas o heurísticas.
- Implementar el modelo diseñado mediante un lenguaje de programación con el fin de evaluar las instancias del problema y medir su desempeño respecto a los indicadores establecidos.
- Interpretar los indicadores resultantes del modelo diseñado, contrastándolos con las metas establecidas para cada uno, y así identificar y controlar la incapacidad de la solución.

E. Plan de trabajo (PdT)

TABLA XIII.  
PLAN DE TRABAJO

OBJETIVO GENERAL						
Diseñar un modelo de ruteo eficiente para búsqueda de minas antipersona en Colombia que considere los costos incurridos por los desplazamientos en el terreno y el riesgo asumido por el agente que realiza la tarea.						
Objetivo específico	Actividades	Área IISE	Herramienta	#	Entregable	Fecha
Revisar y evaluar las alternativas de solución identificadas en la revisión de literatura para adaptarlo al problema estudiado.	Establecer plan de búsqueda de información	N/A	N/A	N/A	Formato del PRD	10-feb-2021
	Consolidar la información recopilada	11. Information Engineering	N/A	A	Formato de resumen de revisión de literatura	25-feb-2021
Diseñar y adaptar un modelo que permita generar rutas eficientes para la detección de minas antipersona a través de las metodologías exactas o heurísticas.	Generar y discutir ideas para el diseño del método exacto	9. Engineering Management	Team Work Communication	B	Registro de las ideas obtenidas	27-feb-2021
	Generar y discutir ideas para el diseño del método heurístico	9. Engineering Management	Team Work Communication	B	Registro de las ideas obtenidas	2-mar-2021
	Modelar la metodología exacta	11. Information Engineering	Code Structures	G	Modelo formulado	6-mar-2021
			Design Process	L		
	Estructurar el pseudocódigo del método heurístico	11. Information Engineering	Code Structures	G	Flujograma de algoritmo	10-mar-2021
			Design Process	L		
	Realizar las modificaciones necesarias a los métodos de acuerdo con la orientación del director	11. Information Engineering	Determining the final system design	M	Registro de propuestas de mejora evaluadas	13-mar-2021
			Obtaining equipment proposals	M	Registro de las modificaciones	
			Evaluation of proposals	M		
	Implementar el modelo diseñado mediante un lenguaje de programación con el fin de evaluar las instancias del problema y medir su desempeño respecto a los indicadores establecidos.	Desarrollar los métodos en el lenguaje de programación más adecuado en cada caso	11. Information Engineering	Programming Techniques	O	Archivos de código fuente
Realizar pruebas preliminares del funcionamiento de los métodos en las instancias generadas		11. Information Engineering	System Testing	P	Registro histórico de correcciones de código fuente	31-mar-2021
Realizar los ajustes necesarios a los métodos		11. Information Engineering	Program Specifications	O	Archivos de código fuente corregidos	3-abr-2021
Interpretar los indicadores resultantes del modelo diseñado, contrastándolos con las metas establecidas para cada uno, y así	Ejecutar pruebas de los métodos sobre las instancias del problema para recopilar resultados de los indicadores	5. Quality & Reliability Engineering	Sample Data	B	Base de datos con resultados de indicadores (Excel)	7-abr-2021

identificar y controlar la incapacidad de la solución.	Elaborar las gráficas y tablas necesarias para interpretar la información de los indicadores de desempeño	5. Quality & Reliability Engineering	Basic Statistics	B	Tablas y gráficas de estadísticas básicas de resultados de indicadores	10-abr-2021
	Comparar los resultados obtenidos con los métodos con los resultados reportados en la etapa MEDIR	11. Information Engineering	Program Specifications	O	Lista de chequeo de resultados contra metas	24-abr-2021
	Realizar las modificaciones necesarias a los métodos de acuerdo con la orientación del director	11. Information Engineering	Determining the final system design	M	Registro de propuestas de mejora evaluadas	1-jun-2021
			Obtaining equipment proposals	M	Registro de las modificaciones	
Consolidar las soluciones exacta y heurística como un modelo integrado	14. Systems Design Engineering	Convergence	G	Modelo terminado	5-jun-2021	

## V. DESARROLLO DEL DISEÑO DE LA SOLUCIÓN

En esta sección se describe el diseño propuesto consiste en un modelo de programación lineal entera mixta para resolver el Shortest Covering Path (SCP), basado en el modelo modificado de Niblett y Church (2016) [29], originalmente propuesto por Current et al. (1984) [30]. Los principales supuestos del problema que se tuvieron en cuenta en el diseño se detallan a continuación:

- Para el agente desminador, es posible comenzar a realizar su tarea a partir de cualquier nodo transitable ubicado en las fronteras del *Área Peligrosa*.
- Quien realiza la tarea es un único agente terrestre.
- Una vez obtenida la ruta óptima, el agente puede consultar los arcos de esta en cualquier momento.
- La tarea finaliza cuando se cubre el *Área Peligrosa* por completo. Posterior a ello, el agente desminador encuentra por sí mismo una forma de regresar (posiblemente a través de la ruta óptima).
- El agente desminador sólo puede desplazarse con movimiento rectilíneo hacia nodos adyacentes a su posición actual.
- La herramienta de detección le permite cubrir desde una misma posición aquellos nodos ubicados a una distancia menor o igual al alcance de la herramienta.

El *Área Peligrosa* por desminar se representa como una cuadrícula subdividida en celdas cuadradas (nodos) las cuales pueden ser transitables o no dependiendo del obstáculo que representan.

El proceso de solución usado para el modelo consta de una serie de iteraciones que involucran actividades de obtención, modificación y resolución. Una iteración se define como el evento que comprende solucionar el modelo, verificar su solución para identificar subtours aislados de la ruta, y así poder añadir las restricciones de tipo (19), correspondiente a cada circuito identificado, al modelo. Posteriormente, se soluciona nuevamente el modelo. Se continúa hasta no encontrar ningún subtour en la solución obtenida.

Las siguientes subsecciones se detallarán el modelo matemático planteado, iniciando por los conjuntos usados, los parámetros, variables y, finalmente, el modelo completo junto con su interpretación.

### A. Modelo

#### 1) Conjuntos

*cells*: Conjunto de nodos dispuestos en la cuadrícula  $\{1, \dots, N\}$ .

*rocks*: Subconjunto de *cells*. Son nodos intransitables que representan rocas en la cuadrícula.

*Nodes*: Subconjunto de *cells*. Son nodos transitables en la cuadrícula.

*Arcs*: Conjunto de arcos formados por la unión de dos nodos  $\{(i, j) \mid i \in Nodes \cup \{0\}, j \in Nodes, i \neq j\}$ .

*Borders*: Subconjunto de *cells*. Son nodos transitables ubicados en las fronteras de la cuadrícula.

## 2) Parámetros

*N*: Constante numérica suficientemente grande. En este caso, la cantidad de nodos en la cuadrícula

*side*: cantidad de nodos que hay en una frontera  $\sqrt[2]{N}$ :

$C_i$ : Costo incurrido al acceder al nodo *i*

$R_i$ : Riesgo incurrido al acceder al nodo *i*

$A_{ij}$ : 1 si desde el nodo *i* se puede acceder al nodo *j*; 0 en otro caso

$COV_{ij}$ : 1 si al acceder al nodo *i* se cubre el nodo *j* con el alcance de la herramienta de desminado; 0 en otro caso.

$\beta$ : Factor de importancia relativa del costo sobre el riesgo en la operación.

## 3) Variables

$x_{ij}$ : Número de veces en las que el arco  $(i, j) \in Arcs$  se recorre.

$y_i$ : 1 si la ruta comienza a partir del nodo *i*; 0 en otro caso.

$w_{ij}$ : 1 si el arco  $(i, j)$  se establece al menos una vez; 0 en otro caso.

$$\text{Minimizar Costo} = \sum_{(i,j) \in Arcs} C_j * x_{ij} \quad (4)$$

$$\text{Minimizar Riesgo} = \sum_{(i,j) \in Arcs} R_j * x_{ij} \quad (5)$$

## 4) Restricciones

$$x_{ij} \leq A_{ij} * w_{ij} * N, \forall (i, j) \in Arcs, i \neq 0 \quad (6)$$

$$x_{ij} \geq w_{ij}, \forall (i, j) \in Arcs, i \neq 0 \quad (7)$$

$$\sum_{\substack{j \in Nodes \\ j \neq p}} x_{pj} - \sum_{\substack{i \in Nodes \\ i \neq p}} x_{ip} \geq 2 * y_p - 1, \quad \forall p \in Borders \quad (8)$$

$$\sum_{\substack{j \in Nodes \\ j \neq k}} x_{kj} - \sum_{\substack{i \in Nodes \\ i \neq k}} x_{ik} \leq y_k, \quad \forall k \in Nodes \quad (9)$$

$$x_{0p} = y_p, \quad \forall p \in Nodes \quad (10)$$

$$\sum_{p \in Borders} y_p = 1 \quad (11)$$

$$\sum_{\substack{k \in Nodes \\ k \notin Borders}} y_k = 0 \quad (12)$$

$$\sum_{(i,j) \in Arcs} COV_{kj} * x_{ij} \geq 1, \quad \forall k \in Nodes \quad (13)$$

$$w_{ij} + w_{ji} - \sum_{\substack{k \in Nodes \\ k \neq j \\ k \neq i}} w_{ik} - \sum_{\substack{k \in Nodes \\ k \neq j \\ k \neq i}} w_{jk} \leq 1, \forall (i,j) \in Arcs, i \neq 0 \quad (14)$$

$$x_{ij} \in \mathbb{Z}^+ \cup \{0\}, \quad \forall (i,j) \in Arcs \quad (15)$$

$$y_i \in \{0, 1\}, \quad \forall i \in Nodes \quad (16)$$

$$w_{ij} \in \{0, 1\}, \quad \forall (i,j) \in Arcs \quad (17)$$

El modelo es de naturaleza multiobjetivo pues las dimensiones de costo (4) y riesgo (5) del recorrido deben minimizarse conjuntamente. A través del método Weighted Sum, se crea una función integrada por los múltiples objetivos, siendo estos priorizados previamente por el decisor mediante ponderaciones de preferencia. Dicho método se caracteriza por su simplicidad aplicativa y la flexibilidad que le ofrece al decisor de usar el método de priorización más conveniente [31].

Se usará este método pues a pesar de su alta subjetividad, dada la convexidad del problema, es posible obtener todos los óptimos de Pareto [32]. Dada su simplicidad y efectividad para hallar un amplio espectro de soluciones, este método se considera adecuado para este proyecto.

Se propone la función objetivo ponderada en (18). Esta debe normalizar los objetivos independientes para obtener soluciones consecuentes con los factores de prioridad [31].

$$\text{Minimize } z = \frac{\text{Costo} - z_{\text{costo}}^*}{z_{\text{costo}}^{\text{Nadir}} - z_{\text{costo}}^*} * \beta + \frac{\text{Riesgo} - z_{\text{riesgo}}^*}{z_{\text{riesgo}}^{\text{Nadir}} - z_{\text{riesgo}}^*} * (1 - \beta) \quad (18)$$

Donde  $z_i^*$  es el valor *Ideal* de la función objetivo  $i$  –ésima;  $z_i^{\text{Nadir}}$  es el valor *Nadir* de la función objetivo  $i$  –ésima [31].

Los valores de la función objetivo varían de acuerdo con los parámetros de penalización establecidos por el usuario del modelo. Esto se debe a que el alcance del presente proyecto no incluye la determinación de formas de cuantificar o medir los costos y riesgos asociados a la tarea de desminado, sino que se centra en la obtención de una ruta óptima (o cercana a ella) partiendo del supuesto de que se cuenta con parámetros confiables y representativos.

La expresión (6) garantiza la lógica de desplazamiento al restringir aquellos arcos entre nodos que no son adyacentes, en estos casos la variable  $x_{ij}$  toma un valor de cero. Por otra parte, para aquellos nodos que sí son adyacentes, pueden ser conectados, permitiendo que la variable  $x_{ij}$  tome un valor positivo.

La restricción (8) asegura que la ruta comience desde un nodo que se encuentre en alguna frontera de la cuadrícula. Dado que un arco puede recorrerse más de una vez, la expresión (8) asegura que para el nodo inicial haya más salidas que entradas asegurando que nunca se retorne a él. Análogamente, la siguiente expresión (9) permite la existencia de un nodo final, al cual se llegue más veces de las que se parta. Estas restricciones serían las equivalentes a las ecuaciones de balance en un problema tradicional de ruteo.

El problema puede ser abstraído como un grafo dirigido asimétrico (Anexo 3). Por esto, la penalización de recorrer el arco  $(i, j)$  equivale a posicionarse en el nodo  $j$  incurriendo en sus características de costo y riesgo. Considérese la siguiente ruta ejemplo:  $(i \rightarrow j, j \rightarrow k, k \rightarrow h, h \rightarrow l)$  donde  $i$  es el nodo inicial y  $l$  el nodo final. En la función objetivo se tendría en cuenta los costos y riesgos de los nodos  $\{j, k, h, l\}$  excluyendo al nodo  $i$ . Para resolver lo anterior, se plantea la existencia de un nodo ficticio identificado con el índice “0” (cero), el cual permite contabilizar el costo y riesgo del nodo inicial  $i$  al ser este el destino de un arco.

En respuesta a lo anterior, la ecuación (10) garantiza la penalización incurrida al pisar el nodo inicial al comenzar el desplazamiento, así como efectuar el cubrimiento de los nodos que estén a una distancia menor o igual a su alcance.

De manera conjunta, las ecuaciones (11) y (12) aseguran la existencia de un único nodo inicial, que además esté ubicado en las fronteras del *Área Peligrosa* y no en otro lugar.

La inecuación (13) responde al requerimiento de cubrimiento total de un *Área Peligrosa* con la herramienta de detección. Así, la ruta debe contener un arco  $i \rightarrow j$  tal que el nodo  $j$  pueda cubrir al nodo  $k$ . De este modo, todos los nodos  $k$  dispuestos en la cuadrícula deben ser cubiertos al menos una vez.

El modelo sujeto a las restricciones descritas hasta este punto genera soluciones caracterizadas por la presencia de circuitos o subtours independientes de la ruta que se obtiene a partir del nodo inicial como se muestra en la Fig. 18 (a). En la Fig. 18 (b) se muestra una solución válida equivalente, pues no tiene subtours. Las soluciones con subtours no tienen ninguna utilidad práctica porque representan imposibilidades físicas si un único agente terrestre realiza la tarea.

Es por esto, que surge la necesidad de restringir la existencia de tales subtours aislados. Para ello, los autores [29], basándose

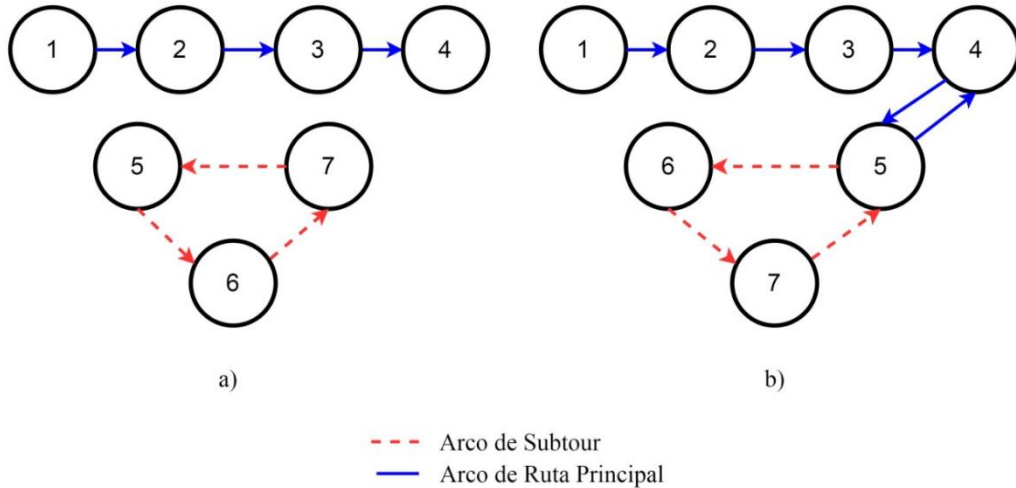


Fig. 18. Subtours embebidos. a) Subtour aislado; b) Subtour embebido

en las restricciones de eliminación de subtours propuestas originalmente por Dantzig, et al [33], conocidas como Clique Packing Constraints o Subtour Elimination Constraints, Ecuación (19), propusieron una modificación de estas, de forma que sólo los subtours independientes de la ruta sean eliminados. La restricción modificada se presenta en (14) para el caso específico de subtours conformados por dos nodos.

El objetivo de la restricción consiste en generar una salida a partir de alguno de los dos nodos que conforman el subtour, hacia un nodo externo al circuito. En otras palabras, el subtour puede seguir existiendo si y sólo si se conecta a algún nodo de la ruta.

$$\sum_{i \in V} \sum_{j \in V} x_{ij} \leq |V| - 1, \quad \forall V \subset N, \{0\} \notin N: |V| \geq 2 \tag{19}$$

Donde,  $V$  es un subconjunto de nodos que conforman el subtour.

Finalmente, las restricciones (13) y (14) aseguran la naturaleza integral de las variables de decisión.

### B. Validación del Diseño Propuesto

#### 1) Eliminación de subtours aislados.

Dado que en este proyecto, el enfoque de ruteo que permite cierto tipo de tours (aquellos adjuntos a la ruta, más no excluidos) [29], la naturaleza de las variables de decisión debe modificarse, puesto que un mismo arco puede ser recorrido más de una vez (en diferentes direcciones) en orden de ser factible en casos poco probables, pero posibles [29]. Este cambio en la descripción de las variables conlleva a que la restricción de eliminación de subtours de Dantzig, et al [34], modificada y propuesta en [29], no funcione como deba.

Considérese el grafo en Fig. 19, el cual representa un conjunto de nodos {1, 2, 3, 4} que conforman un tour ( $x_{12} = x_{21} = x_{23} = x_{32} = x_{34} = x_{43} = 1$ ). El rectángulo de línea discontinua separa este conjunto de nodos externos que poseen conexiones con nodos del subtour, más no hacen parte de este último (sus respectivas variables son 0). Usando la restricción de eliminación de subtours (20), esta quedaría de la forma (21):

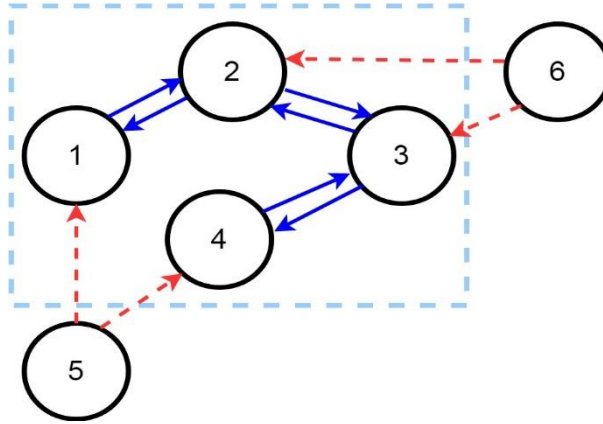


Fig. 19. Dinámica de eliminación de subtours

$$\sum_{(i,j) \in V} x_{ij} - \sum_{k \notin V} \sum_{i \in V} x_{ki} \leq |V| - 1 \tag{20}$$

$V = \{1,2,3,4\}$ , subtour en el ejemplo

$$x_{12} + x_{21} + x_{23} + x_{32} + x_{34} + x_{43} - (x_{51} + x_{54} + x_{62} + x_{63}) \leq 4 - 1 \tag{21}$$

$$6 - (x_{51} + x_{54} + x_{62} + x_{63}) \leq 4 - 1$$

Esto implica que para romper el subtour, se debe acceder a algún nodo de este usando tres arcos distintos. Esto es un defecto del modelo dado que para romper el subtour, basta con que se llegue al subtour desde un nodo externo a este, que además sea parte de la ruta principal. La restricción (20) no estaría modelando esto, sino que, por el contrario, añadiría erróneamente arcos innecesarios, que impactarían la función objetivo obstaculizando la consecución de una solución óptima.

La adaptación propuesta en este trabajo para esta restricción se muestra en (22) para el caso de entrada. Para su análogo de salida, se presenta su versión modificada en (23).

$$\sum_{(i,j) \in AE} w_{ij} - \sum_{\substack{k \notin V \\ k \neq i}} \sum_{i \in V} w_{ki} \leq A - 1 \tag{22}$$

$$\sum_{(i,j) \in AE} w_{ij} - \sum_{\substack{i \in V \\ i \neq k}} \sum_{\substack{k \notin V \\ k \neq i}} w_{ik} \leq A - 1 \tag{23}$$

Donde:

- $V :=$  subconjunto de nodos que conforman un subtour
- $AE :=$  conjunto de arcos que conforman el subtour
- $A :=$  Número total de uso de arcos del conjunto  $AE$

A estas expresiones se les renombra como restricciones de Eliminación o Vinculación de Subtours (*Eliminate or Attach SubTour Constraints*, EAST, por sus siglas en inglés).

En ambas ecuaciones, se considera el conjunto  $AE$  (Arcos Efectivos), que está conformado por los arcos que conectan los nodos del subtour. Por ejemplo, el subtour  $\{1,2,3\}$  (Fig. 20 a.), está conformado por los arcos efectivos  $AE := \{(1,2), (2,1), (2,3), (3,2)\}$ ; por otro lado, los nodos 1 y 3, que integran el subtour, podrían conectarse mediante los arcos de línea punteada, pero estos no se hicieron efectivos en la solución encontrada. Es necesario considerar la suma de los arcos efectivos en lugar de la suma de todas las posibles conexiones de los nodos del subtour por lo siguiente: En el segundo caso, si se muestran todos los elementos de la ecuación (23) aplicado al ejemplo de la Fig. 20 a) se obtendría:

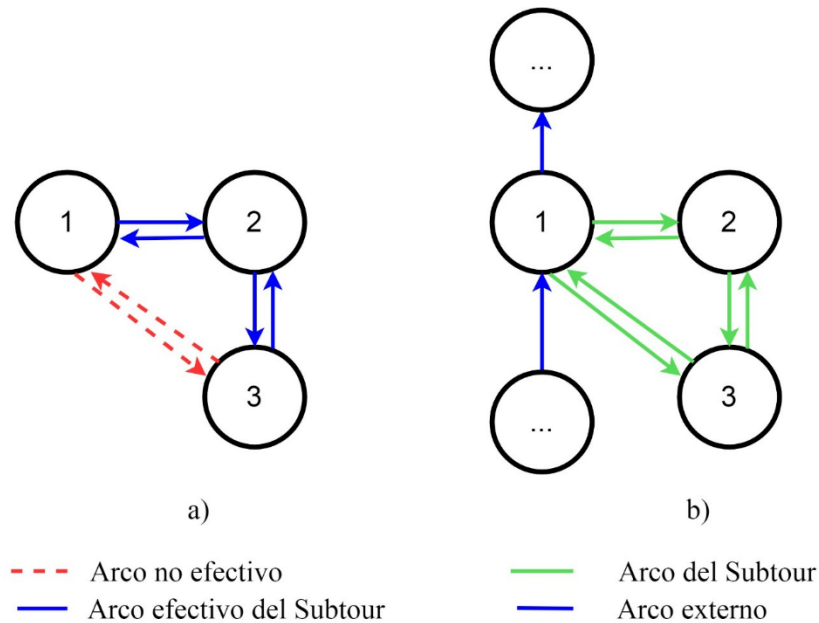


Fig. 20. a) Subtour: Arcos efectivos; b) Solución posterior omitida debido a la restricción EAST aplicada al subtour en a)

$$w_{12} + w_{13} + w_{21} + w_{23} + w_{31} + w_{32} - (\dots) \leq 4 - 1 \tag{24}$$

En la ecuación (24), las variables del lado izquierdo representan todas las conexiones entre los nodos del subtour. Sin embargo, el subtour solo se conforma por algunos de estos arcos (arcos efectivos, variables en negro), mientras que los restantes no integran el subtour pues no se establecieron en la solución (arcos no efectivos, variables en rojo).

Ahora, supóngase que contamos con la solución óptima (o alguna solución factible) de antemano, y se busca probar que el modelo la encuentre. Esta solución se ilustra en Fig. 20 b). En esta se utilizan varios arcos del subtour de Fig. 20 a), incluyendo aquellos que, en el momento en que se restringió tal circuito, no eran efectivos (flechas punteadas, variables en rojo en (24)). La restricción (24) haría infactible la solución (25), y, por ende, el modelo la omitiría, derivando en soluciones peores. Por supuesto,

esto contradeciría la lógica que la restricción quiere imponer en primer lugar: un circuito está prohibido si éste no está conectado con alguno nodo externo al subtour.

$$1 + 1 + 1 + 1 + 1 + 1 - (1) \leq 4 - 1$$

$$5 \leq 3 \tag{25}$$

El motivo radica en que la restricción busca interrumpir el subtour, tomando en cuenta todos los arcos, efectivos y no efectivos. Como las variables de arcos no efectivos, al momento de establecer la restricción, eran equivalentes a cero, ésta funcionaba bastante bien. Pero una solución específica, en una etapa posterior, puede llegar a requerir parte de esos arcos no efectivos, y, aun así, no poder usarlos, puesto que incumpliría con una restricción anterior.

Por lo anterior, la restricción debe considerar los arcos entre los nodos del subtour que sí fueron establecidos en la solución, y no todos de forma indiscriminada. De acuerdo con esto, (24) se modifica y se muestra en la ecuación (26).

$$w_{12} + w_{13} + w_{21} + w_{23} - (...) \leq 4 - 1 \tag{26}$$

De esta forma, la solución de Fig. 20 b) sería factible y la lógica de los subtours se conservaría como se muestra en la ecuación (27).

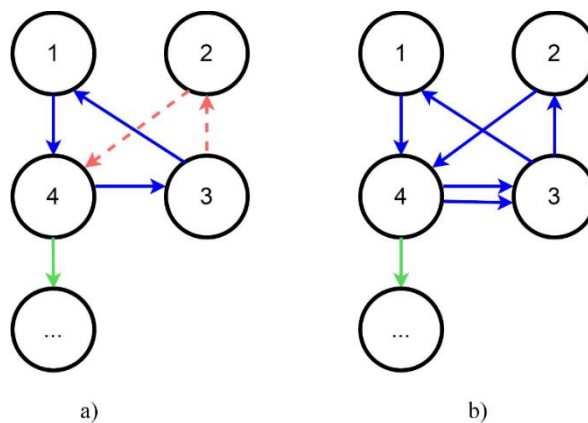
$$1 + 1 + 1 + 1 - (1) \leq 4 - 1$$

$$3 \leq 3 \tag{27}$$

Adicionalmente, las restricciones (22) y (23), están conformadas por la variable  $w_{ij}$ , la cual determina si se usa un arco o no, en lugar de la variable  $x_{ij}$  que expresa el número de veces que dicho arco es utilizado. Lo anterior, se debe al siguiente motivo: supóngase que en las primeras iteraciones de resolución de cierto problema se llega a una solución como la representada en la Fig. 21 a), la cual posee el subtour embebido {1,3,4}. Si la restricción (23) estuviera conformada por la variable  $x_{ij}$ , se encargaría de adjuntar el subtour a un nodo externo, y quedaría constituida como en la ecuación (28).

$$x_{14} + x_{43} + x_{31} - (x_{4(...)}) \leq 3 - 1$$

$$3 - 1 \leq 2 \tag{28}$$



- Arco no efectivo
- Arco efectivo del Subtour
- Arco externo del Subtour

Fig. 21. Factibilidad de doble arco. a) Solución anterior; b) Solución posterior omitida por restricción con variable  $x_{ij}$

En una iteración posterior del modelo, se podría llegar a obtener una solución que luzca como la ilustrada en la Fig. 21 b). Esta también se caracteriza por tener un subtour embebido {1,2,3,4}, que comparte algunos arcos efectivos con el subtour previo {1,3,4}. Nuevamente, la restricción (23) usando la variable  $x_{ij}$  para este nuevo subtour quedaría en la expresión (29).

$$\begin{aligned} x_{14} + x_{43} + x_{31} + x_{32} + x_{24} - (x_{4(\dots)}) &\leq 6 - 1 \\ 1 + 2 + 1 + 1 + 1 - (1) &\leq 5 \\ 6 - 1 &\leq 5 \end{aligned} \tag{29}$$

A pesar de que la (29) funciona, la (28) ha sido incumplida por el uso doble del arco (4,3) como se aprecia en la ecuación (30).

$$\begin{aligned} x_{14} + x_{43} + x_{31} - (x_{4(\dots)}) &\leq 3 - 1 \\ 1 + 2 + 1 - (1) &\leq 2 \\ 4 - 1 &\leq 2 \end{aligned} \tag{30}$$

La razón de lo anterior yace en que las restricciones EAST se establecen tomando en cuenta los arcos efectivos del subtour y el número total de veces que estos se usan. Sin embargo, las restricciones no consideran un posible uso mayor de los arcos efectivos en iteraciones posteriores como sucedió en el ejemplo de la Fig. 21, causando Infactibilidad, por lo que el modelo termina omitiendo la solución de b).

Si se utiliza la variable W para la conformación de (28) y (29), se obtienen las ecuaciones (31) y (32).

$$\begin{aligned} w_{14} + w_{43} + w_{31} - (w_{4(\dots)}) &\leq 3 - 1 \\ 3 - 1 &\leq 2 \end{aligned} \tag{31}$$

$$\begin{aligned} w_{14} + w_{43} + w_{31} + w_{32} + w_{24} - (w_{4(\dots)}) &\leq 6 - 1 \\ 1 + 1 + 1 + 1 + 1 - (1) &\leq 5 \\ 5 - 1 &\leq 5 \end{aligned} \tag{32}$$

De esta forma, se solucionaría la cuestión de subtours de iteraciones anteriores sin limitar el establecimiento de arcos en iteraciones posteriores.

## 2) Considerar subtours conectados a la ruta principal

En [29] proponen la posibilidad de la existencia de *bucles embebidos* (bucles internos o adjuntos a la ruta, conectados a uno o varios nodos de esta) argumentando que pueden conllevar a obtener mejores rutas que los permitan, así parezca contraintuitivo. Argumentan que la eliminación de los subtours se ha enfocado únicamente en aquellos circuitos independientes de la ruta, más no en la posibilidad de que la propia ruta tenga circuitos embebidos, basándose en la idea de que una ruta es más corta que un tour, porque involucra menos arcos.

Sin embargo, existen instancias en las que una ruta, con uno o más subtours embebidos, es más eficiente que una que no los tiene, demostrando así que el enfoque de eliminación de subtours se sesga en la consecución de una ruta sin ninguna clase de circuitos, descartando la posibilidad de obtener una ruta mejor que sí los tenga.

Como ejemplo, considere la instancia ejemplo de la Fig. 22. Allí se ilustra una región a recorrer para cubrimiento con obstáculos. Si se utilizaran las metodologías de eliminación de subtours como las propuestas por Dantzig, et al. [34] o Miller, et al. (MTZ) [35] o el modelo SCPM de Current, et al. [30] con la adición de restricciones antisubtour, se obtendría una ruta (a) de la Fig. 22, la cual se posiciona en nodos completamente innecesarios, incurriendo en mayores costos por desplazamiento (con una distancia recorrida de 74 unidades). La ruta (a) es tan ineficiente, que recorre casi la totalidad de la zona peligrosa, por el hecho de no permitir subtours embebidos, desaprovechando el alcance de la herramienta. Este tipo de rutas tendrían implicaciones graves en la práctica, pues podrían aumentar de forma peligrosa el riesgo para la vida del agente desminador, al obligarlo a posicionarse en un mayor número de zonas de las cuales se desconoce su seguridad. Por su parte, la ruta (b) en la Fig. 22, al permitir subtours embebidos, es mucho más eficiente en comparación con (a), no solo desde el punto de vista de su valor objetivo (con una distancia recorrida de 58), sino de la cantidad de posiciones riesgosas que el desminador (o agente terrestre) tendría que pisar.

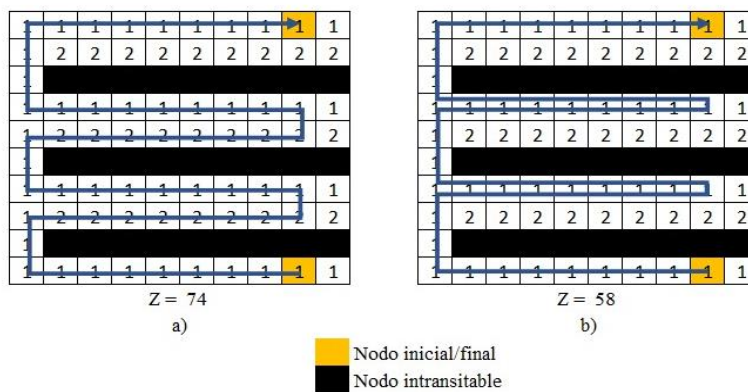


Fig. 22. a) Ruta sin subtours; b) Ruta con subtours embebidos

Sin embargo, el uso de subtours embebidos no solo debe tenerse en cuenta por ser más eficientes, en algunas circunstancias, es la única forma de tener total cubrimiento del Área Peligrosa. Por ejemplo, en la Fig. 23, se ilustra una región que simboliza una zona a transitar, con el fin de poder cubrirla con la herramienta de detección. Suponiendo que se tiene un alcance de una celda, nótese que solo es posible cubrir el terreno en su totalidad únicamente si es permitido un subtour embebido en la ruta (a). De caso contrario, la ruta (b) no cumpliría con el requisito de cubrimiento total del área porque no sería factible al prohibirse los subtours (incluso aquellos embebidos en la ruta).

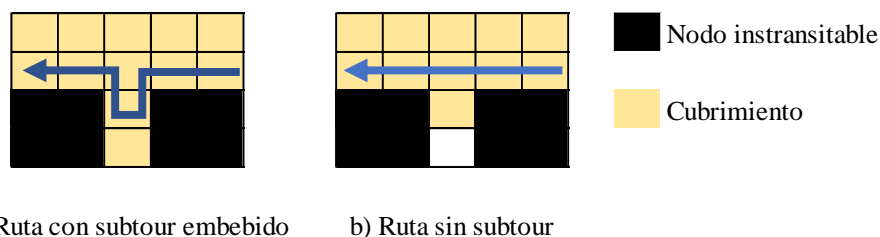


Fig. 23. Infactibilidad de rutas sin subtours embebidos. a) Ruta con subtour embebido; b) Ruta sin subtour

### 3) Considerar arcos usados en la misma dirección en varias ocasiones

Una de las ventajas de la naturaleza de las variables mencionada anteriormente (en la cual un arco puede ser establecido más de una vez), es que amplía el espacio factible de soluciones. En la Fig. 24, se presenta una instancia ejemplo, en la cual, la zona

a transitar se ve limitada por varios obstáculos. Cada celda presenta su costo por desplazamiento. La ruta a) es la forma óptima de recorrer tal región cubriéndola por completo. En esta, no se usa ningún arco más de una vez (en la misma dirección). Tómese en cuenta que en los subtours embebidos no se usa un mismo arco más de una vez pues, dada la asimetría del problema, el arco  $(i, j)$  no es igual al arco  $(j, i)$ . La ruta b), por su parte, sí usa varios arcos más de una vez, y a pesar de no ser óptima, presenta una brecha de optimalidad de 4,72%. Por otro lado, la ruta c), no usa un mismo arco en direcciones diferentes ni en direcciones iguales, y sin embargo, su valor objetivo representa una brecha de optimalidad mayor (35,43%), siendo esta solución la de peor valor. Según lo anterior, si el modelo no permitiera establecer un mismo arco más de una vez, jamás entraría en consideración la ruta b), la cual, en términos de resultado, es mucho mejor que la ruta c). Para aquellas situaciones en que, por motivos de complejidad computacional, encontrar la solución óptima del problema no sea alcanzable, el espectro de buenas soluciones factibles estaría ignorando posibles rutas como la ruta b).

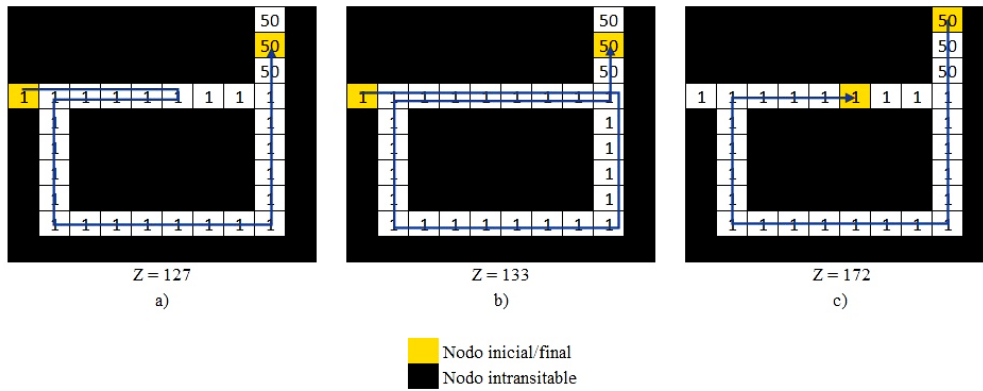


Fig. 24. Uso de arcos más de una vez. a) Solución óptima; b) Solución factible multi arco; c) Solución factible desfavorable

La importancia de la naturaleza multi arco de las variables de decisión queda afianzada con más relevancia, al tomarse en cuenta aquellos casos en los cuales la ruta óptima precisa de usar uno o más arcos en más de una vez, como la instancia de la Fig. 25. Por otra parte, el planteamiento del modelo considera la penalización por vértice, donde el costo de utilizar el arco  $i \rightarrow j$  es equivalente a incurrir en el costo del nodo  $j$ . De este modo, el modelo propone soluciones como la de la Fig. 25 b), donde es preferido establecer subtours embebidos a utilizar un mismo arco en más de una ocasión. En contraste, si la penalización fuere por arco de forma asimétrica, es decir, que el costo de usar el arco  $i \rightarrow j$  es diferente al costo de usar el arco  $j \rightarrow i$ , el modelo sería más propenso a generar soluciones como las de la Fig. 25 a), donde la ruta sí utiliza un arco en múltiples ocasiones. La instancia de la Fig. 25 es especial pues posee múltiples soluciones óptimas, a las que se llega dependiendo del tipo de enfoque de penalización anteriormente descritos. Finalmente, la naturaleza multi arco de la variable  $x_{ij}$  del modelo, permite que, si se llegase a cambiar el enfoque de penalización, no se omitirán soluciones como las de la Fig. 25 a).

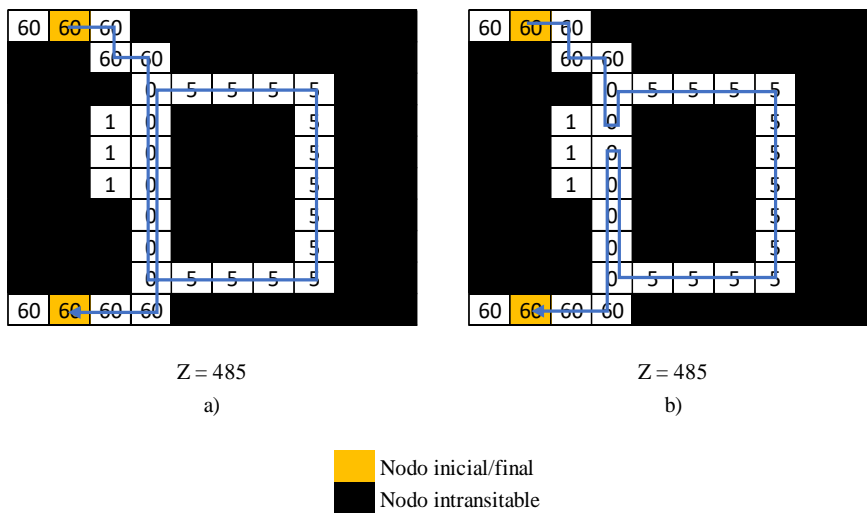


Fig. 25. a) Ruta óptima con multi arco; b) Ruta óptima con subtours embebidos

#### 4) Considerar origen desconocido

Una característica del modelo propuesto es que no establece una ruta a partir de un nodo inicial y final fijados previamente, sino que estos también son establecidos por el modelo al ser resuelto. El modelo se formuló de esta manera por tres razones:

1) La realidad contextual del problema no implica un inicio estático o rígido en el cual un agente desminador debería comenzar a escanear el *Área Peligrosa*. Se parte del supuesto de que, fuera de las fronteras que delimitan el *Área Peligrosa*, los agentes encargados de las labores de desminado pueden transitar con tranquilidad por estar fuera del terreno peligroso o sospechoso. En resumen, dado que el inicio no debe ser preestablecido, este se convierte en parte de las decisiones que debe solventar el modelo, escogiendo el nodo inicial de entre aquellos ubicados en los bordes del terreno.

2) Dado lo anterior, dependiendo del nodo inicial escogido, se obtendrá una ruta óptima diferente. En una instancia cuadrada de  $n^2$  nodos, donde  $n$  es la longitud del lado de la instancia (medida en nodos), se cuenta con  $4n - 4 - O$  nodos iniciales potenciales, donde  $O$  son los nodos fronterizos intransitables. Esto implica que existe un número mínimo de  $4n - 4 - O$  rutas óptimas dependientes del origen. El modelo retorna la mejor ruta entre todas estas.

3) Si el nodo inicio es determinado en el proceso de solución, pero el nodo final es fijado previamente, se está obstaculizando la consecución de una ruta óptima, puesto que se obligaría a que esta tuviese arcos innecesarios, alargándola y encareciéndola, puesto que el modelo establecerá los arcos necesarios para poder llegar al final establecido. Por esto, lo mejor es aprovechar la naturaleza de minimización del modelo, el cual garantiza el cubrimiento total de la región con el menor número de arcos posible.

Para ilustrar la segunda razón expuesta anteriormente, considere el siguiente ejemplo. En la Fig. 26, se ilustra una instancia pequeña de dieciséis nodos. Como ningún nodo fronterizo está obstaculizado, se tienen doce nodos iniciales, y, por ende, mínimo doce rutas óptimas distintas. En (a), se ilustra la ruta óptima cuyo inicio es la esquina superior izquierda. La ruta (b) es mejor que (a), y comienza en la esquina superior derecha. Ya se conocerían dos de las doce rutas óptimas mínimas que existen por cada nodo fronterizo. Sin embargo, con el modelo formulado, se obtiene la mejor ruta posible para recorrer y cubrir la región, la cual se ilustra en (c). Su inicio es el nodo adyacente superior de la esquina inferior izquierda.

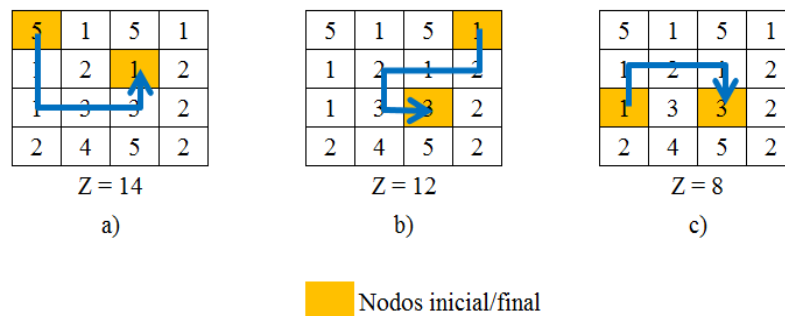


Fig. 26. Origen y final dinámicos

## VI. VERIFICAR

### A. Medición de Impactos

Para la etapa de experimentación, se solucionaron veintiséis instancias de prueba con el modelo propuesto, de las cuarenta y siete usadas para experimentar con la metodología anterior en la etapa MEDIR. De estas, dieciocho instancias eran de un tamaño de cien nodos; y las ocho restantes, de cuatrocientos. El nombre de estas instancias y sus características se pueden consultar en la TABLA XXVIII del Anexo 11.

El método de solución consiste en resolver el modelo de Programación Entera Mixta (MIP, por sus siglas en inglés) sin las restricciones EAST (22) y (23); luego de obtenida una solución, se identifican los subtours aislados de la ruta, para así añadir restricciones EAST para cada subtour según corresponda. Con las nuevas restricciones, el modelo se soluciona nuevamente. Este proceso de solución, identificación y adición de restricciones EAST se denomina *Iteración* y se realiza hasta obtener una solución sin subtours.

Dada la naturaleza multiobjetivo del modelo, se precisa solucionar el modelo varias veces alterando el factor de preferencia ( $\beta$ ) en orden de conseguir soluciones objetivo representativas. Para esto, cada instancia fue resuelta tres veces, variando  $\beta$  entre los valores: 0.2, 0.5 y 0.8. Estos se establecieron pues la función objetivo normalizada integra dos dimensiones: costo y riesgo. Así, se quiso obtener resultados para cada escenario siguiente: dimensión costo más relevante que riesgo ( $\beta = 0.8$ ); la dimensión riesgo más importante que costo ( $\beta = 0.2$ ); ambas dimensiones tienen la misma relevancia ( $\beta = 0.5$ ).

Dada la alta complejidad (NP-Hard) del problema, se establecieron límites de tiempo para el solver, y así obtener soluciones factibles para comparar resultados en tiempos que no excedan el cronograma de la TABLA XIII. Para cada iteración, se estableció un tiempo de cinco segundos. Mientras que para cada proceso de resolución (con un  $\beta$  distinto) cinco minutos. Sin embargo, la resolución instancias que superaban los 100 nodos demandaban tal cantidad de recursos de manera que la CPU del ordenador se veía forzada a trabajar sobre su límite de capacidad. Esto hacía que aplicaciones internas, como el contador de tiempo usado para medir el tiempo de ejecución, se ejecutaran muy lentamente, conllevando a que la medida análoga de este contador se descalibrara del tiempo real. A modo de ejemplo: cierta ejecución se ralentizó tanto por el alto consumo de recursos dado el tamaño exorbitante del problema, que el propio contador actualiza su medición de tiempo de forma descalibrada dado su poco tiempo en ejecución. Es así como sus lecturas de tiempo terminan siendo descoordinadas del tiempo real. Por este motivo, se resalta el hecho de que ninguna de las soluciones encontradas es óptima, sino que son infactibles pues subtours aislados.

El modelo de solución propuesto se implementó en el lenguaje de programación C++, usando la Interfaz de Programación de Aplicaciones (API, por sus siglas en inglés) de AMPL. El modelo MIP se soluciona haciendo uso del solver CPLEX 20.1.0.0. El equipo de cómputo en el cual se realizaron las pruebas fue un HP Laptop 15-ax0011a, con procesador Intel Core i5-6300HG (2.3 GHz) de 4 núcleos, y memoria RAM de 8 GB.

Para consultar la información con los resultados a detalle de las pruebas, se remite al lector al Anexo 11 TABLA XXVIII, que incluye: nombre de instancia; KPI's definidos en el proyecto; función objetivo; factor de preferencia entre las dimensiones de costo y riesgo (ver definiciones del modelo en sección V); MIPGAP (brecha de optimalidad); Estado final de resolución ('solve\_result\_num' de AMPL); Número de restricciones EAST añadidas; Número iteraciones; Tiempo de ejecución.

Respecto al número de restricciones EAST, se generaron en promedio 308 y 86 restricciones para el caso de 100 y 400 nodos respectivamente.

Los KPI's recopilados con el modelo propuesto se presentan en las Fig. 27 y Fig. 28. Nótese que no se está reportando información relativa al indicador PAC puesto que el modelo garantiza un cubrimiento del 100% del *Área Peligrosa*, por lo que exponerlo se hace trivial.

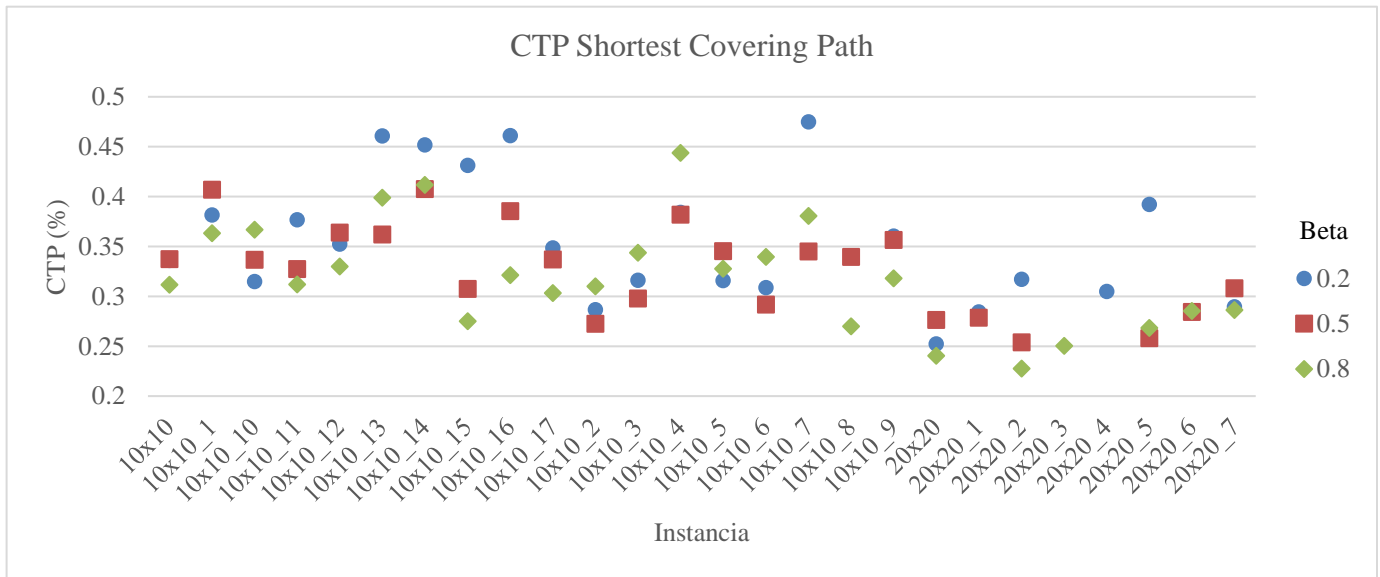


Fig. 27. Indicador CTP SCP

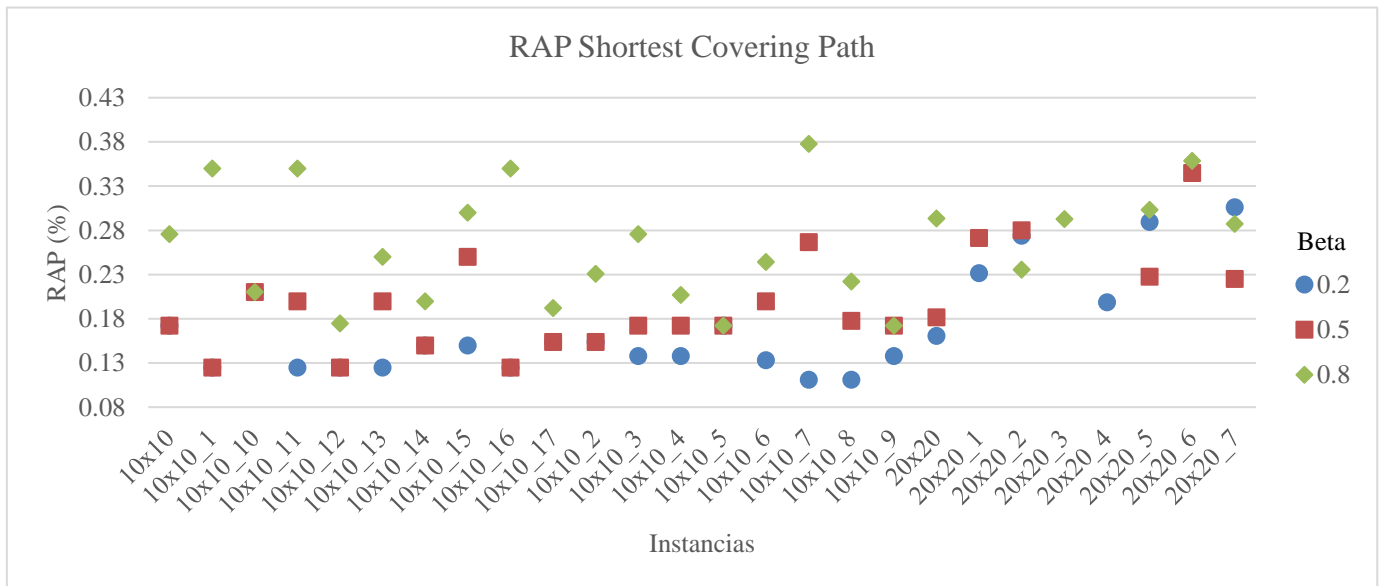


Fig. 28. Indicador RAP SCP

En la Fig. 29, se presenta una comparación de los valores objetivos obtenidos por la metodología anterior y el método propuesto (SCP). Las soluciones tanto del SCP como de la metodología anterior corresponden a aquellas donde  $\beta$  equivale a 0.5.

El gráfico anterior resalta el hecho de que, por regla general, el método propuesto supera con creces al método anterior. Inclusive, en el peor caso del SCP (0.2178) en la instancia 20x20\_6, comparado con el mejor caso del método anterior (0.3791) en la instancia 10x10\_7, este lo supera en un 42.55%. Además, el valor objetivo que se obtiene haciendo uso de la metodología anterior suele ser bastante inestable, e incrementa notablemente con instancias más grandes como se evidencia en las instancias de 400 nodos donde comienza a crecer indiscriminadamente.

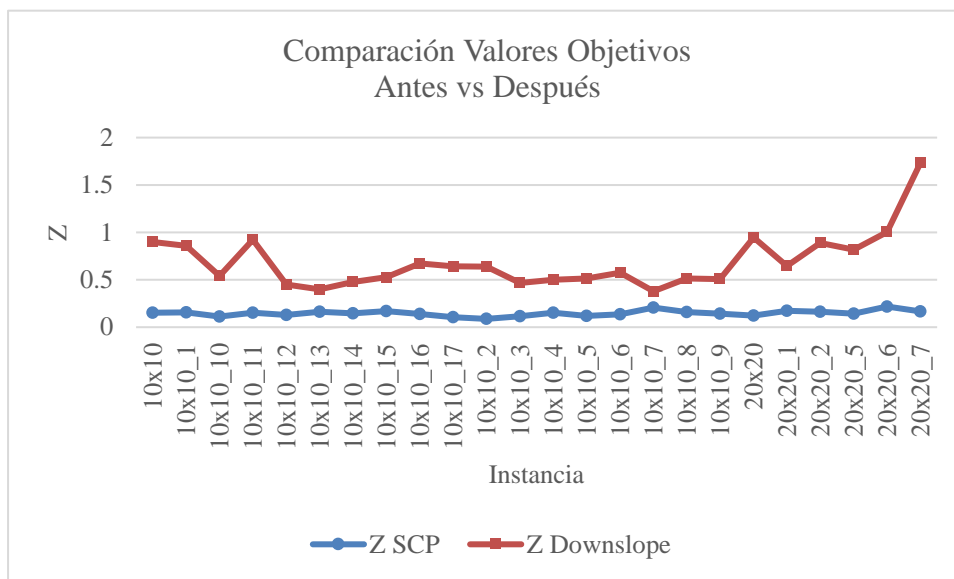


Fig. 29. Comparación de valores objetivo

De acuerdo con la información reportada en la TABLA XXVIII del Anexo 11, los KPI's promedio obtenidos a partir de las instancias evaluadas bajo distintos factores de preferencia con el modelo de solución propuesto se resumen en la TABLA XXIX:

TABLA XXIX.  
KPI'S SCP Y VERIFICACIÓN DE METAS

Indicador	Factor de Preferencia ( $\beta$ )	Valor Promedio	Meta	Cumplida
CTP	0.2	35.58%	< 93%	Sí
	0.5	32.74%		
	0.8	32.01%		
RAP	0.2	16.74%	< 92%	Sí
	0.5	19.71%		
	0.8	26.37%		
PAC	0.2, 0.5, 0.8	100%	= 100%	Sí

CTP: Costo Total Porcentual; RAP: Riesgo Asumido Porcentual; PAC: Porcentaje de Área Cubierta

Como se puede apreciar, todos los indicadores cumplen con las metas establecidas. Para el caso del CTP, el peor valor de 35.78% fue hallado con un  $\beta$  de 0.2, y, aun así, cumple con bastante holgura la meta. Por otro lado, el peor valor del RAP, equivalente a 26.37%, fue hallado con un  $\beta$  de 0.8, y también cumple con bastante holgura la meta. Los resultados ratifican la coherencia de la función objetivo normalizada, pues sí se observa, aquellos valores bajos de Beta (que significan que el costo es

menos importante en la instancia) empeoran el indicador CTP. De igual forma sucede con el RAP, pues a mayores valores de Beta (es decir, que el riesgo es menos relevante que el costo), este indicador empeora.

En la Fig. 30, se ilustra un ejemplo de rutas solución obtenidas por el modelo para cada factor de preferencia de una instancia cuadrada de 100 nodos, junto con sus mapas de riesgo y costo. Para  $\beta = 0.2$ , la ruta en a) refleja como el modelo opta por minimizar más el riesgo que el costo si se comparan sus indicadores CTP y RAP. La ruta principal inicia en el nodo 81 y se adentra un poco más en la zona más peligrosa del mapa, logrando detectar la mina. Para garantizar el total cubrimiento del Área Peligrosa, establece subtours aislados en el resto de la zona.

Para el caso de  $\beta = 0.5$ , la ruta b) evidencia que el indicador RAP no se alteró respecto a la ruta en a); y aunque disminuye el costo del recorrido, la función objetivo aumenta un 131% respecto a la anterior. La razón principal de esto es que hay un mayor costo total distribuido en toda la instancia en comparación al riesgo total de la misma. Por ende, una disminución del 6,61% en la dimensión de costo no pareciera ser muy alta, sin embargo, impacta significativamente la función objetivo cuando se le asigna más importancia.

Finalmente, cuando  $\beta = 0.8$ , el costo toma una relevancia aún mayor, y el CTP disminuye en un 18,9% respecto al de la ruta b). Esto se refleja en la ruta, puesto que realiza unos cuantos pasos en la región más cara de la zona (franja inferior derecha), y se ayuda del subtour {66,75,76,86,96} para cubrirla, y utiliza subtours aislados en las demás regiones del mapa, evitando así, encarecer el costo. Es una buena solución, en vista de que el riesgo de la instancia es relativamente bajo, por lo que darle mayor importancia al costo, a expensas de encarecer 29,05% en la función objetivo no debería alarmar al decisor.

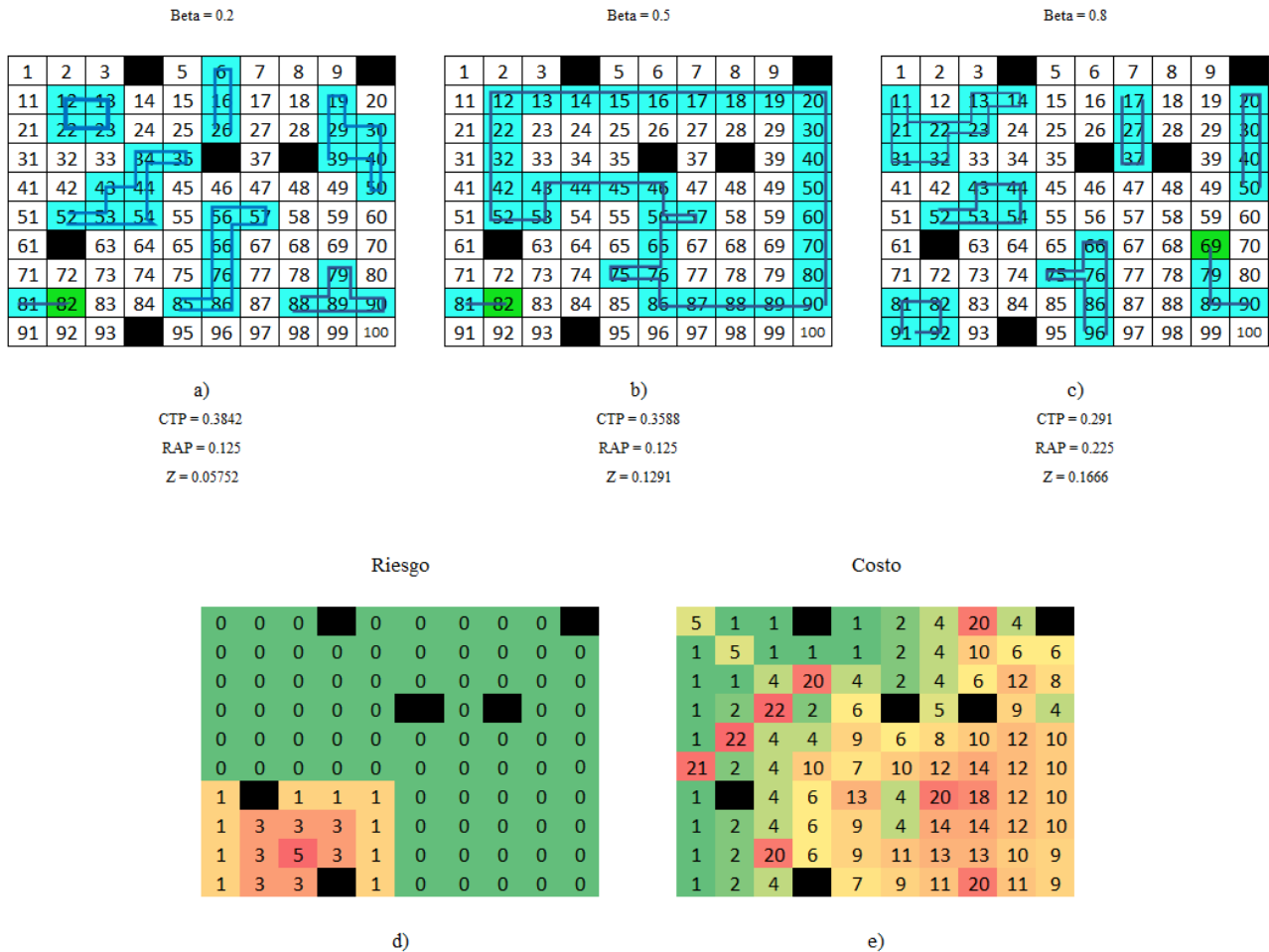


Fig. 30. Influencia de Beta. a) Beta= 0.2; b) Beta= 0.5; c) Beta= 0.8; d) Mapa de Riesgo; e) Mapa de Costo

Cabe resaltar que, debido a los límites de tiempo anteriormente mencionados, los resultados de la Fig. 30 corresponden a soluciones factibles mas no óptimas.

Previo a la comparación entre los resultados obtenidos con la metodología anterior, y el modelo de solución propuesto, cabe resaltar que la cantidad de instancias evaluadas con la primera (48) es mayor en comparación a las evaluadas bajo el modelo propuesto (26). Esto se debe a limitaciones tecnológicas del equipo disponible y la complejidad del problema. El Shortest Covering Path Problem, el cual está relacionado con el Covering Tour Problem, una variante especial del Travelling Salesman Problem (de complejidad *NP-Hard* [33], se caracteriza por el número de subtours potenciales, que aumenta exponencialmente conforme crece el número de nodos ( $2^n - n - 1$ ) [36]. Esto aumenta considerablemente el uso de recursos requeridos por el intérprete de AMPL, al punto en que sencillamente es impráctico esperar una solución en un tiempo razonable. Por ejemplo, resolviendo una instancia de cuatrocientos nodos, se observó que el programa estaba usando 4 GB de memoria tan sólo para cargar el modelo. Esto dificultó la experimentación con el equipo disponible, y sólo se solucionaron 26 instancias. Así mismo, el lector notará que solo se realizará comparación entre valores objetivos (*Z*) del método anterior y el propuesto para ciertas instancias y no la totalidad de estas.

### B. Estandarización de la Solución

Con el propósito de facilitar el uso de las metodologías descritas a lo largo de este documento, se ha diseñado el Manual de Usuario, dispuesto en el Anexo 12. En él, se detallan los pasos a seguir para que el usuario pueda utilizar las herramientas creadas por los autores del presente proyecto.

### C. Conclusiones

Este proyecto abordó el problema "Shortest Covering Path" (SCP). Este consiste en determinar la ruta de menor distancia, entre un nodo inicial y uno final, que recorra determinada región, donde todas las subregiones de esta estén a un rango máximo a la ruta, denominado alcance. Este problema se aplicó bajo el contexto de Minas Antipersona en Colombia, donde un agente desminador debe recorrer determinada zona sospechosa de artefactos explosivos, valiéndose de una herramienta sensorial que le permita escanear los sectores aledaños a su posición, para generar alertas sobre posibles amenazas en todo el terreno, siendo necesario así, cubrir toda el área peligrosa para asegurar la vida de los transeúntes. Se diseñaron instancias de prueba que simulan escenarios rurales donde se encuentran objetos comunes como árboles, arbustos, charcos, entre otros. Posteriormente se diseñó un algoritmo heurístico genérico que proporcionara información sobre los indicadores de costo y riesgo definidos y así poder establecer metas para comprobar si el método propuesto presentaba mejorías. El foco principal de este proyecto se centra en el desarrollo de una metodología iterativa de solución que consiste en adaptar un modelo matemático establecido en [29] del cual se identificaron oportunidades de mejora que ampliaron aún más el espectro de soluciones debido a que se permitían subtours embebidos. Posteriormente, el modelo base se resuelve y, de encontrar subtours, se van adicionando nuevas restricciones que impidan la formación de estos ciclos hasta obtener una solución sin ciclos óptima. Este modelo permite, a partir de datos característicos del peligro y naturaleza de las subregiones de la zona, encontrar una ruta de cubrimiento que permita escanear por completo la zona, a la vez que minimizando el costo y el riesgo de la operación, según la importancia relativa que se le asigne a cada objetivo.

En medio de la etapa de verificación, se descubrieron y corrigieron algunos errores de modelación presentes en las restricciones de Eliminación & Adjuntamiento de Subtours (EAST, por sus siglas en inglés) propuestas en [29], las cuales conllevaban a obtener soluciones usualmente peores, dada la omisión del modelo de algunas soluciones factibles a causa de las deficiencias en cuestión. Esto ocurría dado que se pretendía romper el subtour teniendo en cuenta el número de nodos que lo conformaban, y no por su número de arcos. Por otro lado, el subtour a romper o adjuntar, era modelado como todas las posibles conexiones entre los nodos que lo conformaban, y no como los arcos efectivamente establecidos. Finalmente, la naturaleza entera de las variables de decisión asociadas con los arcos, dado el error anterior, podría generar Infactibilidad en algunas soluciones que llegasen a requerir el uso de un arco múltiples veces, llevando el modelo a omitirla y devolver soluciones desfavorables, como en el ejemplo ilustrado Fig. 24, donde se alejaba en un 35,43% de la óptima.

El problema teórico más ajustado a la descripción del proyecto, conocido como Shortest Covering Path, ha sido objeto de esfuerzos investigativos importantes hechos en [37]–[39]. Sin embargo, la nueva perspectiva de permitir subtours embebidos, si estos son convenientes para la ruta, fue inspirada en el trabajo de [29] donde renombran el problema como New Revised Shortest Covering Path. Esta nueva perspectiva de modelación no ha sido profundizada por otros autores, de acuerdo con la búsqueda de información hecha por el equipo, por lo que el presente proyecto ha continuado este trabajo ciertamente pionero. Es por esto por lo que este trabajo refleja de primera mano la ausencia de métodos eficientes para la resolución del problema en cuestión, pues se eligió la programación entera mixta como metodología de solución para este problema, que es una variante del Travelling Salesman Problem (TSP).

Se observó la alta complejidad hipotetizada del problema, dada su naturaleza combinatoria, al analizar los resultados que se obtuvieron en la fase de experimentación. Ninguna solución fue resuelta óptimamente, además de seguir teniendo subtours

aislados. Incluso el mejor valor obtenido de brecha de optimalidad (MIPGAP), que se recopiló de la resolución de una instancia pequeña de cien nodos, fue del 39.37%, lo cual es considerablemente alto. Es así como se concluye el precario desempeño que tiene el enfoque exclusivamente exacto. En las recomendaciones se sugieren algunos detalles respecto a esta índole.

Se concluye que el método propuesto posee mucho potencial en la toma de decisiones sobre tareas de Investigación de terrenos peligrosos, puesto que los resultados recopilados evidencian una mejoría notable respecto a todos los indicadores KPI establecidos en el proyecto, además de permitir una gran adaptabilidad tanto en los parámetros de entrada, como en el espectro de soluciones que puede entregar. Esto último se debe principalmente al nuevo paradigma de los subtours embebidos lo cual renueva el concepto tradicional de ruta (prohibir cualquier tipo de subtour), lo que usualmente deriva en mejores soluciones.

#### *D. Recomendaciones*

En la experimentación llevada a cabo con el modelo propuesto, el alcance del agente desminador siempre se consideró con un valor fijo, equivalente a las celdas circundantes a su posición. Se recomienda poder evaluar el modelo del proyecto, variando este alcance, con el fin de poder analizar las posibles repercusiones que esto tuviese sobre los indicadores establecidos y los valores objetivo.

La definición de problema del presente proyecto establece como objetivo el recorrido de una zona con amenazas explosivas para su detección, de forma que la tarea sea minimizada en términos de costos preestablecidos, así como garantizando la seguridad de quien recorre. Sin embargo, el agente siempre se asumió como un objeto o persona que recorriera, de forma rectilínea, la zona peligrosa por vía terrestre. Se recomienda que, para investigaciones futuras, se tome en cuenta diferentes tipos de movimientos (euclidiano, por ejemplo), que pudiesen modelar un mayor espectro de agentes desminadores diferentes a vehículos o personas, considerando la relevancia que ha venido tomando con los años el reemplazar el capital humano por vehículos robóticos, por la misma naturaleza de alto riesgo del desminado.

En medio de las constantes pruebas hechas en la fase de ‘Verificación’ del modelo, el equipo del proyecto notó un patrón en las rutas solución que este devolvía. Aunque la variable de decisión concerniente a los arcos a establecer de la ruta se distingue de aquellas de los modelos tradicionales de ruteo, donde usualmente son binarias, por lo general, un arco no era utilizado en más de una ocasión. Generalmente, las soluciones jamás utilizaban un mismo arco múltiples veces, y nunca fueron peores, en términos de su valor objetivo, que aquellas en las cuales sí. Incluso, en el documento, se propuso una instancia ejemplo, en la cual tanto la ruta con múltiples arcos como aquella con subtours embebidos son óptimas. Sin embargo, esto es más la excepción que la regla, considerando además que ni siquiera en este caso tan especial fue peor.

Por lo anterior, se gestó una conjetura abierta a demostración, que expresa que siempre una solución, donde los arcos se usen una única vez, jamás será peor que una donde se use un mismo arco múltiples veces. En caso de ser demostrada cierta, la naturaleza entera de la variable de decisión podría ser binaria, y así, utilizar metodologías de eliminación o adjuntamiento de subtours más eficientes en comparación con las del proyecto. No obstante, se debe tener en cuenta que la forma de penalización del modelo propuesto se hace por vértice y no por arco. Por lo que la validez de la conjetura queda sujeta a mayor incertidumbre bajo otras formas de penalización, las cuales se recomiendan ser analizadas.

Por demás, se recomienda para trabajos futuros, el desarrollo de metodologías de solución más eficientes, especialmente por la línea de las heurísticas y metaheurísticas; de esta forma, se esperan mejores soluciones a futuro para este problema, que vayan más allá de instancias de 100 a 400 nodos, como las del presente trabajo.

En la sección de Medición de Impactos, al comparar los indicadores KPI establecidos en el proyecto con las metas, y con los indicadores obtenidos bajo el método anterior, se observa que el modelo propuesto tuviera un excelente desempeño. Sin embargo, cabe recordar que los indicadores anteriores se obtuvieron a través de una heurística similar al Nearest Neighbour, denominada DownSlope, la cual demostró tener un rendimiento cuestionable. Por ende, se recomienda para trabajos futuros la comparación del modelo propuesto contra metodologías de cubrimiento mejores como los propuestos en [39], para poder obtener datos evaluativos más precisos.

## VII. GLOSARIO

**Accidente por MAP, MSE y/o AEI:** Acontecimiento indeseado causado por Minas Antipersonal, Municiones sin Explosionar y/o Artefactos Explosivos Improvisados que causa daño físico y/o psicológico a una o más personas [7].

**Área Peligrosa (AP):** Es una superficie de terreno definida mediante la realización de un ENT, en la cual se concluye que hay dos o más evidencias indirectas para considerar la posibilidad de contaminación por MAP. Cuando se define un Área Peligrosa se generará un reporte de ENT [9].

**Área Peligrosa Confirmada (APC):** Es una superficie de terreno definida mediante la realización de un ENT o ET, en la cual se concluye que hay evidencias directas para confirmar la contaminación por MAP. Cuando se define un Área Peligrosa Confirmada generará un reporte de ENT [9].

**Contaminación:** Se da por entendido la palabra contaminación como la presencia de MAP en un área determinada [40].

**DAICMA:** (Dirección para la Acción Integral contra Minas Antipersonal) Se refiere a la instrucción de Gobierno Colombiano que tienes las siguientes funciones: responsa responsabilidad de coordinar, hacer seguimiento y evaluar todas las acciones de la Acción Integral contra Minas Antipersonal, Municiones Sin Explosionar y Artefactos Explosivos Improvisado que se desarrollen en los municipios y departamentos por las organizaciones gubernamentales en el país [9].

**Desminador:** Persona calificada y certificada, perteneciente a una organización y la capacidad nacional de Desminado Humanitario acreditada para realizar actividades de Desminado Humanitario [9].

**Desminado Humanitario:** Asistencia humanitaria provista a las comunidades afectadas por las Minas Antipersonal (MAP), las Municiones Sin Explotar (MUSE) y los Artefactos Explosivos Improvisados (AEI) siguiendo los Estándares Internacionales de la Acción contra Minas (IMAS por sus siglas en inglés), los Estándares Nacionales de Desminado Humanitario y los Principios Humanitarios consagrados en la Resolución 46/182 de la Asamblea General de las Naciones Unidas. Las actividades de Desminado Humanitario son reguladas por la Instancia Interinstitucional de Desminado Humanitario, creada mediante el decreto 3750 de 2011. Su objetivo es eliminar los peligros derivados de las Minas Antipersonal (MAP), Municiones sin Explotar (MUSE) y Artefactos Explosivos Improvisados (AEI) a fin de restituir las tierras a la comunidad para su utilización [40].

**Despeje:** En el proceso de desminado humanitario y liberación de tierras, se refiere a las tareas o acciones para remover y/o destruir todos los peligros de MAP/MSE/AEI en un área específica a una profundidad mínima de 13 cm o a una profundidad predeterminada y acordada entre la ODH y la autoridad nacional [9].

**Mina Antipersonal (MAP):** Se entiende toda mina antipersonal concebida para que explote por la presencia, la proximidad o el contacto de una persona, y que en caso de explosionar tenga la potencialidad de matar, herir, lesionar, incapacitar, y/o causar daños a una o más personas. Para el caso de Colombia la fabricación de las minas antipersonal es de carácter improvisado, es decir que se fabrican con materiales que encuentran disponibles en el lugar [9].

**Organización de Desminado Humanitario (ODH):** Corresponde a las Organizaciones de Desminado Humanitario independiente de su carácter civil o militar [9].

**Población no combatiente:** de acuerdo con el Convenio de Ginebra de 1949, en el protocolo II, sobre protección de la población no combatiente inmiscuida en conflictos, se define a esta como cualquier persona no capacitada en el conflicto bélico, ya sea porque no pertenece a ningún en conflicto, o bien, porque de alguna forma su integridad física, de alguna forma afectada, lo inhabilita para continuar en combate.

**Sospecha:** Lugar en el cual se presume la contaminación con Minas Antipersonal (MAP), Municiones sin Explosionar (MSE) o Artefactos Explosivos Improvisados (AEI). La inclusión de un Sospecha en el Sistema de Gestión de Información sobre Actividades relativas a Minas Antipersonal (IMSMA, por sus siglas en inglés) es el resultado de una denuncia documentada, realizada ante el Programa Presidencial para la Acción Integral contra Minas Antipersonal (PAICMA) por un individuo, comunidad, y/o autoridad civil o militar. La Sospecha no tiene superficie ni perímetro conocidos [9].

## VIII. REFERENCIAS

- [1] T. F. Summers Sandoval Jr. and T. F. J. Summers Sandoval, *¡Basta Ya!* 2014.
- [2] “Industria Militar 57 años de Historia – Indumil.” <https://www.indumil.gov.co/noticia/industria-militar-57-anos-de-historia/> (accessed Sep. 22, 2020).
- [3] “Minas, el enemigo oculto - El abc de las minas.” <http://minas.semana.com/abc.php> (accessed Sep. 21, 2020).
- [4] DAICMA - Descontamina Colombia, “Estadísticas de víctimas,” Oct. 31, 2020. <http://www.accioncontraminas.gov.co/Estadisticas/estadisticas-de-victimas> (accessed Nov. 26, 2020).
- [5] D.-D. Colombia, “Datos Abiertos,” Sep. 7, 2020. .
- [6] “[ 2.1 ] Estándares Nacionales de Desminado Humanitario Estudios No Técnicos.” Accessed: Sep. 22, 2020. [Online]. Available: [http://www.accioncontraminas.gov.co/Documents/0420\\_estandar\\_nacional\\_ENT.pdf](http://www.accioncontraminas.gov.co/Documents/0420_estandar_nacional_ENT.pdf).

- [7] “Plan Estratégico 2020-2025.”
- [8] D. C. Dirección para la Acción Integral contra Minas Antipersonal, “Estándares Nacionales de Desminado Humanitario. Operaciones de Despeje,” pp. 1–43, 2017, [Online]. Available: [http://www.accioncontraminas.gov.co/accion/desminado/Documents/20171128-EN-Oper\\_Tecnica\\_Mecanica.pdf](http://www.accioncontraminas.gov.co/accion/desminado/Documents/20171128-EN-Oper_Tecnica_Mecanica.pdf).
- [9] D. C. Dirección para la Acción Integral contra Minas Antipersonal, “Estándares Nacionales de Desminado Humanitario. Operaciones de Despeje,” pp. 1–43, 2017, [Online]. Available: [http://www.accioncontraminas.gov.co/AICMA/Documents/Estandares\\_Nacionales/170815-EstNal\\_Glosario.pdf](http://www.accioncontraminas.gov.co/AICMA/Documents/Estandares_Nacionales/170815-EstNal_Glosario.pdf).
- [10] A. Khanyan and I. Cruz, “Seventh Mine Action Technology Workshop: A Space for Innovation,” vol. 24, no. 1, 2020.
- [11] “Automation of Humanitarian Demining The 2016 Humanitarian Robotics and Automation Technology Challenge,” 2016.
- [12] B. Beneš and R. Forsbach, “Layered data representation for visual simulation of terrain erosion,” *Proc. - Spring Conf. Comput. Graph. SCCG 2001*, pp. 80–86, 2001, doi: 10.1109/SCCG.2001.945341.
- [13] J. Acm Reference Format Gènevaux, É. Galin, É. Guérin, A. Peytavie, and B. Beneš, “Terrain Generation Using Procedural Models based on Hydrology,” *ACM Trans. Graph.*, vol. 32, no. 143, 2013, doi: 10.1145/2461912.2461996.
- [14] M. Ahmadi and P. Stone, “A multi-robot system for continuous area sweeping tasks,” *Proc. - IEEE Int. Conf. Robot. Autom.*, vol. 2006, no. May, pp. 1724–1729, 2006, doi: 10.1109/ROBOT.2006.1641955.
- [15] R. S. Nilsson and K. Zhou, “Method and bench-marking framework for coverage path planning in arable farming,” 2020, doi: 10.1016/j.biosystemseng.2020.08.007.
- [16] K. Sandamurthy and K. Ramanujam, “A hybrid weed optimized coverage path planning technique for autonomous harvesting in cashew orchards,” *Inf. Process. Agric.*, vol. 7, no. 1, pp. 152–164, Mar. 2020, doi: 10.1016/j.inpa.2019.04.002.
- [17] A. Xu, C. Viriyasuthee, and I. Rekleitis, *Optimal Complete Terrain Coverage using an Unmanned Aerial Vehicle*. 2011.
- [18] D. Bremmer, D. Few, C. Nielsen, and M. Walton, “Intelligent Robotic Behaviors for Landmine Detection and Marking,” 2008.
- [19] G. Gutin and A. P. Punnen, Eds., *The Traveling Salesman Problem and Its Variations*, vol. 12. Boston, MA: Springer US, 2007.
- [20] M. Gendreau, G. Laporte, and F. Semet, “The Covering Tour Problem,” *Oper. Res.*, vol. 45, no. 4, pp. 568–576, Aug. 1997, doi: 10.1287/opre.45.4.568.
- [21] L. Cristina Soares Motta and L. Tito Nogueira, “Improving performance of algorithms for the covering tour problem by applying reduction rules.”
- [22] G. Lugosi, “The On-Line Shortest Path Problem Under Partial Monitoring András György Tamás Linder György Ottucsák,” 2007.
- [23] E. M. Arkin, S. P. Fekete, and J. S. B. Mitchell, “Approximation algorithms for lawn mowing and milling,” *Comput. Geom. Theory Appl.*, vol. 17, no. 1–2, pp. 25–50, Oct. 2000, doi: 10.1016/S0925-7721(00)00015-8.
- [24] E. Packer, “Computing Multiple Watchman Routes \*.”
- [25] R. Yehoshua, N. Agmon, and G. A. Kaminka, “Safest path adversarial coverage,” *IEEE Int. Conf. Intell. Robot. Syst.*, no. Iros, pp. 3027–3032, 2014, doi: 10.1109/IROS.2014.6942980.
- [26] C. Luo, S. X. Yang, D. A. Stacey, and J. C. Jofriet, “A solution to vicinity problem of obstacles in complete coverage path planning,” *Proc. - IEEE Int. Conf. Robot. Autom.*, vol. 1, no. May, pp. 612–617, 2002, doi: 10.1109/robot.2002.1013426.
- [27] Y. Gabriely and E. Rimon, “Competitive on-line coverage of grid environments by a mobile robot,” *Comput. Geom. Theory Appl.*, vol. 24, no. 3, pp. 197–224, 2003, doi: 10.1016/S0925-7721(02)00110-4.
- [28] M. Wei and V. Isler, “Coverage Path Planning under the Energy Constraint,” *Proc. - IEEE Int. Conf. Robot. Autom.*, pp. 368–373, 2018, doi: 10.1109/ICRA.2018.8462867.
- [29] T. J. Niblett and R. L. Church, “The Shortest Covering Path Problem: A New Perspective and Model,” *Int. Reg. Sci. Rev.*, vol. 39, no. 1, pp. 131–151, 2016, doi: 10.1177/0160017614550082.
- [30] J. Current, J., ReVelle, C., Cohon, “The Shortest Covering Path Problem: An Application of Locational Constraints to Network Design,” *J. Reg. Sci.*, 1984.
- [31] K. Deb, “MULTI-OBJECTIVE OPTIMIZATION,” in *Search Methodologies Introductory Tutorials in Optimization and Decision Support Techniques*, E. Burke and K. Graham, Eds. Springer, 2005, pp. 273–316.
- [32] R. Timothy Marler, J. S. Arora, R. T. Marler, and J. S. Arora, “The weighted sum method for multi-objective optimization: new insights,” vol. 41, pp. 853–862, 2010, doi: 10.1007/s00158-009-0460-7.
- [33] G. Gutin, *The Traveling Salesman Problem and Its Variations*. 2544.
- [34] S. Journal and N. Nov, “Solution of a Large-Scale Traveling-Salesman Problem Author ( s ): G . Dantzig , R . Fulkerson , S . Johnson Published by : INFORMS Stable URL : <http://www.jstor.org/stable/166695>,” *Oper. Res.*, vol. 2,

no. 4, pp. 393–410, 2010.

- [35] C. E. Miller, R. A. Zemlin, and A. W. Tucker, “Integer Programming Formulation of Traveling Salesman Problems,” *J. ACM*, vol. 7, no. 4, pp. 326–329, Oct. 1960, doi: 10.1145/321043.321046.
- [36] R. L. Church Alannmurray, “Advances in Spatial Science Location Covering Models History, Applications and Advancements.” Accessed: Mar. 28, 2021. [Online]. Available: <http://www.springer.com/series/3302>.
- [37] J. Current and H. Min, “Multiobjective design of transportation networks: Taxonomy and annotation,” *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 26, no. 2, pp. 187–201, 1986.
- [38] J. Current, C. ReVelle, and J. Cohon, “SYMPOSIUM ON LOCATION PROBLEMS: IN MEMORY OF LEON COOPER: THE SHORTEST COVERING PATH PROBLEM: AN APPLICATION OF LOCATIONAL CONSTRAINTS TO NETWORK DESIGN,” *J. Reg. Sci.*, vol. 24, no. 2, pp. 161–183, 1984.
- [39] “Efficient Algorithms for Solving the Shortest Covering Path Problem,” *Transp. Sci.*, vol. 28, no. 4, pp. 317–327, 1994, doi: 10.1287/trsc.28.4.317.
- [40] Vicepresidencia de la República, “Glosario Nacional Básico General de Términos de Acción Integral contra Minas Antipersonal,” 2012, [Online]. Available: [http://www.accioncontraminas.gov.co/prensa/Documents/glosario\\_terminos\\_accion\\_contra\\_minas.pdf](http://www.accioncontraminas.gov.co/prensa/Documents/glosario_terminos_accion_contra_minas.pdf).

## IX.ANEXOS

TABLA XXX.  
TABLA DE ANEXOS

No. Anexo	Nombre	Desarrollo	Contenido	Tipo de Archivo (PDF, HTML, Excel, Word...)
1	2020206-Anexo-1_Base_Eventos_MAP_MUSE	Terceros	Hoja <i>Datos eventos (Registros)</i> . Base de datos relacional de eventos relacionados con MAP/MUSE en el territorio.	Anexo_1_2020206.xlsx
2	2020206-Anexo-2_Análisis_Descriptivo_Base_EventosMAP_MUSE	Propio	Hoja <i>Tablas</i> . Tablas descriptivas sobre características de interés de eventos relacionados con MAP/MUSE.	Anexo_2_2020206.xlsx
3	2020206-Anexo-3_Definiciones_Teoría_de_Grafos	Propio	Glosario de términos sobre grafos.	Anexo_3_2020206.docx
4	2020206-Anexo-4_Plan_para_Recolección_de_Datos	Propio	Plan de recolección de datos	Anexo_4_2020206.xlsx
5	Anexo-5_Metodo_de_Generación_de_Instanceas	Propio	Metodología para generar instancias	Anexo_5_2020206.docx
6	Anexo-6_Algoritmo_Down_Slope	Propio	Descripción del algoritmo down-slope	Anexo_6_2020206.docx
7	Anexo-7_Instanceas_de_Prueba	Propio	Resultados de las instancias de prueba	Anexo_7_2020206.xlsx
8	Anexo-8_Método_AHP	Terceros	Matrices de evaluación de criterios sobre las diferentes alternativas de solución	Anexo_8_2020206.xlsx
9	Anexo-9_Plan_de_Trabajo	Propio	Cronograma sobre las actividades a desarrollar en el curso de PDII	Anexo_9_2020206.mpp
10	Anexo-10_Project_Charter	Propio	Descripción de los aspectos generales del proyecto	Anexo_10_2020206.xlsx
11	Anexo-11_Instanceas_de_Prueba_SCP	Propio	Resultados de las instancias de prueba con el modelo SCP	Anexo_11_2020206.xlsx
12	Anexo-12_Manual_de_Usuario	Propio	Manual de usuario	Anexo_12_2020206.xlsx