



**ESTRATEGIA DE BÚSQUEDA Y RESCATE CON ROBOTS COLABORATIVOS BASADA EN ANTI
FEROMONAS Y DECISIONES ALEATORIAS**

José Luis Henríquez Mercado¹
ID ORCID 0009-0007-9868-9721

¹ Doctorando en Informática, Universidad Americana de Europa
Revista de Investigación Multidisciplinaria Iberoamericana. RIMI © 2023 by Elizabeth Sánchez Vázquez is licensed under

Resumen

Este estudio aborda la problemática de optimizar la búsqueda de víctimas en escenarios de desastre mediante robots inspirados en el comportamiento de las hormigas faraón. La investigación se justifica por la necesidad de reducir los tiempos de búsqueda en áreas complejas, y como tal, el objetivo es determinar el número óptimo de robots para explorar laberintos, bloquear caminos sin salida y encontrar una víctima de manera eficiente.

Se realizaron varias pruebas en un simulador con escenarios de distinto tamaño, variando la cantidad de robots. Los robots obstruyen caminos sin salida utilizando anti feromonas, y al encontrar a la víctima, un algoritmo BFS (búsqueda en anchura) entra en funcionamiento para determinar la ruta más

Palabras clave

Anti feromonas, BFS (búsqueda en anchura), Robots

Abstract

This study addresses the problem of optimizing the search for victims in disaster scenarios using robots inspired by the behavior of pharaoh ants. The research is justified by the need to reduce search times in complex areas, and as such, the objective is to determine the optimal number of robots to explore mazes, block dead ends and find a victim efficiently.

Several tests were performed in a simulator with different sized scenarios, varying the number of robots. The robots block dead-end paths using anti-pheromones, and upon finding the victim, a BFS (breadth-first search) algorithm kicks in to

cut short towards her. The times were recorded and the average number of runs was calculated for each configuration in the different scenarios.

The results showed that the optimal number of robots varies with the size of the scenario, and that using more robots than necessary generates bottlenecks that increase times. In the test with a larger area, seven robots managed to find the victim in 37 seconds and traced the shortest route in all runs.

The study concludes that the number of robots must be balanced with the size of the scenario, as more robots do not always reduce times. Anti-

determine the shortest route to the victim. The times were recorded and the average number of runs was calculated for each configuration in the different scenarios.

The results showed that the optimal number of robots varies with the size of the scenario, and that using more robots than necessary generates bottlenecks that increase times. In the test with a larger area, seven robots managed to find the victim in 37 seconds and traced the shortest route in all runs.

The study concludes that the number of robots must be balanced with the size of the scenario, as more robots do not always reduce times. Anti-

pheromones were key to avoiding dead-end paths, and future studies with advanced algorithms and three-dimensional environments are suggested.

Keywords

Anti pheromones, BFS (breadth-first search), Robots

INTRODUCCIÓN

LA BÚSQUEDA de víctimas en los escombros después de un desastre natural es una tarea de vital importancia para lograr el rescate oportuno de las personas afectadas. Si bien existen equipos especializados, perros de rescate entrenados y máquinas operadas a distancia, no se dispone de un método que permita determinar la ubicación exacta de las víctimas para minimizar el tiempo de exploración.

El presente trabajo surge ante la necesidad de mejorar los tiempos de respuesta en situaciones de desastre, especialmente en eventos geofísicos como terremotos y sismos, considerados de los más peligrosos por su repentina aparición y magnitud. Los robots colaborativos basados en el comportamiento bioinspirado de las hormigas, específicamente en el uso de anti feromonas, presentan una alternativa innovadora. Estos robots podrían optimizar el proceso de búsqueda mediante la identificación de rutas eficientes en escenarios desconocidos, logrando así una reducción significativa del tiempo necesario para encontrar víctimas.

El objetivo principal consiste en implementar un sistema de robots inspirados en las hormigas para la búsqueda y rescate, optimizando las rutas exploradas mediante la utilización de anti feromonas.

El trabajo busca desarrollar un software que simule el comportamiento de los robots, eviten caminos sin salida y reduzcan el tiempo de exploración. Además, se pretende validar la eficiencia del sistema propuesto en términos de tiempo y precisión en la localización de víctimas, así como analizar el impacto del número óptimo de robots para evitar cuellos de botella y maximizar la efectividad en la resolución del problema de búsqueda. Posteriormente un algoritmo por búsqueda en anchura (BFS) analizará las rutas trazadas por los robots y determinará la ruta más corta hacia la víctima.

El uso de robots colaborativos basados en anti feromonas e inspirados en el comportamiento de las hormigas faraón, permite reducir significativamente el tiempo de búsqueda de víctimas en escenarios de desastre natural y determinar cuál es el camino más corto.

ESTADO DEL ARTE Y MARCO TEÓRICO

El uso de robots autónomos en misiones de búsqueda y rescate ha sido un tema de investigación, especialmente en escenarios donde la intervención humana resulta difícil o peligrosa. Estos robots están diseñados para explorar áreas colapsadas o de difícil acceso, empleando algoritmos de navegación y búsqueda que permiten la localización eficiente de víctimas.

Robots autónomos en misiones de búsqueda y rescate: Los robots autónomos son dispositivos programados para realizar tareas sin intervención humana directa, y en escenarios de búsqueda y rescate, su objetivo principal es explorar áreas colapsadas o inaccesibles con rapidez y precisión. Estos sistemas requieren de algoritmos de navegación que les permitan tomar decisiones en tiempo real, evaluar caminos y obstrucciones, así como priorizar la eficiencia en la búsqueda de víctimas.

Algoritmos de búsqueda y optimización (BFS): El algoritmo de búsqueda en anchura (BFS) es fundamental para la navegación en grafos y la búsqueda de rutas óptimas. En el contexto de este trabajo, BFS se utiliza para determinar la ruta más corta entre la entrada al escenario y la víctima una vez que ésta es localizada. Este enfoque es ampliamente utilizado en entornos de búsqueda donde es necesario recorrer todas las posibilidades de forma exhaustiva, pero garantizando la menor distancia posible.

Bioinspiración y comportamiento de las hormigas: La naturaleza ha proporcionado soluciones eficientes que pueden ser emuladas en robótica. Hormigas, abejas y termitas son algunos de los animales que expelen sustancias que les permite comunicarse entre sí (estimergia), optimizando la coordinación de sus colonias y su relación con el entorno. (Garzón-Ramos, 2024).

En el caso de las hormigas, su capacidad para colaborar de forma organizada en la búsqueda de alimentos y marcar rutas mediante el uso de feromonas ha inspirado algoritmos que permiten a los robots evitar caminos erróneos. Las anti feromonas, que bloquean la exploración de rutas sin salida, son clave en este proyecto, ya que permiten a los robots identificar caminos no útiles en un laberinto.

Colaboración multi-robot: La interacción entre múltiples robots requiere algoritmos que optimicen su comportamiento colectivo. Un grupo de robots debe distribuirse de forma eficiente, evitando embotellamientos que puedan ralentizar el proceso de búsqueda. El uso adecuado de anti feromonas y algoritmos de toma de decisiones aleatorias permite minimizar estos problemas, pero encontrar el número óptimo de robots sigue siendo un reto central para maximizar la eficiencia.

METODOLOGÍA

El presente estudio se llevó a cabo con el objetivo de conocer la fiabilidad de utilizar robots cooperativos para la generación de rutas en medios inexplorados, utilizando robots inspirados en el comportamiento de las hormigas faraón y validando así el uso de algoritmos en el ámbito de búsqueda y rescate. Para lograrlo, se implementó un simulador en el que los robots exploran diferentes laberintos, obstruyen caminos sin salida mediante el uso de anti feromonas y, una vez encontrada la víctima, se aplica un algoritmo BFS para trazar la ruta más corta hacia ella.

El simulador se creó en el motor de desarrollo Godot. La interfaz principal tiene el siguiente diseño.



Fig. 1. Recuadro de impresión de rutas (a la izquierda). Recuadro de laberinto oculto (a la derecha).

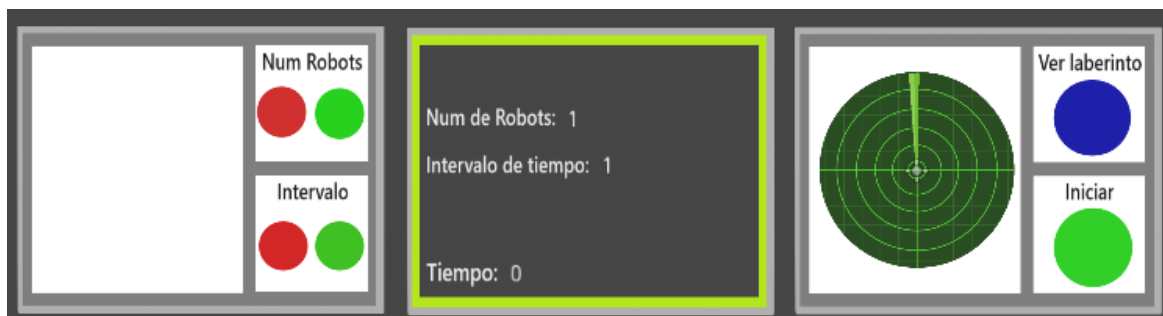


Fig. 2. Panel de configuración y control de parámetros.

La interfaz se divide en las siguientes partes. El recuadro blanco (ver figura 1) es un monitor para visualizar en tiempo real las rutas que los robots están explorando. El panel de control (ver figura 2) tiene botones para elegir el número de robots que entrarán al laberinto. Existen dos botones importantes en la parte derecha de ese mismo panel, el de color verde inicia la ejecución del simulador y el azul permite ocultar o mostrar el laberinto. En sí, este botón es útil una vez que los robots hayan cumplido con su recorrido con la finalidad de comparar las rutas exploradas, pero lo recomendable es mantener oculto el escenario, ya que, en un caso real, los rescatistas desconocen totalmente el interior de los escombros. El recuadro negro a la derecha (ver figura 1), como ya se mencionó anteriormente, oculta el laberinto. Al desactivarlo se puede observar un escenario como el que se muestra a continuación.

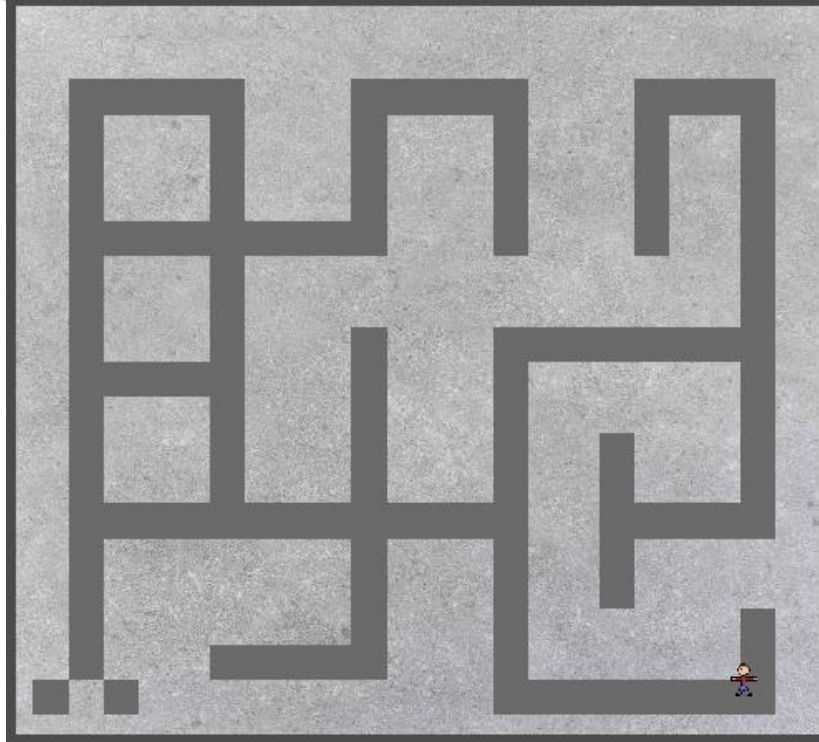


Fig. 3. Escenario de laberinto.

Los escenarios son configurables a través de la colocación de losetas, teniendo libertad de diseño de acuerdo a la necesidad que requiera el usuario. Esta opción permite borrar y agregar losetas de color gris, que en conjunto forman los caminos por los cuales los robots van a transitar. La entrada de los robots al escenario se da por la parte inferior izquierda.

Los robots están dotados de tres sensores (adelante, izquierda y derecha) para la detección de los caminos. Tienen un sensor de distancia al frente para detectar a otros robots y se simula el envío de su recorrido a través de una antena de radiofrecuencia. Su locomoción es de tracción diferencial, permitiendo que sus movimientos sean adelante, atrás y giros sobre su propio eje hacia la derecha e izquierda.

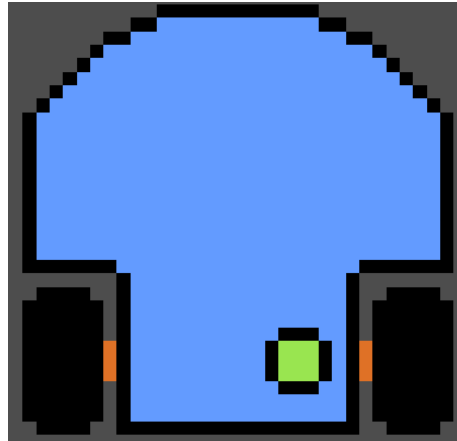


Fig. 4. Diseño en 2D de robot explorador.

Cuando el robot detecte una intersección debe de reconocer el tipo de cruce para obtener el número de salidas disponibles y hacia cuál dirección debe dirigirse.

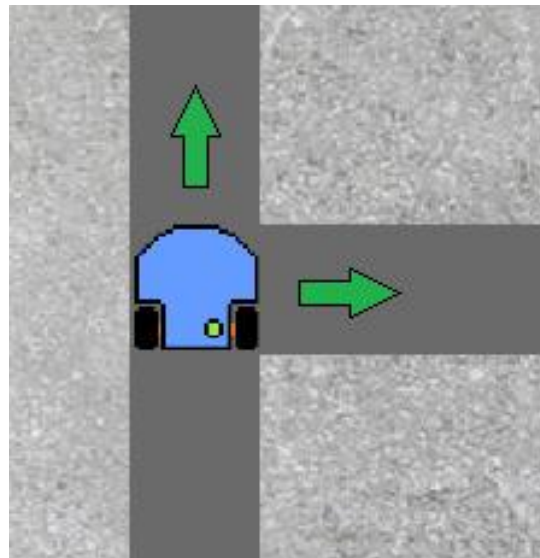


Fig. 5. Detección de cruce de caminos y decisión aleatoria.

Cada vez que el programa se ejecuta, la víctima se posiciona de manera aleatoria en el escenario, de tal manera que siempre debe estar tocando alguna loseta de los caminos.

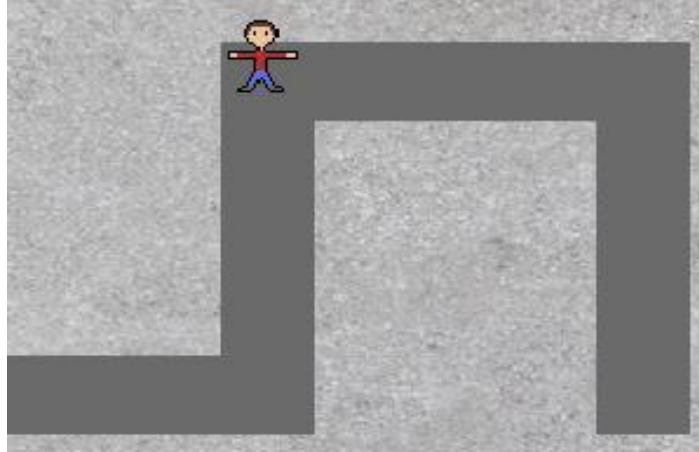


Fig. 6. Ejemplo de víctima en el escenario.

Si un robot detecta un camino sin salida, girará 180 grados para regresar por esa misma ruta pero estará depositando anti feromonas hasta encontrarse con una intersección. Las anti feromonas se representan con losetas de color rojo y están sobre puestas en las losetas del camino principal. Cuando un robot las detecta, tiene la instrucción de no pasar hacia esa dirección, esto significa que otro robot ya exploró esa ruta y además es un camino sin salida, por lo tanto, no tiene caso explorarlo por segunda ocasión. Se puede dar el caso de que un robot, al que llamaremos A, está depositando anti feromonas y un segundo robot B lo detecta, para este caso, la prioridad de camino la tiene A, por lo que B debe girar 180 grados para regresar por ese mismo camino pero sin depositar anti feromonas. Para el robot A, el depósito sigue funcionando hasta encontrarse con una intersección, en ese momento deja de depositarlas.

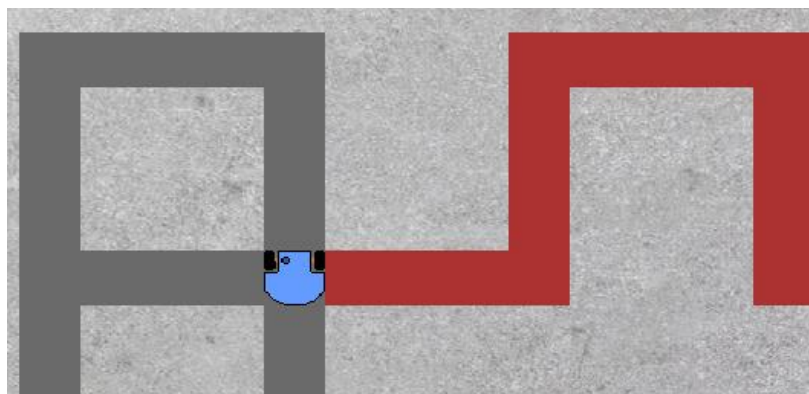


Fig. 7. Bloqueo con anti feromonas para un camino sin salida.

Cada robot es capaz de enviar su posición actual hacia el monitor en el cual queda marcada con un recuadro negro, esto lo hacen cada vez que avanzan una loseta, dando como resultado su ruta explorada. Se da el caso que, si un robot está depositando anti feromonas, la ruta marcada previamente de ese camino se estará borrando, ya que no es indispensable trazar los caminos que no tienen salida.

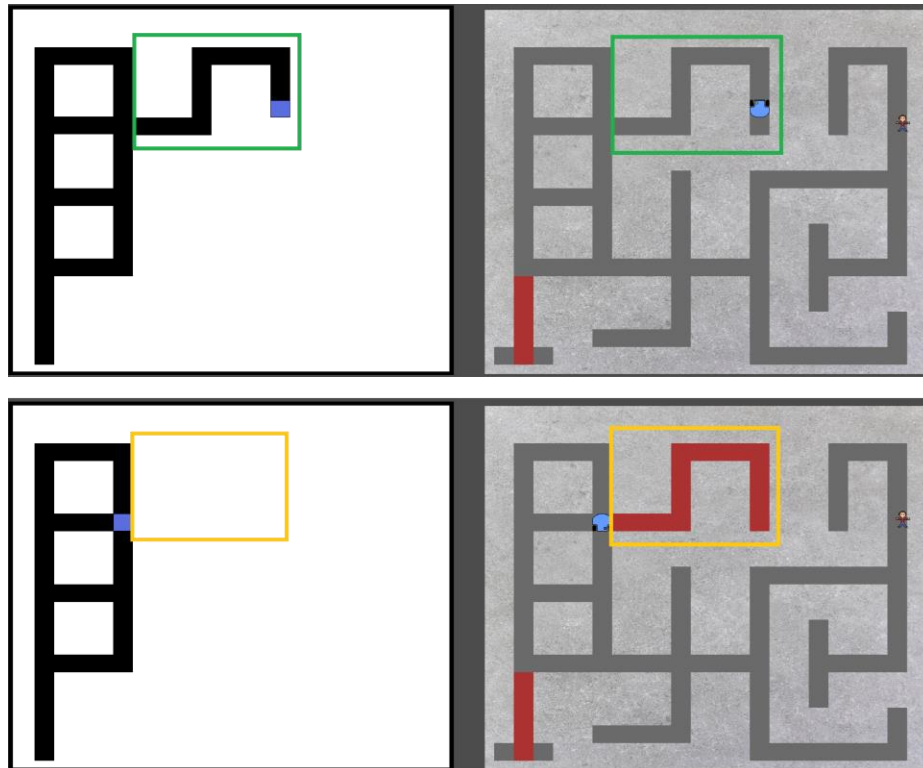


Fig. 8. Exploración y borrado de camino sin salida.

En el presente estudio, la población consistió en robots programados para realizar búsquedas en entornos simulados, con el objetivo de encontrar una víctima en el menor tiempo posible. La muestra estuvo conformada por configuraciones específicas de entre uno y siete robots, variando la función de cada prueba. Estas configuraciones permitieron evaluar el rendimiento de los robots en diferentes escenarios, analizando cómo el número de robots influye en la efectividad de la búsqueda. El área de estudio incluyó una serie de laberintos simulados con complejidad variable, los cuales representaron entornos colapsados o de difícil acceso, similares a los que se encontrarían tras un desastre natural.

RESULTADOS

Se realizaron corridas con cantidades diferentes de robots en un total de cuatro escenarios diferentes. Múltiples corridas en un mismo escenario permiten asegurar la consistencia y confiabilidad de los resultados. Debido a que cada corrida puede estar sujeta a variaciones aleatorias en el comportamiento de los robots, repetir el experimento varias veces permite cambiar la aleatoriedad y posibles variaciones no controladas, analizando así patrones o comportamientos promedio. Con esto se puede identificar si el escenario proporciona un entorno confiable para los robots y si las estrategias de búsqueda son efectivas. Esta replicabilidad permite comprobar que los resultados no son un efecto de una única corrida y, por tanto, fortalece la validez de los datos obtenidos.

En dichas pruebas los robots están configurados para seguir una trayectoria específica a lo largo del escenario, priorizando la exploración de caminos disponibles. Cuando un robot encuentra un camino sin salida, marca o bloquea esa ruta, esto evita que otros robots o el mismo robot exploren áreas que no llevan a la víctima, optimizando así el uso de recursos y tiempo. Una vez que un robot encuentra a la víctima, el simulador está programado para detenerse automáticamente.

El objetivo de estas primeras pruebas es determinar el tiempo en que los robots tardan en bloquear todos los caminos sin salida.

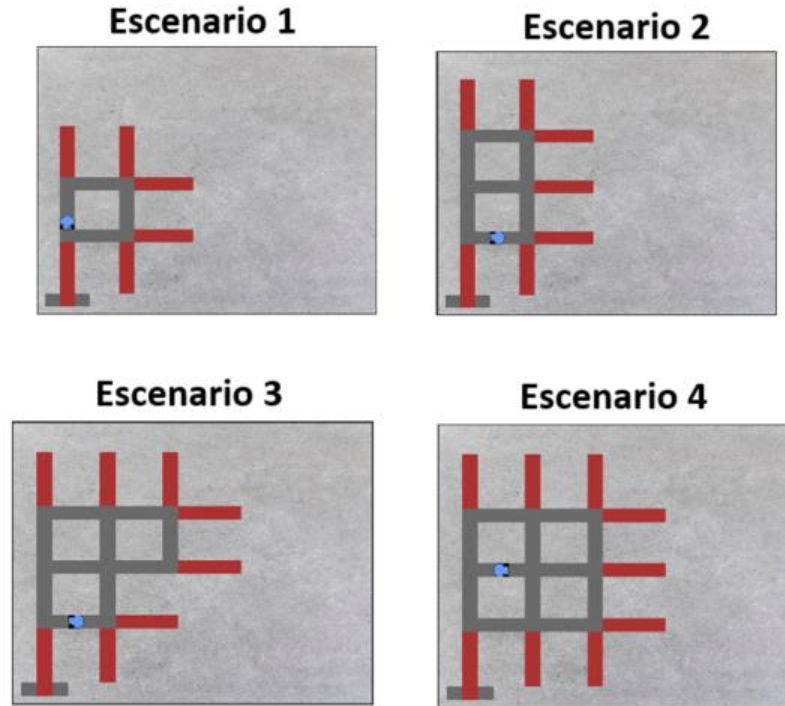


Fig. 9. Escenarios de pruebas.

Escenario 1				
	Tiempo (segundos)			
Robots	Corrida 1	Corrida 2	Corrida 3	Promedio
1	65	51	86	67.33
2	28	33	28	29.66
3	25	24	42	30.33
4	0	0	0	0

Fig. 10. Tabla de resultados de bloqueo de caminos en el escenario 1.

Escenario 2				
	Tiempo (segundos)			
Robots	Corrida 1	Corrida 2	Corrida 3	Promedio
1	68	107	60	78.33
2	49	52	64	55
3	34	39	57	43.33
4	28	27	37	30.66
5	0	0	0	0

Fig. 11. Tabla de resultados de bloqueo de caminos en el escenario 2.

Escenario 3				
	Tiempo (segundos)			
Robots	Corrida 1	Corrida 2	Corrida 3	Promedio
1	132	115	109	118.66
2	54	109	59	74
3	41	59	38	46
4	55	33	29	39
5	41	48	34	41
6	35	34	34	34.33
7	0	0	0	0

Fig. 12. Tabla de resultados de bloqueo de caminos en el escenario 3.

Escenario 4	
	Tiempo (segundos)

Robots	Corrida 1	Corrida 2	Corrida 3	Promedio
1	126	239	77	147.33
2	66	68	128	87.33
3	41	63	33	45.66
4	39	49	35	41
5	44	38	40	40.66
6	33	37	32	34
7	0	0	0	0

Fig. 13. Tabla de resultados de bloqueo de caminos en el escenario 4.

Se realizó una segunda fase de pruebas con los mismos escenarios, pero ahora con el objetivo de encontrar a la víctima, la cual se posicionó manualmente en el mismo lugar en cada corrida.

Escenario 1						
Tiempo (segundos)						
Robots	Corrida 1	Corrida 2	Corrida 3	Corrida 4	Corrida 5	Promedio
1	24	12	33	42	25	45.33
2	19	26	26	8	47	42
3	22	11	11	22	25	30.33

Fig. 14. Tiempos búsqueda de víctima en el escenario 1.

Escenario 2						
Tiempo (segundos)						
Robots	Corrida 1	Corrida 2	Corrida 3	Corrida 4	Corrida 5	Promedio

1	68	14	30	14	74	66.66
2	30	13	13	17	17	30
3	47	24	27	23	21	47.33
4	13	35	10	10	13	27

Fig. 15. Tiempos búsqueda de víctima en el escenario 2.

Escenario 3						
	Tiempo (segundos)					
Robots	Corrida 1	Corrida 2	Corrida 3	Corrida 4	Corrida 5	Promedio
1	50	47	153	140	64	151.33
2	24	21	50	83	45	74.33
3	38	39	50	13	13	51
4	33	36	25	21	19	44.66
5	13	22	16	25	26	34
6	27	13	32	28	21	40.33

Fig. 16. Tiempos búsqueda de víctima en el escenario 3.

Escenario 4						
	Tiempo (segundos)					
Robots	Corrida 1	Corrida 2	Corrida 3	Corrida 4	Corrida 5	Promedio
1	81	225	12	67	25	136.66

2	23	25	44	22	24	46
3	17	21	32	47	17	44.66
4	17	31	41	21	47	52.33
5	13	25	22	14	17	30.33
6	29	31	17	26	28	43.66

Fig. 17. Tiempos búsqueda de víctima en el escenario 4.

La validación del algoritmo BFS se comprobó a través de mapas trazados por los robots, dando como resultado grafos con la ruta más corta hacia la víctima como el que se muestra a continuación.

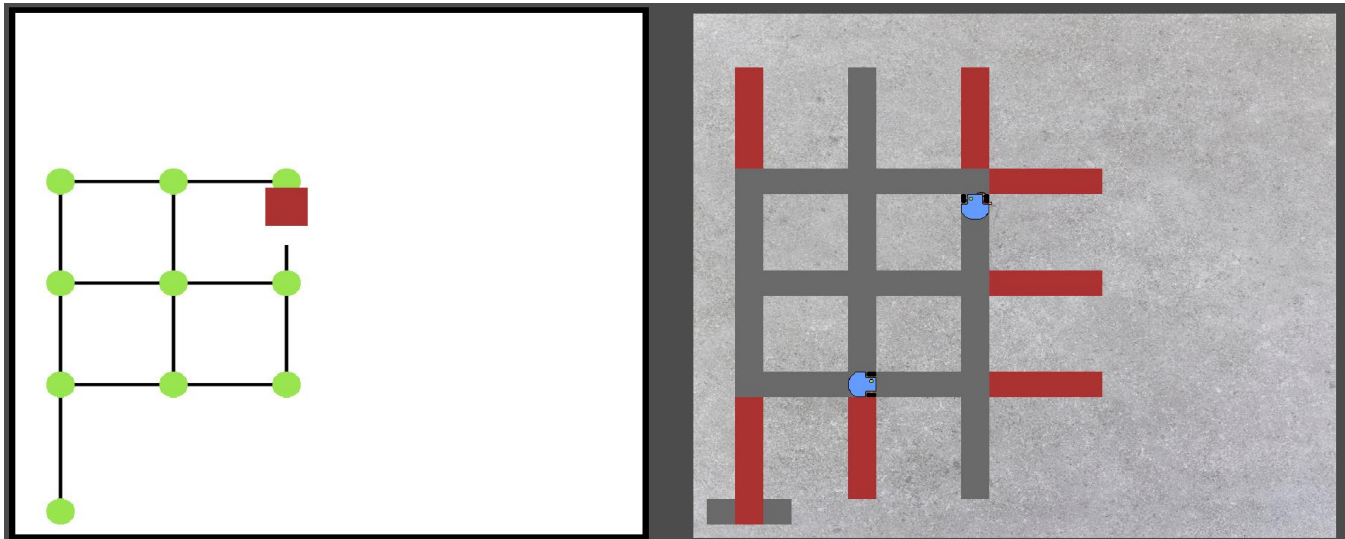


Fig. 18. Búsqueda de víctima entre dos robots.

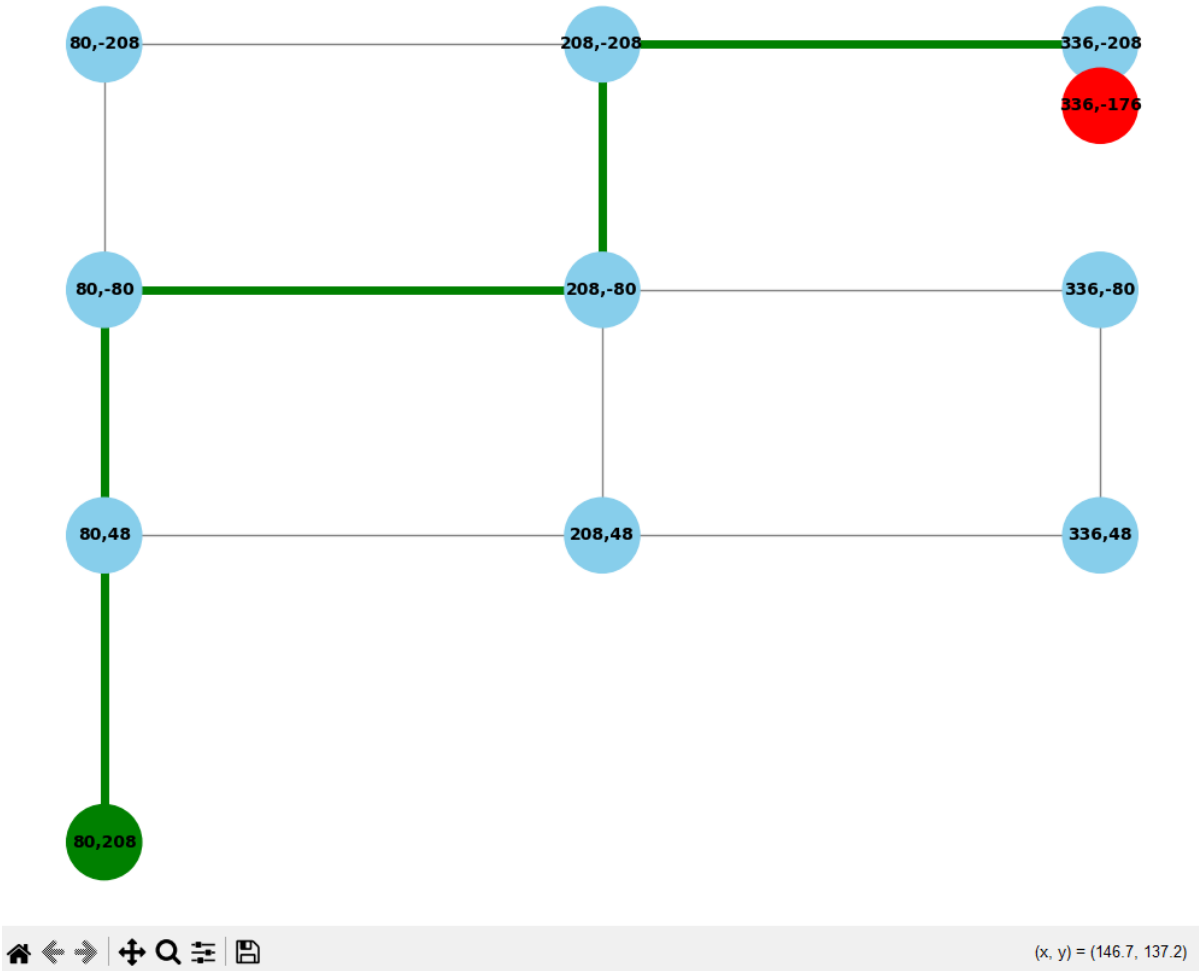


Fig. 19. Validación de algoritmo BFS en Python para encontrar la ruta más corta de acuerdo al escenario de la Figura 17.

Estas pruebas ayudan a identificar la importancia relativa de cada parámetro en el desempeño global del sistema y proporcionan una comprensión más profunda de las condiciones bajo las cuales el sistema puede optimizarse. El número de robots demostró una alta sensibilidad a la configuración del entorno, pues en los terrenos más complejos se requiere un ajuste fino en la cantidad de robots para evitar los embotellamientos. El sistema mostró una gran sensibilidad al tamaño y complejidad del escenario, lo que indica la importancia de ajustar adecuadamente el número de robots en función de la complejidad del terreno.

LIMITACIONES

A pesar de los avances obtenidos en este estudio, existen varias limitaciones que deben ser consideradas para contextualizar los resultados. Dicho estudio se realizó en entornos simulados en 2D, lo que limita la replicabilidad de los resultados en escenarios tridimensionales o en condiciones del mundo real. Los laberintos creados en el simulador no imitan completamente la complejidad de los escombros o terrenos difíciles que se encontrarían en situaciones de rescate reales. El estudio no consideró interacciones más complejas entre robots, como la cooperación o comunicación avanzada entre ellos, los robots toman decisiones aleatorias al enfrentarse a una intersección sin una estrategia más avanzada para la selección del camino a seguir. El número de robots se tomó como una variable importante, pero no se exploraron otros factores que podrían influir en el rendimiento, como la velocidad de los robots al transitar en el laberinto. También, aunque se realizaron múltiples corridas en un mismo escenario para asegurar la consistencia de los resultados, las pruebas se basaron en un número limitado de configuraciones de robots y escenarios. Tener escenarios con mayor variabilidad en términos de tamaño, complejidad o características geográficas podrían haber generado resultados diferentes.

DISCUSIÓN

En comparación con otros estudios donde se emplean robots en labores de búsqueda y rescate, este trabajo se destaca por la implementación de anti feromonas como mecanismo para bloquear caminos sin salida. Enfoques previos se han basado en algoritmos de búsqueda estándar o estrategias de inteligencia colectiva para la exploración de áreas, mientras que en este método se combina la bioinspiración con la optimización del número de robots exploradores.

El principal problema que surge en este método es el embotellamiento de robots, debido a que, si se utilizan más robots de los necesarios, los tiempos de búsqueda se incrementan en lugar de reducirse. Al generarse los embotellamientos, los robots bloquean sus propios caminos, es ahí donde surge un error que no se menciona en la literatura previa, pero que aquí resulta ser un factor crítico. Este hallazgo resalta la importancia de equilibrar el número de robots con la complejidad del entorno para evitar interferencias entre ellos. En varias pruebas, un número óptimo de robots resolvió los laberintos en tiempos significativamente menores que al emplear más robots. Además, la implementación del algoritmo BFS para encontrar la ruta

más corta hacia la víctima tras su localización es un avance respecto a otros trabajos, lo que mejora la efectividad de las operaciones de búsqueda.

CONCLUSIONES

Las conclusiones se están alineadas con los objetivos planteados, los cuales buscaban determinar el número óptimo de robots para explorar laberintos y encontrar a la víctima minimizando los tiempos y evitando caminos sin salida.

De acuerdo con la hipótesis, los resultados confirman que existe un número ideal de robots dependiendo del tamaño del escenario. El utilizar más robots de los que son necesarios no se reducen los tiempos, al contrario, se generan embotellamientos que dificultan la resolución del laberinto y ubicación de la víctima.

El algoritmo BFS es capaz de determinar la ruta más corta, convirtiendo el mapa trazado de los robots en un mapa de nodos, validando así el uso combinado de bioinspiración y métodos de búsqueda, en este caso con el uso de anti feromonas.

Se concluye entonces, que el número de robots debe estar equilibrado con la complejidad del terreno, y que, aunque el enfoque basado en anti feromonas es efectivo para evitar caminos sin salida, se pueden optimizar aún más los tiempos de búsqueda mediante la inclusión de algoritmos avanzados de toma de decisiones, ya que, en este caso, las decisiones de los robots para elegir caminos en una intersección es totalmente aleatoria. Se recomienda que futuros estudios exploren entornos tridimensionales para replicar mejor las condiciones reales de búsqueda en desastres naturales.

REFERENCIAS

Ricardo, R. (2020, noviembre 5). *Técnicas de búsqueda y rescate*. Estudyando.

<https://estudyando.com/tecnicas-de-busqueda-y-rescate/>

Cruz Ulloa, C., Cerro, J., & Barrientos, A. (2022). *Robótica colaborativa de búsqueda y rescate: Una clasificación basada en interacción física*. En *XLIII Jornadas de Automática: Libro de actas* (pp. 679-686).

<https://doi.org/10.17979/spudc.9788497498418.0679>

Neuron. (2024, June 18). *Robótica de rescate: Tecnologías y aplicaciones*. Neuron.

<https://neuron.com.ar/robotica-de-rescate-tecnologias-y-aplicaciones/>

ASCUN. (2021, mayo 20). *Prueban feromonas artificiales en enjambre de robots para saber cómo se comunican y coordinan*. ASCUN.

<https://ascun.org.co/noticias-ies/prueban-feromonas-artificiales-en-enjambre-de-robots-para-saber-como-se-comunican-y-coordinan/>

Barrón Estrada, M., & Téllez Gaytán, L. R. (2023). *Análisis de algoritmos de búsqueda informada y no informada*. ResearchGate.

https://www.researchgate.net/publication/372412479_Analisis_de_algoritmos_de_busqueda_informada_y_no_informada

Gil, Á., Aguilar, J., Rivas, R., & Dapena, E. (2019). *Coordinación emergente en sistemas multirobots*.

Revista UIS Ingenierías, 18(3), 75-86. <https://www.redalyc.org/journal/5537/553762534009/html/>