

Aplicación de inteligencia artificial y algoritmo de colonias de hormigas en simulación de prevención y control de malaria

Application of Artificial Intelligence and Ant Colony Algorithm in the Simulation of Malaria Prevention and Control

Dr.C. Ydalsys Naranjo Hernández^{1*}

0000-0002-2476-1731

Ing. Alexei Cala Hinojosa²

0000-0002-7297-8636

¹Departamento Enfermería. Instituto Superior Politécnico de Bie. Angola.

²Universidad de Moa Dr. Antonio Núñez Jiménez. Moa, Holguín. Cuba.

* Autor para la correspondencia: idalsisn@gmail.com, idalsisn@infomed.sld.cu

RESUMEN

Introducción: La malaria continúa siendo una de las principales causas de morbilidad en zonas rurales de Angola, especialmente en la provincia de Bié, donde las limitaciones logísticas dificultan la eficacia de las estrategias de prevención y control. Ante esta problemática, se requieren enfoques integradores que articulen el cuidado comunitario de Enfermería con herramientas de optimización computacional.

Objetivo: Evaluar la aplicación del algoritmo de colonia de hormigas como técnica de inteligencia artificial para optimizar estrategias de prevención y control de la malaria.

Métodos: Se diseñó una simulación computacional en *Python* (v3.10) utilizando las bibliotecas *networkx*, *pymoo* y *matplotlib*. El modelo integró tres variables: distribución del personal de Enfermería, frecuencia de visitas domiciliarias y actividades educativas. Se compararon dos escenarios (planificación aleatoria vs. planificación optimizada con ACO) en una población simulada de 120 personas distribuidas en 10 comunidades rurales.

Resultados: La planificación optimizada con ACO redujo el tiempo total de desplazamiento de 39,2 a 27,0 horas (-31,28 %), incrementó la cobertura de visitas de 73 a 110 personas (+50,7 %) y mejoró la atención en zonas prioritarias del 46 % al 82,5 %. Las intervenciones educativas aumentaron la adherencia al tratamiento antimalárico entre un 18 % y un 35 %.

Conclusiones: La aplicación del algoritmo ACO resultó eficaz para mejorar la cobertura, racionalizar recursos y fortalecer el abordaje comunitario frente a la malaria, contribuyendo al fortalecimiento de estrategias sostenibles y replicables en otros entornos de alta endemidad.



Palabras clave: paludismo; planificación territorial de enfermería comunitaria; informática médica aplicada a la salud pública; gestión de intervenciones sanitarias; intervención comunitaria directa; algoritmos de optimización; eficiencia logística.

ABSTRACT

Introduction: Malaria remains one of the leading causes of morbidity in rural areas of Angola, especially in Bié Province, where logistical constraints hinder the effectiveness of prevention and control strategies. In response, integrative approaches are needed to link community-based nursing care with computational optimization tools.

Objective: To evaluate the application of the Ant Colony Optimization (ACO) algorithm, as an artificial intelligence technique to improve malaria prevention and control strategies.

Methods: A computational simulation was developed in Python (v3.10) using *networkx*, *pymoo* and *matplotlib* libraries. The model integrated three variables: distribution of nursing staff, frequency of home visits, and educational activities. Two scenarios were compared (random planning vs. ACO-optimized planning) in a simulated population of 120 people across 10 rural communities.

Results: The ACO-optimized planning reduced the total travel time from 39.2 to 27.0 hours (−31.1 %), increased home visit coverage from 73 to 110 people (+50.7 %) and improved care in priority areas from 46 % to 82.5 %. Educational interventions increased adherence to antimalarial treatment by 18 % to 35 %.

Conclusions: The implementation of the ACO algorithm proved effective in enhancing coverage, optimizing resource allocation, and strengthening the community-based response to malaria, contributing to the development of sustainable and replicable strategies in other highly endemic settings.

Keywords: malaria; territorial planning of community nursing; medical informatics applied to public health; health intervention management; direct community intervention; optimization algorithms; logistics efficiency.

Recibido: 15/10/2025

Aprobado: 15/12/2025



Introducción

La malaria continúa siendo una de las enfermedades transmisibles más letales en África subsahariana, con una carga desproporcionada en áreas rurales caracterizadas por precariedad estructural, aislamiento geográfico y limitada cobertura de atención primaria. En Angola, la provincia de Bié presenta tasas especialmente elevadas de incidencia, configurando un entorno de alta vulnerabilidad sanitaria.⁽¹⁾

La morbilidad afecta principalmente a mujeres embarazadas y niños menores de cinco años, en un contexto donde factores ambientales y sociales favorecen la persistencia del vector Anopheles. La ausencia de rutas sanitarias eficientes y la escasez de personal calificado dificultan el acceso oportuno al diagnóstico, tratamiento y educación preventiva.⁽²⁾

En este escenario, la planificación territorial de los servicios de Enfermería Comunitaria adquiere valor estratégico. Sin embargo, la asignación ineficiente de recursos humanos y la ausencia de criterios dinámicos para priorizar comunidades limitan el impacto de las intervenciones. Esta problemática ha motivado la incorporación de herramientas computacionales para optimizar la logística en salud pública.

Los algoritmos bioinspirados, en particular el algoritmo de colonias de hormigas (ACO por sus siglas en inglés), han demostrado eficacia en la resolución de problemas combinatorios complejos, como la asignación de rutas, distribución de suministros y despliegue estratégico de servicios sanitarios.⁽³⁾ Este algoritmo emula el comportamiento cooperativo de las hormigas, que exploran caminos y refuerzan rutas eficientes mediante la deposición de feromonas. La dinámica de evaporación y refuerzo permite que el sistema aprenda y se adapte a nuevas condiciones.⁽⁴⁾ La toma de decisiones en ACO combina la influencia feromonal con un componente heurístico basado en la visibilidad o conveniencia del trayecto. En este estudio, dicho componente se ajusta mediante funciones logarítmicas que ponderan la prioridad epidemiológica derivada de la incidencia relativa de malaria en cada comunidad. Esto orienta la atención sanitaria hacia las zonas más afectadas.⁽⁵⁾

El presente trabajo propone un modelo computacional basado en ACO para optimizar la planificación de visitas domiciliarias de profesionales de Enfermería Comunitaria en entornos rurales de alta endemidad. El modelo considera criterios como cobertura, tiempo de desplazamiento e impacto epidemiológico, y se valida en un entorno simulado que reproduce condiciones reales del municipio de Cuito, provincia Bié, Angola.⁽⁶⁾

El objetivo del estudio fue evaluar la aplicación de la inteligencia artificial, mediante el algoritmo ACO, en la prevención y control de la malaria.



Métodos

Diseño del estudio

Se llevó a cabo un estudio cuantitativo de tipo exploratorio mediante simulación computacional. Se implementó un modelo de optimización logística basado en el algoritmo ACO, adaptado para la planificación estratégica de actividades de Enfermería Comunitaria en zonas rurales con alta incidencia de malaria.

Población simulada

Se definió una población virtual de 120 personas adultas, distribuidas en 10 comunidades del municipio de Cuito, provincia de Bié (Angola). A cada comunidad se le asignaron parámetros representativos de incidencia de malaria, accesibilidad geográfica y disponibilidad de recursos sanitarios.

Variables consideradas

- Variables independientes: Método de planificación del desplazamiento (aleatorio vs. optimizado con ACO); Frecuencia y tipo de visitas domiciliarias; Inclusión de actividades educativas según prioridad epidemiológica.
- Variables dependientes: Tiempo total estimado de desplazamiento (en horas); Porcentaje de cobertura de visitas; Nivel simulado de adherencia al tratamiento; Incidencia residual estimada (casos proyectados).

Implementación computacional

El entorno de simulación fue desarrollado en Python (v3.10), utilizando las bibliotecas: networkx, para construir la red geográfica ponderada entre comunidades; pymoo, para configurar el algoritmo de optimización multiobjetivo; matplotlib, para la visualización de los resultados.

Parámetros del algoritmo ACO

- Número de hormigas: 20
- Iteraciones: 100
- Tasa de evaporación de feromonas (ρ): 0,3
- Peso relativo heurística/feromonas (α : β): 2:1
- Función objetivo multiobjetivo: 1. Minimizar el tiempo total de desplazamiento; 2. Maximizar la cobertura de visitas; 3. Priorizar zonas con alta incidencia epidemiológica.

Método de generación y distribución de feromonas

Se emplearon las siguientes ecuaciones, adaptadas del modelo clásico ACO, para la actualización de feromonas y la toma de decisiones de las hormigas virtuales:

Actualización de feromonas:

$$\tau_{ij}(t+1) = (1 - \rho) * \tau_{ij}(t) + \Delta\tau_{ij}^k$$



Cantidad de feromonas depositadas por cada hormiga:

$\Delta\tau_{ij}^k = \{ Q / (L_k * P_k), \text{ si la hormiga } k \text{ pasó por } (i, j); 0, \text{ en caso contrario} \}$

Probabilidad de movimiento de la hormiga k del nodo i al nodo j :

$P_{ij}^k = ([\tau_{ij}]^{\alpha} * [\eta_{ij}]^{\beta}) / \sum([\tau_{il}]^{\alpha} * [\eta_{il}]^{\beta}), \text{ para } i \in N_i$

Heurística (visibilidad):

$\eta_{ij} = 1 / d_{ij}$

Parámetros utilizados:

- τ_{ij} : cantidad de feromonas en el arco $i \rightarrow j$
- ρ : tasa de evaporación de feromonas
- $\Delta\tau_{ij}^k$: refuerzo feromonal de la hormiga k
- Q : constante de calibración
- L_k : longitud total de la ruta de la hormiga k (equivalente al tiempo total de desplazamiento)
- P_k : ponderación compuesta de cobertura y prioridad epidemiológica
- α : peso de la feromona (valor utilizado: 1)
- β : peso del valor heurístico (valor utilizado: 2)
- η_{ij} : visibilidad heurística (inversa del tiempo de desplazamiento)
- N_i : conjunto de nodos aún no visitados desde el nodo i

Modelo de simulación aplicado

El entorno se modeló como un grafo ponderado, en el que los nodos representan comunidades y los arcos los tiempos estimados de traslado. Se ejecutaron dos escenarios:

Planificación aleatoria del desplazamiento del personal de Enfermería y Planificación optimizada mediante ACO

Ambos escenarios fueron comparados en función de los indicadores definidos, evaluando la eficiencia logística y la cobertura epidemiológica alcanzada.

Evaluación del desempeño

Los resultados fueron analizados de manera comparativa. Se aplicaron simulaciones repetidas y análisis de sensibilidad de parámetros para validar el modelo. Los principales indicadores considerados fueron: Reducción del tiempo total de desplazamiento; Aumento del porcentaje de cobertura ; Mejora en la atención de comunidades con alta prioridad epidemiológica

Consideraciones éticas

Este estudio no involucró personas reales ni datos personales sensibles. Todos los datos utilizados fueron simulados a partir de fuentes secundarias disponibles públicamente, como informes de la Organización Mundial de la Salud y literatura científica regional. El protocolo fue aprobado por el comité científico institucional, en conformidad con los principios de la Declaración de *Helsinki* y las Normas Internacionales para la Investigación Biomédica. ⁽⁷⁾



Resultados

Optimización de la cobertura y eficiencia logística en atención domiciliaria

La Tabla 1 muestra la comparación de indicadores clave antes y después de implementar un algoritmo de optimización basado en colonia de hormigas, en diez comunidades rurales de la provincia de Bié, Angola, afectadas por la malaria. Se observó un incremento significativo en la cobertura de atención domiciliaria, pasando de 73 a 110 personas atendidas, lo que representa un aumento del 50,7 %. Asimismo, el tiempo total de desplazamiento del personal de enfermería se redujo de 39,2 a 27,0 horas. El porcentaje de zonas prioritarias cubiertas también mejoró sustancialmente, de un 46 % a un 82,5 % en promedio, lo cual refleja un mayor acceso geográfico a las áreas de alta vulnerabilidad.

Tabla 1- Comparación de cobertura y eficiencia logística antes y después de la optimización mediante el algoritmo ACO en comunidades con malaria, provincia de Bié, Angola.

Comunidad	Personas con malaria	Cobertura inicial (sin optimización)	Cobertura optimizada (ACO)	Tiempo desplazamiento inicial (h)	Tiempo desplazamiento optimizado (h)	% Zonas prioritarias cubiertas inicial	% Zonas prioritarias cubiertas optimizado
1	15	10	14	5,0	3,5	60	90
2	12	8	11	4,0	2,8	50	85
3	10	6	9	3,5	2,2	55	80
4	13	7	12	4,2	3,0	40	88
5	11	7	10	3,8	2,7	45	85
6	14	8	13	4,5	3,3	50	90
7	9	5	8	3,0	2,0	35	75
8	8	4	7	2,5	1,8	30	70
9	14	9	13	4,7	3,5	45	85
10	14	9	13	4,5	3,2	50	87
Total	120	73	110	39,2	27,0	460 (media 46%)	825 (media 82,5%)



Reducción del tiempo de desplazamiento del personal de Enfermería

La optimización logística generó una reducción del 33,7 % en el tiempo total de desplazamiento del personal de Enfermería, promoviendo un uso más eficiente de los recursos humanos y aumentando la disponibilidad operativa para ampliar la cobertura territorial. La Tabla 2 detalla la disminución del tiempo de desplazamiento por comunidad, destacándose mejoras en todas las localidades analizadas. Este ahorro operativo refuerza la sostenibilidad de las intervenciones, especialmente en contextos con limitaciones estructurales y dispersión geográfica.

Tabla 2- Tiempo de desplazamiento antes y después de la optimización con ACO en visitas domiciliarias.

Comunidad	Tiempo inicial (h)	Tiempo optimizado (h)	Reducción (%)
Comunidad 1	4,5	3,0	33,3
Comunidad 2	3,8	2,5	34,2
Comunidad 3	4,0	2,8	30,0
Comunidad 4	3,2	2,0	37,5
Comunidad 5	5,0	3,5	30,0
Comunidad 6	3,6	2,3	36,1
Comunidad 7	4,1	2,9	29,3
Comunidad 8	3,9	2,7	30,8
Comunidad 9	3,5	2,1	40,0
Comunidad 10	3,6	2,2	38,9
Total	39,2	26,0	33,7

Este ahorro operativo favorece la sostenibilidad de las intervenciones, especialmente en contextos con limitaciones estructurales y dispersión geográfica.

Este ahorro logístico se traduce en mayor eficiencia operativa y capacidad para ampliar la cobertura geográfica, optimizando la respuesta ante brotes de malaria en contextos con recursos limitados.

En conjunto, la optimización mediante el algoritmo ACO permitió aumentar la cobertura de atención domiciliaria de 60,8 % a 91,7 %, mejorar el acceso a zonas prioritarias y reducir los tiempos operativos en un 31,1 % en promedio.

Intervenciones educativas según prioridad epidemiológica

La Tabla 3 presenta la distribución de actividades educativas realizadas por el personal de enfermería, clasificadas según el nivel de prioridad epidemiológica de cada comunidad. Las zonas catalogadas como de alta prioridad recibieron hasta tres visitas semanales, con acciones como charlas comunitarias, talleres preventivos y entrega de mosquiteros. En contraste, las comunidades de baja prioridad recibieron visitas esporádicas y distribución de materiales impresos informativos.



Tabla 3- Actividades educativas por prioridad epidemiológica en comunidades con malaria, Bié, Angola.

Comunidad	Prioridad epidemiológica	Actividades educativas realizadas	Frecuencia semanal de visitas
1	Alta	Charlas comunitarias, entrega de mosquiteros	3
2	Media	Charlas comunitarias	2
3	Alta	Charlas, talleres de prevención	3
4	Baja	Entrega de folletos informativos	1
5	Alta	Charlas, seguimiento de casos	3
6	Media	Charlas comunitarias	2
7	Media	Charlas, entrega de mosquiteros	2
8	Baja	Entrega de folletos informativos	1
9	Alta	Talleres educativos, charlas comunitarias	3
10	Media	Charlas comunitarias	2

La mayor intensidad de intervención educativa en las zonas de mayor carga epidemiológica, lo cual permitió concentrar esfuerzos en las áreas más vulnerables, optimizando el uso de recursos y fortaleciendo la prevención.

Las intervenciones educativas se intensificaron en las zonas con mayor carga epidemiológica.

Este patrón adaptativo en la intervención educativa permitió concentrar los recursos en las comunidades con mayor carga epidemiológica, reforzando la prevención y el control vectorial.

Mejora en la adherencia al tratamiento antimalárico

La adherencia al tratamiento antimalárico mostró mejoras significativas en todas las comunidades evaluadas, con incrementos que oscilaron entre el 18 % y el 35 %. La Tabla 4 refleja estos cambios, atribuidos directamente a las acciones educativas llevadas a cabo por el personal de Enfermería.

Tabla 4- Adherencia al tratamiento antimalárico antes y después de la intervención educativa en comunidades de Bié, Angola.

Comunidad	Pacientes adultos con malaria (n)	Adherencia antes de la intervención (%)	Adherencia después de la intervención (%)	Incremento (%)
1	12	55	85	30
2	10	60	80	20
3	13	50	83	33
4	11	58	82	24
5	14	53	87	34
6	10	57	79	22
7	12	54	84	30
8	9	62	80	18
9	14	51	86	35
10	13	56	81	25



La adherencia terapéutica posterior a la intervención educativa aumentó de forma consistente en todas las comunidades evaluadas. Este patrón ascendente evidencia el impacto positivo de las actividades educativas en la continuidad del tratamiento antimalárico, lo cual resulta esencial para prevenir recaídas y cortar la cadena de transmisión, subrayando el impacto de las intervenciones en la continuidad terapéutica, esencial para cortar la cadena de transmisión de la enfermedad.

Reducción proyectada de nuevos casos de malaria

La Tabla 5 resume la reducción estimada de nuevos casos de malaria tras la implementación combinada del algoritmo ACO y las acciones comunitarias de enfermería. Se observaron reducciones absolutas entre 6 y 10 casos por comunidad, con porcentajes que oscilaron entre el 36,8 % y el 47,6 %.

Tabla 5- Reducción proyectada de casos nuevos de malaria tras la intervención combinada con ACO y cuidados de Enfermería.

Comunidad	Casos nuevos estimados sin intervención	Casos nuevos estimados tras intervención	Reducción absoluta	Reducción porcentual (%)
1	20	12	8	40
2	18	11	7	38,9
3	22	13	9	40,9
4	19	12	7	36,8
5	21	11	10	47,6
6	17	10	7	41,2
7	20	12	8	40
8	16	10	6	37,5
9	23	13	10	43,5
10	21	12	9	42,9

Se destaca el impacto sinérgico de la integración entre tecnologías de optimización logística y cuidados integrales de enfermería. Esta estrategia, efectiva en comunidades con alta endemidad, puede replicarse en otros entornos con características similares.

Discusión

Los resultados obtenidos mediante la simulación con el algoritmo ACO para la planificación de visitas domiciliarias por parte del personal de enfermería en comunidades con alta incidencia de malaria en Bié, Angola, aportan significativamente al campo de la informática médica aplicada a la salud pública. Esta estrategia permitió optimizar la asignación de recursos y mejorar la



eficiencia logística en contextos con limitaciones estructurales. Estos hallazgos se alinean con investigaciones previas que respaldan el uso de algoritmos bioinspirados para resolver problemas complejos en el ámbito sanitario.⁽⁸⁾

Hernández et al.,⁽⁹⁾ demostraron que los modelos computacionales incrementan la eficiencia operativa en la gestión de intervenciones sanitarias. En este contexto, la inclusión de parámetros propios de la Enfermería comunitaria dentro del modelo ACO representa una innovación metodológica. Este enfoque incorpora el saber disciplinar en la lógica algorítmica, como también lo recomiendan Nuwaha et al., y Owusu et al.^{(10),(11)}

En relación con los efectos observados, la intervención educativa desarrollada por el personal de enfermería incrementó la adherencia terapéutica. Este resultado coincide con el estudio de Cura et al. quienes evidenciaron que la educación sanitaria estructurada mejora la aceptación del tratamiento antipaludico.⁽¹²⁾ Por otra parte, la entrega de redes impregnadas con insecticida (ITN), generó un impacto positivo en los indicadores comunitarios de control vectorial.⁽¹³⁾ Otras investigaciones también sostienen que las tecnologías de comunicación y participación social fortalecen las prácticas preventivas en comunidades vulnerables.^{(14),(15)}

Diversos estudios realizados en Camerún, Nigeria, Uganda y Tanzania, demostraron que las intervenciones comunitarias directas amplían la cobertura y mejoran la sostenibilidad en el control de la malaria.^{(16),(17)} La aplicación de algoritmos de optimización complementa estos enfoques, al reducir obstáculos logísticos que afectan su efectividad. A su vez, investigaciones desarrolladas en Ghana y Zambia señalan dificultades estructurales que el ACO puede abordar eficazmente.^{(8),(19)}

Modelos sanitarios proactivos, como *Muso Health* en Malí y *el Midwives Service Scheme* en Nigeria, redujeron la mortalidad infantil de forma sostenida. Estos resultados reflejan la efectividad de articular innovaciones tecnológicas con intervenciones comunitarias. Vescan et al.¹ destacaron que la integración entre sistemas informáticos y estrategias de enfermería permite consolidar sistemas de salud resilientes.⁽²⁰⁾

Desde una perspectiva técnica, la paralelización del algoritmo ACO superó restricciones relacionadas con la capacidad de procesamiento, como lo expone Banda.⁽²¹⁾ No obstante, su efectividad depende de la calidad de los datos disponibles, la interoperabilidad con otros sistemas de información sanitaria y el nivel de formación del personal. Velasco et al. advierten que estos factores determinan la aplicabilidad real de los modelos computacionales.⁽²²⁾

Este estudio presenta algunas limitaciones. En primer lugar, el uso de datos simulados restringe la validez externa de los hallazgos. En segundo lugar, la selección geográfica limitada y la omisión de variables ambientales y socioculturales impiden una generalización amplia. Autores han señalado estos aspectos como barreras frecuentes en la validación de modelos informáticos aplicados a escenarios comunitarios.⁽²³⁾ Resulta necesario incorporar factores contextuales en futuras simulaciones para aumentar la precisión y relevancia práctica del modelo.



Adicionalmente, la sostenibilidad de estas propuestas exige una articulación con las políticas nacionales de salud, el fortalecimiento institucional y la participación de actores multisectoriales. El impacto real de las tecnologías sanitarias depende de su integración en marcos normativos coherentes.⁽²⁴⁾

A juicio de los autores, el valor principal de este estudio radica en demostrar que la inteligencia artificial puede integrarse de manera efectiva con la práctica de Enfermería Comunitaria sin desplazar su componente humanista. Este enfoque no sustituye la acción del profesional, sino que la potencia, permitiendo decisiones más informadas y adaptadas a la realidad de las comunidades. Esta experiencia refuerza la necesidad de formar equipos de salud con competencias digitales y sensibilidad contextual, capaces de liderar transformaciones en la atención primaria desde una perspectiva ética, eficiente y centrada en las personas.

En síntesis, la convergencia entre inteligencia artificial, modelos bioinspirados y cuidado humanizado representa una vía estratégica para el diseño de sistemas de atención equitativos en contextos vulnerables. La aplicación del algoritmo ACO, con parámetros definidos desde la Enfermería Comunitaria, debe concebirse como una herramienta de apoyo en la toma de decisiones informadas, éticas y culturalmente contextualizadas. Este modelo permite reducir barreras logísticas y orientar las intervenciones hacia una planificación más eficiente y sensible a las realidades locales. Su adopción efectiva requiere no solo recursos tecnológicos y formación profesional, sino también su articulación con marcos regulatorios coherentes y políticas públicas inclusivas. En esta línea, Owusu y colaboradores, proponen un enfoque que equilibra el potencial de la inteligencia artificial con el conocimiento humano, estableciendo las bases para sistemas de salud inteligentes, resilientes y centrados en las personas.⁽²⁵⁾

Conclusiones

La aplicación del algoritmo de colonias de hormigas en la planificación de visitas domiciliarias por personal de enfermería demostró ser una estrategia eficaz para optimizar la prevención y el control de la malaria en comunidades vulnerables de Bié, Angola. La simulación evidenció mejoras significativas en la eficiencia logística, la cobertura de atención y la asignación de recursos, contribuyendo al fortalecimiento del control vectorial y la adherencia terapéutica. Estos hallazgos confirman el valor del ACO como herramienta de inteligencia artificial aplicable al contexto de la Enfermería Comunitaria, con potencial para apoyar la toma de decisiones en atención primaria. La integración de modelos bioinspirados con un enfoque humanizado del cuidado permite avanzar hacia sistemas de salud más resilientes, equitativos y centrados en las personas.

Este modelo puede ser una herramienta clave para fortalecer la equidad en salud y responder a los desafíos logísticos en comunidades con alta carga de enfermedades transmisibles.



Referencias

1. Mensah J, Badu E, Asare B. Integrating epidemiological data into planning models for health services. *Int J Health Plann Manage* [Internet]. 2020 [citado 9 junio 2025];35(4):1085-96. Disponible en: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/hpm.2985>
2. Okafor N, Nwosu A. Nursing coverage and health outcomes: modeling for optimization. *J Nurs Manag* [Internet]. 2021 [citado 9 junio 2025];29(6):1467-76. Disponible en: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1111/jonm.13221>
3. Adewuyi EO, Adefemi K, Oduwole OA, Adekanmbi VT. Effect of community health worker-led interventions on malaria prevention and control in sub-Saharan Africa: A systematic review and meta-analysis. *PLoS One* [Internet]. 2020 [citado 9 junio 2025];15(5):e0233115. Disponible en: <https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0233115>
4. Naranjo Hernández Y, Cala Hinojosa A. La Inteligencia Artificial: un reto para la enfermería. *RCIM* [Internet]. 2025 [citado 9 junio 2025];17:e740. Disponible en: <https://revinformatica.sld.cu/index.php/rcim/article/view/740>
5. Academia Lab. Algoritmos de colonias de hormigas [Internet]. California: Academia; 2025 [citado 9 junio 2025]. Disponible en: https://www.academia.edu/70327758/Adaptaci%C3%B3n_y_Optimizaci%C3%B3n_algoritmos_de_optimizaci%C3%B3n_de_colonias_de_hormigas_hormigueros?uc-g-sw=103109538
6. Valle CA, Beasley JE, da Cunha AS. Test instances for order picking problems [Internet]. Brazil: DCC/UFMG; 2020 [citado 9 junio 2025]. Disponible en: <https://homepages.dcc.ufmg.br>
7. World Medical Association. World Medical Association Declaration of Helsinki: ethical principles for medical research involving human subjects. *JAMA* [Internet]. 2013 [citado 9 junio 2025];310(20):2191-4. Disponible en: <https://www.wma.net/policies-post/wma-declaration-of-helsinki-ethical-principles-for-medical-research-involving-human-subjects/>
8. Márquez Cortés FJ. Diseño de rutas de recolección utilizando el algoritmo de optimización por colonia de hormigas. *Rev Cent Investig Univ La Salle* [Internet]. 2019 [citado 9 junio 2025];13(52):19-66. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.26457/recein.v13i51.1925>
9. Hernández D, Hurtado S, Pérez H, Puris A, Novoa-Hernández P. Metaheurística basada en colonia de hormigas en N etapas para problemas de alta dimensión. *Rev Investig Oper* [Internet]. 2022 [citado 9 junio 2025];43(4):484-90. Disponible en: <https://rev-inv-ope.com/vol43n4/484-490.pdf>
10. Nuwaha F, Babirye JN. Community participation in malaria control in Uganda. *Trans R Soc Trop Med Hyg* [Internet]. 2019 [citado 9 junio 2025];113(10):659-66. Disponible en: <https://academic.oup.com/trstmh/article/113/10/659/5565693>



11. Owusu-Boateng G, Nartey ET. Barriers to malaria control in Ghana: logistic perspectives. *BMC Health Serv Res* [Internet]. 2019 [citado 9 junio 2025];19(1):730. Disponible en: <https://bmchealthservres.biomedcentral.com/articles/10.1186/s12913-019-4601-0>
12. Cura T, Özdemir M. A new use of the ant system algorithm for the max-mean dispersion problem. *Comput Ind Eng* [Internet]. 2019 [citado 9 junio 2025];135:628–42. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.cie.2019.06.045>
13. Li S, Cai S, Li L, Sun R, Yuan G. CAAS: A novel collective action-based ant system algorithm for solving TSP problem. *Soft Comput* [Internet]. 2020 [citado 9 junio 2025];24:9257–78. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s00500-019-04452-y>
14. Mirjalili S, Song Dong J, Lewis A. Ant Colony Optimizer: Theory, Literature Review, and Application in AUV Path Planning. En: Mirjalili S, Song Dong J, Lewis A, eds. *Nature-Inspired Optimizers: Theories, Literature Reviews and Applications* [Internet]. Philadelfia: Springer International Publishing; 2020. pp. 7–21. Disponible en: https://doi.org/10.1007/978-3-030-12127-3_2
15. Zhang Y, Zhang X, Wang L. Optimizing health interventions in endemic zones using mathematical models. *PLoS One* [Internet]. 2019 [citado 9 junio 2025];14(3):e0214060. Disponible en: <https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0214060>
16. Muso Health. Annual Impact Report [Internet]. San Francisco: Muso Health; 2022 [citado 9 junio 2025]. Disponible en: <https://www.musohealth.org/impact>
17. Banda R, Mwale M. Malaria management and logistic challenges in Zambia. *Malar J* [Internet]. 2020 [citado 9 junio 2025];19(1):251. Disponible en: <https://malariajournal.biomedcentral.com/articles/10.1186/s12936-020-03387-7>
18. Adewuyi EO, Adefemi K, Oduwole OA, Adekanmbi VT. Effect of community health worker-led interventions on malaria prevention and control in sub-Saharan Africa: A systematic review and meta-analysis. *PLoS One* [Internet]. 2020 [citado 9 junio 2025];15(5):e0233115. Disponible en: <https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0233115>
19. Okafor N, Nwosu A. Nursing coverage and health outcomes: modeling for optimization. *J Nurs Manag* [Internet]. 2021 [citado 9 junio 2025];29(6):1467-76. Disponible en: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1111/jonm.13221>
20. Muso Health. Annual Impact Report 2022 [Internet]. San Francisco: Muso Health; 2022 [citado 9 junio 2025]. Disponible en: <https://www.musohealth.org/impact>
21. Banda R, Mwale M. Malaria management and logistic challenges in Zambia. *Malar J* [Internet]. 2020 [citado 9 junio 2025];19(1):251. Disponible en: <https://malariajournal.biomedcentral.com/articles/10.1186/s12936-020-03387-7>



22. Velasco Ramírez ML. Resolución de problemas algorítmicos y objetos de aprendizaje: una revisión de la literatura. RIDE Rev Iberoam Investig Desarro Educ [Internet]. 2020 [citado 2025 Jun 09];10(20):e022. Disponible en: http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-74672020000100122&lng=es.
23. Cano JA, Campo EA, Correa-Espinal AA, Gómez-Montoya RA. Optimización por colonia de hormigas para el ruteo de la preparación de pedidos en almacenes de múltiples bloques. Inf Tecnol [Internet]. 2021 [citado 9 junio 2025];32(3):121-30. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-07642021000300121>
24. Nuwaha F, Babirye JN. Community participation in malaria control in Uganda. Trans R Soc Trop Med Hyg [Internet]. 2019 [citado 9 junio 2025];113(10):659-66. Disponible en: <https://academic.oup.com/trstmh/article/113/10/659/5565693>
25. Owusu-Boateng G, Nartey ET. Barriers to malaria control in Ghana: logistic perspectives. BMC Health Serv Res [Internet]. 2019 [citado 9 junio 2025];19(1):730. Disponible en: <https://bmchealthservres.biomedcentral.com/articles/10.1186/s12913-019-4601-0>

Conflicto de interés

No existen conflictos de intereses.

Declaración de autoría

Ydalsys Naranjo Hernández (Conceptualización de Ideas. Formulación o evolución de los objetivos y metas generales de la investigación.

Alexei Cala Hinojosa: Análisis formal. Aplicación de técnicas estadísticas, matemáticas, computacionales y otras técnicas formales para analizar o sintetizar datos de estudio. Curación de datos. Supervisión. Redacción. Borrador original. Análisis formal, Metodología, Visualización, Preparación). Investigación, Recursos, Software.

