

## Los sistemas de información geográfica en la simulación basada en agentes: Un estudio de casos

### Geographic Information Systems in Agent Based Simulation: A case study

Ariadna Moreno Román<sup>1</sup>, Jesús Hernández Barrios<sup>1</sup>, Mailyn Moreno Espino<sup>1,\*</sup>

<sup>1</sup> Universidad Tecnológica de La Habana “José Antonio Echeverría”, CUJAE. Centro de Estudios de Ingeniería y Sistemas. Calle 114 No. 11901 e/ Ciclovía y Rotonda, Marianao. La Habana, Cuba.

\*Autor de correspondencia: [amoreno@ceis.cujae.edu.cu](mailto:amoreno@ceis.cujae.edu.cu)

Este documento posee una [licencia Creative Commons Reconocimiento/No Comercial 4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)



**Recibido:** 3 noviembre 2022 **Aceptado:** 19 diciembre 2022 **Publicado:** 21 diciembre 2022

#### Resumen

Los sistemas de información geográfica en la actualidad son utilizados en un gran número de ramas, como son la gestión de recursos, la gestión de activos, la planificación urbana, el marketing y la logística. Esto se debe a la amplia variedad de facilidades que ofrece en el trabajo con datos espaciales geográficamente referenciados. Por otra parte, las técnicas de simulación se utilizan en procesos donde es necesario tener un conocimiento previo de cómo será su desarrollo una vez puestos en marcha. Procesos como la planificación de transporte, la colocación de señales viales y la ubicación de estaciones de servicios están entre los fenómenos comúnmente simulados. Este trabajo comprende el estudio de dos casos que integran ambas tecnologías para lograr resultados óptimos en la planificación de procesos de este tipo. Se presenta un primer caso que comprende la configuración y evaluación del funcionamiento de señalizaciones viales. El segundo caso es un análisis del comportamiento de las estaciones de patrulla ubicadas según una solución dada para el problema de máxima cobertura. En ambos casos se evidencia cómo el uso de sistemas de información geográficos en la simulación puede aportar resultados más reales y más útiles para las entidades que desarrollan estas planificaciones.

**Palabras clave:** Simulación Basada en Agentes, Sistemas de información geográficos, Problema de máxima cobertura, Señales de tráfico

#### Abstract

Geographic Information Systems now are used in a great number of branches, like the administration of resources, the administration of assets, the urban planning, the marketing and the logistics. This is due to the wide variety of facilities that they offer in the work with space data geographically indexed. On the other hand, the simulation techniques are used in processes where it is necessary to have a previous knowledge of how they will be developed once in March, processes like the planning of transport, the placement of traffic lights and the location of services stations are among the commonly feigned phenomenon. This work understands the study of two cases that integrate both technologies to achieve good results in the planning of processes. A first case is presented that understands the configuration and evaluation of the working of traffic signals. The second case is an analysis of the behavior of the patrol car stations located according to a solution given for the maximum covering problem. In both cases, it is evidenced as the use of geographic information systems in the simulation can contribute to get more real and useful results for the entities that develop these planning processes.

**Keywords:** Agent Based Simulation, Geographic Information Systems, Maximum Covering Problem, Traffic signals

## 1. Introducción

En la actualidad, la puesta en marcha de un proceso o sistema sin antes tener cierto grado de confianza de cómo será su funcionamiento, no constituye una buena práctica. Esto es provocado por el riesgo de ocurrencia de colapsos, insuficiencias y errores, es decir, obtención de resultados no esperados [1]. Las técnicas de simulación se han utilizado durante mucho tiempo de una forma eficaz para imitar el desempeño de un sistema o artefacto que se desea desarrollar, con el fin de estimar cuál sería su desempeño e impacto real [2, 3].

Los Sistemas de Información Geográfica, (GIS, *Geographic Information System*) han supuesto en los últimos años una revolución para la gestión y análisis de datos espaciales. Constituyen sistemas integrados y organizados de hardware, software y datos geográficos que permiten analizar información geográficamente referenciada y además representar la misma. Esta tecnología es utilizada para investigaciones científicas, la planificación urbana, la logística, entre otros proyectos de planificación y gestión [4]. Los GIS también han sido utilizados en conjunto con técnicas de inteligencia artificial y simulación de procesos, con el propósito de imitar el comportamiento de determinados sistemas basándose en una información geoespacial real [5].

Una de las temáticas que pueden abordar la simulación y los GIS es la ingeniería de tránsito [6]. El objetivo de este trabajo es describir el estudio de dos casos que integran la simulación basada en multi-agente y la información de mapas geolocalizados. El primer caso comprende el desarrollo de una herramienta que evalúa configuraciones semafóricas en redes viales, utilizando mapas de carreteras; el segundo caso presenta una simulación basada en agente que muestra el comportamiento de una determinada solución para el problema de máxima cobertura.

Con el estudio de ambas herramientas se evidencia que las soluciones son escalables y reutilizables en gran medida porque aplican técnicas de sistemas de información geográfica en su implementación, que permiten obtener resultados basados en información espacial real.

## 2. Materiales y Métodos

### *Sistemas de Información Geográfica*

Los Sistemas de Información Geográfica están compuestos por una serie de elementos, donde los datos espaciales son esenciales debido a que contienen la información geográfica necesaria para el funcionamiento de estos sistemas. Esta información puede ser almacenada tanto en ficheros como en bases de datos espaciales [4].

Uno de los modelos que utilizan los GIS es el modelo ráster que consiste en una matriz rectangular de celdas cuadradas o píxeles usados para representar información relativa a capas temáticas, elevaciones e imágenes satelitales, entre otras [6]. A su vez, el modelo vectorial se basa en el uso de puntos independientes con atributos matemáticos, que se agrupan para formar geometrías más complejas [7].

Ejemplos de información obtenida de GIS son las características de calles determinadas, puntos de interés ubicados en un mapa, conjunto de puntos y edificaciones pertenecientes a una zona específica, entre otros muchos datos espaciales [8].

### *Simulación Basada en Agentes*

Una definición tomada de Wooldridge [9] es: “Un agente es un sistema computacional situado en un entorno dado, que es capaz de actuar de forma autónoma para cumplir sus objetivos”.

Un agente se ajusta perfectamente a las demandas de aplicaciones complejas e inherentemente distribuidas, donde cada agente es un sistema computacional en sí mismo, así como también modificable independientemente [9, 10].

La Simulación Basada en Agentes (ABS, *Agent Based Simulation*) se refiere a una categoría de modelos computacionales que invoca las acciones dinámicas, las reacciones y los protocolos de intercomunicación entre los agentes en un entorno compartido, para evaluar su diseño y rendimiento y obtener información sobre su comportamiento y propiedades emergentes [11].

### *Marco de trabajo MASON*

MASON (*Stands for Multi-Agent Simulator Of Neighborhoods*) es una plataforma de simulación basada en agentes, de eventos rápidos y discretos, diseñado para ser la base de grandes simulaciones, y también para proporcionar funcionalidad más que suficiente para muchas necesidades de simulación de peso ligero. Como parte de la integración con GIS, MASON cuenta con una extensión opcional llamada GeoMason la cual añade soporte para datos geoespaciales. Las principales características por las que se escoge el marco de trabajo MASON son [12, 13]:

1. Posibilidad de trabajo con GIS
2. Licencia de Academia Libre
3. Soporte para usuarios con tutoriales, documentación, listas de correo y ejemplos
4. Rápido, portátil y computacionalmente poco costoso
5. Los modelos son independientes y pueden ejecutarse dentro de otras plataformas y aplicaciones

### *Ejemplos de simulación basada en agentes usando GIS*

En las universidades de Estados Unidos y China se han vuelto frecuentes los ataques dentro de los campus universitarios, desde tiroteos masivos hasta personas portando cuchillos. La simulación presentada en [14] propone una solución para examinar las consecuencias de las acciones de las personas durante un ataque a un campus universitario. En ella se utiliza un sistema de información geográfico y está basada en agentes. Los resultados arrojados por los experimentos sugerían que cuando el atacante portaba un cuchillo las personas se agrupaban y lo enfrentaban; si portaba armas de fuego huían.

En [15] se presenta un sistema integrado ABS-GIS, donde a partir de un estudio de casos, se analizan para el tránsito de mercancías el impacto que tienen los cambios en el estado del tráfico. Se estudian los cambios en el coste, la calidad del servicio y las emisiones de carbono. Los resultados revelan que los atascos de tráfico influyen negativamente en la entrega a tiempo de las mercancías y se propone un algoritmo para la ampliación de las ventanas temporales.

El trabajo descrito en [16] presenta un marco empírico de modelado basado en agentes terrestres (ABS) para evaluar la difusión espacial y temporal de los sistemas fotovoltaicos (PV) en la azotea en edificios existentes de un distrito de la ciudad.

Otra integración entre estos sistemas se presenta en [17]. Los autores proponen un marco de metodología para evaluar la probabilidad de encuentros con barcos, basado en un paradigma de simulación basado en agentes. El comportamiento de la navegación tiene como soporte información de mapas basados principalmente en regiones de China.

### 3. Resultados y Discusión

Los casos fueron escogidos por su relevancia, siguiendo las recomendaciones de [18]. Un caso trata sobre el desarrollo de una herramienta de simulación para evaluar configuraciones de señalización en redes viales, y el segundo caso trata sobre el desarrollo de un modelo de simulación para representar soluciones del problema de máxima cobertura para la ubicación del patrullaje policial.

#### *Caso #1: Control de la señalización vial*

Se presenta el desarrollo de una herramienta de simulación para la configuración y evaluación de señalización en redes viales.

#### *Preguntas de estudio y proposiciones*

¿Se puede desarrollar una herramienta que evalúe las configuraciones de señalización vial utilizando simulación basada en agentes y sistemas de información geográficos?

Las proposiciones correspondientes son:

1. El uso de los GIS puede aportar información sobre las redes viales en las que se evaluarán las configuraciones de señales.
2. La simulación basada en agentes permite imitar el comportamiento de los vehículos para conocer el impacto de las señales.

#### *Contexto*

La unidad de análisis es el uso de los GIS en el proceso de desarrollo de la herramienta de simulación para evaluar configuraciones de señalización en redes viales.

En Cuba actualmente la colocación de semáforos en intersecciones de carreteras se realiza sin tener un previo conocimiento del impacto que tendrá. La instalación de estas señalizaciones supone para el país una inversión de recursos materiales y mano de obra que se desperdician si el resultado es contraproducente. La mala configuración semafórica trae como consecuencia embotellamientos en las vías, accidentes, y por supuesto pérdidas económicas. Un ejemplo de mala configuración semafórica se instanció en octubre de 2015, en la Rotonda de la Ciudad Deportiva, La Habana, Cuba. El proyecto consistió en instalar un semáforo en cada uno de los accesos a la rotonda, regulando la entrada a la misma. Esta reforma provocó una congestión en las vías adyacentes por más de 25 minutos e interrupción en la entrada del Hospital Clínico Quirúrgico de 26. La Dirección Nacional de Tránsito indicó retirar los semáforos a menos de 72 horas de su puesta en funcionamiento.

El fenómeno del tránsito:

Con el aumento de la cantidad de usuarios en la vía de vehículos de cualquier tipo, se incrementa también lamentablemente, el número de efectos negativos, como son los embotellamientos,

colapsos y accidentes. Una de las causas que agrava esta situación es la mala configuración del tráfico y las señales.

En el mundo se han desarrollado numerosas investigaciones para optimizar y configurar correctamente las señales de tráfico. En [19] se formula un sistema de configuración de tiempo verde más dinámico utilizando el sistema de inferencia difuso tipo Mamdani. Este se presenta en conjunto con una simulación que imita la configuración de la luz verde para las intersecciones. Los datos se comparan con los obtenidos de la oficina de transporte de la ciudad de Jakarta, donde se validan el modelo y la simulación.

Un simulador de tráfico desarrollado recientemente es CAVSim [20]. Este simulador es microscópico y representa vehículos conectados y automatizados. Enfatiza comportamientos de conducción más detallados y destaca los componentes de decisión y planificación en el entorno. Este simulador contribuye a que los investigadores puedan implementar rápidamente métodos de decisión y planificación en diferentes niveles, evaluar y probar su desempeño y explorar su impacto en el flujo de tráfico.

En [21] se propone una simulación basada en agentes de un sistema de control de tráfico urbano. La solución se ofrece como semáforos inteligentes como agentes para aliviar la congestión del tráfico en un lugar determinado. Los resultados de nuestros experimentos simulados apuntan a la mejora del tráfico urbano al utilizar el Sistema Multi-agente propuesto.

En aras de contribuir a la disminución de indicadores como los accidentes en vías reguladas por semáforos, es importante conocer qué configuraciones aplicar, y con ello minimizar los embotellamientos y contribuir al ahorro de recursos innecesarios para el país. Es necesario, además, utilizar GIS para realizar las simulaciones sobre mapas reales que contemplen las condiciones de las carreteras cubanas.

### *Lógica de análisis*

Se explica la lógica que relaciona los datos con las proposiciones. En esta sección, la fuente de la información presentada sería la observación directa o la observación participativa según la clasificación de [18].

### *Componentes principales de la herramienta*

**Agentes Semáforo:** Una de las entidades con mayor importancia dentro de esta herramienta es el agente semáforo. Los vehículos para saber si pueden continuar su tránsito deben detenerse y consultar la fase del semáforo en la que están transitando y actuar según el color de la luz. Cada fase tiene una lista de arcos de entrada, y por cada uno de estos, una lista de arcos de salida. Con esto se logra representar, dada una fase habilitada, qué calles están disponibles para la entrada, y dependiendo de esta, para la salida [22].

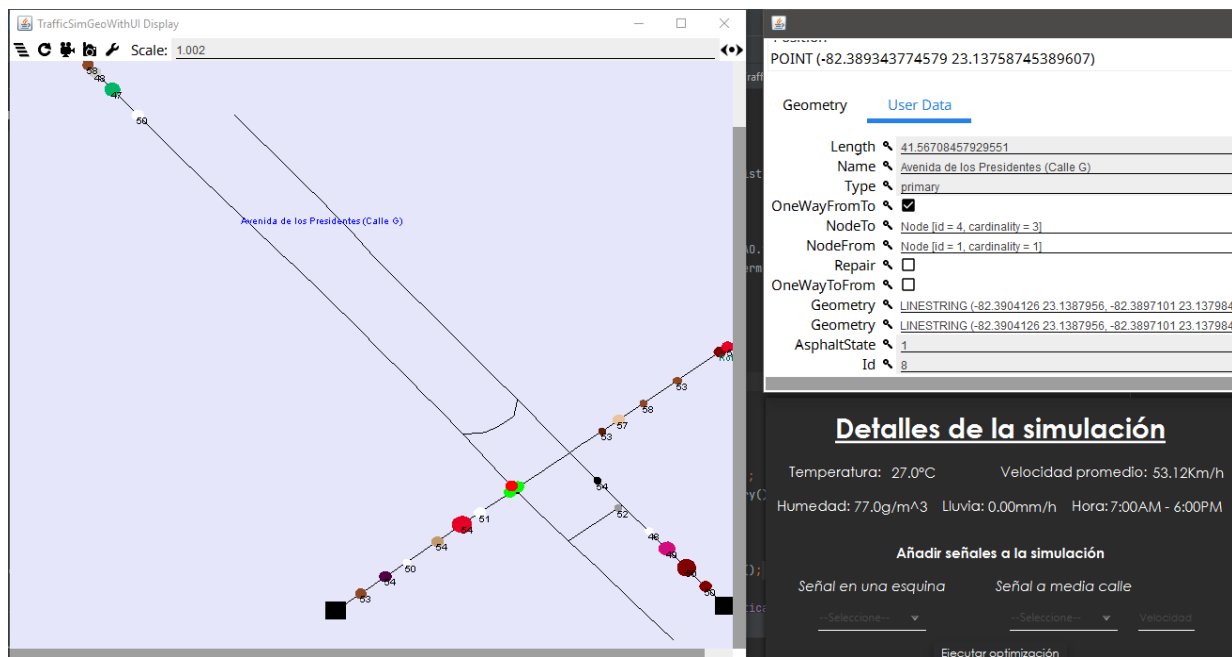
**Agente Vehículo:** La otra entidad principal de la herramienta desarrollada son los vehículos. Estos constituyen agentes autónomos con una ruta definida desde el inicio de su trayectoria, creada utilizando el algoritmo de Dijkstra [23] para encontrar camino más corto desde el nodo de arribo del vehículo hasta su nodo destino. Durante la marcha los vehículos comprueban que la calle por la que transitan tenga alguna señal, y la almacenan para decidir qué acción tomar cuando lleguen a la línea de señalización [22].

### Datos espaciales

Los datos espaciales para la herramienta son obtenidos del GIS OpenStreetMap [24]. Para el almacenamiento de los datos espaciales se utilizan bases de datos en formato SQLite. Con ello se permite el almacenamiento de diferentes geometrías y su consulta a través de un conjunto de métodos almacenados. Igualmente, posee procedimientos para efectuar una gran cantidad de operaciones espaciales, como pueden ser el cálculo de distancia, área, centroide y rutas, por solo citar ejemplos [8, 24].

Para generar esta DB se utilizó la herramienta “spatialite\_osm\_net”, que forma parte del conjunto de herramientas que brinda para el trabajo con ficheros de OSM. La única capa del GIS que utiliza la herramienta es la capa de líneas (calles). A través del uso de dicha solución es posible generar un grafo (red vial) partiendo de las etiquetas y relaciones presentes en la información espacial.

De los atributos de la DB los agentes obtienen información para transitar sobre ella. Los vehículos utilizan los atributos “onewaytofrom” y “onewayfromto” para conocer el sentido de la calle por la que transitan. El atributo “cost” permite que calculen la ruta más corta para llegar a su destino, tratando siempre de que el costo total del camino sea el menor posible. La velocidad máxima permitida está establecida según el tipo de calle, que se obtiene a través del atributo “class”, y los atributos “nodeTo” y “nodeFrom” indican el punto de inicio y de final de una calle determinada. En la Figura 1 se muestra un ejemplo de la simulación en ejecución para la intersección de Calle 23 y Avenida de los Presidentes, en La Habana, Cuba. En la consola auxiliar se muestran los datos de los atributos antes mencionados para la calle seleccionada.



**Fig.1** Atributos del mapa en la simulación

### Discusión

La herramienta de simulación desarrollada apoya el proceso de configuración de controladores del tránsito en redes viales. El uso de información espacial real para la simulación ofrece una mayor confiabilidad y permite que los analistas e ingenieros de tránsito imiten el comportamiento de los vehículos en las mismas intersecciones donde han planificado colocar un controlador de tráfico.

La herramienta puede generalizarse para analizar el comportamiento de una intersección semaforizada en cualquier ciudad de Cuba. En caso de uso para intersecciones de otros países la herramienta está limitada pues está desarrollada respetando las leyes cubanas; sería necesaria una modificación del software.

Los mapas obtenidos por el GIS utilizado todavía pueden ofrecer más parámetros y atributos de la vía que serían útiles en la simulación. Tal es el caso de los semáforos ya colocados, ahorrando tiempo a los analistas en la configuración de las señales que ya existen instaladas.

#### *Caso #2: Problema de máxima cobertura*

Se presenta el desarrollo de un modelo de simulación capaz de representar soluciones previstas para el problema de máxima cobertura.

#### *Preguntas de estudio y proposiciones*

¿Se pueden simular soluciones para el problema de máxima cobertura para la ubicación del patrullaje policial utilizando simulación basada en agentes y GIS?

Las proposiciones correspondientes son:

1. Los GIS permiten el tránsito de las patrullas colocadas por una red vial obtenida de un mapa real.
2. La simulación basada en agente puede ayudar a conocer el comportamiento de los vehículos de policía según la posición inicial dada.

#### *Contexto*

La unidad de análisis es el uso de los GIS en el proceso de desarrollo de un modelo de simulación basada en agentes para representar soluciones al problema de máxima cobertura en la colocación de patrullas de policías.

Una temática en la que la ABS puede aportar ventajas es en el problema Máxima Cobertura (MCLP, *Maximum Covering Location Problem*) [25]. En este problema la decisión está basada en buscar la mejor combinación de un número conocido de instalaciones que tenga un máximo de cobertura sobre las demandas de los nodos. Una de las aplicaciones de este problema es la localización de las estaciones de patrullas de la policía [26].

Hay tres principales tipos de estrategias de patrullaje para oficiales de patrulla: Patrullaje activo, patrullaje aleatorio, y patrullaje dirigido. En patrulla activo, los oficiales de patrulla deberían aprovechar cada oportunidad para descubrir, detectar, observar e interceptar un evento inusual. En el patrullaje aleatorio y dirigido como su nombre lo indica representa la disposición de las patrullas de ir a un lugar específico o no.

Existen estudios realizados en el mundo para la ubicación de patrullas de manera que se obtenga la mayor cobertura posible. El trabajo presentado por [26] contiene el diseño de un software capaz de modelar y resolver el problema de máxima cobertura para la ubicación de antenas, patrullas, ambulancias, etc., utilizando sistemas de información geográficos.

El trabajo presentado en [27] se desarrolla un algoritmo que dirige las rutas de patrullaje en tiempo real al enfocarse en áreas de alta criminalidad mientras maximiza la cobertura de la demanda. Ello da como resultado patrullas diarias más efectivas que reducen los tiempos de respuesta y apuntan con precisión a las áreas problemáticas.

Otro estudio realizado [28] propone una nueva técnica que determina automáticamente las zonas de patrullaje y los turnos, luego asigna los oficiales disponibles a las zonas. La técnica utiliza los datos de delitos anteriores de la región y emplea una clasificación no supervisada para identificar automáticamente las zonas.

El uso de los sistemas de información geográficos permite basarse en datos espaciales reales para el análisis del problema de máxima cobertura, y la simulación basada en agentes de las soluciones encontradas ayuda a evaluar las mismas antes de su puesta en práctica.

### *Lógica de análisis*

Se explica la lógica que relaciona los datos con las proposiciones. En esta sección, la fuente de la información presentada sería la observación directa o la observación participativa según la clasificación de [18].

### Funcionamiento del patrullaje:

Luego de aplicarle una solución de MCLP a la distribución de las patrullas en un territorio determinado, hay que ver que tan efectivo es ese despliegue, y es aquí donde se simula. La cuestión está en el funcionamiento de cada patrulla en el terreno. Cada patrulla es ubicada en su “casa”, que representaría una intersección en el mapa, inicialmente tienen un estado “patrullando” en el que recorren aleatoriamente su radio de acción medido en cuadradas. Una vez generada una emergencia, la patrulla más cercana se dirige al lugar y le da el servicio requerido.

### Ubicación inicial de las patrullas. MCLP-Tools:

La herramienta MCLP-Tools es una de las utilizadas para la solución del problema de máxima cobertura, propuesta en el 2017 [26] y mejorada continuamente, aplica técnicas heurísticas para solucionar, en este caso, la distribución inicial de estaciones de trabajo (patrullas), dando la mayor cobertura posible. La herramienta, utilizando GIS carga un mapa y dado la cantidad de estaciones a ubicar y la demanda por zona, devuelve una posible distribución del problema.

### Descripción del agente Patrulla:

Cada patrulla contiene un Punto con la ubicación de su casa, y a partir de esta, genera recorridos aleatorios dentro de su rango de acción, establecido en cuadradas y lo recorre. Cuenta también con su posición actual y el estado en el que está, inicialmente ‘Patrullando’. Al ser llamado para una emergencia, este calcula desde su ubicación actual hasta la ubicación de la emergencia la ruta más corta utilizando el algoritmo A\* [23] y se dirige al lugar. Luego de resuelta la emergencia vuelve a su “casa”.

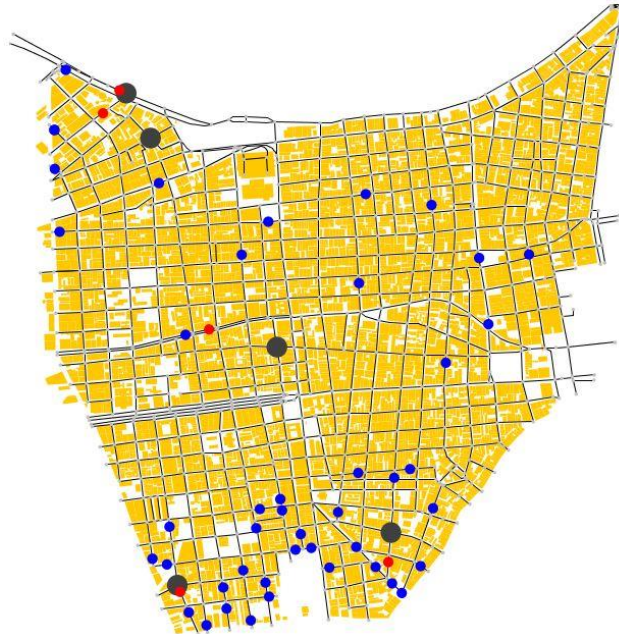
### Datos espaciales:

Se decidió utilizar la herramienta de edición QGIS, debido a la trascendencia que posee para manejar recursos GIS. La elección fue tomada debido a que es una herramienta altamente

recomendada por la comunidad GIS por ser de código libre, tener soporte tanto para archivos vectoriales como otros más complejos y ser multiplataforma.

Para obtener la información geoespacial se descargó todo el mapa del archipiélago como ficheros Shape del servicio web OpenStreetMap y se recortaron con la herramienta QGIS para utilizar solo lo que se necesitara y evitar así sobrecargar la simulación innecesariamente.

En la Figura 2 se muestra un ejemplo de polígono utilizado para la ejecución de la herramienta, en este caso es del municipio Centro Habana, La Habana, Cuba.



**Fig.2** Representación del municipio Centro Habana obtenida del GIS

### *Discusión*

La integración de los sistemas de información geográfica debe ser un requisito a la hora de modelar los procesos de patrullaje policial porque aporta datos reales al ambiente de simulación. Esta herramienta contribuye a la optimización considerable de la asignación de patrullas en el área donde se realiza el estudio.

Se puede lograr que la simulación se acerque más a la real asignación de los carros de patrulla si se añaden a los parámetros obtenidos por los GIS la división de localidades, límites que no pueden pasar las patrullas a menos que estén autorizadas. Por otra parte, en la implementación es necesario incluir comportamiento a los vehículos para que circulen respetando el sentido de las calles.

El uso de información espacial real para la simulación ofrece una mayor confiabilidad a la herramienta y permite que los analistas y encargados de la distribución de los policías imiten el comportamiento de los mismos en las zonas donde deben desarrollar su trabajo.

### **4. Conclusiones**

El estudio muestra dos herramientas que vinculan las técnicas de simulación basada en agentes con datos espaciales obtenidos de sistemas de información geográfica. La simulación basada en agentes permite tener una aproximación de como funcionarán los procesos antes de su puesta en práctica. Las soluciones son escalables y reutilizables, fácilmente adaptables y extensibles a nuevas

funcionalidades. Los modelos de simulación construidos constituyen una vía de análisis previo para problemas tan frecuentes como la configuración de señalización vial o la ubicación de patrullas logrando la mayor cobertura posible. La utilización de los GIS permite que los resultados obtenidos sean en gran medida cercanos a la realidad. Las secciones de mapas utilizadas en los casos estudiados comprenden regiones pequeñas de la ciudad, por lo que sería recomendable analizar la influencia de una región mayor y la interacción de los agentes inteligentes en un espacio de entorno más amplio. Asimismo, se recomienda estudiar otros casos donde el uso de información espacial real es determinante como es el caso de los recorridos escolares o de trabajadores y la repartición de envíos de comercio electrónico.

## Referencias

1. Frank, M., Drikakis, D., Charissis, V., *Machine-Learning Methods for Computational Science and Engineering*. Computation, 2020. **8**. DOI: <http://doi.org/10.3390/computation8010015>.
2. Brailsford, S.C., *Hybrid simulation modelling in operational research: A state-of-the-art review*. European Journal of Operational Research, 2019. **278**(3): p. 721-737. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.ejor.2018.10.025>.
3. Law, A.M., *How to Build Valid and Credible Simulation Models*. in *2019 Winter Simulation Conference (WSC)*, 2019. DOI: <http://doi.org/10.1109/WSC40007.2019.9004789>.
4. Lü, G., *Reflections and speculations on the progress in Geographic Information Systems (GIS): a geographic perspective*. International Journal of Geographical Information Science, 2019. **33**(2): p. 346-367. DOI: <http://doi.org/10.1080/13658816.2018.1533136>.
5. Li, W., Batty, M., Goodchild, M.F., *Real-time GIS for smart cities*. International Journal of Geographical Information Science, 2020. **34**(2): p. 311-324. DOI: <http://doi.org/10.1080/13658816.2019.1673397>.
6. Chen, M., *Geographic modeling and simulation systems for geographic research in the new era: Some thoughts on their development and construction*. Science China Earth Sciences, 2021. **64**(8): p. 1207-1223. DOI: <http://doi.org/10.1007/s11430-020-9759-0>.
7. Zakeri, F., Mariethoz, G., *A review of geostatistical simulation models applied to satellite remote sensing: Methods and applications*. Remote Sensing of Environment, 2021. **259**: p. 112381. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.rse.2021.112381>.
8. Vargas-Munoz, J.E., *OpenStreetMap: Challenges and Opportunities in Machine Learning and Remote Sensing*. IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine, 2021. **9**(1): p. 184-199. DOI: <http://doi.org/10.1109/MGRS.2020.2994107>.
9. Woolridge, M., *An Introduction to MultiAgent Systems*. 2nd ed. 2009, Department of Computer Science, University of Liverpool: John Wiley & Sons.
10. An, L., et al., *Challenges, tasks, and opportunities in modeling agent-based complex systems*. Ecological Modelling, 2021. **457**: p. 109685. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2021.109685>.
11. Stieler, D., et al., *Agent-based modeling and simulation in architecture*. Automation in Construction, 2022. **141**: p. 104426. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.autcon.2022.104426>.
12. Cordasco, G., V. Scarano, and C. Spagnuolo, *Distributed MASON: A scalable distributed multi-agent simulation environment*. Simulation Modelling Practice and Theory, 2018. **89**: p. 15-34. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.simpat.2018.09.002>.
13. Luke, S., et al. *The MASON Simulation Toolkit: Past, Present, and Future*. in *Multi-Agent-Based Simulation XIX*. 2019. Cham: Springer International Publishing.
14. Jing Yang, S.X., Wai Kin, V.C., *Simulation of knife attack and gun attack on University campus using agent-based model and Gis*, *Winter Simulation Conference*, 2019. Maryland. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/WSC40007.2019.9004873>.

15. EL Raoui, H., Oudani, M., EL Hilali Alaoui, A., *ABM-GIS simulation for urban freight distribution of perishable food*. MATEC, 2018. **2018**(00006). DOI: <http://doi.org/10.1051/mateconf/201820000006>.
16. Schiera, D.S., et al., *Analysis of Rooftop Photovoltaics Diffusion in Energy Community Buildings by a Novel GIS-and Agent-Based Modeling Co-Simulation Platform*. IEEE Access, 2019. **7**: p. 93404-93432. DOI: <http://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2927446>.
17. Zhao, M., et al., *GIS-Based Simulation Methodology for Evaluating Ship Encounters Probability to Improve Maritime Traffic Safety*. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2019. **20**(1): p. 323-337. DOI: <http://doi.org/10.1109/TITS.2018.2812601>.
18. Yin, R.K., *Case Study Research: Desing and Methods*. 2003: International Educational and Professional.
19. Komsiyah, S., Desvania, E., *Traffic Lights Analysis and Simulation Using Fuzzy Inference System of Mamdani on Three-Signaled Intersections*. Procedia Computer Science, 2021. **179**: p. 268-280. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.procs.2021.01.006>.
20. Zhang, J., et al. *CAVSim: A Microscope Traffic Simulator for Connected and Automated Vehicles Environment*. in *2022 IEEE 25th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*. 2022. DOI: <http://doi.org/10.1109/ITSC55140.2022.9922267>.
21. Teixeira, R., et al., *An Agent-Based Simulation to Explore Communication in a System to Control Urban Traffic with Smart Traffic Lights*. Advances in Distributed Computing and Artificial Intelligence Journal, 2021. **10**(3): p. 209-225. DOI: <http://doi.org/10.14201/ADCAIJ2021103209225>.
22. Moreno Román, A., Bravo Fraga, D., Moreno Espino, E., *Herramienta de simulación para evaluar configuraciones semafóricas*. Revista Cubana de Transformación Digital, 2021. **2**(1): p. 102-114.
23. Russel, S., Norving, P., *Artificial Intellgence, a modern approach*. 3er ed. 2010, New Jersey: Prentice Hall.
24. Minghini, M., Frassinelli, F., *OpenStreetMap history for intrinsic quality assessment: Is OSM up-to-date?* Open Geospatial Data, Software and Standards, 2019. **4**(1): p. 9. DOI: <http://doi.org/10.1186/s40965-019-0067-x>.
25. Taiwo, O.J., *Maximal Covering Location Problem (MCLP) for the identification of potential optimal COVID-19 testing facility sites in Nigeria*. African Geographical Review, 2021. **40**(4): p. 395-411. DOI: <http://doi.org/10.1080/19376812.2020.1838306>.
26. Fajardo, J., et al., *Software tool for model and solve the maximum coverage location problem, a case study: Locations police officers*. Revista de Investifación Operacional, 2017. **38**(2): p. 141-149.
27. Leigh, J., Dunnett, S., Jackson, L., *Predictive police patrolling to target hotspots and cover response demand*. Annals of Operations Research, 2019. **283**(1): p. 395-410. DOI: <http://doi.org/10.1007/s10479-017-2528-x>.
28. Dinc, S., Dinc, I., *Evaluation of Unsupervised Classification on Police Patrol Zone Design Problem*. in *SoutheastCon 2018*. 2018. DOI: <http://doi.org/10.1109/SECON.2018.8478908>.

### Conflicto de Intereses

No existen conflictos de intereses. Los autores autorizan la distribución y el uso del manuscrito.

**Contribución de los autores**

**Ariadna Moreno Román.** ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4705-9929>

Participó en la metodología del estudio, la curación de datos, la investigación y la redacción y edición del manuscrito.

**Jesús Hernández Barrios.** ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8264-3920>

Participó en la metodología del estudio, la investigación, la validación de los resultados y la redacción del manuscrito.

**Mailyn Moreno Espino.** ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7613-3382>

Participó en la conceptualización del trabajo, la administración del proyecto, la supervisión y ña gestión de los recursos.