

Simulación del proceso de extracción y descargue de malezas en la ciénaga Juan Gómez del departamento de Bolívar-Colombia

Simulation of the extraction process and unloading of weeds in the Juan Gómez swamp department of Bolivar-Colombia

DOI: <https://doi.org/10.17981/bilo.6.2.2024.15>

Fecha de recepción: 14/11/2024, Fecha de Publicación: 28/11/2024

Kevin Puello-Martínez

Universidad del Sinú, Cartagena, Colombia

kevinepuello@unisinu.edu.co

Miguel Buelvas-Gallo

Universidad del Sinú, Cartagena, Colombia

miguelabuelvas@unisinu.edu.co

German Herrera-Vidal

Universidad del Sinú, Cartagena, Colombia

gherrerav@unisinucartagena.edu.co

Como citar en *IEEE* este artículo: Puello-Martínez, K. y Otros, «Simulación del proceso de extracción y descargue de malezas en la ciénaga Juan Gómez del departamento de Bolívar-Colombia» Boletín de Innovación, Logística y Operaciones, vol. 6. No. 2. pp. 124-133, 2024. Online. <https://revistascientificascuc.edu.co/bilo/article/view/6116>

Resumen

Esta investigación destaca la relevancia de la simulación de eventos discretos como una herramienta estratégica para evaluar procesos logísticos complejos, aplicada a un sistema real en la ciénaga Juan Gómez, Bolívar, Colombia. El objetivo es desarrollar un modelo de simulación para comparar la eficiencia operativa en los procesos de extracción, y descargue de malezas de cada una de las cuadrillas, permitiendo tomar decisiones basadas en datos durante la ejecución del proyecto. Bajo un enfoque cuantitativo y mediante una metodología basada en simulación, se modelaron las operaciones de tres cuadrillas asociadas a un recurso específico tipo botes mediante software ProModel. La investigación, es de tipo práctica, aplicada y propositiva. Los hallazgos identificaron ineficiencias en la cuadrilla 3, proponiéndose estrategias como la redistribución de tareas, optimización de procesos logísticos y mantenimiento preventivo para mejorar su desempeño. Este estudio evidencia el valor de la simulación como herramienta robusta para analizar y resolver problemáticas logísticas en

sistemas fluviales, aportando soluciones prácticas para incrementar la sostenibilidad y eficiencia operativa en entornos complejos.

Palabras claves: Sistema, Simulación, Proceso, Eventos discretos, Modelo.

Abstract

This research highlights the relevance of discrete event simulation as a strategic tool to evaluate complex logistic processes, applied to a real system in the Juan Gómez swamp, Bolívar, Colombia. The objective is to develop a simulation model to compare operational efficiency in the processes of extraction and unloading of weeds of each of the crews, allowing them to make decisions based on data during the execution of the project. Under a quantitative approach and using a simulation-based methodology, the operations of three crews associated with a specific resource, such as boats, were modeled using ProModel software. The research is practical, applied and proactive. The findings identified inefficiencies in crew 3, proposing strategies such as task redistribution, optimization of logistic processes and preventive maintenance to improve its performance. This study evidences the value of simulation as a robust tool to analyze and solve logistic problems in river systems, providing practical solutions to increase sustainability and operational efficiency in complex environments.

Keywords: System, Simulation, Process, Discrete Events, Model.

Introducción

La simulación se ha consolidado como una herramienta imprescindible para abordar problemas complejos en diversas disciplinas, permitiendo explorar escenarios, optimizar procesos y predecir comportamientos sin necesidad de recurrir a pruebas físicas costosas o inviables. En ingeniería, se ha destacado por optimizar diseños y acelerar la comercialización de productos innovadores al reducir costos y fallos en etapas tempranas del desarrollo [1][2]. En el campo de las ciencias geológicas y ambientales, las simulaciones han permitido avances significativos en la modelación de sistemas naturales complejos, facilitando la toma de decisiones informadas en la gestión de recursos y la mitigación de riesgos ambientales [3][4]. Por otro lado, su aplicación en la robótica y los sistemas autónomos ha potenciado el desarrollo de tecnologías avanzadas, como los vehículos autónomos y la automatización de tareas complejas, mejorando su rendimiento y adaptabilidad [5]. Además, en la biomedicina, los modelos simulados han permitido avances en la comprensión de sistemas biológicos y el diseño de soluciones innovadoras en ingeniería de tejidos [6]. En cadenas de suministro y logística, la simulación ha demostrado ser crucial para optimizar flujos y reducir costos, especialmente en contextos de alta incertidumbre [7]. Estas aplicaciones, unidas a los avances en materiales computacionales y en la modelación matemática de sistemas industriales, han subrayado su rol transformador en la innovación científica y tecnológica [8][9]. Por último, las simulaciones no solo han mejorado procesos técnicos, sino que han promovido una mejor comunicación y coordinación en proyectos de alta complejidad, facilitando la toma de decisiones estratégicas en entornos interdisciplinarios [10]. Estas contribuciones demuestran que la simulación no es únicamente una herramienta, sino un catalizador clave para el progreso en múltiples áreas de conocimiento.

El sistema lagunar Juan Gómez - Dolores, en el departamento de Bolívar, enfrenta una grave problemática ambiental. La introducción de una especie invasora de maleza, *Elodea Canadensis*, conocida localmente como "májate", ha afectado aproximadamente el 21% de la superficie de la ciénaga, generando serias consecuencias para las comunidades cercanas. La obstrucción provocada por esta vegetación impide las actividades pesqueras, afectando la economía local y el sustento de los pescadores. Además, el transporte fluvial se ha vuelto complicado, limitando el acceso y dificultando la movilización de recursos y personas. La empresa encargada de suministrar agua a Cartagena, que extrae el agua cruda de la ciénaga, ha asumido la responsabilidad de implementar un plan de emergencia para la remoción de la especie invasora. Las actividades principales del proyecto incluyen la extracción, el transporte y la descarga de la maleza.

En este contexto, el objetivo principal de esta investigación es desarrollar un modelo de simulación para comparar la eficiencia operativa en los procesos de extracción, y descargue de malezas de cada una de las cuadrillas, permitiendo tomar decisiones basadas en datos durante la ejecución del proyecto. Lo anterior, se convierte en un escenario habilitador para el desarrollo de la presente investigación de tipo aplicada y propositiva, por tanto su

estructura contempla cinco secciones, (i) el estado del arte, (ii) la propuesta metodológica, (iii) los resultados, y (iv) las conclusiones.

Estado del arte

La simulación es el proceso de crear un modelo computacional que emula el comportamiento dinámico de un sistema real para analizar su rendimiento, identificar mejoras y prever su respuesta ante distintas condiciones operativas. Es una herramienta clave para abordar problemas complejos en sistemas que involucran múltiples variables interdependientes, como manufactura, logística y servicios de salud [11][12]. Según [13], esta metodología no solo optimiza procesos existentes, sino que también facilita la exploración de escenarios hipotéticos, reduciendo riesgos y costos asociados a pruebas físicas. Su capacidad para modelar interacciones detalladas en sistemas discretos, como líneas de ensamblaje o redes de transporte, la posiciona como una técnica esencial para la toma de decisiones estratégicas y operativas [14][15].

Los modelos de simulación se clasifican en discretos, continuos y basados en agentes, con aplicaciones específicas en función de las características del sistema. Los modelos de eventos discretos (DES) representan cambios de estado en puntos específicos del tiempo, siendo esenciales en sistemas industriales y logísticos [11][13]. Los modelos continuos, por otro lado, simulan flujos constantes, como los sistemas hidráulicos o energéticos, donde las variables evolucionan gradualmente [16]. Los modelos basados en agentes combinan entidades autónomas que interactúan, permitiendo explorar dinámicas sociales o económicas complejas [17]. Además, los modelos híbridos integran características de múltiples enfoques, ofreciendo mayor flexibilidad en escenarios que combinan procesos discretos y continuos, como los sistemas de manufactura avanzada y ciudades inteligentes [14][18].

El desarrollo de la simulación ha estado impulsado por herramientas de software diseñadas para abordar diferentes necesidades. ProModel y FlexSim son dos plataformas ampliamente utilizadas en manufactura y logística por su facilidad para modelar sistemas complejos y analizar su desempeño [19][20]. Los sistemas clásicos, como GPSS y Simscript, sentaron las bases del desarrollo computacional en simulación, proporcionando estructuras robustas para modelar procesos discretos [11][14]. Arena es otro software destacado por su adaptabilidad en industrias diversas, mientras que AnyLogic se posiciona como una herramienta integral para modelos híbridos y basados en agentes [3]. Estas plataformas han evolucionado para integrar tecnologías avanzadas como la computación paralela y la aceleración por GPU, mejorando la precisión y velocidad de los análisis, lo que las convierte en herramientas indispensables para la planificación y optimización de sistemas complejos [14].

En la literatura se distinguen investigaciones sobre simulación en tráfico fluvial y marítimo, donde se han aplicado metodologías avanzadas. [11] propusieron simulaciones basadas en GIS para evaluar probabilidades de encuentros entre barcos y mejorar la seguridad del tráfico. [12] integraron enfoques de sistemas multiagente para modelar maniobras autónomas en vías navegables. Otros estudios, como los de [13], analizaron el impacto de condiciones climáticas adversas, como el hielo en el Báltico, optimizando rutas con sistemas híbridos. [20] utilizaron datos AIS y técnicas de aprendizaje para prever patrones de tráfico. En la simulación basada en agentes, se han explorado sistemas dinámicos en tiempo real para manejar riesgos y mejorar la planificación en sistemas portuarios [21]. Estos trabajos demuestran un enfoque creciente hacia la mejora de eficiencia, seguridad y sostenibilidad en el transporte marítimo y fluvial.

La implementación de técnicas de simulación en el proyecto ambiental de remoción de malezas invasoras en la ciénaga Juan Gómez podría ser clave para identificar cuellos de botella y optimizar los procesos de extracción y descarga de las malezas. Al aplicar enfoques como el modelo de simulación Monte Carlo, el contratista tendría la capacidad de gestionar de manera más eficiente los riesgos e incertidumbres inherentes a este tipo de proyectos. Esto no solo permitirá organizar mejor los flujos de trabajo, optimizando el uso de recursos y reduciendo costos, sino también mejorar la precisión en la predicción de plazos y resultados, lo que facilitaría una toma de decisiones más informada durante la ejecución del proyecto.

Metodología

El método se fundamenta en (8) etapas, que describen un proceso de tipo sistemático. Estas etapas son: (i) la descripción del caso de estudio; (ii) el modelo conceptual del sistema a simular; (iii) la recolección de datos y su

parametrización; (iv) la construcción del modelo de simulación; (v) el análisis de resultados; (vi) la verificación y validación; (vii) la experimentación con diferentes escenarios; y por último, (viii) la propuesta de mejora (ver figura 1).

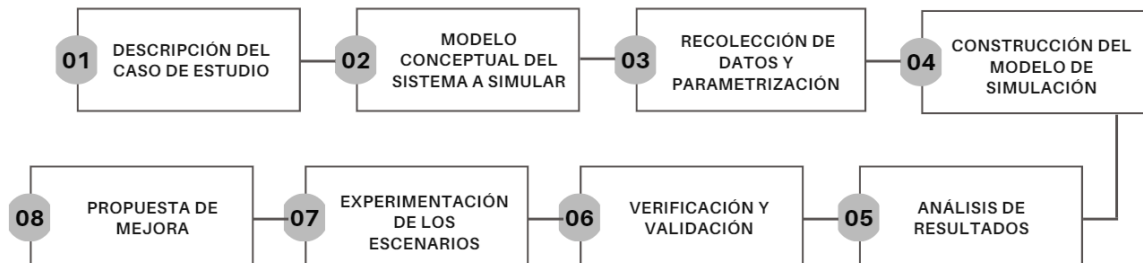


Figura 1. Propuesta metodológica

La primera fase consiste en una descripción detallada de las áreas de estudio, específicamente enfocada en los procesos (extracción y descargue) del proyecto ambiental para la remoción de maleza en la ciénaga Juan Gómez. Posteriormente, se desarrolla un modelo conceptual del sistema a simular con el fin de facilitar su comprensión y establecer de manera clara los objetivos, las preguntas y los parámetros de evaluación. En la tercera fase, se construyen los modelos utilizando el software ProModel, empleando los datos previamente recolectados y parametrizados. Este modelo simula las dinámicas y procesos del sistema en estudio, permitiendo observar su comportamiento bajo diferentes condiciones. A continuación, se procede con el análisis de los resultados obtenidos a partir de las simulaciones, evaluando el rendimiento por cuadrillas, identificando patrones y extrayendo conclusiones relevantes sobre su desempeño. La etapa siguiente es la validación, en la que se verifica que el modelo represente de manera adecuada la realidad del sistema. Se comparan los resultados del modelo con datos reales para asegurar su precisión y confiabilidad. Después, se lleva a cabo la experimentación de escenarios, diseñando y ejecutando simulaciones que permitan explorar cómo el sistema responde a diversas condiciones y parámetros. Esta fase resulta esencial para evaluar el impacto de diferentes variables y estrategias en el rendimiento del sistema. Finalmente, con base en los análisis y experimentaciones realizadas, se formulan propuestas de mejora orientadas a optimizar los procesos clave del proyecto en estudio.

Desarrollo

En el presente caso de estudio, se toma como referencia los procesos de remoción de malezas del plan de emergencia ambiental ejecutado por la empresa encargada del suministro de agua en Cartagena de Indias, cuya misión es garantizar el abastecimiento de agua potable para consumo humano, así como para actividades industriales, comerciales y turísticas en la región. La empresa enfrenta un desafío crítico en su principal fuente de captación de agua cruda, la Ciénaga Juan Gómez, donde la proliferación de una especie invasora de algas ha afectado gravemente el ecosistema acuático.

El proceso involucra múltiples etapas, entre las que se incluyen la extracción de las malezas, el transporte del material extraído y el descargue de este. A continuación, se detallan las características y el alcance de las actividades involucradas en la remoción de las malezas acuáticas, así como los indicadores de desempeño que permitirán evaluar la efectividad del modelo de simulación.

1. Descripción del proceso

El proceso comienza en la zona central de la Ciénaga Juan Gómez, donde 20 trabajadores se encargan de extraer el material vegetal invasor, principalmente las algas, utilizando herramientas manuales y equipos adecuados. El material es cargado en botes con motor fuera de borda, tripulados por un piloto y un ayudante, quienes transportan las algas hacia la zona de descarga, ubicada cerca de la estación de bombeo "Conejo". Allí, un equipo de 10 trabajadores retira el material de los botes y lo coloca en las áreas designadas en tierra.

Una vez descargado el material, se traslada a una zona adecuada para su disposición final utilizando un retroexcavadora tipo "pajarita" y una volqueta. Este proceso garantiza que las malezas se manejen de manera responsable, contribuyendo a la restauración del ecosistema afectado. El proyecto involucra recursos clave, como cuadrillas de 30 trabajadores de las comunidades locales, quienes se encargan de las tareas de extracción y descarga, y transporte fluvial consiste en botes con motor y canoas para trasladar el material desde la ciénaga hasta las zonas de descarga. Para esta investigación, se tomaron como referencia los procesos de extracción y descarga de malezas, específicamente las operaciones de 3 cuadrillas diferentes, ya que son esenciales para la ejecución y el rendimiento del proyecto. Esta elección se fundamenta en los datos recopilados a través de entrevistas realizadas a 3 líderes de las cuadrillas, quienes proporcionaron información valiosa sobre las dinámicas y desafíos de cada etapa del proceso. Desde el punto de vista de análisis de los procesos operativos en el proyecto, existen ciertos parámetros clave para evaluar su rendimiento. Estos parámetros permiten analizar la eficiencia en la extracción, transporte y descarga de las malezas, así como la capacidad de las cuadrillas para completar las tareas asignadas y los tiempos de espera entre las etapas del proceso. Se consideran los siguientes aspectos:

- **Tiempo de extracción:** El tiempo que tardan las cuadrillas en extraer y llenar los botes de malezas en las áreas designadas en la ciénaga.
- **Tiempo entre arribo a zona de descarga:** El tiempo que tardan los botes con motor fuera de borda en trasladar las malezas desde la ciénaga hasta las zonas de descarga en tierra.
- **Tiempo entre arribo a zona de extracción:** tiempo que tardan los botes con motor fuera de borda en desplazarse desde las zonas de descarga en tierra hacia las zonas de extracción en la Ciénaga. Nota: Este tiempo es menor porque los botes, al regresar sin carga, pueden alcanzar una mayor velocidad.
- **Tiempo de descarga:** El tiempo en que se descarga el material vegetal en las áreas correspondientes para su posterior traslado.
- **Disciplina operativa:** El orden en el que se llevan a cabo las operaciones sigue una secuencia predeterminada para maximizar la eficiencia, similar a un sistema FIFO (First in, First out), donde las cuadrillas atienden a los botes de esta manera que los primeros en entrar son los primeros en salir.

2. Modelo conceptual

En este apartado, se definieron las particularidades y las medidas de desempeño a evaluar en el sistema como las variables de cantidad y de tiempo. El sistema está conformado por dos (2) locaciones: (i) zona de extracción y (ii) zona de descarga. Además, se identificaron tres (3) entidades, que corresponden a los botes utilizados en el proceso: Bote 1, Bote 2 y Bote 3.

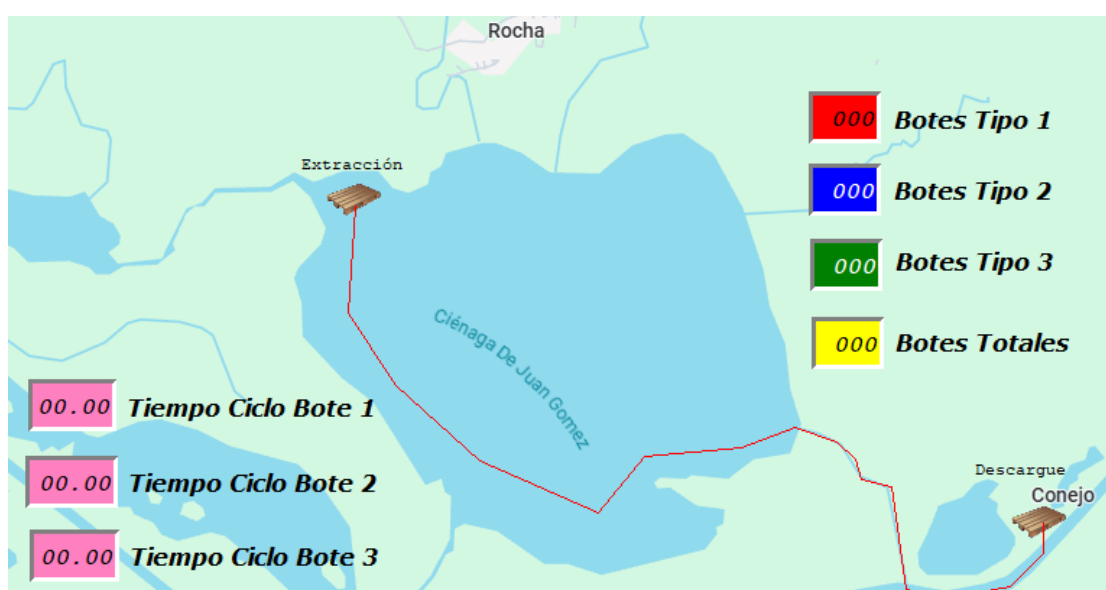


Figura 2. Modelo conceptual del sistema a simular

Los datos recopilados son de primera mano, obtenidos directamente a través de herramientas clave, como entrevistas a los líderes de las cuadrillas, estudios de tiempos y observaciones directas de los procesos. Estas herramientas nos permiten comprender mejor el sistema en estudio. Mediante un proceso de recolección de datos se obtienen los parámetros necesarios para su modelamiento para cada cuadrilla. En el caso bajo estudio, se identifican cuatro procesos principales: extracción del material, transporte hacia la zona de descarga, proceso de descarga, y el retorno de los botes a la zona de extracción. En este contexto, la investigación se centrará en evaluar las cantidades de botes que se utilizan por jornada de trabajo de 6 horas y los tiempos promedios de ciclo durante el proceso de extracción y descarga de cada cuadrilla. Adicional a esto, se llevó a cabo el análisis de los datos de entrada a partir del complemento Stat::Fit para identificar el tipo de distribución más adecuada de los datos recolectados para las 3 cuadrillas, a través de un estudio de tiempos. Para asegurar mayor precisión en el análisis, se recopilaban 100 datos para cada proceso a simular. La tabla 1 muestra los procesos evaluados, junto con la distribución asignada.

Tabla 1. Datos de bondad de ajuste en los procesos.

Procesos	Cuadrilla 1 (Bote 1)	Cuadrilla 2 (Bote 2)	Cuadrilla 3 (Bote 3)
Extracción	T(20., 20.2, 25.8)	U(27.5, 2.48)	U(35., 4.95)
Descargue	U(10.4, 2.38)	U(11.5, 2.48)	U(10.5, 2.5)
Frecuencia Arribos	U(12.5, 2.5)	U(12.5, 2.46)	U(17.5, 2.46)

3. Construcción del modelo

Para la creación del modelo se utilizó el software de simulación profesional ProModel. El primer paso en la construcción fue introducir la información necesaria en los módulos: Locaciones, Entidades, Procesamiento, Llegadas, Atributos, Variables, Información General y Gráficos de Fondo [22]. El comando de programación y las palabras reservadas del software se utilizaron para capturar la lógica del proceso de los programas (véase la figura 3).

Entidad	Locación	Operación	Blk	Salida	Destino	Regla	Lógica de Movimiento
Bote_1	Extracción	Hora_Inicial = Clock(min) Wait T(20., 20.2, 25.8) min 1	Bote_1	Descargue	FIRST	1	Move On Ruta
Bote_1	Descargue	Wait U(10.4, 2.38) min Hora_Salida = Clock(min) TC_Bote_1 = Hora_Salida - Hora_Inicial Inc Cantidad_Botes_1, 1 Cantidad_de_Botes_Totales = Cantidad_Botes_1+Cantidad_Botes_2+Cantidad_Botes_3 1	Bote_1	EXIT	FIRST	1	
Bote_2	Extracción	Hora_Inicial = Clock(min) Wait U(27.5, 2.48) min 1	Bote_2	Descargue	FIRST	1	Move On Ruta
Bote_2	Descargue	Wait U(11.5, 2.48) min Hora_Salida = Clock(min) TC_Bote_2 = Hora_Salida - Hora_Inicial Inc Cantidad_Botes_2, 1 Cantidad_de_Botes_Totales = Cantidad_Botes_1+Cantidad_Botes_2+Cantidad_Botes_3 1	Bote_2	EXIT	FIRST	1	
Bote_3	Extracción	Hora_Inicial = Clock(min) Wait U(35., 4.95) min 1	Bote_3	Descargue	FIRST	1	Move On Ruta
Bote_3	Descargue	Wait U(10.5, 2.5) min Hora_Salida = Clock(min) TC_Bote_3 = Hora_Salida - Hora_Inicial Inc Cantidad_Botes_3, 1 Cantidad_de_Botes_Totales = Cantidad_Botes_1+Cantidad_Botes_2+Cantidad_Botes_3 1	Bote_3	EXIT	FIRST	1	

Figura 3. Elemento proceso programado en ProModel

Resultados

La configuración de corrida del modelo se estructura a partir de la hora de inicio de la jornada de trabajo (8:00 am) hasta la hora final (2:00 pm), correspondiente a un tiempo de corrida de 6 horas. Para validar correctamente el modelo y tener una visión más precisa del comportamiento del sistema, de manera representativa se utilizaron 30 réplicas (ver figura 4).

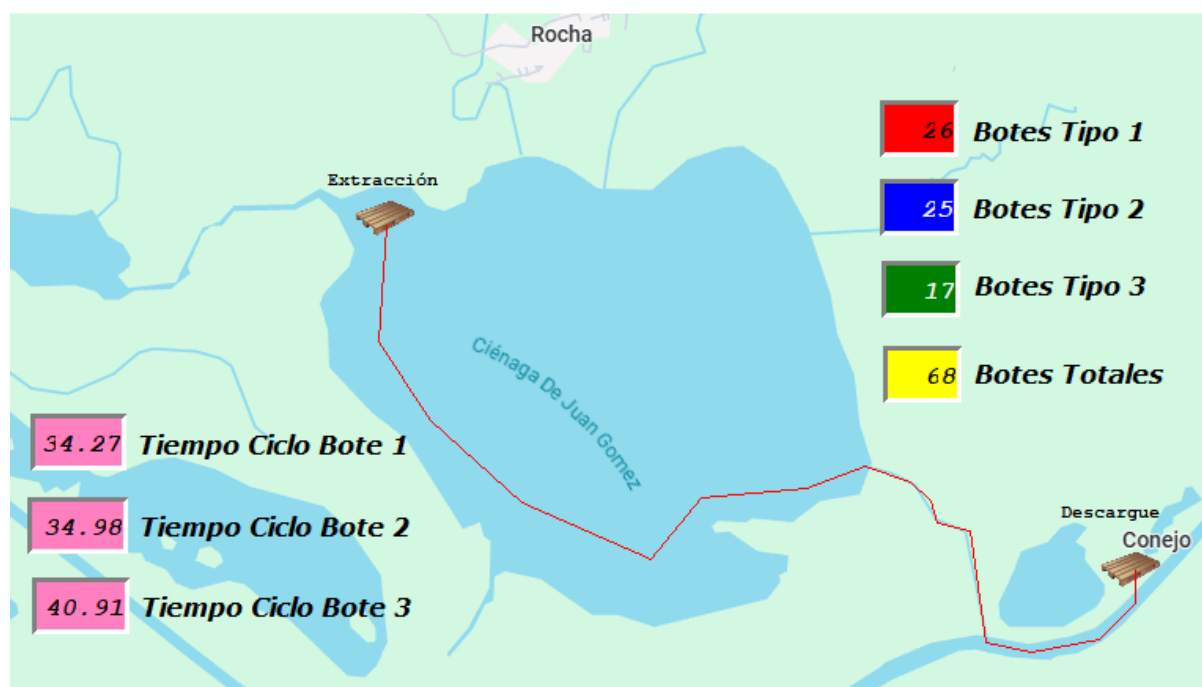


Figura 4. Resultado de la simulación en ProModel

Una vez realizada la simulación, los indicadores que evalúan el rendimiento del sistema actual se enmarcan en el número de botes que operan y el tiempo de ciclo promedio. La tabla 5 muestra los resultados obtenidos (véase la tabla 5).

Table 2. Indicadores resultados de la simulación

Entidad	Cantidad	Tiempo en Sistema	Tiempo en Operación
Bote 1	26	33.07 min	32.37 min
Bote 2	25	39.42 min	38.72 min
Bote 3	17	45.53 min	44.82 min

Un análisis más profundo, a partir de la comparación de los indicadores de eficiencias entre los tres (3) botes en términos de tiempo en sistema, tiempo en operación, y cantidad procesada (ver figura 5). Los hallazgos principales son:

- El Bote 1 muestra el mejor balance con el menor tiempo en sistema (33.07 min) y operación (32.37 min), junto con la mayor cantidad procesada (26 unidades), indicando un desempeño más eficiente.
- El Bote 2 ocupa una posición intermedia en cuanto a tiempo y cantidad procesada
- El Bote 3 tiene los mayores tiempos en sistema (45.53 min) y en operación (44.82 min), pero procesa significativamente menos cantidad (17 unidades), lo que refleja una menor eficiencia operativa.

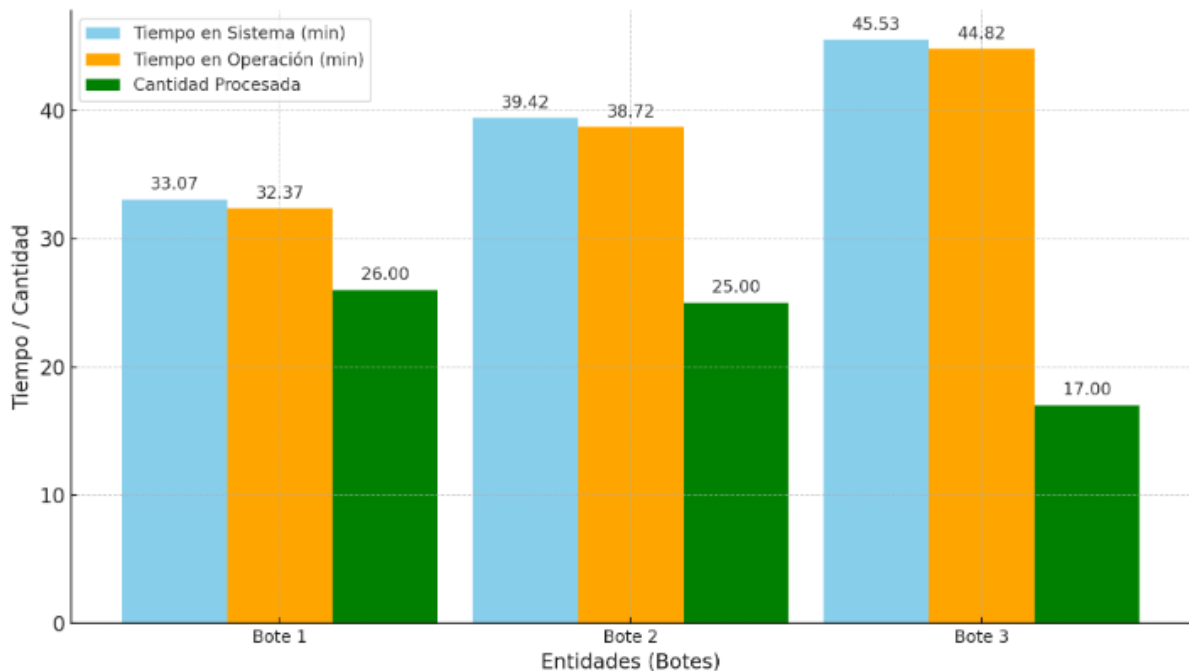


Figura 5. Comparación de eficiencias entre entidades

El uso de SimRunner permitió optimizar el sistema de simulación, identificando configuraciones robustas y eficientes. La configuración óptima de 74 botes no solo ofrece el mejor rendimiento, sino que también proporciona una guía clara para gestionar recursos y planificar operaciones de manera sostenible y efectiva. Estos hallazgos demuestran la capacidad de la simulación y la optimización para resolver problemas complejos en contextos logísticos fluviales. La configuración óptima identificada corresponde a un total de 74 botes, logrando un valor óptimo de la función objetivo de 29.706, dentro de un intervalo de confianza del 95% que varía entre 29.527 y 29.884. Este resultado fue consistente con el perfil de optimización agresivo y 30 repeticiones por experimento (ver figura 6).

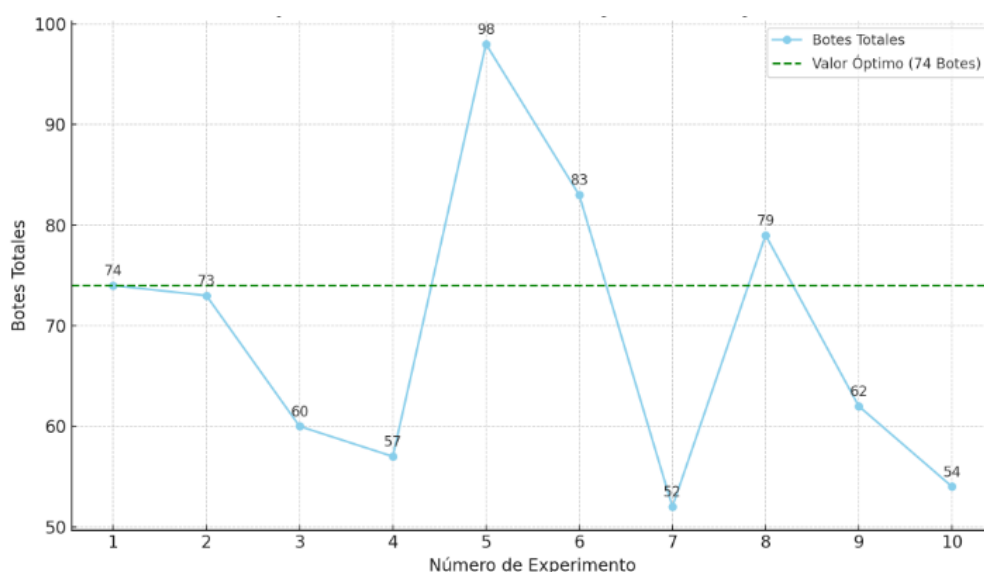


Figura 6. Optimización de botes totales con SimRunner

La simulación permite evaluar y estudiar el sistema, siendo evidente el proceso crítico desempeñado por la cuadrilla del bote 3. Para mejorar su desempeño, se recomienda implementar medidas como:

- Optimizar la logística de carga y descarga mediante rediseño de procesos o asignación de más personal en estas etapas;
- Aumentar su capacidad operativa con ajustes técnicos como ampliación del espacio de carga o mejora del motor; y reducir tiempos muertos mediante análisis detallado de los cuellos de botella en su operación.
- Adicionalmente, la sincronización con los otros botes para equilibrar la carga de trabajo y un mantenimiento preventivo más frecuente para evitar retrasos podrían ser claves para mejorar su eficiencia global.

Conclusiones

La investigación se centró en la optimización del proceso de extracción y descargue de malezas en la ciénaga Juan Gómez, ubicada en el departamento de Bolívar, Colombia, mediante la simulación de eventos discretos, fundamentada en teorías sobre modelado y análisis de sistemas complejos. La simulación, una herramienta clave en la investigación operativa, se definió como un método para replicar y analizar dinámicas de sistemas reales a través de modelos computacionales, proporcionando una base para tomar decisiones fundamentadas. Los modelos de simulación se categorizaron en determinísticos y estocásticos, mientras que el estudio adoptó una aproximación discreta utilizando ProModel como software principal debido a su capacidad para modelar sistemas logísticos. El problema abordado radica en la identificación de ineficiencias operativas en la extracción de malezas, especialmente en el desempeño desigual entre los botes utilizados, que afecta directamente la productividad y sostenibilidad de las actividades en la ciénaga.

El modelo de simulación permitió analizar el desempeño de tres botes involucrados en el proceso, revelando que el Bote 3 tenía tiempos significativamente más altos en el sistema (45.53 minutos) y en operación (44.82 minutos), mientras procesaba menos unidades (17), en comparación con el Bote 1 (33.07 minutos y 26 unidades procesadas). Este hallazgo indicó un claro cuello de botella operativo en el Bote 3, posiblemente causado por deficiencias en logística, mantenimiento o asignación de carga. En contraste, el Bote 1 mostró el mejor desempeño, equilibrando tiempos reducidos y mayor productividad. Como soluciones, se propusieron mejoras operativas como la redistribución de tareas entre los botes, la optimización de procesos de carga y descarga, y la incorporación de un cuarto bote en simulaciones futuras para equilibrar la carga de trabajo y reducir los tiempos promedio del sistema. Estas propuestas, fundamentadas en experimentos simulados, representan un enfoque práctico para mejorar la eficiencia del sistema. En resumen, este estudio no solo evidenció la importancia de la simulación como herramienta de análisis y planificación en sistemas logísticos, sino que también proporcionó una hoja de ruta para resolver problemas específicos de operaciones en contextos fluviales. Los resultados resaltan cómo un análisis detallado puede identificar puntos críticos y proponer intervenciones efectivas, contribuyendo al manejo sostenible de recursos y a la mejora de las operaciones en sistemas complejos como el de la ciénaga Juan Gómez.

Referencias

1. Kumar, A., & Singh, R. (2023). Advances in simulation-driven mechanical design. *Journal of Simulation*, 59(3), 110-124. DOI: [10.1016/j.simpat.2023.101847](https://doi.org/10.1016/j.simpat.2023.101847).
2. Wang, J., & Li, F. (2023). Virtual prototyping in product innovation. *Virtual and Physical Prototyping*, 18(1), 98-112. DOI: [10.1080/17452759.2023.2117760](https://doi.org/10.1080/17452759.2023.2117760).
3. Nguyen, P., & Chen, Y. (2023). Geoscientific simulation advances. *Geoscientific Model Development*, 16(2), 1423-1435. DOI: [10.5194/gmd-2023-123](https://doi.org/10.5194/gmd-2023-123).

4. Smith, H., & Carter, J. (2023). Energy policy simulation. *Energy*, 298, 122561. DOI: [10.1016/j.energy.2023.122561](https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.122561).
5. Pereira, R., & Silva, M. (2023). Simulation in robotics systems. *International Journal of Robotics Research*, 42(1), 112-125. DOI: [10.1177/02783649211034519](https://doi.org/10.1177/02783649211034519).
6. Chen, R., & Liu, Q. (2023). Biomedical system simulation. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 129, 101940. DOI: [10.1016/j.simpat.2023.101940](https://doi.org/10.1016/j.simpat.2023.101940).
7. García, D., & Torres, L. (2023). Simulation in supply chain management. *European Journal of Operational Research*, 308(2), 345-359. DOI: [10.1016/j.ejor.2023.07.004](https://doi.org/10.1016/j.ejor.2023.07.004).
8. Zhou, Y., & Ahmed, S. (2023). Computational materials modeling. *npj Computational Materials*, 9(3), 221-233. DOI: [10.1038/s41524-022-00779-7](https://doi.org/10.1038/s41524-022-00779-7).
9. Huang, L., & Zhao, T. (2023). Mathematical modeling in industrial systems. *Applied Mathematical Modelling*, 47, 52-68. DOI: [10.1016/j.apm.2023.05.019](https://doi.org/10.1016/j.apm.2023.05.019).
10. Allen, T., & Roberts, N. (2023). Communication simulation in complex projects. *Journal of Simulation*, 15(4), 345-358. DOI: [10.1057/s41273-023-00281-x](https://doi.org/10.1057/s41273-023-00281-x).
11. Van Tendeloo, Y., Paredis, R., & Vangheluwe, H. (2023). An Introduction to Discrete-Event Modeling and Simulation with Devs. In *2023 Winter Simulation Conference (WSC)* (pp. 1531-1545). IEEE. DOI: [10.1109/WSC60868.2023.10407433](https://doi.org/10.1109/WSC60868.2023.10407433)
12. Brown, S., & Lee, K. (2023). Challenges and Opportunities in Integration of Simulation and Optimization in Maritime Logistics. IEEE. DOI: [10.1109/8632202](https://doi.org/10.1109/8632202)
13. Zhao, M., Yao, X., Sun, J., Zhang, S., & Bai, J. (2018). GIS-based simulation methodology for evaluating ship encounters probability to improve maritime traffic safety. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 20(1), 323-337. DOI: [10.1109/TITS.2018.2812601](https://doi.org/10.1109/TITS.2018.2812601)
14. Nguyen, M., Zhang, S., & Wang, X. (2018). A novel method for risk assessment and simulation of collision avoidance for vessels based on AIS. *Algorithms*, 11(12), 204. DOI: [10.3390/a11120204](https://doi.org/10.3390/a11120204)
15. Darabi, H. R., Gorod, A., Mansouri, M., Wakeman, T., & Efatmaneshnik, M. (2012, March). Using hybrid modeling to simulate maritime transportation system of systems (mtsos). In *2012 IEEE International Systems Conference SysCon 2012* (pp. 1-6). IEEE. DOI: [10.1109/SysCon.2012.6189445](https://doi.org/10.1109/SysCon.2012.6189445)
16. Chislov, O., Zadorozhniy, V., Lomash, D., Chebotareva, E., Solop, I., & Bogachev, T. (2020). Methodological bases of modeling and optimization of transport processes in the interaction of railways and maritime transport. In *Modern Traffic Engineering in the System Approach to the Development of Traffic Networks: 16th Scientific and Technical Conference "Transport Systems. Theory and Practice 2019" Selected Papers 16* (pp. 79-89). Springer International Publishing.
17. Jiang, J., Zuo, Y., Xiao, Y., Zhang, W., & Li, T. (2024). STMGF-Net: A Spatiotemporal Multi-Graph Fusion Network for Vessel Trajectory Forecasting in Intelligent Maritime Navigation. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*. DOI: [10.1109/TITS.2024.3465234](https://doi.org/10.1109/TITS.2024.3465234)
18. Blokus-Roszkowska, A., & Smolarek, L. (2014, September). Maritime traffic flow simulation in the intelligent transportation systems theme. In *Safety and Reliability: Methodology and Applications-Proceedings of the European Safety and Reliability Conference (ESREL 2014)* (pp. 265-274).
19. Hellström, D., & Johnsson, M. (2002). Using discrete event simulation in supply chain planning. In *14th Annual NOFOMA Conference*, 2002.
20. Zhang, X., Fu, X., Xiao, Z., Xu, H., & Qin, Z. (2022). Vessel trajectory prediction in maritime transportation: Current approaches and beyond. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 23(11), 19980-19998. DOI: [10.1109/TITS.2022.3192574](https://doi.org/10.1109/TITS.2022.3192574)
21. Li, L., Pan, M., Liu, Z., Sun, H., & Zhang, R. (2024). Semi-dynamic spatial-temporal graph neural network for traffic state prediction in waterways. *Ocean Engineering*, 293, 116685. DOI: [10.1016/j.oceaneng.2024.116685](https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2024.116685)
22. Vidal, G. H. (2020). Simulación de sistemas discretos: un enfoque industrial. Alpha Editorial.