

Modelo de optimización secuencial para la asignación de recursos digitales a docentes en entornos virtuales de aprendizaje

Sequential optimization model for the allocation of digital resources to faculty in virtual learning environments

Juan José Viscaino Gavilanes*
Universidad Nacional de Chimborazo
Riobamba - Ecuador
juan.viscaino@unach.edu.ec
https://orcid.org/0009-0003-8346-2859

Henry Mauricio Villa Yáñez
Universidad Nacional de Chimborazo
Riobamba - Ecuador
hvilla@unach.edu.ec
https://orcid.org/0000-0003-4076-5211

María José Mora Campana
Universidad Nacional de Chimborazo
Riobamba - Ecuador
mariaj.mora@unach.edu.ec
https://orcid.org/0009-0004-0598-5619

Verónica Alexandra Villa Yáñez
Universidad Nacional de Chimborazo
Riobamba - Ecuador
veros_alexandra@hotmail.com
https://orcid.org/0000-0003-0731-2384

*Correspondencia:
juan.viscaino@unach.edu.ec

Cómo citar este artículo:
Viscaino, J., Villa, H., Mora, M., & Villa, V. (2026). Modelo de optimización secuencial para la asignación de recursos digitales a docentes en entornos virtuales de aprendizaje. *Esprint Investigación*, 5(1), 843-857. <https://doi.org/10.61347/ei.v5i1.289>

Recibido: 30 de marzo de 2026

Aceptado: 29 de abril de 2026

Publicado: 5 de mayo de 2026

Copyright: Derechos de autor 2026 Juan José Viscaino Gavilanes, Henry Mauricio Villa Yáñez, María José Mora Campana, Verónica Alexandra Villa Yáñez.



Esta obra está bajo una licencia internacional Creative Commons Atribución- NoComercial 4.0.

Resumen: La gestión académica en instituciones con modalidades virtuales sincrónicas exige una coordinación precisa entre el talento humano y un ecosistema de recursos digitales sujeto a restricciones comerciales y técnicas, cuya planificación empírica suele generar conflictos operativos, solapamientos horarios e ineficiencias presupuestarias. El objetivo de este estudio consistió en diseñar e implementar un modelo de optimización matemática secuencial en tres etapas, fundamentado en la Programación Lineal Entera Binaria (BILP) y desarrollado en Python mediante la librería PuLP, con el propósito de automatizar la asignación de docentes, licencias de videoconferencia y recursos bibliográficos digitales en un entorno de aprendizaje virtual sincrónico. Se adoptó un enfoque cuantitativo de tipo aplicado, con un diseño no experimental y de corte transversal, empleando como caso de estudio un instituto de lenguas extranjeras con 46 clases activas y 30 docentes. Los resultados demostraron que el modelo alcanzó el 100% de satisfacción de las preferencias docentes, identificó con precisión un déficit de cuatro licencias de videoconferencia adicionales respecto al inventario disponible y redujo la diversidad de licencias bibliográficas activadas en un 36.4%, así como el tiempo de planificación en un 81.3% en comparación con el proceso manual. Se concluye que la descomposición del problema en etapas lógicamente dependientes permite abordar de manera eficiente la complejidad combinatoria del entorno educativo virtual, ofreciendo una base cuantitativa auditable para la toma de decisiones estratégicas y financieras en la administración académica.

Palabras clave: Aprendizaje en línea, asignación de recursos, modelo matemático, optimización, programación lineal.

Abstract: Academic management in institutions with synchronous virtual modalities requires precise coordination between human talent and an ecosystem of digital resources subject to commercial and technical constraints, whose empirical planning often leads to operational conflicts, scheduling overlaps, and budgetary inefficiencies. The objective of this study was to design and implement a three-stage sequential mathematical optimization model, based on Binary Integer Linear Programming (BILP) and developed in Python using the PuLP library, with the aim of automating the allocation of faculty, videoconferencing licenses, and digital bibliographic resources in a synchronous virtual learning environment. A quantitative applied approach was adopted, with a non-experimental cross-sectional design, using as a case study a foreign language institute with 46 active classes and 30 faculty members. The results showed that the model achieved 100% satisfaction of faculty preferences, accurately identified a deficit of four additional videoconferencing licenses relative to the available inventory, and reduced the diversity of activated bibliographic licenses by 36.4%, as well as the planning time by 81.3% compared to the manual process. It is concluded that decomposing the problem into logically dependent stages enables the efficient handling of the combinatorial complexity of the virtual educational environment, providing an auditable quantitative basis for strategic and financial decision-making in academic administration.

Keywords: Linear programming, mathematical models, online learning, optimization, resource allocation.

1. Introducción

La asignación de recursos académicos constituye una tarea administrativa de alta exigencia que se realiza de forma recurrente en la mayoría de las instituciones de educación superior para garantizar su adecuado funcionamiento (Tan et al., 2021). Históricamente, la literatura se ha enfocado en entornos presenciales, donde los conflictos de asignación se resuelven mediante la reubicación en espacios físicos (Tagliaferro et al., 2024). Sin embargo, la consolidación de los modelos de aprendizaje virtual sincrónico ha transformado la operatividad institucional, trasladando el énfasis desde la infraestructura física hacia la coordinación precisa entre el talento humano y los recursos digitales, bajo diversas restricciones técnicas (Bashab et al., 2023).

Este proceso, definido formalmente como un problema de optimización combinatoria (COP), busca asignar recursos en tiempo y espacio para cumplir con los requerimientos del período académico (Abdipoor et al., 2023). Desde la perspectiva de la complejidad computacional, estos problemas se clasifican como NP-difíciles, lo que implica que encontrar soluciones óptimas mediante métodos manuales o heurísticos resulta inviable a gran escala, debido al crecimiento exponencial del problema (Bashab et al., 2023). En consecuencia, su planificación al inicio de cada ciclo académico representa un reto significativo para la gestión y la toma de decisiones (Piedra et al., 2026).

Ante este desafío, la literatura ha propuesto diversas estrategias de solución, como las metaheurísticas, que permiten explorar amplios espacios de búsqueda con rapidez, aunque sin garantizar el óptimo global (Córdoba, 2026; Tagliaferro et al., 2024). Por su parte, los modelos de Programación Lineal Entera Binaria (BILP) aseguran soluciones exactas bajo restricciones estrictas (Saltos & Benavides, 2022; Urbán-Rivero et al., 2024), mientras que los enfoques de descomposición secuencial facilitan el tratamiento de problemas complejos al dividirlos en subproblemas manejables (Hernández et al., 2020). No obstante, la mayoría de estos enfoques se ha centrado en entornos presenciales o híbridos, sin abordar la naturaleza específica de los recursos digitales compartidos en la educación virtual sincrónica (Moreno et al., 2023).

La irrupción de los entornos virtuales de aprendizaje (EVA) ha incrementado la complejidad de la planificación académica. Recursos como las plataformas de videoconferencia, sujetas a licencias por usuario concurrente, y las bibliotecas digitales requieren una gestión basada en la demanda por franja horaria y en límites de acceso simultáneo (Oeding et al., 2024; Valverde Romero et al., 2025). En este contexto, la convergencia de restricciones técnicas y comerciales dentro de un único proceso de planificación constituye una limitación poco abordada en la literatura. En contraste con los estudios centrados en la gestión de aulas físicas (Córdoba, 2026; Saltos & Benavides, 2022) o en la gestión de recursos humanos (Fernández et al., 2024), persiste la ausencia de enfoques que integren de manera conjunta la asignación docente, la concurrencia de licencias de comunicación y la compatibilidad de recursos bibliográficos digitales en un modelo exacto y automatizado.

La presente investigación se justifica en la necesidad de modernizar la gestión académica mediante enfoques de optimización cuantitativa, con el fin de reducir errores y tiempos de planificación (García et al., 2024). La formalización de las reglas operativas en un marco matemático permite desarrollar sistemas de soporte a decisiones (DSS) auditables y reproducibles (Robayo-Laz et al., 2022). Asimismo, el uso de herramientas de código abierto como Python facilita la implementación de modelos avanzados, democratizando el acceso a soluciones de inteligencia cuantitativa en instituciones con recursos limitados y permitiendo la asignación óptima de clases sin solapamientos, considerando la disponibilidad y aptitud del personal docente (Chen et al., 2022; Pinargote-Zambrano et al., 2024).

El objetivo de este estudio es diseñar e implementar un modelo de optimización matemática secuencial en tres etapas, basado en Programación Lineal Entera Binaria y desarrollado en Python, para la asignación automatizada de la carga académica y recursos tecnológicos en entornos virtuales sincrónicos. El modelo propuesto aborda un problema de alta complejidad combinatoria mediante 18 restricciones operativas organizadas en fases dependientes, que incluyen la asignación docente, la gestión de cuentas de videoconferencia y la asignación de licencias bibliográficas. Asimismo, su desempeño se evalúa en términos de factibilidad operativa, cumplimiento de preferencias docentes, reducción del tiempo de asignación y optimización del uso de recursos digitales, en comparación con el proceso manual.

2. Metodología

Enfoque y diseño de la investigación

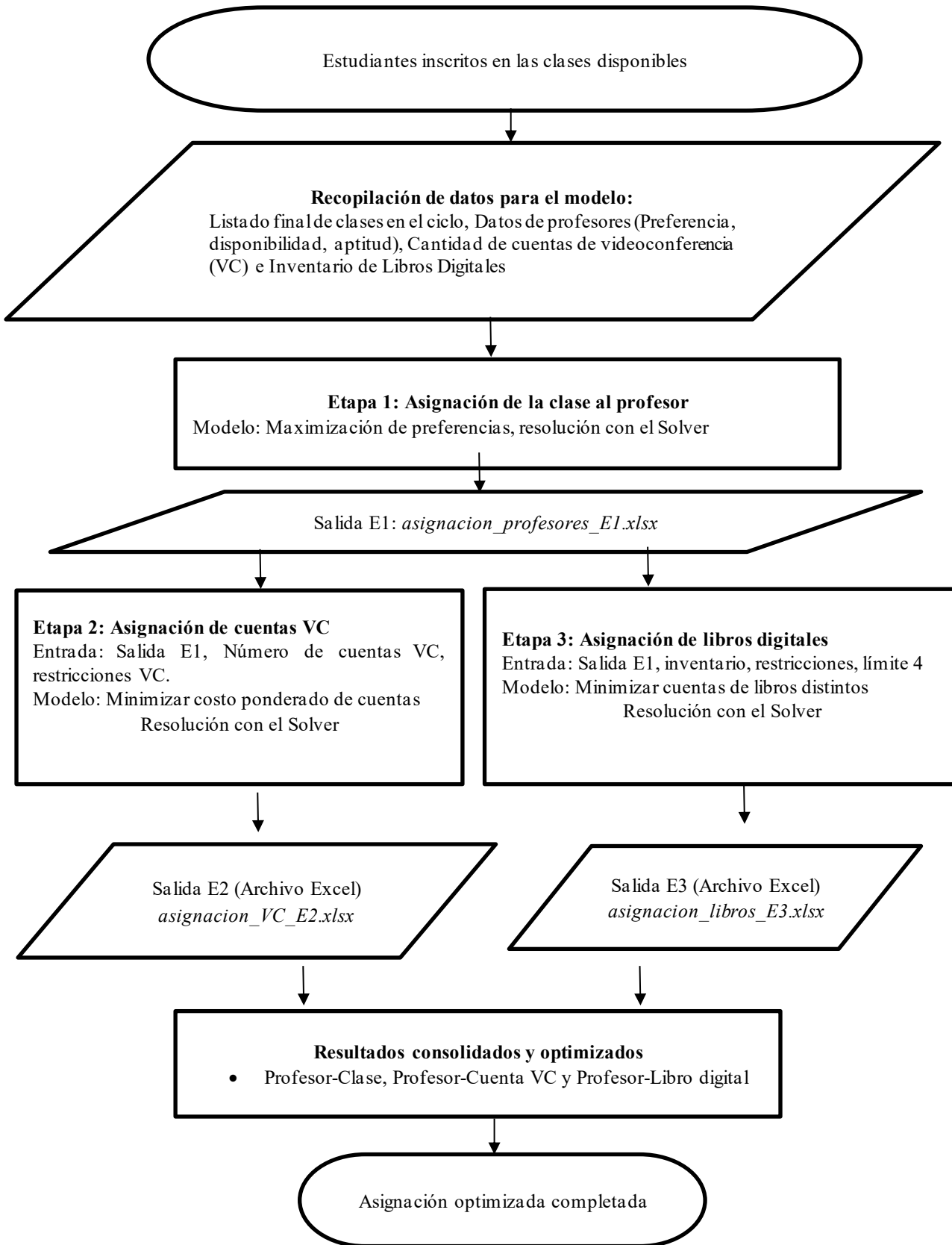
La presente investigación se enmarcó en un enfoque cuantitativo de tipo aplicado y operativo, bajo un diseño no experimental y de corte transversal, con un alcance descriptivo-prescriptivo**. En una primera fase, se caracterizó el proceso empírico de asignación con el fin de identificar y formalizar matemáticamente 18 restricciones operativas**, estructuradas en tres componentes interdependientes.

Las restricciones de asignación docente aseguraron la cobertura de clases, el cumplimiento de la carga horaria, la compatibilidad académica y la ausencia de solapamientos. Las restricciones de recursos de videoconferencia regularon la disponibilidad de cuentas, su uso compartido bajo condiciones de no contigüidad y la incorporación de licencias adicionales cuando el inventario resultó insuficiente. Por su parte, las restricciones bibliográficas garantizaron la asignación coherente de contenidos y el respeto a los límites de uso simultáneo por licencia.

En una segunda fase, se formuló un modelo exacto de Programación Lineal Entera Binaria para generar una solución óptima automatizada. El problema global se descompuso en un esquema de optimización secuencial de tres etapas para garantizar su tratabilidad computacional. Para ilustrar el modelo propuesto, la figura 1 presentó la estructura general de la metodología implementada, donde la solución óptima obtenida en una etapa alimentó las restricciones de la siguiente, garantizando la coherencia del sistema.

Figura 1

Esquema del marco de optimización matemática secuencial



Población y datos del caso de estudio

Para el desarrollo y validación del modelo, no se recurrió a un muestreo estadístico, sino a un censo completo de los registros operativos correspondientes a un ciclo académico real en un instituto de lenguas extranjeras con modalidad virtual sincrónica. Las características del conjunto de datos se resumieron en la tabla 1.

La demanda académica estuvo compuesta por 46 clases activas distribuidas en cuatro franjas horarias. La oferta docente incluyó 30 profesores, diferenciados entre personal de planta y contratados. Asimismo, los recursos de comunicación consideraron un inventario base de 20 licencias de videoconferencia, mientras que los recursos pedagógicos abarcaron 11 tipos de licencias de libros digitales con restricciones de uso simultáneo.

Tabla 1

Parámetros y elementos operativos del caso de estudio

Categoría	Descripción y Volumen de Datos
Demanda Académica	46 clases únicas activas, distribuidas en 4 franjas horarias (08:00 a 10:00, 15:00-17:00, 17:00-19:00 y 19:00-21:00).
Oferta Docente	30 profesores activos (2 de planta con carga fija, 28 contratados con carga variable).
Recursos de Comunicación	Inventario base de 20 licencias institucionales de videoconferencia.
Recursos Pedagógicos	Catálogo de 11 tipos de licencias de libros digitales (limitadas a 4 usos simultáneos).

Formulación del modelo matemático

Para una adecuada formalización del problema, las tablas 2, 3 y 4 presentaron la nomenclatura utilizada, incluyendo conjuntos, parámetros y variables de decisión del modelo. Se definieron los conjuntos de profesores, clases, franjas horarias, cuentas de videoconferencia y licencias bibliográficas, así como los parámetros asociados a preferencias, compatibilidad y restricciones operativas.

El modelo utilizó variables de decisión binarias que representaron la asignación y activación de recursos dentro del sistema. Estas variables permitieron modelar de manera precisa la relación entre docentes, clases, recursos tecnológicos y materiales educativos, asegurando el cumplimiento de las restricciones definidas en cada etapa del proceso.

Tabla 2

Nomenclatura del modelo matemático de los conjuntos e índices

Conjunto / Índice	Descripción
$P = \{p_1, p_2, \dots, p_n\}$	Conjunto de profesores, subdividido en profesores de planta y de contrato.
$C = \{c_1, c_2, \dots, c_m\}$	Conjunto de clases definidas por módulo, horario y paralelo.
$H = \{h_1, h_2, \dots, h_k\}$	Conjunto de franjas horarias operativas disponibles en la institución.

$A = \{a_1, a_2, \dots, a_j\}$	Conjunto total de cuentas de videoconferencia.
$A_{base} \subset A$	Subconjunto de cuentas de videoconferencia disponibles.
$A_{add} \subset A$	Subconjunto de cuentas adicionales potenciales.
$B = \{b_1, b_2, \dots, b_l\}$	Conjunto de licencias de libros digitales disponibles.

Tabla 3

Nomenclatura del modelo matemático de los parámetros

Parámetro	Descripción
$PrefComb_{p,c}$	Parámetro binario que indica la preferencia del profesor p por la clase c .
$MaxClases_p$	Número máximo de clases que puede impartir el profesor p .
W_{base}, W_{add}	Pesos de penalización para cuentas base y adicionales, con $W_{add} \gg W_{base}$.
$LimUsuario$	Número máximo de clases que pueden usar simultáneamente una licencia del libro b en una misma franja horaria.
$Compat_{b,c}$	Parámetro binario que indica si el libro b es compatible con la clase c .
$Adj_{c,c'}$	Parámetro binario que indica si las clases c y c' se desarrollan en franjas horarias contiguas.

Tabla 4

Nomenclatura del modelo matemático de las variables de decisión

Variable	Dominio	Descripción
$x_{p,c}$	{0,1}	1 si el profesor p es asignado a la clase c
$y_{p,a}$	{0,1}	1 si el profesor p utiliza la cuenta de videoconferencia a
v_a	{0,1}	1 si la cuenta $a \in A_{base}$ es utilizada
u_a	{0,1}	1 si la cuenta $a \in A_{add}$ es activada
$w_{c,b}$	{0,1}	1 si la clase c utiliza el libro digital b
s_b	{0,1}	1 si la licencia del libro b es activada

Nota. El modelo utiliza variables de decisión binarias que representan la asignación y activación de recursos dentro del sistema.

Etapa 1: Asignación de la clase al docente

El objetivo consistió en asignar cada clase a un profesor, maximizando la satisfacción global en función de su aptitud académica y preferencia horaria. La función objetivo se expresó en la Ecuación (1):

$$\text{Maximizar } Z_1 = \sum_{p \in P} \sum_{c \in C} PrefComb_{p,c} \cdot x_{p,c} \quad (1)$$

Las restricciones duras garantizaron la cobertura total de clases, el cumplimiento de la carga horaria máxima y la no superposición de horarios para un mismo docente, asegurando así la factibilidad operativa del sistema.

Etapa 2: Asignación de cuentas de videoconferencia

Con la asignación docente definida, esta etapa buscó distribuir las cuentas de videoconferencia minimizando un costo ponderado, con el fin de evitar la adquisición de cuentas adicionales. La función objetivo se definió en la Ecuación (2):

$$\text{Minimizar } Z_2 = \sum_{a \in A_{base}} W_{base} \cdot v_a + \sum_{a \in A_{add}} W_{add} \cdot u_a \quad (2)$$

Se aplicó una penalización fuerte ($W_{add} = 1000$) frente al uso del inventario base ($W_{base} = 1$), con el propósito de desincentivar la activación de cuentas adicionales. Asimismo, se estableció que las cuentas debían activarse antes de su uso y que no podían compartirse entre clases con horarios contiguos.

Etapa 3: Asignación de Libros Digitales

La fase final tuvo como objetivo minimizar la cantidad de licencias bibliográficas activadas, promoviendo la reutilización en distintas franjas horarias. La función objetivo se definió en la Ecuación (3):

$$\text{Minimizar } Z_3 = \sum_{b \in B} s_b \quad (3)$$

Este procedimiento estuvo sujeto a restricciones de compatibilidad entre libros y clases, así como al límite de uso simultáneo por franja horaria, garantizando un uso eficiente del inventario bibliográfico disponible.

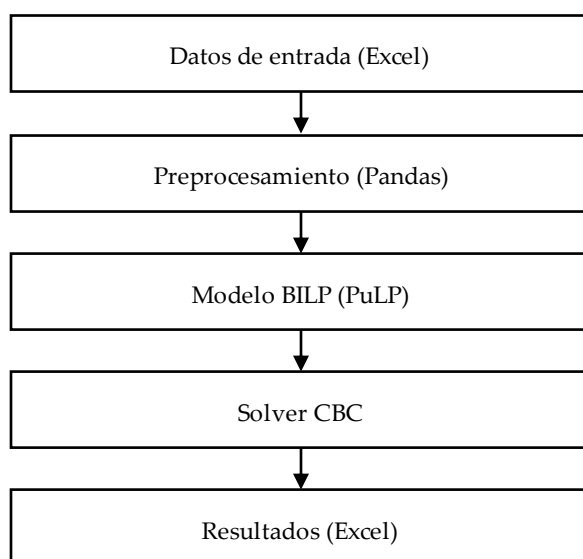
Herramientas y procesamiento computacional

Para la implementación computacional del modelo propuesto, se utilizó un entorno de código abierto basado en el lenguaje Python versión 3.11.12. La gestión de datos se realizó mediante la librería Pandas versión 2.2.2, mientras que la formulación del modelo se desarrolló utilizando la interfaz PuLP versión 3.1.1. La lectura y escritura de archivos en formato .xlsx se llevó a cabo mediante OpenPyXL versión 3.1.5.

La resolución de los subproblemas se efectuó mediante el *solver* exacto CBC versión 2.10.7, invocado desde PuLP con su configuración estándar. Este *solver* implementó algoritmos de ramificación y corte, lo que permitió obtener soluciones óptimas en problemas de Programación Lineal Entera Binaria.

A diferencia del esquema metodológico, la figura 2 presentó la arquitectura computacional del modelo, describiendo el flujo de procesamiento desde la ingesta de datos hasta la generación de resultados. El esquema integró las etapas de preprocesamiento, construcción del modelo y resolución mediante el *solver*.

Esta representación permitió distinguir el nivel conceptual del modelo del nivel operativo de su implementación, evidenciando cómo la formulación matemática fue traducida a un entorno computacional reproducible. Asimismo, la arquitectura planteada facilitó la trazabilidad del proceso y la replicabilidad de los resultados en contextos institucionales similares.

Figura 2*Arquitectura de implementación computacional del modelo de optimización*

3. Resultados

La implementación computacional del modelo de optimización secuencial basado en Programación Lineal Entera Binaria se ejecutó sobre la instancia de datos correspondiente al período académico evaluado. El algoritmo determinó la factibilidad matemática del sistema y alcanzó soluciones óptimas globales en cada una de las tres etapas del modelo propuesto. A continuación, se presentan los resultados cuantitativos, los tiempos de procesamiento y el comportamiento de las variables de decisión frente a las restricciones operativas, en correspondencia con el objetivo del estudio.

Asignación docente y cumplimiento de preferencias

En la primera etapa, el modelo procesó una demanda de 46 clases y una oferta de 30 docentes, alcanzando la convergencia óptima en 0.27 segundos de tiempo de cómputo. El valor de la función objetivo de maximización $Z_1 = 46.0$ fue equivalente al número total de clases, lo que indicó el cumplimiento del 100% de las preferencias docentes en términos de aptitud académica y disponibilidad horaria.

Las restricciones operativas se cumplieron en su totalidad, garantizando la cobertura completa de clases sin conflictos de solapamiento. Los docentes de planta fueron asignados a tres clases cada uno, mientras que la carga restante se distribuyó entre 24 docentes contratados sin exceder los límites establecidos. Asimismo, cuatro docentes no fueron asignados debido al desbalance entre oferta y demanda, lo cual confirma la consistencia del modelo frente a las restricciones definidas.

Diagnóstico de infraestructura y asignación de videoconferencias

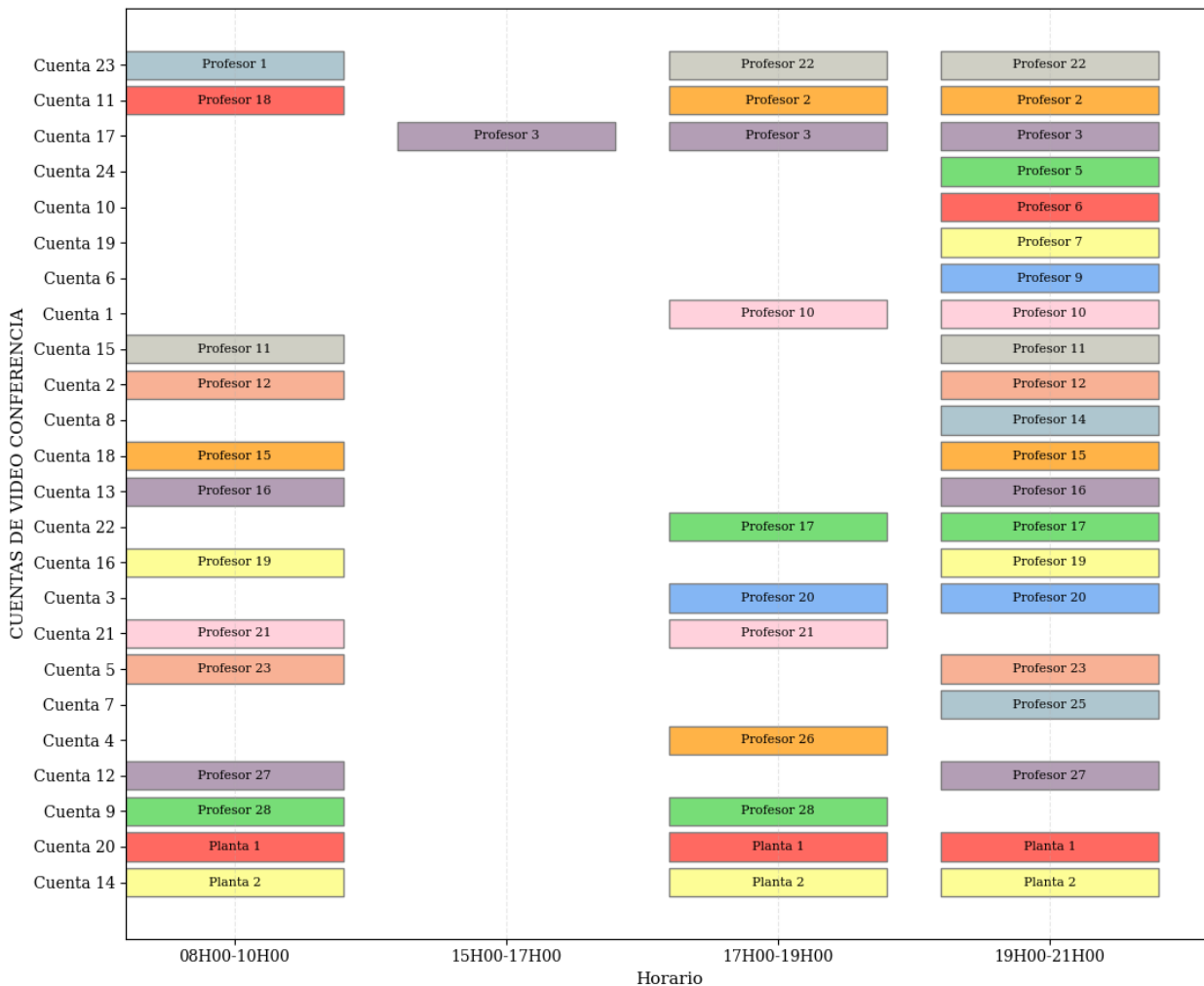
En la segunda etapa, el modelo resolvió la asignación de cuentas de videoconferencia bajo restricciones de disponibilidad, no contigüidad y solapamiento, constituyendo la fase de mayor carga computacional. La convergencia óptima se alcanzó en 591.87 segundos, evidenciando la complejidad del subproblema.

El valor de la función objetivo de minimización $Z_2 = 4020$ reflejó que la capacidad instalada inicial resultó insuficiente, por lo que el modelo utilizó las 20 cuentas base disponibles y determinó la necesidad de activar 4 cuentas adicionales para garantizar la factibilidad del sistema sin violar las restricciones operativas. Este resultado responde directamente al objetivo de optimizar el uso de recursos tecnológicos y anticipar requerimientos adicionales.

La figura 3 presentó el diagrama de Gantt, construido a partir de la matriz de variables de decisión $y(p,a)$, el cual mostró la distribución temporal de las 24 cuentas asignadas a los docentes en las distintas franjas horarias. Las restricciones lógicas se cumplieron completamente, evidenciando la exclusividad de cuentas para docentes con alta carga y la ausencia de asignaciones contiguas incompatibles, lo que validó la correcta implementación del modelo.

Figura 3

Diagrama de Gantt de la ocupación de cuentas de videoconferencia por profesor y franja horaria



Optimización y consolidación del inventario bibliográfico

En la tercera etapa, el modelo alcanzó la solución óptima en 0.07 segundos, minimizando la cantidad de licencias bibliográficas activadas. El valor de la función objetivo $Z_3 = 7.0$ indicó que solo 7 de las 11 licencias disponibles fueron necesarias para cubrir la totalidad de la demanda académica, evidenciando una optimización efectiva del inventario.

El análisis de las variables s_b y $w_{(c,b)}$ confirmó que la asignación cumplió simultáneamente con las restricciones de compatibilidad y los límites de uso concurrente, sin exceder el máximo de 4 usuarios por licencia en cada franja horaria. Este resultado demuestra la capacidad del modelo para reducir la sobreasignación de recursos y mejorar su utilización eficiente, en línea con el objetivo planteado.

Análisis comparativo de eficiencia operativa

Para evaluar el desempeño global del modelo, se consolidaron los resultados de las tres etapas y se compararon con el proceso manual empírico utilizado previamente por la institución. Los indicadores de desempeño se estructuraron en la Tabla 5, considerando variables como tiempo de planificación, uso de recursos y verificación de restricciones.

Los resultados evidenciaron una reducción del 81.3% en el tiempo total de planificación, pasando de un rango de 12 a 17 horas a 3.17 horas, incluyendo preprocesamiento, ejecución y validación. Asimismo, se logró una reducción del 36.4% en el uso de licencias bibliográficas, al pasar de 11 a 7 tipos utilizados, lo que refleja una mejora sustancial en la eficiencia del sistema.

Adicionalmente, el modelo permitió automatizar la verificación de restricciones y alcanzar un 100% de cumplimiento de preferencias docentes, superando las limitaciones del proceso manual. Los tiempos de cómputo reportados correspondieron a un entorno de hardware estándar, por lo que pueden presentar variaciones menores en otros contextos de ejecución.

Tabla 5

Análisis comparativo de indicadores de desempeño operativo y uso de recursos

Indicador de Evaluación Cuantitativa	Proceso Manual	Modelo Secuencial BILP
Tiempo total de planificación y asignación	12 a 17 horas efectivas	3.17 horas
Tiempo de ejecución computacional	No aplica	592.21 segundos como total de las tres etapas
Tasa de cumplimiento de preferencias docentes	Subóptima	100% de factibilidad
Cuentas de videoconferencia requeridas	No diagnosticado a priori	24 (20 base + 4 adicionales)
Licencias bibliográficas utilizadas	11 tipos (100% del inventario)	7
Verificación de restricciones	Auditoría manual	Automática

Nota. El tiempo total del modelo (3.17 horas) incluye aproximadamente 2 horas de preprocesamiento de datos, 592.21 segundos de ejecución del *solver* para las tres etapas y alrededor de 1 hora para la validación y exportación de resultados.

4. Discusión

Los hallazgos de esta investigación demostraron que la integración de un modelo de optimización secuencial basado en Programación Lineal Entera Binaria (BILP) transformó la planificación académica manual en un sistema de inteligencia cuantitativa auditable, reproducible y libre de conflictos operativos. Este resultado adquiere especial relevancia al considerar que el problema abordado pertenece a la clase NP-difícil, en la cual los métodos empíricos no garantizan soluciones óptimas y generan riesgos administrativos sistemáticos (Abdipoor et al., 2023; Bashab et al., 2023). En este sentido, el estudio no solo valida un enfoque técnico, sino que evidencia su aplicabilidad real en entornos educativos complejos.

En relación con la asignación docente, los resultados evidenciaron un nivel de cumplimiento del 100% en las preferencias declaradas, lo que representa un desempeño superior frente a enfoques tradicionales. Este resultado contrasta significativamente con lo reportado por Escobedo et al. (2024), quienes señalaron que la planificación manual de horarios es propensa a errores debido a la carga cognitiva asociada a la gestión simultánea de múltiples variables. De este modo, el modelo propuesto reduce la incertidumbre operativa y mejora la calidad de las decisiones académicas.

Esta limitación del proceso empírico resulta consistente con lo señalado por Bashab et al. (2023), quienes identificaron la satisfacción de preferencias como una de las restricciones blandas más vulnerables en sistemas no automatizados. Asimismo, estudios como el de Tan et al. (2021) han demostrado que los modelos exactos superan a las heurísticas en contextos estructurados, hallazgo que el presente estudio confirma en el ámbito de la educación virtual sincrónica. En contraste, aunque Fernández et al. (2024) validaron el uso de programación lineal en contextos educativos, su enfoque se limitó a la gestión de recursos humanos, sin integrar recursos digitales, aspecto que esta investigación abordó de manera integral.

Un aporte relevante de este estudio fue el análisis de la asignación de cuentas de videoconferencia bajo la restricción de no contigüidad. Los resultados demostraron que la demanda no pudo ser satisfecha con el inventario base de 20 licencias, debido a limitaciones técnicas asociadas al uso concurrente en franjas horarias consecutivas. Este hallazgo amplía la comprensión del problema de calendarización en entornos virtuales, tradicionalmente centrado en la asignación de espacios físicos (Saltos & Benavides, 2022), al incorporar restricciones propias de la infraestructura digital.

Además, este resultado tuvo implicaciones financieras directas, ya que el modelo permitió anticipar la necesidad de cuatro licencias adicionales antes del inicio del ciclo académico. En este sentido, la optimización trascendió su función operativa para convertirse en una herramienta de planificación estratégica y presupuestaria, alineada con el rol de los Sistemas de Soporte a Decisiones (DSS) descrito por Fernando y Baldelovar (2022). Esto evidencia el potencial del modelo como instrumento de gestión institucional proactiva.

En cuanto a la optimización del inventario bibliográfico, el modelo logró reducir el uso de licencias activas a 7 de un total de 11 disponibles, lo que representó una disminución del 36.4%. Este resultado demuestra que la gestión basada en demanda permite evitar la subutilización de recursos, optimizando su asignación en función de criterios operativos reales. A diferencia de la asignación manual, caracterizada por decisiones estáticas, el modelo introdujo un enfoque dinámico y eficiente, orientado a maximizar el aprovechamiento de los recursos disponibles.

Por otra parte, el análisis comparativo evidenció que el enfoque secuencial propuesto superó significativamente los resultados reportados en la literatura, alcanzando una reducción del 81.3% en los tiempos de planificación. Este valor excede ampliamente el 40% reportado por Saltos y Benavides (2022) en entornos presenciales, lo que sugiere que la descomposición del problema en etapas dependientes constituye una estrategia efectiva para mitigar la complejidad combinatoria. Asimismo, el modelo logró resolverse en 592.21 segundos utilizando herramientas de código abierto, lo que refuerza su viabilidad técnica y accesibilidad.

No obstante, es necesario reconocer que el modelo fue validado en una única instancia operativa, correspondiente a un instituto de lenguas extranjeras con modalidad virtual sincrónica. Si bien los resultados demostraron factibilidad y optimalidad, su generalización a contextos de mayor escala requiere estudios adicionales, particularmente mediante análisis de sensibilidad que evalúen el comportamiento del modelo ante variaciones en los datos. Esta limitación abre una línea de investigación futura relevante, especialmente en el contexto latinoamericano (García et al., 2024).

En conjunto, los hallazgos confirman que la optimización matemática aplicada a la gestión académica en entornos virtuales mejora significativamente la eficiencia operativa y el uso de recursos digitales. La presente investigación contribuye a la literatura en tres dimensiones principales: la integración de la asignación docente con recursos tecnológicos y bibliográficos, la formalización de restricciones propias de entornos virtuales (como la no contigüidad) y la demostración de que es posible alcanzar soluciones óptimas mediante herramientas de código abierto, reduciendo la dependencia de software propietario.

5. Conclusiones

La implementación del marco de optimización matemática secuencial estructurado en tres etapas demostró ser una solución altamente eficaz y robusta para resolver el problema de asignación simultánea de recursos en entornos de aprendizaje virtual sincrónico. El estudio permitió transitar desde una gestión administrativa empírica, fragmentada y propensa a errores hacia un sistema de inteligencia cuantitativa auditable, el cual garantizó la factibilidad operativa mediante la eliminación sistemática de conflictos de asignación, restricciones técnicas no satisfechas y problemas de subutilización de recursos digitales.

En términos cuantitativos, el modelo logró reducir el tiempo total de planificación en un 81.3% en comparación con el proceso manual, además de maximizar la satisfacción de las preferencias docentes hasta alcanzar el 100% de cumplimiento verificable. Asimismo, identificó de manera anticipada y precisa la necesidad de cuatro licencias adicionales de videoconferencia, lo que evidencia su capacidad como herramienta de diagnóstico. De igual forma, disminuyó en un 36.4% la diversidad de licencias bibliográficas activadas, optimizando el uso del inventario disponible.

Estos resultados posicionan al modelo no solo como una herramienta operativa, sino también como un instrumento estratégico para la planificación presupuestaria y la toma de decisiones basada en evidencia, al permitir anticipar déficits de infraestructura digital que no pueden ser detectados mediante procesos manuales. En este sentido, la propuesta trasciende el ámbito técnico y se integra en la gestión institucional como un mecanismo de optimización integral, alineado con las demandas actuales de la educación virtual.

Como líneas futuras de investigación, se proponen tres recomendaciones principales. En primer lugar, la integración de técnicas de aprendizaje automático para la predicción de la demanda académica basada en datos históricos, con el fin de fortalecer el carácter prospectivo del modelo. En segundo lugar, el desarrollo de una interfaz gráfica de usuario intuitiva, que facilite su adopción por parte de personal administrativo no especializado. Finalmente, se sugiere la realización de análisis de sensibilidad paramétrica y estudios de escalabilidad, que permitan evaluar el comportamiento del modelo ante variaciones en el volumen de datos y la complejidad de las restricciones.

En conjunto, los resultados obtenidos confirman que la optimización matemática aplicada a la gestión académica constituye una alternativa sólida, viable y escalable para mejorar la eficiencia operativa en instituciones educativas con modalidad virtual. Asimismo, se evidencia que el uso de modelos de programación lineal entera binaria implementados mediante herramientas de código abierto permite obtener soluciones óptimas, reproducibles y financieramente sostenibles, contribuyendo a reducir la dependencia de procesos manuales y de sistemas propietarios.

Referencias

- Abdipoor, S., Yaakob, R., Goh, S. L., & Abdullah, S. (2023). Meta-heuristic approaches for the University Course Timetabling Problem. *Intelligent Systems with Applications*, 19, 200253. <https://doi.org/10.1016/J.ISWA.2023.200253>
- Bashab, A., Ibrahim, A. O., Hashem, I., Aggarwal, K., Mukhlif, F., Ghaleb, F., & Abdelmaboud, A. (2023). Optimization Techniques in University Timetabling Problem: Constraints, Methodologies, Benchmarks, and Open Issues. *Computers, Materials and Continua*, 74(3), 6461–6484. <https://doi.org/10.32604/cmc.2023.034051>
- Chen, Y., Bayanati, M., Ebrahimi, M., & Khalijian, S. (2022). A Novel Optimization Approach for Educational Class Scheduling with considering the Students and Teachers' Preferences. *Discrete Dynamics in Nature and Society*, 2022. <https://doi.org/10.1155/2022/5505631>
- Córdoba, J. (2026). An Introduction to Timetabling: Constraints, Parameters and Objective Functions: Una introducción a la programación de horarios: restricciones, parámetros y funciones objetivo. *Revista Digital: Matemática, Educación E Internet*. <https://doi.org/10.18845/rdmei.v26i2.8404>
- Escobedo, R., Quezada, Á., Marquez, B., & Alanis, A. (2024). Análisis de datos para la optimización eficiente de horarios y Aprendizaje Automático. *Revista Perspectivas*, 6(2). <https://doi.org/10.47187/perspectivas.6.2.223>
- Fernández, A., Clark, D., & Vidal, M. (2024). Optimización de la asignación de docentes en la gestión de una asignatura: lecciones de un caso en estudios de pregrado. *Spirat. Revista Académica de Docencia y Gestión Universitaria*, 2(1), 47–69. <https://revistas.upch.edu.pe/index.php/Spirat/article/view/5257>
- Fernando, J., & Baldelovar, M. (2022). Decision Support System: Overview, Different Types and Elements. *Technoarete Transactions on Intelligent Data Mining and Knowledge Discovery*, 2(2). <https://doi.org/10.36647/TTIDMKD/02.02.A003>
- García, C., Treviño, J., Zapata, A., & Alcalá, C. (2024). Estándares y Estrategias para la Mejora Continua en Instituciones Educativas: Un Enfoque hacia la Optimización de Procesos Académicos. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, 8(6), 283-290. https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v8i6.14612
- Hernández, J., Hernández, S., Baltazar, M., Jiménez, J., & Hernández, J. (2020). Programación matemática binaria por etapas en la elaboración de un horario universitario. *Entreciencias: Diálogos En La Sociedad Del Conocimiento*, 8(22). <https://www.redalyc.org/journal/4576/457662386001/457662386001.pdf>
- Moreno, Y., Mejía, G., & Hidrobo, F. (2023). Diseño e implementación de un esquema de rendimiento para una plataforma e-learning. *Revista Ingeniería UC*, 29(2), 184–193. <https://n9.cl/gggjo7>
- Oeding, J., Gunn, T., & Seitz, J. (2024). The Mixed-Bag Impact of Online Proctoring Software in Undergraduate Courses. *Open Praxis*, 16(1), 82–93. <https://doi.org/10.55982/OPENPRAXIS.16.1.585>
- Piedra, A., Valladares, M., & Robles, E. (2026). La optimización de los procesos académicos en la educación superior como resultado de una dirección eficiente de proyectos educativos. *Revista Social Fronteriza*, 6(1), e–1038. [https://doi.org/10.59814/resofro.2026.6\(1\)1038](https://doi.org/10.59814/resofro.2026.6(1)1038)

-
- Pinargote-Zambrano, J., Lino-Calle, A., & Vera-Almeida, J. B. (2024). Python en la enseñanza de las Matemáticas para estudiantes de nivelación en Educación Superior. *MQRInvestigar*, 8(3), 3966–3989. <https://doi.org/10.56048/MQR20225.8.3.2024.3966-3989>
- Robayo-Laz, G., Romero-Fernández, A., Fernández-Villacrés, G., & Llerena-Ocaña, L. (2022). Sistemas de soporte a las decisiones y efecto en la evaluación de la calidad educativa. *CIENCIAMATRIA*, 8(4), 867–875. <https://doi.org/10.35381/cm.v8i4.894>
- Saltos, R., & Benavides, L. (2022). Formulation and implementation of an integer programming model for the course timetabling problem: a case study in Ecuador. *Revista Digital: Matemática, Educación e Internet*, 22(1). <https://doi.org/10.18845/RDMEI.V22I1.5734>
- Tagliaferro, S., Martínez, M., Alguíndigue, J., & Pereira, A. (2024). El algoritmo de búsqueda Tabú: Caso Asignación de Aulas de la universidad Metropolitana. *Anales de Ciencias Básicas, Físicas y Naturales*, (40), 1–34. <https://doi.org/10.58479/ACBFN.2024.68>
- Tan, J., Goh, S., Kendall, G., & Sabar, N. (2021). A survey of the state-of-the-art of optimisation methodologies in school timetabling problems. *Expert Systems with Applications*, 165. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2020.113943>
- Urbán-Rivero, L., Lezama-León, M., Cruz-Aldana, E., Mares-Ortega, N., & Loera-Díaz, L. (2024). Un modelo de programación entera para la generación de horarios universitarios: Un caso de estudio. *Computación y Sistemas*, 28(1), 137–149. <https://doi.org/10.13053/CYS-28-1-4610>
- Valverde, R., Mayorga, A., Herrera, S., Logroño, M., & Bedoya, C. (2025). Optimización de la gestión del aprendizaje y diversificación de recursos educativos en plataformas de e-learning: Innovación para la institución educativa virtual Eduvirtuoso. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, 9(5), 11884–11909. https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v9i5.20484

Transparencia

Conflicto de interés

Los autores declaran que no existen conflictos de interés de naturaleza alguna como parte de la presente investigación.

Fuente de financiamiento

Los autores financiaron completamente la investigación.

Contribución de autoría

Juan José Viscaíno Gavilanes: Conceptualización, metodología, software, análisis formal, investigación, gestión de datos, visualización, redacción - preparación del borrador original, financiamiento, administración del proyecto, recursos.

Henry Mauricio Villa Yáñez: Metodología, validación, investigación, redacción - revisión y edición, financiamiento, recursos, supervisión.

María José Mora Campana: Validación, investigación, redacción - revisión y edición, financiamiento, recursos.

Verónica Alexandra Villa Yáñez: Investigación, redacción - revisión y edición, financiamiento, recursos.

Los autores contribuyeron activamente en el análisis de los resultados, revisión y aprobación del manuscrito final.