

Programación y asignación de horarios de clases universitarias: un enfoque de programación entera

Angélica Sarmiento-Lepesqueur

Universidad de La Sabana, Chia, Cundinamarca, Colombia, Email: angelicasarle@unisabana.edu.co

Camilo Torres-Ovalle

Universidad de La Sabana, Chia, Cundinamarca, Colombia, Email: camilo.torres@unisabana.edu.co

Carlos L. Quintero-Araújo

Universidad de La Sabana, Chia, Cundinamarca, Colombia, Email: carlos.quintero5@unisabana.edu.co

Jairo R. Montoya-Torres

Universidad de La Sabana, Chia, Cundinamarca, Colombia, Email: jairo.montoya@unisabana.edu.co

RESUMEN

Un aspecto importante en la gestión de operaciones de una universidad es la programación de horarios de clase para los distintos cursos que ésta ofrece. Esta asignación es un problema complejo debido a la gran cantidad de restricciones que se deben considerar. Este artículo presenta un modelo de programación lineal entera aplicado al diseño de horarios de clases para el programa de pregrado en Administración de Mercadeo y Logística Internacionales de la Universidad de La Sabana, Colombia. El modelo tiene en cuenta las restricciones presentes en la programación de horarios de la universidad tales como la disponibilidad de salones, los horarios de los profesores, los requisitos de recursos audiovisuales para cada materia, entre otros. Se muestran y se analizan los resultados arrojados por el modelo. El modelo propuesto permite obtener soluciones eficientes en un tiempo de cálculo corto satisfaciendo todas las condiciones obligatorias de la programación. Además, considera algunas de las condiciones deseables a la hora de la realización del horario.

Palabras clave: Programación de horarios, asignación de salones, programación lineal entera, caso de estudio

ABSTRACT

Course timetable is an important aspect of operations management at universities. This is a very complex problem due to the great number of constraints that should be considered simultaneously. This paper aims to present a an integer linear programming model applied to university course timetabling for the undergraduate program of International Logistics and Marketing Management at Universidad de La Sabana, Colombia. The model takes into account several traditional as well as particular scheduling constraints such as classroom availability, professors' schedules, specific video and audio resources requirements, among others. Results of the computational experiments are presented and analyzed. The proposed model offers an effective timely solution satisfying all the mandatory conditions for course timetabling. The model is also able to consider some of the desired conditions when generating the schedule.

Keywords: Course timetabling, classroom assignment, integer programming, case study

1. INTRODUCCIÓN

Todas las universidades enfrentan en cada periodo académico el problema de la programación de horarios y la asignación de salones a cada una de las materias programadas en cada semestre. La programación que realice la universidad debe satisfacer una serie de condiciones que por lo general son comunes a todas las instituciones de

educación superior. En el presente trabajo se analiza el proceso actual de la Universidad de La Sabana para la asignación de salones para las diferentes facultades, centrándose en la programación para el programa de Administración de Mercadeo y Logística Internacional (AMLI) de la Escuela Internacional de Ciencias Económicas y Administrativas (EICEA). El objetivo es encontrar una solución eficiente a la asignación de horarios a través de la aplicación de un modelo de programación lineal entera.

Este artículo está organizado de la siguiente manera. En la Sección 2 se hace una revisión de los estudios anteriores y los enfoques empleados para resolver el problema de programación de horarios. En las Secciones 3 y 4 respectivamente se hace una descripción del problema particular bajo estudio y se propone el modelo matemático. La Sección 5 presenta la metodología propuesta para resolver el problema bajo estudio. En la Sección 6 se encuentran los resultados y su análisis. La Sección 7 está dedicada a presentar los resultados de un análisis de sensibilidad de la metodología propuesta. El artículo termina en la Sección 8 presentando las principales conclusiones del trabajo y algunas perspectivas de investigación..

2. LITERATURA RELACIONADA

En la literatura científica, el problema de programación de horarios universitarios ha sido definido conceptualmente como la asignación de cierto número de eventos (clases, exámenes) a un determinado número de espacios horarios y salones de clase, respetando ciertas restricciones (Lewis 2008, Qu et al. 2009). Tradicionalmente, estas restricciones son clasificadas como “duras” (*hard constraints*) y “blandas” (*soft constraints*): las primeras, deben ser respetadas a cabalidad para proveer una solución factible, mientras que las segundas, pueden ser violadas pero se espera poder satisfacerlas (Sabar et al. 2012). La calidad del horario de clases es medida según qué tanto, han sido violadas las restricciones blandas. Este problema ha sido de particular interés por parte de investigadores tanto de la comunidad de la Investigación de Operaciones y Ciencias de la Administración como de investigadores en Inteligencia Artificial. El problema básico puede ser modelado como un problema de coloración de grafos (Al-Betar y Khader 2012). Por lo tanto, los primeros enfoques de solución para el problema estuvieron basados en métodos heurísticos inspirados de procedimientos de solución para el problema de coloración de grafos (e.g., Carter et al. 1996). Si bien estos procedimientos permiten encontrar una solución rápidamente, la calidad de la solución es muchas veces inferior a la obtenida con modelos de programación lineal o con métodos meta-heurísticos o hiper-heurísticos (Burke et al. 2003, Burke et al. 2007, Al-Betar y Khader 2012).

En las últimas dos décadas, gracias al desarrollo de los computadores, el diseño de métodos meta-heurísticos eficientes ha sido aplicado con gran éxito a la resolución de problemas de programación de horarios universitarios. Por ejemplo, tabu search (Di Gaspero y Schaerf 2001), large neighbourhood search (Abdullah y Burke 2006), algoritmos de diluvio (Landa-Silva y Obit 2008, 2009), algoritmos híbridos (Sabar et al. 2009), algoritmos meméticos (Burke et al. 1996), colonia de hormigas (Socha y Samples 2003), algoritmos genéticos (Pillay y Banzhaf 2010), y colonias de abejas (Sabar et al. 2012).

Con respecto a los modelos de programación matemática, algunos artículos en la literatura se apoyan en la programación lineal o no lineal para formalizar la relación entre las variables de decisión. Es de notar, sin embargo, que la mayoría de estos artículos no resuelven el modelo matemático argumentando la complejidad computacional debida al número de variables de decisión. Entre los principales trabajos se pueden citar el modelo no lineal de Wood y Whitaker (1998) con variables binarias, el de Sampson et al. (1995) aplicado a un programa de Maestría en Administración (MBA), o el de Boland et al. (2008) quienes utilizan la programación binaria.

En este contexto, una de las grandes contribuciones de nuestro artículo consiste en mostrar que, diseñando el modelo correcto, la programación lineal puede ser empleada de forma eficiente y eficaz para resolver un problema de programación de horarios de clases y asignación de salones. El enfoque propuesto en este artículo es relativamente sencillo y permite resolver instancias de tamaño real para un programa académico de pregrado.

3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El problema de asignación de aulas y horarios no solo cuenta con una buena cantidad de variables, sino que, además, cuenta con un espacio de soluciones altamente amplio y complejo, que obliga a la búsqueda de posibles soluciones a través de la aplicación de métodos matemáticos complejos (e.g. programación lineal, programación no lineal, heurísticas, metaheurística o procedimientos híbridos). El problema de programación de horarios de clases (*course timetabling*) y asignación de salones es un problema ampliamente conocido en el campo de la Investigación de Operaciones. Como se mencionó anteriormente, el presente trabajo realizará un análisis del proceso actual de asignación de salones para el programa de Administración de Mercadeo y Logística Internacionales (AMLI) de la Escuela Internacional de Ciencias Económicas y Administrativas (EICEA) de la Universidad de La Sabana, en Chía, Colombia. A término se pretende diseñar una herramienta de programación lineal entera que permita optimizar la capacidad instalada en la universidad y mejorar los tiempos de respuesta para el proceso de programación de aulas de clase.

La programación que se realice para la Universidad debe satisfacer la siguiente serie de condiciones:

- No puede existir más de una asignación en un mismo periodo para una misma materia ni una misma aula.
- La programación se debe realizar completa, es decir que todas las asignaturas con su respectiva intensidad horaria deben tener asignado un salón en un periodo de tiempo determinado.
- Es necesario respetar la disponibilidad horaria de cada profesor.
- Las materias del mismo semestre que tengan un solo grupo no pueden ser programadas en la misma franja horaria.
- Se debe respetar la capacidad de los salones.
- Una materia se puede dictar en bloques de 3 horas máximo cada día.
- Si una materia se dicta en bloque no debe cambiar de salón.

Algunas otras características particulares a tener en cuenta para la programación de clases del programa de Administración de Mercadeo y Logística Internacional son:

- Como entrada al modelo (parámetros) se conoce el número de asignaturas y el número de grupos de cada una a programar. 44 asignaturas y se sabe a qué semestre pertenece cada asignatura.
- Se conoce el número de estudiantes esperado en cada grupo a programar y la intensidad horaria requerida de cada grupo.
- Se conoce el profesor asignado a cada grupo de cada asignatura y la disponibilidad horaria de cada profesor: se cuenta con 36 profesores para dictar las 44 asignaturas.
- Se conocen los salones disponibles para realizar la asignación y la capacidad de los mismos: 47 salones.
- Se conocen las franjas horarias en las cuales se pueden programar clases. En total son 64 franjas que equivalen a franjas de 1 hora de lunes a jueves desde las 7:00 am hasta las 6:00 pm y viernes y sábados desde las 7:00 am hasta las 2:00 pm.

El modelo debe lograr la asignación del total de las asignaturas de acuerdo con su disponibilidad horaria y cumpliendo con las condiciones exigidas por el programa. Para reducir el tiempo computacional del modelo se crean parámetros auxiliares que reducen el número de variables los cuales se explicarán en la formulación del modelo.

4. FORMULACIÓN DEL MODELO

El modelo de programación lineal entera que permite resolver el problema de programación de horarios se presenta continuación.

4.1 CONJUNTOS PRINCIPALES

$I =$ Franjas horarias $\{F1, F2, \dots, F64\}$

$J =$ Materias (cada elemento hace referencia a una materia y su grupo $\{1, 2, \dots, 44\}$)

L = Salones disponibles $\{L1, L2, \dots, L47\}$

4.2 CONJUNTOS AUXILIARES

K = Profesores disponibles $\{P1, P2, \dots, P36\}$

M = Semestre al que pertenece una materia $\{S1, S2, \dots, S9\}$

N = Días hábiles $\{D1, D2, \dots, D6\}$

4.3 PARÁMETROS

$INTH(J)$ = Número de franjas horarias que debe tener la materia J .

$TG(J)$ = Numero de estudiantes esperados en la materia J .

$TS(L)$ = Capacidad instalada (en número de estudiantes) del salón L .

$MS(J,M)$ = Matriz de 1 y 0; 1 si la materia J pertenece al semestre M , 0 sino.

$MP(J,K)$ = Matriz de 1 y 0; 1 si la materia J la dicta el profesor K , 0 sino

$FD(I,N)$ = Matriz de 1 y 0; 1 si la franja i es del día N , 0 sino.

$FM(I,J)$ = Matriz de 1 y 0; 1 si en la franja I se puede dictar la materia J , 0 sino.

$FP(I,K)$ = Matriz de 1 y 0; 1 si en la franja I se cuenta con el profesor K , 0 sino.

$CFM(I,J)$ = Matriz con la ponderación de las franjas horarias, con valores entre 10 y 50.

$PB(J)$ = Parámetro de 1 y 0 si la materia j se puede dictar en máximo bloques de 3 horas 0 sino.

4.4 VARIABLES DE DECISIÓN

Las variables de decisión del modelo son variables binarias que buscan definir en qué salón y franja horaria se asigna cada una de las asignaturas que componen el plan de estudios:

$$X_{IJL} = \begin{cases} 1 & \text{si en la franja horaria } I \text{ se asigna la materia (asignatura) } J \text{ en el salón } L \\ 0 & \text{De otra forma} \end{cases}$$

4.5 MODELO MATEMÁTICO

Con la definición de los conjuntos, parámetros y variables anteriores la formulación del modelo es la siguiente:

$$\min \sum_{I \in CFM} \sum_{J \in FM} \sum_L [CFM_{(I,J)} X_{IJL}] \quad (1)$$

Sujeto a:

$$\sum_J X_{IJL} \leq 1 \quad \forall I, \forall L \quad (2)$$

$$\sum_L X_{IJL} \leq 1 \quad \forall I \in FM, \forall J \quad (3)$$

$$\sum_{I \in FM} \sum_L X_{IJL} = INTH_J \quad \forall J \quad (4)$$

$$X_{IJL} TG_J \leq TS_L \quad \forall I \in FM, \forall J, \forall L \quad (5)$$

$$\sum_{J \in MP} \sum_L X_{IJL} \leq 1 \quad \forall K \in FP, \forall I \quad (6)$$

$$\sum_{J \in MSUFM} \sum_L X_{IJL} \leq 1 \quad \forall M, \forall I \quad (7)$$

$$\sum_{I \in FD} \sum_L X_{IJL} \leq 3 \quad \forall N, \forall J \in PB \quad (8)$$

$$\sum_L X_{IJL} + X_{I+3JL} \leq 1 \quad \forall I \in FM, \forall N \in FD, \forall J \in PB \quad (9)$$

La ecuación (1) expresa la función objetivo, la cual busca minimizar la suma de todas las posibles asignaciones multiplicada por la matriz de costos de las franjas horarias (CFM). Esta matriz representa la ponderación que tiene cada franja en cada materia según la preferencia de los docentes. Los conjuntos de ecuaciones (2) y (3) buscan garantizar que cada salón en una franja horaria solo se puede asignar máximo una vez y que una misma materia no se programe dos veces en la misma franja horaria. El conjunto de restricciones (4) impone que cada materia se programe según la intensidad horaria semanal de la misma. El conjunto de restricciones (5) garantiza que no se exceda la capacidad de los salones disponibles. Con el fin de que las asignaturas dictadas por el mismo docente no se programen en la misma franja horaria se ha establecido la ecuación (6). Las restricciones (7) imponen que las materias del mismo semestre queden programadas a diferentes horas y así los estudiantes del mismo semestre académico podrán asistir a todas las materias pertenecientes a su semestre. Por último, las restricciones (8) y (9) garantizan que si una materia se dicta el mismo día, máximo se dicta en tres franjas horarias y estas franjas deben ser consecutivas (bloques). En el modelo existen nueve restricciones iguales a la expresión (9) que garantizan que esta condición se cumpla a lo largo de todo el día.

5. METODOLOGÍA Y SOLUCIÓN PROPUESTA

Debido a la complejidad del problema, el desarrollo del modelo se llevó a cabo en dos fases. La primera fase buscaba encontrar a qué franja horaria asignar cada materia cumpliendo con las restricciones impuestas. Al solucionar este modelo se pudo establecer qué materias era conveniente dictar en bloque. Sin embargo, se presentó el inconveniente de que estas materias no se dictaban en el mismo salón (por ejemplo, la asignatura de Matemática Financiera quedó programada en un bloque de tres horas pero en este lapso, cambiaba de salón en dos oportunidades). Por tal razón, se diseñó la segunda fase del modelo que se explicará más adelante. Otro inconveniente encontrado en la primera etapa fue el hecho de que no era posible cumplir la restricción (8) la cual buscaba que máximo se programaran sesiones de 3 horas de la misma materia en un día. Analizando las razones de este comportamiento del modelo en la primera fase, se encontró que existe una materia en la que el profesor que la dicta sólo tiene disponibilidad horaria para un día y la intensidad de la misma es de 4 horas, por tal razón fue necesario relajar esta restricción y excluir de la misma a esta materia creando el parámetro PB_j .

En la segunda etapa, partiendo del conocimiento de las materias que era conveniente dictar en bloque y en qué franja horaria se debían dictar, se adicionan al modelo restricciones que garanticen que estos bloques se dictarán en el mismo salón. De esta manera se evitan desplazamientos innecesarios que provocarían pérdidas de clase y dispersión de los estudiantes. Dicha restricción se muestra en la ecuación (10), garantizando que para toda franja y materia que se dicte en bloque (esta información la dará el parámetro $MB_{(i,j)}$) el salón donde se ofrecerá cada materia será el mismo.

$$X_{IJL} = X_{I+1JL} \quad \forall I \in MB, \forall J \in MB, \forall L \quad (10)$$

El modelo se soluciona nuevamente arrojando como resultado que algunas de las materias que habían quedado programadas en días diferentes (no en bloque), ahora aparecen en bloque, con esto se evidencia que el modelo cambia las variables básicas para garantizar un mismo costo final. Sin embargo, esto hace que franjas no

consideradas en bloque se dicten ahora en bloque y sea necesario actualizar el parámetro $MB_{(i,j)}$ para que estas nuevas materias se asignen al mismo salón. Este proceso se realiza tantas veces como sea necesario, hasta que cada materia que se dicte en bloque se dicte en el mismo salón.

6. RESULTADOS Y ANÁLISIS

El desarrollo de las dos fases del modelo se realizó a través del sistema general de modelaje algebraico (GAMS), versión 23.5, el cual está diseñado específicamente para modelar problemas de programación lineal, no lineal o de entera mixta. Este aplicativo es especialmente útil para problemas que sean grandes y complejos. Además, GAMS está disponible en versiones para computadores personales, estaciones de trabajo, bases de datos y súper computadores. Para resolver el caso bajo estudio, se utilizó un computador personal con Procesador Intel(R) Core™ 2 Duo con memoria RAM de 4 GB. El tiempo de resolución del problema en el programa fue de 4 segundos aproximadamente para cada una de las corridas.

Una vez realizado el proceso completo (primera y segunda fase) se logró tener una programación completa de las 44 asignaturas pertenecientes al programa AMLI que cumpliera con todas y cada una de las condiciones impuestas por la Universidad. El costo asociado a esa asignación es de 1300 u.m. Se debe recordar que la función objetivo y este costo están relacionados al hecho de asignar los horarios de acuerdo a las preferencias horarias de los profesores. De las 44 asignaturas que conforman el programa, 13 materias que representan el 29.55%, no fueron programadas en bloque, 21 asignaturas (el 47.73% del total) fueron programadas en bloques de dos horas, mientras que en bloques de tres horas se programó un total de 9 asignaturas (el 20.45% del total). Como se mencionó anteriormente, solamente una materia (llamada Marketing Electrónico) fue programada en un bloque de 4 horas debido a la disponibilidad del profesor asignado. Es importante mencionar que para que este último bloque se programara fue necesario relajar la restricción (8): la disponibilidad del docente es de 8 horas pero solamente para el día sábado y la asignatura tiene una intensidad horaria de 4 horas semanales, con lo cual no se cumplía la restricción de que máximo se pueden programar 3 horas en bloque.

La información obtenida de los resultados permite concluir que la ocupación de los salones es de tan solo el 4.12%, esto ocurre porque como parámetro de capacidad se tomaron los salones ubicados en los edificios E y G de la universidad con un total de 18 y 29 salones respectivamente. Como se cuenta con un total 64 franjas horarias, esto da un total de 3008 franjas disponibles por semana. Según la intensidad horaria del programa AMLI se cuenta con 124 franjas para programar en este periodo, por tal motivo la ocupación es tan baja. Por lo cual podemos concluir que la capacidad instalada que se tuvo en cuenta para la realización del modelo es mucho mayor a la que realmente se necesita.

Para propósitos de presentación en este artículo se muestra a continuación el horario asignado a las materias de séptimo semestre del programa aunque vale la pena aclarar que el modelo se realizó para las materias de todos los semestres. En la Figura 1 se puede evidenciar cómo se respeta la restricción de no programar materias del mismo semestre a la misma hora y cómo las materias en bloque son asignadas al mismo salón de clases evitando desplazamientos innecesarios y pérdida de clase.

Como análisis de los resultados generales de la programación se puede concluir que en casi todos los días a excepción de los días miércoles y jueves, queda espacio libre en la hora de almuerzo (12 a.m. a 1 p.m.) lo cual favorece tanto a docentes como estudiantes que cuentan con un espacio libre para descansar y alimentarse, también se evidencia que la mayor parte de la programación se realiza en las horas de la mañana, esto se debe a la ponderación dada a las franjas horarias según la preferencia de los docentes. Sin embargo al tener tanta disponibilidad de salones nos encontramos con un horario bastante disperso, este aspecto se tratará de subsanar al realizar el análisis de sensibilidad del modelo.

7. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

Debido a que el problema bajo estudio cae en la categoría de “problemas de asignación” según la clasificación en Investigación de Operaciones, se dificulta un poco el análisis de sensibilidad ya que el valor de los parámetros que se pueden cambiar son pocos (Hillier y Lieberman, 2006). Sin embargo se consideró importante realizar un nuevo

modelo reduciendo el número de salones disponibles para analizar en qué afecta esta situación la asignación actual realizada por el modelo. Este cambio también se hace ya que la idea principal de este proyecto es que sirva como primer acercamiento a la realización de un modelo para toda la Universidad de La Sabana y para esto no se contará con capacidad en exceso ya que todos los programas estarán compitiendo para la asignación de los recursos de salones.

Figura 1: Ejemplo de horario de clase para las asignaturas de séptimo semestre

	LUNES	MARTES	MIERCOLES	JUEVES	VIERNES	SABADO
7:00	BRANDING G 114		C. CONSUMIDOR 1 E 203			LOGISTICA DEL TRANS MAR Y PORT. E 202
8:00	ECO. DEL TRANSPORTE E 210		C. CONSUMIDOR 1 E 203			LOGISTICA DEL TRANS MAR Y PORT. E 202
9:00	ECO. DEL TRANSPORTE E 210	BRANDING E 205	C. CONSUMIDOR 1 E 203		MDEO RESPON SOCIAL CORPORATIVA E 102	GERENCIA DE LOGISTICA E 208
10:00		BRANDING E 205	MDEO RESPON SOCIAL CORPORATIVA E 203		MDEO RESPON SOCIAL CORPORATIVA E 102	GERENCIA DE LOGISTICA E 208
11:00	C. CONSUMIDOR 2 E 208		MERCADEO SEMIOTICO G 220			GERENCIA DE LOGISTICA E 208
12:00			MERCADEO SEMIOTICO G 220	GERENCIA DE MERCADEO G 114		
13:00			DIRECCIONAMIENTO ESTRATEGICO G 220	GERENCIA DE MERCADEO G 114		
14:00			DIRECCIONAMIENTO ESTRATEGICO G 220	GERENCIA DE MERCADEO G 114		
15:00						
16:00				LOGISTICA INVERSA E 101		
17:00			COMPORTAMIENTO DEL CONSUMIDOR 2 G 220	LOGISTICA INVERSA E 101		
18:00			COMPORTAMIENTO DEL CONSUMIDOR 2 G 220	DIRECCIONAMIENTO ESTRATEGICO G 210		

Para este nuevo análisis se supondrá que para la programación de las asignaturas solo se contará con los salones disponibles en el primer piso del edificio E: es decir, un total de 7 salones (pasamos de tener disponibles 3008 franjas por semana, a tener 448 franjas disponibles por semana). Al solucionar el modelo con estas nuevas condiciones (nuevamente se realizan las dos fases del problema original), de las 44 asignaturas que conforman el programa de Administración de Mercadeo y Logística Internacionales, 10 materias (el 22.73% del total) no fueron programadas en bloque, 24 asignaturas (el 54.55% del total) fueron programadas en bloques de dos horas, el 20.45% de las materias (es decir, 9) son programadas en los bloques de tres horas y solamente una materia fue programada en un bloque de 4 horas. Como se observa en la tabla 1, si comparamos estos resultados con los primeros obtenidos podemos observar que se asigna un horario más compacto bajo este nuevo escenario.

A partir de este análisis, y consultando con los directivos de la universidad, se considera que esta solución es más apropiada y es entonces la recomendada para la extensión del problema a toda la Universidad de La Sabana: pre asignar un número de salones a cada programa de tal manera que éste trate de respetar esta pre asignación. En los resultados se observa sin embargo que el porcentaje de ocupación de los salones sigue siendo muy bajo al tener todavía capacidad en exceso (ver Tabla 2). Sin embargo, observando la programación en detalle encontramos que hay franjas horarias donde se utilizan los 7 salones disponibles en su totalidad, lo que indica que se está tratando al máximo de aprovechar los recursos disponibles. La Figura 2 muestra nuevamente la programación asignada a las materias del séptimo semestre del programa de AMLI para observar cómo cambia la programación obtenida.

Es importante aclarar que el costo obtenido sigue siendo 1300 u.m. por lo que se evidencia que lo que se realizó fue un cambio en las variables básicas sin afectar el valor óptimo de la función objetivo.

Tabla 1: Comparación entre soluciones para las asignaturas programadas

	Modelo original		Modelo análisis de sensibilidad	
	Total de materias	% del total de materias	Total de materias	% del total de materias
Número de bloques	13	29.55%	10	22.73%
Bloque de 2 hr	21	47.73%	24	54.55%
Bloque de 3 hr	9	20.45%	9	20.45%
Bloque de 4 hr	1	2.27%	1	2.27%

Tabla 2: Comparación entre soluciones para las asignaturas programadas

Salón	Ocupación	% ocupación
E101	25	20.2%
E102	10	8.1%
E103	17	13.7%
E104	16	12.9%
E105	18	14.5%
E106	16	12.9%
E107	22	17.7%

Como se puede observar, la asignación cumple nuevamente con todas las condiciones impuestas por la Universidad. Si se mira la programación de la Figura 2, podría pensarse que es una programación más dispersa con relación a la obtenida anteriormente. Sin embargo, es importante aclarar que las personas no ven todas las materias al existir varios grupos para la misma asignatura (por ejemplo, Comportamiento del Consumidor) y que en esta programación los estudiantes de séptimo semestre tendrían libre el viernes para poder adelantar los trabajos e investigaciones a lo largo de todo el semestre o para participar en actividades extracurriculares las cuales hacen parte del proceso de formación integral.

8. CONCLUSIONES

Este artículo presentó un modelo de programación entera para la programación de horarios de clases del programa de pregrado en Administración de Mercadeo y Logística Internacionales de la Universidad de La Sabana, Chía, Colombia. El modelo logró realizar una asignación que cumple con todas las restricciones impuestas por las directivas del programa y tiene en cuenta algunas condiciones deseables tales como las preferencias de los profesores y el impedir cambio de salón en materias que se dictan en bloque. En la evaluación del modelo se hizo necesario el desarrollo en dos fases. La primera fase entrega la asignación de materias a cada una de las franjas horarias, mientras que la segunda fase logra la asignación de salones de tal manera que no haya cambio de salón en las materias que se dictan el mismo día en bloque.

Aunque los métodos de solución propuestos y la respectiva solución son una buena aproximación a la programación deseada, es importante reconocer que se debe realizar una mejora del modelo para que logre asignar en días diferentes franjas horarias homogéneas (por ejemplo, si una materia se dicta el primer día a las 7:00 am, los otros días se dicte en franjas cercanas como 7:00 u 8:00 am.) Esta mejora se deja abierta para tener en cuenta en futuras investigaciones. Por último es importante tener en cuenta que para la extensión de este modelo a toda la programación de horarios de la Universidad de La Sabana se hace necesario pensar en la aplicación de un procedimiento meta-heurístico que reduzca el número de corridas que debió realizarse en este modelo para cumplir con las condiciones de bloques.

Figura 2: Horario de clase para las asignaturas de séptimo semestre revisado

	LUNES	MARTES	MIERCOLES	JUEVES	VIERNES	SABADO
7:00	BRANDING E 107		C. CONSUMIDOR 1 E 103			LOGISTICA DEL TRANS MAR Y PORT. E 104
8:00	ECO. DEL TRANSPORTE E 105		C. CONSUMIDOR 1 E 103			LOGISTICA DEL TRANS MAR Y PORT. E 104
9:00	ECO. DEL TRANSPORTE E 105	BRANDING E 107	C. CONSUMIDOR 1 E 103	GERENCIA DE MERCADEO E 102		GERENCIA DE LOGISTICA E 104
10:00	C. CONSUMIDOR 2 E 101	BRANDING E 107				GERENCIA DE LOGISTICA E 104
11:00			MERCADEO SEMIOTICO G 220			GERENCIA DE LOGISTICA E 104
12:00			MERCADEO SEMIOTICO G 220			
13:00						
14:00	GERENCIA DE MERCADEO E 107	MDEO RESPON SOCIAL CORPORATIVA E 103				
15:00	GERENCIA DE MERCADEO E 107	MDEO RESPON SOCIAL CORPORATIVA E 103				
16:00		MDEO RESPON SOCIAL CORPORATIVA E 103		LOGISTICA INVERSA E 103		
17:00	DIRECCIONAMIENTO ESTRATEGICO E 106		C. CONSUMIDOR 2 E 101	LOGISTICA INVERSA E 103		
18:00	DIRECCIONAMIENTO ESTRATEGICO E 106		C. CONSUMIDOR 2 E 101	DIRECCIONAMIENTO ESTRATEGICO E 106		

AGRADECIMIENTOS

Loa autores agradecen a la Universidad de La Sabana y a los funcionarios que colaboraron en desarrollo de este trabajo, especialmente Martha Torres de la Secretaría Administrativa de la EICEA, Sonia Noreña, Jefe de Registro Académico, Janneth Suarez, Coordinadora Administrativa y Jose Fernando Jimenez. Todos ellos fueron parte fundamental para el éxito de este trabajo.

REFERENCIAS

- Abdullah, S., Burke, E.K. (2006) “A multi-start large neighbourhood search approach with local search methods for examination timetabling”. In: Long, D., Smith, S.F., Borrajo, D., McCluskey, L. (Eds.), Proceedings of the 2006 International Conference on Automated Planning and Scheduling, Cumbria, UK, pp. 334-337.
- Al-Betar, M.A., Khader, A.T. (2012) “A harmony search algorithm for university course timetabling”. Annals of Operations Research, Vol. 194, No. 1, pp 3-31.
- Boland, N., Hughes, B.D., Merlot, L.T.G., Stuckey P.J. (2008) “New integer linear programming approaches for course timetabling”. *Computers & Operations Research*, Vol. 35, No. 7, pp 2209-2233.
- Burke, E.K., Newall, J.P., Weare, R.F. (1996) “A memetic algorithm for university exam timetabling”. In: Burke, E.K., Ross, P. (Eds.), *Lecture Notes in Computer Science*, Vol. 1153. Springer, Heidelberg, pp. 241-250.

- Burke, E.K., Kendall, G., Soubeiga, E. (2003). "A tabu-search hyperheuristic for timetabling and rostering". *Journal of Heuristics*, Vol. 9, No. 6, pp 451-470.
- Burke, E.K., McCollum, B., Meisels, A., Petrovic, S., Qu, R. (2007) "A graph-based hyper-heuristic for educational timetabling problems". *European Journal of Operational Research*, Vol. 176, No. 1, pp 177-192.
- Carter, M.W., Laporte, G., Lee, S.Y. (1996) "Examination timetabling: algorithmic strategies and applications. *Journal of the Operational Research Society*, Vol. 74, pp 373-383.
- Di Gaspero, L., Schaerf, A. (2001) "Tabu search techniques for examination timetabling". In: Burke, E.K., Erben, W. (Eds.), *Lecture Notes in Computer Science*, Vol. 2079. Springer, Heidelberg, pp. 104–117
- Hillier, F.S., Lieberman, G.J. (2006) *Introducción a la Investigación de Operaciones*. Editorial McGraw Hill. Octava edición: México.
- Landa-Silva, D., Obit, J.H. (2008) "Great deluge with non-linear decay rate for solving course timetabling problem". *Proceedings of the Fourth International IEEE Conference on Intelligent Systems*, Varna, Bulgaria, pp. 8.11-8.18.
- Landa-Silva, D., Obit, J.H. (2009). "Evolutionary non-linear great deluge for university course timetabling". In: *Proceeding of 2009 International Conference on Hybrid Artificial Intelligent (HAIS09)*, Lecture Notes in Artificial Intelligence, Vol. 5572. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, pp. 269-276.
- Lewis, R. (2008) "A survey of metaheuristic-based techniques for university timetabling problems". *OR Spectrum*, Vol. 30, No. 1, pp 167-190
- Pillay, N., Banzhaf, W. (2010) "An informed genetic algorithm for the examination timetable problem". *Applied Soft Computing*, Vol. 10, pp 457-467.
- Qu, R., Burke, E.K., McCollum, B., Merlot, L.T.G., Lee, S.Y. (2009) "A survey of search approaches and automated system development for examination timetabling". *Journal of Scheduling*, Vol. 12, No. 1, pp 55-89.
- Sabar, N.R., Ayob, M., Kendall, G. (2009) "Tabu exponential Monte-Carlo with counter heuristic for examination timetabling". In: *Proceedings of 2009 IEEE Symposium on Computational Intelligence in Scheduling (CISched2009)*, Nashville, Tennessee, USA, pp. 90-94.
- Sabar, N.R., Ayob, M., Kendall, G., Qu, R. (2012) "A honey-bee mating optimization algorithm for educational timetabling problems". *European Journal of Operational Research*, Vol. 216, pp 533-543.
- Sampson, S.E., Freeland, J.R., Weiss, E.N. (1995) "Class scheduling to maximize participant satisfaction". *Interfaces*, Vol. 25, No. 3, pp. 30-41.
- Socha, K., Samples, M. (2003) "Ant algorithms for the university course timetabling problem with regard to the state-of-the-art". In: *Evolutionary Computation in Combinatorial Optimization (EvoCOP 2003)*. Lecture Notes in Computer Science, Vol. 2611. Springer-Verlag, Berlin, pp. 334-345.
- Wood, J., Whitaker, D. (1998) "Student centered school timetabling". *Journal of the Operational Research Society*, Vol. 49, pp 1146-1152.

Authorization and Disclaimer

Authors authorize LACCEI to publish the paper in the conference proceedings. Neither LACCEI nor the editors are responsible either for the content or for the implications of what is expressed in the paper.