



## XIII Coloquio de Gestión Universitaria en América del Sur “En homenaje al Dr. Roberto Ismael Vega”

### *Rendimientos académicos y eficacia social de la Universidad*

## SISTEMAS DE INFORMACIÓN Y TOMA DE DECISIONES

## METODOLOGÍA PARA LA PROGRAMACIÓN DE HORARIOS Y SALONES DE CLASES UNIVERSITARIAS – UN CASO DE ESTUDIO

Camilo Torres-Ovalle<sup>1</sup>  
Jairo R. Montoya-Torres<sup>2</sup>  
Carlos L. Quintero-Araújo<sup>3</sup>  
Mónica Castilla-Luna<sup>4</sup>

### 1. Introducción

Universidades, y en general instituciones de educación en todos los niveles, enfrentan en cada periodo académico el problema de la programación de horarios y la asignación de aulas (salones) de clase. En la literatura académica, este problema es una caracterización del problema de *timetabling* (Hernández et al. 2008). Puesto que existen recursos limitados en infraestructura y medios educativos, el problema consiste en asignar salones (aulas de clases) y recursos (docentes, equipos de apoyo, etc.) a un grupo de clases que deben tomar los estudiantes de acuerdo con su programa de estudios. Otras definiciones recientes del problema se encuentran en los trabajos de Schaerf (1999), Burke y Petrovic (2002) y Pillay (2013). La solución requiere la satisfacción de restricciones fuertes (duras) y suaves. De manera general, se requiere que las clases, módulos o eventos asociados sean programados en espacios horarios de tal forma que, primero, los estudiantes tengan cierta flexibilidad en la escogencia de los cursos; segundo, que los profesores y docentes tengan asignados sus cursos en espacios horarios que les permitan realizar otras actividades (gestión académica, investigación, etc.); y tercero, que la infraestructura sea utilizada de la mejor manera posible. Por esta razón, se invierte mucho tiempo en la planeación y asignación de estos recursos, con el fin de aprovechar al máximo la capacidad instalada.

A pesar de los avances en el diseño de procedimientos formales (computacionales) para la resolución del problema, no existe evidencia en la literatura de que estos avances tomen en cuenta restricciones reales o hayan sido efectivamente traducidos en implementaciones reales en las universidades (McCollum 2007). En un estudio realizado hace más de 10 años, Carter y Laporte (1998) manifestaron haberse “sorprendido al descubrir que hay muy pocos artículos sobre planeación o programación de horarios de clases que reportan una real utilización de los métodos empleados en la investigación” [traducción de los autores]. El estudio de McCollum (2007) reporta las mismas conclusiones.

Una de las estrategias para reducir este distanciamiento entre los desarrollos teóricos y la implementación real en las universidades de los modelos y algoritmos de programación de horarios consiste en resaltar la importancia de los aspectos particulares de cada institución educativa (McCullan 2007). Bajo esta premisa, el objetivo de este artículo es presentar el impacto que se obtiene al diseñar modelos de optimización apropiados para la programación de horarios en la Universidad de La Sabana, Colombia. Para lograrlo, la siguiente sección presenta en detalle la metodología empleada. Posteriormente se presenta la caracterización del problema, así como los resultados obtenidos. Finalmente, el artículo presenta las conclusiones y algunas líneas para trabajo futuro.

## 2. Métodos

La primera etapa del proceso consistió en la caracterización del proceso actual de planeación de horarios en la universidad. Se buscaba resolver dos preguntas de investigación:

*PI1: ¿Cómo se desarrolla actualmente el proceso de planeación / programación de horarios en la Universidad de La Sabana?*

*PI2: ¿En qué medida la planta física de la Universidad es utilizada para satisfacer las necesidades logísticas de las diferentes asignaturas?*

Para responder a estas preguntas se desarrollaron dos actividades en paralelo. Por un lado, se realizó la caracterización del proceso actual de planeación de horarios de clases llevado a cabo por la unidad administrativa encargada. Esta diagramación (ver Sección 3) permitió tanto la comprensión del proceso mismo como la identificación de los actores participantes del proceso. El segundo componente de esta primera etapa consistió en cuantificar las variables propias del problema bajo estudio. Esto es, conocer el número de grupos, asignaturas, estudiantes, capacidad de salones, requerimientos de cada programa académico, etc. de tal forma que se pudiera determinar en qué medida se utiliza la planta física. Así pues, se logró establecer el alcance apropiado para validar los métodos de programación de horarios propuestos a través de una prueba piloto en las dos unidades académicas más grandes de la universidad.

Una vez delimitado el alcance de la prueba piloto, la segunda etapa del proceso consistió en aplicar una encuesta a los estudiantes de pregrado de la Facultad de Ingeniería y de la Escuela Internacional de Ciencias Económicas y Administrativas (EICEA) con el fin de responder a la siguiente pregunta de investigación, con el fin de determinar el concepto de flexibilidad horaria desde el punto de vista de los estudiantes:

*PI3: ¿Cuáles son las preferencias de los estudiantes en cuanto a los horarios de clases?*

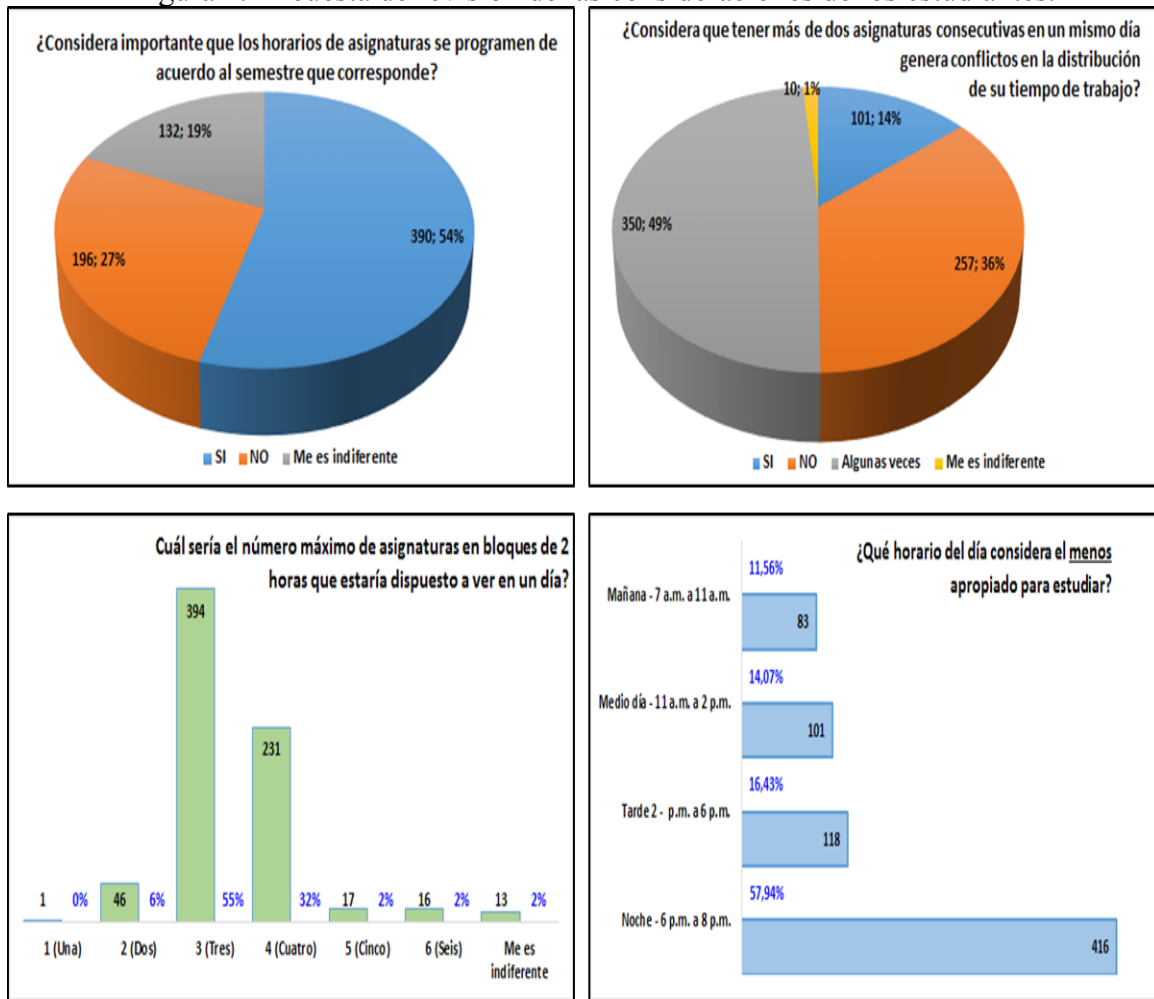
Esta encuesta se realizó a 780 estudiantes de ambas facultades en diferentes semestres académicos. Esto representa el 25% de la población. Se formularon preguntas básicas sobre el horario más adecuado para asistir a una clase, el número de materias vistas por día, entre otros. Los resultados numéricos más importantes se presentan en la Figura 1.

La encuesta aplicada permitió identificar las preferencias de los estudiantes, como por ejemplo el 54% prefiere que las asignaturas programadas en su horario sean programadas de acuerdo con el semestre al que corresponden, en otro aspecto el 36% de los estudiantes encuestados considera que el tener asignaturas consecutivas el mismo día no afecta su tiempo de trabajo académico, así mismo tan solo el 14% está en desacuerdo y cree que la programación seguida el mismo día si puede llegar a afectar su tiempo de trabajo. En cuanto el número de asignaturas en bloques de dos horas que estarían dispuesto a ver diariamente el 55% manifiesta que aceptarían ver 3 bloques, seguido por el 32% que vería 4 bloques, finalmente el horario de mayor aceptación para estudiar está entre las 7 a.m. y las 11 a.m., estas consideraciones son tenidas en cuenta en la perspectiva planteada por los estudiantes.

La última etapa de esta investigación consistió en el desarrollo de modelos matemáticos apropiados para la optimización de los horarios de clases de las unidades académicas seleccionadas. En esta etapa se buscaba responder la siguiente pregunta de investigación:

*PI4: ¿En qué medida un procedimiento de resolución del problema basado en métodos de optimización matemática permite mejorar los indicadores de utilización de las aulas de clase de la Universidad de La Sabana?*

Figura 1. Encuesta de revisión de las consideraciones de los estudiantes.



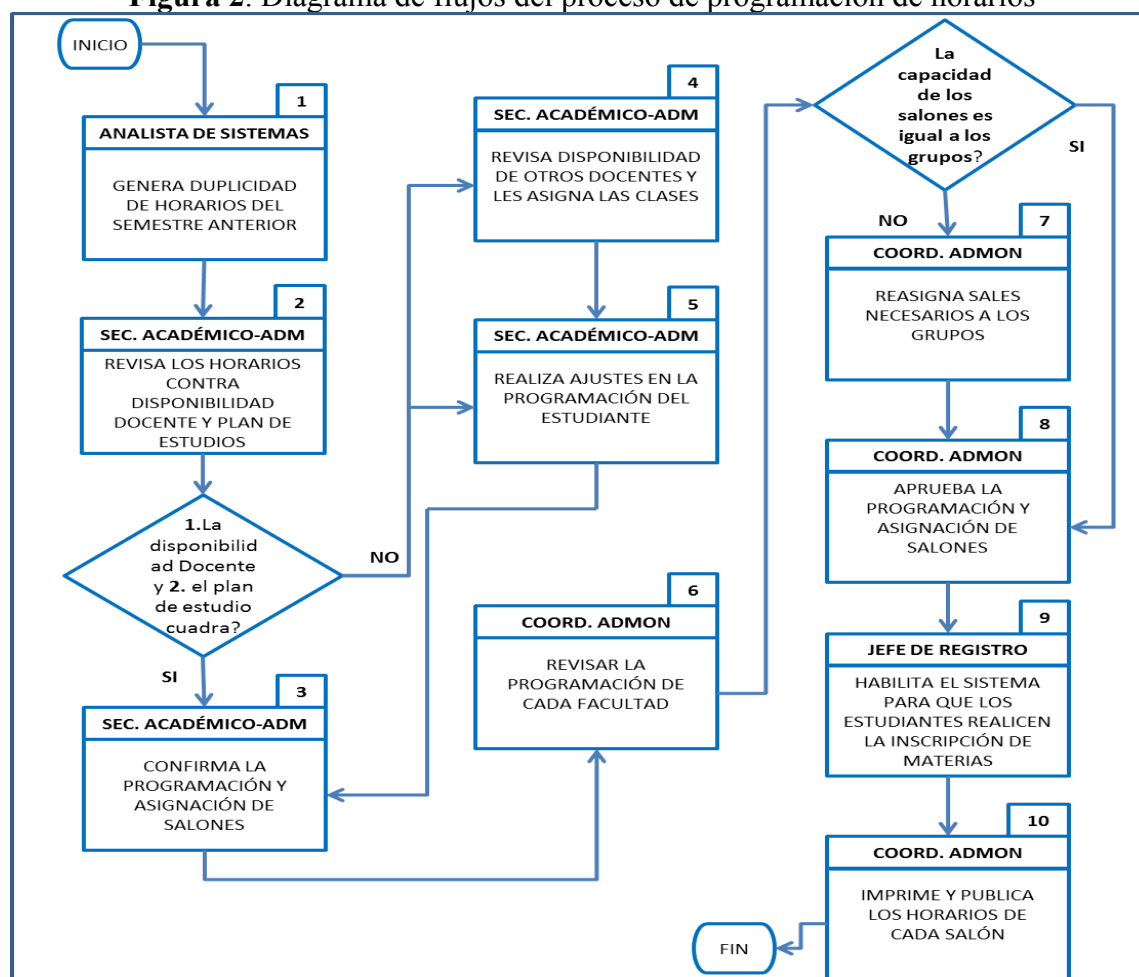
Fuente: Autoría propia

Es requisito indispensable que estos modelos tomen en cuenta las características propias de la Universidad de La Sabana; por lo tanto, no era posible utilizar modelos anteriormente propuestos en la literatura pues, tal como se mencionó en la introducción de este artículo, esos modelos no resultan apropiados para la aplicación real en contextos institucionales particulares. Los modelos matemáticos empleados para el desarrollo del método de resolución del problema se presentan en anexo. El lector interesado en una presentación detallada de los modelos empleados puede contactar los autores de este artículo.

### 3. Comprensión del proceso actual y delimitación del estudio

En la actualidad, el proceso de programación de aulas de clase en la Universidad de La Sabana es administrado por la Dirección Administrativa. Con base en la información ingresada al sistema por las Secretarías Académico-Administrativas de cada facultad después del proceso de matrículas de los estudiantes, se asignan las aulas de manera manual. Posteriormente se revisan, también manualmente, las asignaciones de salones realizadas. Estas tareas toman entre 2 y 3 días por cada programa, consumiendo un total de 3 semanas para toda la universidad. Además, este proceso es totalmente dependiente de la experiencia de la persona que las realiza. La figura 2 muestra una gráfica que ilustra los flujos y actores involucrados en el proceso actual (manual) de programación de horarios.

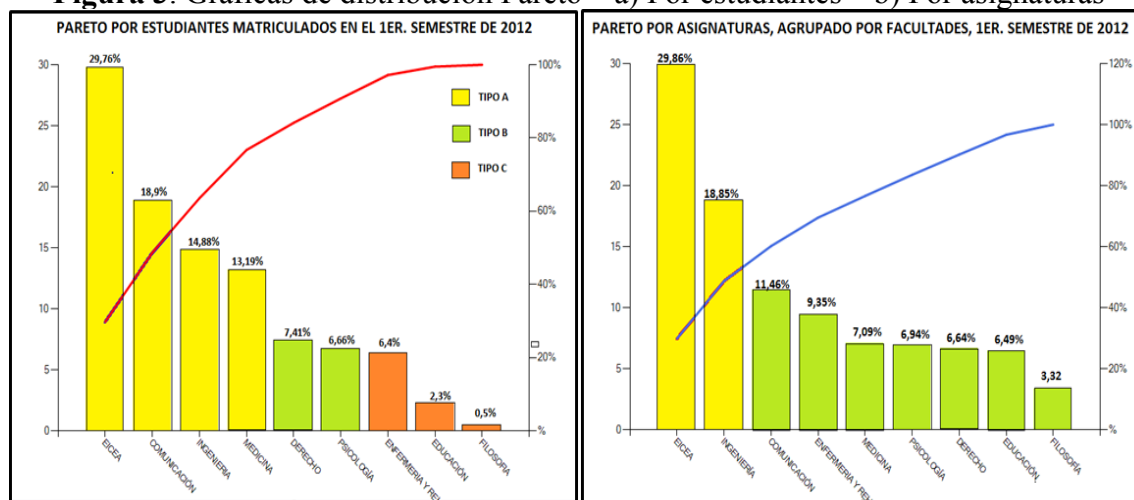
**Figura 2.** Diagrama de flujos del proceso de programación de horarios



Fuente: Torres Ovalle (2013)

Para definir el alcance del trabajo a desarrollar, se decidió realizar una prueba piloto lo suficientemente representativa de la complejidad del proceso. Se utilizó la información suministrada por la Jefatura de Registro Académico correspondiente al número de estudiantes matriculados en cada programa de pregrado en el primer semestre de 2012. A partir de esta información es posible obtener la distribución de estudiantes en los 20 programas de pregrado y en cada una de las facultades. La Figura 3 muestra el diagrama de Pareto de la distribución de estudiantes y asignaturas por facultades. Se observa que la Escuela Internacional de Ciencias Económicas y Administrativas (EICEA) y la Facultad de Ingeniería representan el 44.64% de la población estudiantil de pregrado en ese semestre académico. Es importante anotar que estas dos facultades suman 10 programas académicos de pregrado (esto es 50% del total de pregrados de la universidad). Adicionalmente, estos pregrados requieren una gran variedad de recursos físicos para sus asignaturas (aulas de clase, laboratorios especializados, talleres de cocina, etc.) y cuentan con gran número de asignaturas comunes, lo cual favorece la creación de múltiples grupos para una sola asignatura. Algunos de sus programas son también muy específicos y cuentan con pocos estudiantes (e.g. el programa de Administración de Mercadeo y Logística Internacionales), lo cual favorece el análisis del modelo a proponer en cuanto al “cruce” de asignaturas de un mismo semestre. Además, según se observa en la Figura 3, la Facultad de Ingeniería y la EICEA contribuyen con el 48.71% del total de asignaturas ofrecidas en la Universidad.

**Figura 3.** Gráficas de distribución Pareto – a) Por estudiantes – b) Por asignaturas



Fuente: Universidad de La Sabana, 2012.

A partir de este análisis se puede concluir que estudiar el problema de programación de horarios de clase y asignación de aulas (salones) para estas dos unidades académicas permite tener una gran representatividad para validar metodología y los modelos propuestos. De esta forma, se pueden obtener conclusiones para extrapolar en un futuro el uso de los modelos propuestos tanto para la universidad objeto de estudio como para otras universidades.

#### 4. Resultados y análisis

Esta sección presenta los resultados obtenidos de la implementación del modelo en la prueba piloto. Primeramente, se presentan, a manera de ejemplo, los resultados obtenidos para un programa académico. El mismo proceso y análisis se llevó a cabo para los 10 programas considerados en esta investigación. En una segunda parte, se presenta un consolidado de los resultados obtenidos, mostrando cómo cambian de manera global tanto la estructura de programación de los salones como su nivel de utilización. Adicionalmente se presentan los resultados obtenidos al considerar la flexibilidad percibida por los estudiantes. Finalmente, esta sección presenta los resultados de un análisis de sensibilidad desarrollado con el propósito de estudiar la robustez del modelo propuesto y proponer alternativas de mejora al sistema propio de gestión de la universidad.

##### 4.1. Ejemplo de horarios para un programa: Caso de Ingeniería Química

La solución al programa de Ingeniería Química se obtuvo trabajando con los laboratorios de Química y Biología, además, del salón C106, ubicado en el edificio C, el mismo donde se encuentran los laboratorios. Las siguientes tablas muestran la programación obtenida para un total 86 horas de estudio utilizando 3 aulas. En la Tabla 1 se presenta la programación del Laboratorio de Química. Se programaron en total 35 horas y las materias que fueron programas en bloques quedaron asignadas en el mismo salón, por ejemplo la asignatura de Termodinámica del Equilibrio de cuarto semestre que tiene una intensidad horaria de 3 horas semanales quedó programada el día miércoles en un bloque de 3 horas iniciando a las 3 p.m. y finalizando a 6 p.m. En la Tabla 2 se muestra la programación del Laboratorio de Biología. Se programaron en total 33 horas y en la tabla 10 está la

programación del salón C-106 con un total de 18 horas programadas, en ambas aulas se programan materias en bloques sin que cambien de salón.

**Tabla 1. Programación Programa Ingeniería Química – Laboratorio de Química**

HORA	LUNES		MARTES		MIÉRCOLES		JUEVES		VIERNES		SÁBADO	
	Cod.	Materia	Cod.	Materia	Cod.	Materia	Cod.	Materia	Cod.	Materia	Cod.	Materia
07:00 a.m.	M693	LAB. DE INGENIERIA QUIMICA III	M674	EMPREDIMIENTO Y NEGOCIACION	M673	METODOS NUMERICOS			M691	ING. DE SISTEMAS PROCESOS Y PRODUCTOS II		
08:00 a.m.	M695	PETROQUIMICA	M674	EMPREDIMIENTO Y NEGOCIACION	M673	METODOS NUMERICOS	M692	LAB. DE INGENIERIA QUIMICA III	M691	ING. DE SISTEMAS PROCESOS Y PRODUCTOS II		
09:00 a.m.	M669	FENOMENOS DE TRANSPORTE	M664	TALLER DE PENSAMIENTO Y METODO CIENTIFIC	M671	LAB. ANALISIS QUIMICO CUANTITATIVO	M674	EMPREDIMIENTO Y NEGOCIACION	M683	LAB. DE INGENIERIA QUIMICA II		
10:00 a.m.	M669	FENOMENOS DE TRANSPORTE	M664	TALLER DE PENSAMIENTO Y METODO CIENTIFIC	M691	ING. DE SISTEMAS PROCESOS Y PRODUCTOS II	M692	LAB. DE INGENIERIA QUIMICA III	M683	LAB. DE INGENIERIA QUIMICA II		
11:00 a.m.			M695	PETROQUIMICA			M669	FENOMENOS DE TRANSPORTE	M678	LAB. INGENIERIA QUIMICA I		
12:00 p.m.												
01:00 p.m.												
02:00 p.m.												
03:00 p.m.	M690	DINAMICA DE PROCESOS Y CONTROL	M684	LAB. DE INGENIERIA QUIMICA II	M666	TERMODINAMICA DEL EQUILIBRIO	M693	LAB. DE INGENIERIA QUIMICA III				
04:00 p.m.	M690	DINAMICA DE PROCESOS Y CONTROL	M679	LAB. INGENIERIA QUIMICA I	M666	TERMODINAMICA DEL EQUILIBRIO	M671	LAB. ANALISIS QUIMICO CUANTITATIVO				
05:00 p.m.	M690	DINAMICA DE PROCESOS Y CONTROL	M678	LAB. INGENIERIA QUIMICA I	M666	TERMODINAMICA DEL EQUILIBRIO	M679	LAB. INGENIERIA QUIMICA I				
06:00 p.m.												

Fuente: Autoría Propia

**Tabla 2. Programación Programa Ingeniería Química – Laboratorio de Biología**

HORA	LUNES		MARTES		MIÉRCOLES		JUEVES		VIERNES		SÁBADO	
	Cod.	Materia	Cod.	Materia	Cod.	Materia	Cod.	Materia	Cod.	Materia	Cod.	Materia
07:00 a.m.	M681	EVALUACION TEC ECO DE PROYECTOS Y GES DE PROYECTOS	M694	MODELACION Y SIMULACION ING. QUIMICA	M696	PROFUNDIZACION II	M694	MODELACION Y SIMULACION ING. QUIMICA	M681	EVALUACION TEC ECO DE PROYECTOS Y GES DE PROYECTOS		
08:00 a.m.	M665	CIENCIA DE LOS MATERIALES	M694	MODELACION Y SIMULACION ING. QUIMICA	M696	PROFUNDIZACION II	M670	FENOMENOS DE TRANSPORTE	M668	BIOLOGIA GENERAL		
09:00 a.m.	M665	CIENCIA DE LOS MATERIALES	M672	LAB. BIOLOGIA GENERAL	M696	PROFUNDIZACION II	M670	FENOMENOS DE TRANSPORTE	M668	BIOLOGIA GENERAL		
10:00 a.m.	M682	ING. DE SISTEMAS DE PROCESOS Y PRODUCTO I	M689	CONTAMINACION AMBIENTAL	M668	BIOLOGIA GENERAL	M670	FENOMENOS DE TRANSPORTE	M672	LAB. BIOLOGIA GENERAL		
11:00 a.m.	M675	INGENIERIA DE FENOMENOS DEL TRANSPORTE					M689	CONTAMINACION AMBIENTAL				
12:00 p.m.												
01:00 p.m.												
02:00 p.m.												
03:00 p.m.	M665	CIENCIA DE LOS MATERIALES	M697	SEMINARIO PROYECTO DE GRADO II	M688	BIOTECNOLOGIA	M675	INGENIERIA DE FENOMENOS DEL TRANSPORTE				
04:00 p.m.	M682	ING. DE SISTEMAS DE PROCESOS Y PRODUCTO I	M697	SEMINARIO PROYECTO DE GRADO II	M688	BIOTECNOLOGIA	M675	INGENIERIA DE FENOMENOS DEL TRANSPORTE				
05:00 p.m.	M682	ING. DE SISTEMAS DE PROCESOS Y PRODUCTO I	M687	SEMINARIO DE PROYECTO GRADO I			M687	SEMINARIO DE PROYECTO GRADO I				
06:00 p.m.												

Fuente: Autoría Propia

En cada salón o laboratorio se pueden programar como máximo 64 horas de estudio. Es así posible medir el uso de la capacidad instalada. Para el caso del programa de Ingeniería Química, se presenta la Tabla 3 donde se aprecia que el Laboratorio de Química se utiliza un 54.69% con 35 horas, seguido por el Laboratorio de Biología con 51.56% y finalmente el salón C-106 tan solo tiene 18 horas programadas lo que indica que se utiliza un 28.13%.

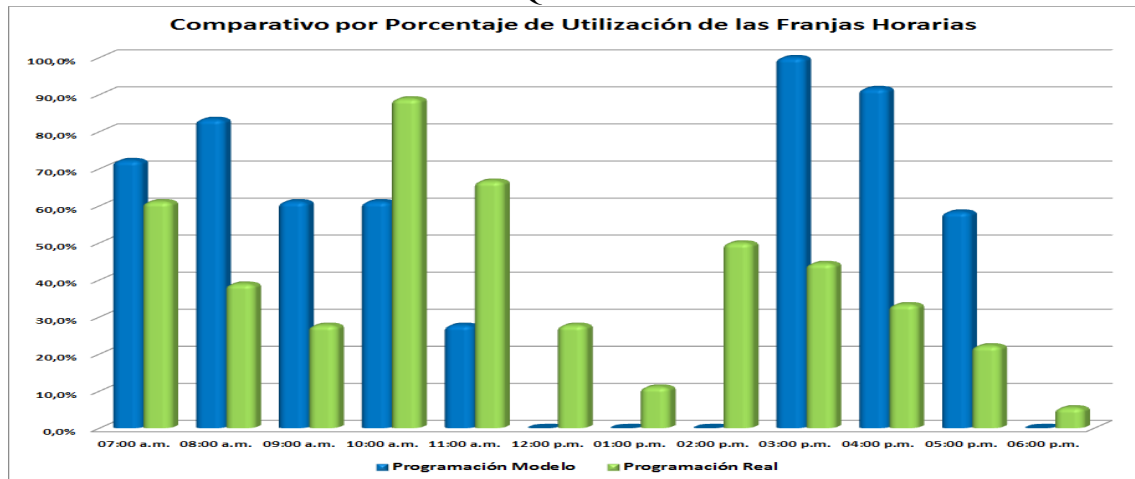
**Tabla 3.** Uso de la Capacidad Instalada I.Q.

Salón	H/ Semana	% Ocupación
LAB. QUIMICA	35	54,69%
LAB. BIOLOGÍA	33	51,56%
L45 - C106	18	28,13%

Fuente: Autoría Propia

Para la comunidad universitaria es importante contar con tiempo libre para disfrutar de la hora de almuerzo, compartir con los compañeros y aprovechar la gran ventaja de trabajar o estudiar en un campus universitario. Por esta razón la metodología empleada realiza una programación que cumpla con esta restricción blanda, que aunque no hace parte fundamental del problema sí se vio necesario involucrarla. En la figura 4 se realiza un comparativo del uso de las franjas horarias entre la programación real y los resultados del modelo propuesto. Se observa que la propuesta del modelo permite tener libres las franjas comprendidas entre las 12 p.m. y 2 p.m., mientras que la programación real tiene programados 4 grupos a las 12 p.m. y 3 grupos a la 1 p.m. Además, la programación del modelo propuesto tiene la mayor concentración en las horas de la tarde, después de almuerzo y en las primeras franjas de la mañana. Es de notar que la Universidad dedica las jornadas de viernes en la tarde y sábados para la operación de los posgrados. Por esta razón, estos espacios horarios son restringidos a menos que los docentes asignados solo tengan disponibilidad en estas franjas.

**Figura 4.** Comparativo por porcentaje de uso de las franjas – Programa de Ingeniería Química



Fuente: Torres Ovalle (2013)

Finalmente se realiza un cuadro comparativo entre la situación real y la propuesta por el modelo (ver Tabla 4). Se observa una mejora de 26.7% empleando el modelo. Esto indica que la solución y la metodología propuesta son más eficientes que la programación real. También se comparan la cantidad de materias que son programadas en bloques de 2, 3 y 4 horas y las que no son programadas en bloques.



**Tabla 4.** Comparación entre la Programación Real y el Modelo Propuesto - I.Q.

	Programación Real		Modelo Propuesto	
	Total de materias	% del total de materias	Total de materias	% del total de materias
No bloques	1	2,9%	11	31,4%
Bloque de 2 Horas	34	97,1%	19	54,3%
Bloque de 3 Horas	0	0,0%	5	14,3%
Bloque de 4 Horas	0	0,0%	0	0,0%
<b>Valor de la Solución</b>	<b>288</b>		<b>211</b>	

Fuente: Autoría Propia

## 4.2. Resultados consolidados

A continuación se presenta un análisis consolidado de la programación obtenida por el modelo propuesto y un breve comparativo con la programación real de la Universidad de La Sabana. La Tabla 5 presenta la comparación entre las asignaturas programadas en bloques horarios, mostrando el comportamiento y la respectiva variación de la programación de cada bloque horario. Se puede ver que el modelo programó 4 bloques de 4 horas (debido a disponibilidad de estos docentes, en este caso se relajó la restricción de no programar en más de 3 horas). La última fila de la tabla muestra los valores de la función objetivo. El modelo permite obtener horarios de clase que son 35.6% mejores que la programación actual de la universidad, según este indicador. Este importante cambio se debe principalmente a que el enfoque propuesto en esta investigación logra obtener la solución óptima del problema.

**Tabla 5.** Comparación entre las programaciones real y propuesta.

	Programación Real		Modelo Propuesto		Dif.
	Total de materias	% del total de materias	Total de materias	% del total de materias	
No bloques	49	7,0%	149	21,4%	204,1%
Bloque de 2 Horas	554	79,5%	433	62,1%	-21,8%
Bloque de 3 Horas	76	10,9%	111	15,9%	46,1%
Bloque de 4 Horas	17	2,4%	4	0,6%	-76,5%
Bloque de 5 Horas	1	0,1%	0	0,0%	-100,0%
<b>Valor de la Solución</b>	<b>7,421</b>		<b>4,782</b>		<b>-35,6%</b>

Fuente: Autoría, Universidad de La Sabana, 2012.

La Tabla 6 presenta el comparativo consolidado de uso de las franjas. Se observa que, para la solución obtenida con el modelo, las franjas horarias de mayor utilización, en su orden son: de 8:00 a 9:00 a.m. (91.3%), de 4:00 a 5:00 p.m. (91%) y de 7:00 a 8:00 a.m. (87.4%), mientras que en la programación real, la franja horaria entre 10:00 y 11:00 a.m. es la de mayor utilización (62.5%). Es de notar, además, que la programación del modelo propuesto permite disminuir notablemente el uso en las franjas del mediodía, utilizando tan solo un 9.8% de los espacios horarios entre 12 p.m. a 2 p.m. Esto permite cumplir con la restricción blanda (propia de la Universidad) de evitar programar clases en estas franjas para permitir que la comunidad universitaria tenga el tiempo para almorzar o disfrutar del campus.

**Tabla 6.** Comparación consolidada del uso de las franjas horarias.

HORA	07:00 a.m.	08:00 a.m.	09:00 a.m.	10:00 a.m.	11:00 a.m.	12:00 p.m.	01:00 p.m.	02:00 p.m.	03:00 p.m.	04:00 p.m.	05:00 p.m.	06:00 p.m.
Programación Real	61,2%	60,4%	45,0%	62,5%	47,2%	43,2%	43,6%	45,7%	39,2%	37,8%	30,3%	16,1%
Programación Modelo	87,4%	91,3%	75,6%	68,6%	43,6%	11,6%	8,1%	17,3%	82,0%	91,0%	68,3%	30,8%

Fuente: Autoría, Universidad de La Sabana, 2012.

### **4.3. Análisis desde la perspectiva de los estudiantes**

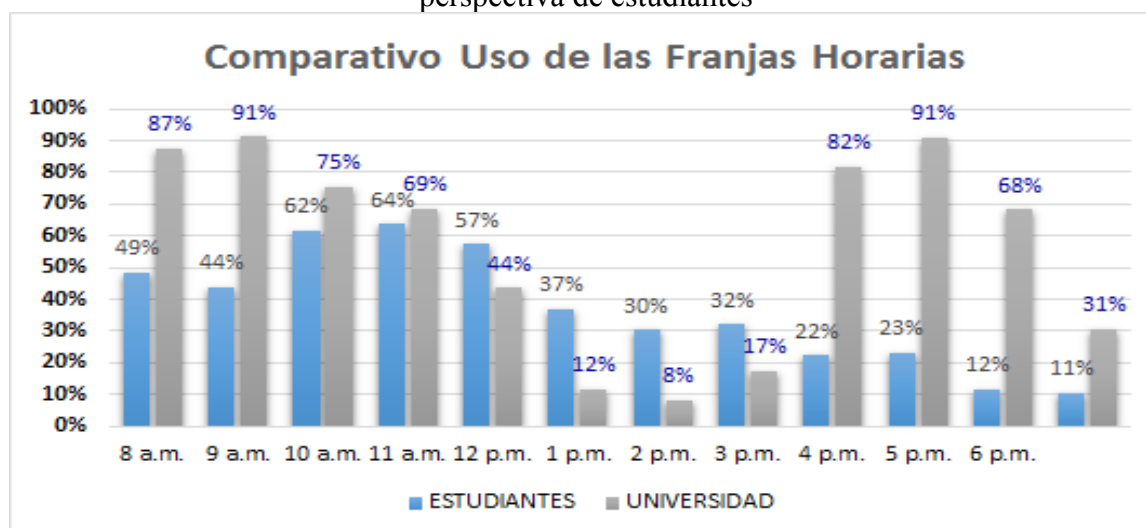
Con base en los resultados de encuestas realizadas entre los estudiantes, se pudo abordar la perspectiva de los estudiantes para el diseño de horarios de clases y así incluir estas condiciones en el modelo de optimización. A manera de ejemplo, esta perspectiva permitió incluir preferencias como son que la mayor cantidad de asignaturas sean programadas en las primeras franjas del día (entre 7 a.m. y 11 a.m.) o que no se programe ninguna materia los días viernes y sábados. Otro aspecto importante en este enfoque es que se incluyen las materias de inglés y humanidades. El nuevo conjunto de materias a programar cambia de 415 a 504 (incremento de 21.4% con respecto al experimento anterior). Este conjunto de asignaturas transversales no fue tenido en cuenta en la metodología de programación de la Universidad porque por políticas de flexibilidad curricular se pretende que dichas materias sean puestas a disposición de toda la comunidad universitaria en diferentes grupos y con variedad de horarios, de tal manera que los estudiantes se puedan inscribir al grupo de preferencia que se acomode a sus horarios.

A manera de ejemplo, la figura 5 presenta una comparación entre el uso de las franjas horarias empleando ambas perspectivas. Se evidencia la influencia que ejerce la estrategia de ponderar las franjas horarias (asignar un valor a cada una de las franjas horarias de acuerdo con las preferencias). Es importante anotar que en el caso desde la visión de la Universidad, el valor asignado a las franjas fue dado de acuerdo con algunos criterios institucionales (por ejemplo, que la mayor cantidad de materias fuesen programadas en los bloques entre 7 a.m. y 11 a.m. y de 2 p.m. a 5 p.m.), mientras que desde la perspectiva de los estudiantes, las encuestas revelaron que el bloque de mayor preferencia para tener clase se encuentra entre las 10 a.m. y 12 p.m. Además, en los dos enfoques se planteó que en lo posible se dejaran libres las franjas del medio día. De tal manera que en las dos metodologías se consigue cumplir con esta condición que aunque no es propia del problema, si es ideal su cumplimiento para el caso de la Universidad de La Sabana.

## **5. Discusión, conclusiones y perspectivas**

Este artículo estudió el problema de programación de horarios y asignación de salones de clases para la Universidad de La Sabana, Chía, Colombia. Debido a la complejidad del problema, se tomaron como prueba piloto los 10 programas de pregrado de la Escuela Internacional de Ciencias Económicas y Administrativas y de la Facultad de Ingeniería, en los cuales se encuentra el 44.64% de los estudiantes inscritos en la universidad en el semestre de 2012-1 (semestre base para el análisis y comparación con la programación real). También, en estas facultades se tiene variedad de requerimientos de recursos académicos (e.g., talleres de alimentos, laboratorios) y administrativos. Esto permitió tener los elementos suficientes para analizar una situación con todas las características propias del problema propio de la universidad bajo estudio. Se buscaba presentar una metodología basada en optimización para solucionar el problema y mejorar el uso de la capacidad instalada en la universidad. Adicionalmente, este artículo presentó la evaluación de la flexibilidad de los horarios propuestos desde la perspectiva de los estudiantes.

**Figura 5.** Comparación del uso de franjas horarias – perspectiva Universidad versus perspectiva de estudiantes



Fuente: Autoría Propia

En este punto es pertinente resaltar que, como parte del proceso, el resultado del trabajo fue validado a través de un taller de trabajo (workshop) al interior de la universidad con un grupo de personas directamente vinculadas al de asignación de horarios, aulas y profesores. Como resultado de la reunión se encontró viable el uso de este tipo de metodologías, considerando algunas otras variables adicionales que no fueron consideradas en el modelo actual debido a la delimitación inicial del trabajo de investigación. Este punto es importante en cuanto se puede apreciar que este trabajo contribuye también a disminuir la distancia que existe entre los desarrollos teóricos y las necesidades reales de las instituciones educativas, tal como se explicó al inicio de este artículo.

A partir del trabajo realizado, se abren varias perspectivas de investigación. Un punto importante a tener en cuenta y que también se evidenció en este trabajo, es la necesidad de generar herramientas que permitan recopilar la información de parte de los docentes (por ejemplo, disponibilidad) con eficiencia, puesto que en la mayoría de los casos esta información se recolecta manualmente en las Facultades. Esta información alimentaría una base de datos que se convertiría en insumo para el modelo o para algún otro desarrollo informático.

### Agradecimientos

Aquí los agradecimientos que serán incluidos en la versión final con miras a preservar el anonimato de los autores

### Referencias

BURKE, E.K; PIETROVIC, S. Recent research directions in automated timetabling. European Journal of Operational Research. 2002, vol. 140, pp. 266-280.

CARTER, M.W; LAPORTE G. Recent developments in practical course timetabling. In BURKE, E.K; CARTER, M.W. (eds.), Lecture Notes in Computer Science. Heidelberg: Springer-Verlag, 1998, vol. 1408, pp. 3-19.

HERNÁNDEZ, R; MIRANDA, J; REY, P. Programación de horarios de clases y asignación de salas para la Facultad de Ingeniería de la Universidad Diego Portales mediante un enfoque de programación entera. Revista de Ingeniería de Sistemas. 2008, vol. XXII, pp. 121-141.

MCCULLAM, B. A perspective on bridging the gap between theory and practice in university timetabling. In BURKE, E.K., RUDOVÁ, H. (eds.). Lecture Notes in Computer Science. Berlin: Springer-Verlag, 2007, vol. 3867, pp. 3-23.

PILLAY, N. A survey of school timetabling research. Annals of Operations Research. 2013. In press, DOI: 10.1007/s10479-013-1321-8.

SCHAERF, A. A survey of automated timetabling. Artificial Intelligence Review. 1999, vol. 13, pp. 87-127.

## A. Anexos

Esta sección de anexos presenta los modelos matemáticos empleados en la resolución del problema, tanto desde la perspectiva de la universidad (Anexo A.1) como desde la perspectiva de los estudiantes (Anexo A.2.)

### A.1. Modelo de optimización con la perspectiva de la universidad:

#### Conjuntos

**I = franjas horarias {F1, F2, ..., F64}**

**J = materias (cada elemento referencia un grupo de cada materia {M1, M2, M3 ...})**

**L = Salones disponibles {L1, L2, ..., L53}**

**K = profesores disponibles {P1, P2, ..., P276}**

**M = semestre al que puede pertenecer una materia {S1, S2, ..., S10}**

**N = Días hábiles {D1, D2, ..., D6}**

#### Parámetros

**INTH<sub>(J)</sub> = Número de franjas horarias que debe tener la materia J**

**TG<sub>(J)</sub> = Número de estudiantes esperados en la materia J**

**TS<sub>(L)</sub> = Capacidad instalada (en número de estudiantes) del salón L**

**MS<sub>(J,M)</sub> = Matriz de 1 y 0; 1 si la materia J pertenece al semestre M 0 sino**

**MP<sub>(J,K)</sub> = Matriz de 1 y 0; 1 si la materia J la dicta el profesor K 0 sino**

**FD<sub>(I,N)</sub> = Matriz de 1 y 0; 1 si la franja I es del día N 0 sino**

**FM<sub>(J,I)</sub> = Matriz de 1 y 0; 1 si en la franja I se puede dictar la materia J 0 sino**

**FP<sub>(I,K)</sub> = Matriz de 1 y 0; 1 si en la franja I se cuenta con el profesor K 0 sino**

**CFM<sub>(J,I)</sub> = Matriz con la ponderación de las franjas horarias con valores entre 2 y 9**

**MA<sub>(J,L)</sub> = 1 si la materia j se puede dictar en estos salones, 0 sino**

#### VARIABLES DE DECISIÓN

**$X_{I,J,L} = \begin{cases} 1 & \text{si en la franja horaria I es asignada la materia J al salón L} \\ 0 & \text{si en la franja horaria I NO es asignada la materia J al salón L} \end{cases}$**

#### Función objetivo

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

La función objetivo busca minimizar la suma de todas las posibles asignaciones multiplicada por la matriz de costos de las franjas horarias. Esta matriz representa la ponderación de cada franja en cada materia según la disponibilidad de los docentes.

### Restricciones

Cada salón en una franja horaria solo puede ser asignado máximo una vez, garantizando que no se programen dos materias al mismo tiempo en el mismo salón.

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

Una asignatura sólo pueda ser programada a lo sumo una vez en una franja horaria.

$$\sum_{L \in MA} X_{IJL} \leq 1; \forall I \in FM, \forall J \quad (3)$$

Toda asignatura se programe según su intensidad horaria semanal, dando cumplimiento a lo estipulado en el plan de estudios de cada programa académico.

$$\sum_{I \in FM} \sum_{L \in FM \in MA} X_{IJL} = INT_H_j; \forall J \quad (4)$$

Asignación de salones con capacidad suficiente para recibir al número de estudiantes previstos.

$$X_{IJL} * TG_j \leq TS_{L}; \forall I \in MF, \forall J \in MF, \forall L \quad (5)$$

Prohibición de programar un mismo docente en dos franjas horarias distintas.

$$\sum_{J \in MF} \sum_{L \in MA} X_{IJL} \leq 1; \forall K, \forall I \in MF \quad (6)$$

Prohibición de programar las materias de un mismo semestre en el mismo horario.

$$\sum_{J \in MS} \sum_{L \in MA} X_{IJL} \leq 1; \forall M, \forall I \quad (7)$$

Máximo bloques de 3 horas por cada materia (restricciones pedagógicas)

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

## A.2. Modelo de optimización con la perspectiva de los estudiantes:

### Conjuntos principales

i = franjas horarias {F1, F2, ..., F64}

j = materias (cada elemento referencia un grupo de cada materia {M1, M2, M3...})

K = profesores disponibles {K1, K2, ..., K386}

L = Salones disponibles {L1, L2, ..., L53}

### Conjuntos auxiliares

m = semestre al que puede pertenecer una materia {S1, S2, ..., S10}

n = días hábiles {D1, D2, ..., D6}

## Parámetros

$INTH_{(j)}$  = Número de asignaciones por materia  $j$

$TG_{(j)}$  = Número máximo de estudiantes por materia  $j$

$TS_{(L)}$  = Capacidad (número máximo de estudiantes) por salón  $L$

$PB_{(j)}$  = Bloques horarios por materia  $j$  (1 si se debe programar en máximo bloques de 3 horas, 0 si no se puede programar por disponibilidad del profesor)

$MS_{(j,m)}$  = Matriz de 1 y 0; 1 si la materia  $j$  pertenece al semestre  $m$ , 0 si no

$MP_{(j,k)}$  = Matriz de 1 y 0; 1 si la materia  $j$  la dicta el profesor  $K$ , 0 si no

$FD_{(i,n)}$  = Matriz de 1 y 0; 1 si la franja  $i$  pertenece al día  $n$ , 0 si no

$FP_{(i,k)}$  = Matriz de 1 y 0; 1 si en la franja  $i$  dicta el profesor  $K$ , 0 si no

$FM_{(i,j)}$  = Matriz de 1 y 0; 1 si en la franja  $i$  se puede dictar la materia  $j$ , 0 si no

$CFM_{(i,j)}$  = Matriz con la ponderación de las franjas horarias con valores entre 1 y 9

## Variables de decisión

$X_{(i,j,k,l)} = 1$  si en la franja horaria  $i$  asignó la materia  $j$  con el profesor  $k$  en el salón  $l$ , 0 si en la franja horaria  $i$  NO asignó la materia  $j$  con el profesor  $k$  en el salón  $l$

## Función objetivo

$$\text{Min } z \sum_i \sum_j \sum_k \sum_l CFM_{(i,j)} * X_{(i,j,k,l)} \quad \forall CFM_{(i,j)} > 0, \quad FM_{(i,j)} > 0, \quad MP_{(j,k)} > 0 \quad (1a)$$

La función objetivo está definida con el fin de minimizar la suma de todas las posibles asignaciones de franja horaria  $i$ , materia  $j$ , profesor  $k$  y salón  $l$ , multiplicada por la matriz de costos de las franjas horarias, la cual fue definida a partir de la ponderación de CFM, para cada una de las franjas horarias y días de la semana, dando un peso bajo a las franjas más deseables para programar y por el contrario un peso alto a las franjas donde no se desea programar.

## Restricciones

Asignación de una y sólo una materia  $j$  en una misma franja horaria  $i$  un profesor  $k$  y un salón  $l$ .

$$\sum_j x_{i,j,k,l} \leq 1 \quad \forall i, l, k \quad (2a)$$

Un salón sólo puede ser ocupado máximo una vez en una misma franja horaria  $i$ .

$$\sum_l \sum_k x_{i,j,k,l} \leq 1 \quad \forall i, j, FM_{(i,j)} > 0 \quad (3a)$$

Cumplimiento de la intensidad horaria semanal de cada asignatura.

$$\sum_{i \forall FM_{(i,j)} > 0} \sum_k \sum_l x_{i,j,k,l} = INTH_j \quad \forall j \quad (4a)$$

Restricción de capacidad de cada salón

$$x_{i,j,k,l} * TG_j \leq TS_l \quad \forall i, j, k, l, FM_{i,j} > 0 \quad (5a)$$

Cada profesor es asignado a una y solo una franja horaria  $i$  para una sola asignatura en un salón  $l$ .

$$\sum_{j, MP_{j,k} > 0} \sum_l \leq 1 \quad \forall i, k, FP_{i,k} > 0 \quad (6a)$$

Programación en diferentes horarios de las materias de un mismo semestre.

$$\sum_{j \forall MS_{j,m} > 0} \sum_l \sum_k x_{i,j,k,l} \leq 1 \quad \forall m, i \quad (7a)$$

Máximo 3 horas de clase seguidas por cada asignatura (restricción propia de la Universidad).

$$\sum_{i \forall FD_{i,n} > 0} \sum_l \sum_k x_{i,j,k,l} \leq 3 \quad \forall n, j, PB_j > 0 \quad (8a)$$

Asignación de profesores según su posibilidad de dictar la materia.

$$\sum_i x_{i,j,k,l} \leq MP_{j,k} \quad \forall j, k, l \quad (9a)$$

Restricción de disponibilidad horaria de los profesores

$$\sum_j x_{i,j,k,l} \leq FP_{i,k} \quad \forall i, k, l \quad (10a)$$

**Palabras clave:** Programación de clases, asignación de salones, gestión académica.

Administrador Financiero y de Sistemas, Fundación Universitaria Agraria de Colombia, Bogotá, Colombia. Magíster en Gerencia de Operaciones, Universidad de La Sabana, Chía, Colombia. Profesional Dirección de Currículo, Universidad de La Sabana, Chía, Colombia. Correo electrónico: camilo.torres@unisabana.edu.co

<sup>2</sup> Ingeniero Industrial, Universidad del Norte, Barranquilla, Colombia. Doctor en ingeniería industrial, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne y Université Jean Monnet, Saint-Etienne, Francia. Diploma postdoctoral de Habilitación para Dirigir Investigaciones (HDR), INSA de Lyon y Universidad Claude Bernard, Lyon, Francia. Profesor Titular, Universidad de La Sabana, Chía, Colombia. Correo electrónico: jairo.montoya@unisabana.edu.co

<sup>3</sup> Ingeniero Industrial, Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, Colombia. Maestría “Optimisation et Sûreté des Systèmes”, Université de Technologie de Troyes, Francia. Director del programa Administración de Mercadeo y Logística Internacionales, Universidad de La Sabana, Chía, Colombia. Correo electrónico: carlos.quintero5@unisabana.edu.co

<sup>4</sup> Médico, Universidad del Rosario, Bogotá, Colombia. Maestría en Ciencias, Instituto Nacional de Salud Pública, Colombia. Directora de Currículo, Universidad de La Sabana, Chía, Colombia. Correo electrónico: monica.castilla@unisabana.edu.co