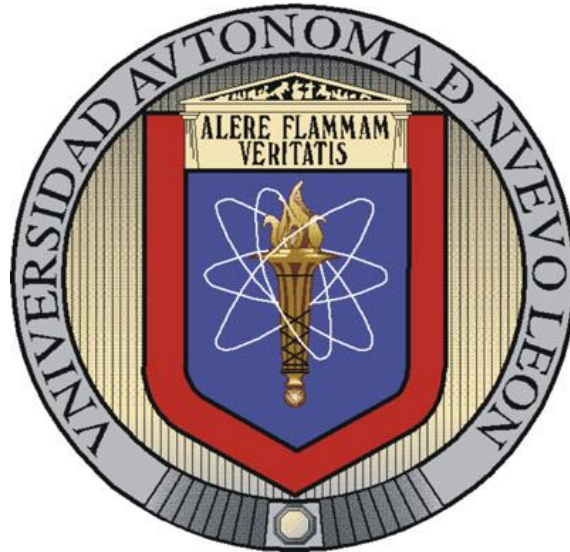


**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN**  
**FACULTAD DE CONTADURÍA PÚBLICA Y ADMINISTRACIÓN**



**ANÁLISIS PARAMÉTRICO PARA PROBLEMAS DE ADMINISTRACIÓN DE  
RECURSOS ACADÉMICOS**

**PRESENTA**

**ALVARO FRANCISCO SALAZAR GONZALEZ**

**DISERTACIÓN PRESENTADA COMO REQUISITO PARA OBTENER EL GRADO DE  
DOCTOR EN FILOSOFÍA CON ESPECIALIDAD EN ADMINISTRACIÓN**

**JUNIO, 2019**



# **UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN**

**FACULTAD DE CONTADURÍA PÚBLICA Y ADMINISTRACIÓN**

**CENTRO DE DESARROLLO EMPRESARIAL Y POSGRADO**

## **ANÁLISIS PARAMÉTRICO PARA PROBLEMAS DE ADMINISTRACIÓN DE RECURSOS ACADÉMICOS**

**DISERTACIÓN PRESENTADA POR**

**ALVARO FRANCISCO SALAZAR GONZALEZ**

**COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE DOCTOR EN FILOSOFÍA CON ESPECIALIDAD EN ADMINISTRACIÓN**

**San Nicolás de los Garza, Nuevo León, México**

**Junio de 2019**

ANÁLISIS PARAMÉTRICO PARA PROBLEMAS DE ADMINISTRACIÓN DE RECURSOS  
ACADÉMICOS

Aprobación de la Tesis por el Comité Doctoral:

---

Dr. Jesus Fabián López Pérez  
Presidente

---

Dr, Arturo Tavizón Salazar  
Secretario

---

Dra. María de Jesús Araiza Vázquez  
Vocal 1

---

Dra. Roxana Saldívar del Angel  
Vocal 2

---

Dr. José Felipe Ramírez Ramírez  
Vocal 3

## DECLARACIÓN DE AUTENTICIDAD

Declaro solemnemente que el documento que presento a continuación es producto de mi propio intelecto y trabajo, además tengo conocimiento de que no contiene material previamente publicado o escrito por otro autor, a excepción de aquellos materiales o ideas que por ser de otras personas les he dado el debido reconocimiento y los he citado en las referencias.

Igualmente, declaro que tampoco contiene material que haya sido aprobado para el otorgamiento de cualquier otro grado o diploma de alguna universidad o institución de educación superior.

Nombre: Alvaro Francisco Salazar Gonzalez

Fecha: Junio 2019

Firma: \_\_\_\_\_

## Dedicatoria

A mis abuelos, quienes espero que tengan la paz de saber que son recordados con gran amor y agradecimiento.

A mis padres, por todo su esfuerzo y cariño.

A mi hija, por enseñarme lo que es el amor y la dicha de ver el mundo nuevamente a través de los ojos de una vida que inicia, y a asombrarme de las pequeñas cosas que conforman la verdadera felicidad.

Y, muy especialmente, a mi amada esposa; quien creyó en mi cuando en una época que me era tan difícil, coincidimos; y tuvo el valor y el amor para, juntos, formar un hogar al cual acudo al final de cada jornada y confirmo que cada esfuerzo vale la pena.

## Agradecimientos

Agradezco, con gran admiración, a mi director de tesis: el Dr. Fabián López por su paciencia, apoyo incondicional y su sobresaliente voluntad para ayudar y enriquecer la formación académica de los que tenemos el privilegio de contar con su apoyo. Gracias por confiar en mí y guiarme en esta experiencia que sin duda marca un hito en mi vida.

También agradezco al Dr. Arturo Tavizón y a la Dra. María de Jesús Araiza por sus invaluable aportaciones y orientación en momentos de duda, y por el gran ejemplo que son para quienes incursionan en el campo de la investigación. A la Dra. Roxana Saldívar y al Dr. Felipe Ramírez por su impagable ayuda dentro del trabajo académico y de investigación realizado.

Agradezco a mis compañeros de la generación doctoral por su amistad y por hacer más llevadero y ameno este proyecto.

No omito agradecer a las autoridades académicas de la Facultad de Contaduría Pública y Administración de la Universidad Autónoma de Nuevo León por su ayuda en este proyecto, así como al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por el apoyo brindado para concluir este nivel académico.

# Tabla de Contenidos

Resumen .....	1
Introducción .....	2
Capítulo 1. Naturaleza y dimensión del estudio .....	5
1.1 Antecedentes del problema a estudiar.....	5
1.2 Planteamiento del problema de investigación.....	7
1.2.1 Antecedentes teóricos del fenómeno a estudiar. ....	7
1.2.2 Mapa Conceptual del planteamiento del problema. ....	17
1.3 Pregunta central de investigación .....	17
1.4 Objetivo general de la investigación .....	18
1.4.1 Objetivos metodológicos de la investigación.....	18
1.4.2 Objetivos específicos.....	18
1.5 Hipótesis general de investigación.....	18
1.6 Hipótesis Nula .....	19
1.7 Metodología .....	19
1.8 Justificación y aportaciones del estudio.....	20
1.8.1. Justificación práctica. ....	20
1.8.2. Justificación teórica. ....	20
Capítulo 2. Marco teórico.....	20
2.1. Contexto administrativo y de toma de decisiones.....	21
2.1.1. Taxonomía matemática del problema. ....	23
2.2. Variable dependiente .....	25
2.2.1. Marco teórico de la variable dependiente Calidad de la solución obtenida.....	25
2.3. Marco teórico de las variables independientes .....	27
2.3.1. Variable independiente X1: Tamaño de la instancia. ....	28
2.3.2. Variable independiente X2: Afinidad de los docentes contra las materias a impartir. ....	28
2.3.3. Variable independiente X3: Disponibilidad de los docentes.....	28
2.4 Métodos de solución .....	29
2.4.1. Método heurístico.....	29
2.4.2. Método exacto.....	29
2.4.3. Algoritmos genéticos .....	30
2.5. Hipótesis específicas y/o Operativas .....	35
2.5.1. Hipótesis de estudio. ....	35
2.5.2. Hipótesis operativas de investigación. ....	35

2.5.2. Modelo gráfico de la hipótesis.....	35
2.5.3. Modelo de relaciones teóricas con las hipótesis. ....	36
Capítulo 3. Estrategia metodológica.....	37
3.1. Tipo y diseño de la investigación.....	37
3.1.1 Tipo de investigación.....	37
3.2 Universo del estudio.....	37
3.2.1. Unidad de análisis. ....	37
3.2.2. Tamaño de la muestra.....	38
3.3 Proceso de medición.....	39
3.4 Métodos de análisis.....	43
Capítulo 4. Análisis de resultados.....	44
4.1. Descripción del modelo matemático estudiado.....	45
4.2. Planteamiento del modelo matemático de optimización.....	46
4.3. Operacionalización de las variables de estudio.....	49
4.3.1. Descripción de las variables.....	49
4.3.2. Grados de manipulación de las variables independientes. ....	50
4.4. Resultados.....	52
4.4.1. Resultados de las pruebas de ejecución.....	52
4.4.2. Análisis exploratorio gráfico.....	53
4.4.3. Análisis estadístico mediante pruebas de hipótesis.....	55
4.4.4. Análisis estadístico mediante regresión lineal.....	57
4.5. Comprobación de Hipótesis.....	59
4.5.1. Hipótesis Nula.....	59
4.5.2. Hipótesis Específicas.....	59
5. Conclusiones y discusión.....	61
Referencias bibliográficas.....	63
Anexo A: Glosario.....	66



## Índice de tablas

Tabla 1 Factores participantes en el fenómeno a estudiar.....	13
Tabla 2 Criterios de asignación para recursos académicos.....	22
Tabla 3 Relaciones teóricas .....	36
Tabla 4 Representación estandarizada del experimento .....	41
Tabla 5 Descripción de las actividades del experimento.....	43
Tabla 6 Parámetros del modelo matemático.....	46
Tabla 7 Restricciones del modelo.....	48
Tabla 8 Operacionalización de las variables de estudio.....	49
Tabla 9 Resultados de las pruebas de ejecución .....	52
Tabla 10 Hipótesis nulas para las pruebas de hipótesis t .....	55
Tabla 11 Comprobaciones de hipótesis de diferencia de medias .....	56
Tabla 12 Variables introducidas al modelo de regresión lineal, método paso a paso.....	57
Tabla 13 Resumen del modelo de regresión lineal .....	58
Tabla 14 Tabla de coeficientes.....	58
Tabla 15 Variables excluidas.....	58
Tabla 16 Comprobación de las hipótesis específicas de la investigación.....	60

## Índice de figuras

Figura 1 Óptimo Local VS Óptimo Global.....	10
Figura 2 Literatura reciente encontrada y vinculada al tema.....	14
Figura 3 Mapa Conceptual del problema bajo estudio .....	17
Figura 4 Taxonomía matemática para problemas de timetabling universitarios .....	24
Figura 5 Operador de cruce simple de un algoritmo genético.....	33
Figura 6 Operador de mutación de un algoritmo genético .....	33
Figura 7 Modo de operación de un algoritmo genético simple.....	34
Figura 8 Modelo Gráfico .....	36
Figura 9 Diagrama de flujo del experimento.....	42
Figura 10 Media de ratios alcanzados por categoría de tamaño.....	53
Figura 11 Media de los ratios alcanzados por categoría de afinidad de los docentes .....	54
Figura 12 Media de los ratios alcanzados por categoría de disponibilidad de los docentes..	54

## Resumen

El presente trabajo de investigación tiene como objetivo ayudar a evaluar la conveniencia del uso del método metaheurístico de Algoritmos genéticos para la resolución de problemas de asignación de recursos académicos (Docentes, Aulas, Horas de clase y Asignaturas) común en muchas instituciones de educación superior a través del estudio del impacto de las características de tamaño de la instancia, disponibilidad de los docentes y la afinidad de docentes con materias en la resolución mediante la metaheurística referida comparando, mediante un proceso experimental, el tiempo requerido en encontrar una buena solución de asignación de los recursos y la optimalidad alcanzada. El principal interés por este tipo de estudio es debido a que, en específico, el tiempo de solución necesario para la resolución por métodos combinatorios de búsqueda exhaustiva suele incrementarse de manera exponencial conforme se incrementan la cantidad de opciones a evaluar; de allí el propósito de conocer los efectos estudiados en la aplicación del método de Algoritmos genéticos. Se encontraron indicios del impacto que la variación en cada uno de los parámetros tiene en el tiempo necesario para alcanzar una buena solución, lo cual ayudará a evaluar la conveniencia del uso de estas opciones de solución.

### Palabras clave

Administración académica; Recursos académicos; Asignación académica; Metaheurística; Algoritmos genéticos.

### Abstract

The aim of this research work is to help assess the convenience of using the metaheuristic method of genetic algorithms to solve problems for the allocation of academic resources (teachers, classrooms, class hours and subjects) common in many institutions of higher education. By studying the impact of: The size of the instance, the availability of teachers and the affinity of teachers with subjects in the results achieved through the referred metaheuristic and comparing, through an experimental process, the optimality reached, and the time required to find a good solution to assign these resources. The main interest for this type of study is that, specifically, the solution time needed for resolution by combinatorial methods of exhaustive search usually increases exponentially as the number of options to be evaluated increases; hence the purpose of knowing the effects studied in the application of the genetic algorithm's method. There were indications of the impact that the variation in each of the parameters has on the time necessary to reach a good solution, which will help to evaluate the convenience of using these solution options.

### Keywords

Academical management; Academical Resources; Academical assignments; Metaheuristics; Genetic Algorithms.

## Introducción

La presente investigación aborda la solución de problemas de asignación de recursos académicos que las instituciones de educación superior deben afrontar periódicamente. Dichos problemas pueden clasificarse en alguna de múltiples categorías, sin embargo, usualmente suelen consistir en problemas de tipo combinatorio en los cuales se busca obtener el mayor beneficio de las posibles formas de combinación de los referidos recursos académicos.

Múltiples estudios previos han permitido definir a los problemas de asignación de recursos académicos como pertenecientes al tipo *Class Teacher Timetabling Problem* (CTTP), los cuales analizan situaciones en las cuales se busca generar la mejor asignación de docentes con asignaturas en diferentes períodos de tiempo y distintos espacios físicos.

Los problemas de tipo CTTP se consideran como muy difíciles de resolver en términos de procesamiento de datos debido a que el tiempo de solución crece exponencialmente conforme la cantidad de combinaciones que deben ser analizadas se incrementan.

Ante la referida situación, se han buscado métodos de solución diferentes. Entre los cuales podemos referir los siguientes:

- a) Métodos Heurísticos. Son aquellos métodos que representan las soluciones encontradas mediante prueba y error y que suelen replicarse período tras período con la desventaja de implementar soluciones rígidas que no suelen adaptarse por completo a las variaciones estacionales que se puedan presentar.

- b) Métodos Exactos. Son aquellos métodos que buscan encontrar la mejor combinación posible de los recursos mediante métodos matemáticos exactos. La desventaja es que, como se mencionó previamente, su tiempo de solución se comporta de una manera exponencial convirtiéndose, cuando ese sea el caso, en una opción impráctica para los requerimientos de las organizaciones que buscan aplicarlos en sus casos de estudio
  
- c) Metaheurísticas. Son métodos de solución que se han desarrollado para lograr obtener una solución lo más cercana posible al óptimo absoluto. Esto último es debido a que no pueden garantizar alcanzar dicha solución, pero si una muy buena en un tiempo de cómputo razonable. Suelen basarse en emulaciones de la naturaleza desde procesos evolutivos, pasando por procesos físicos o por procesos similares a la manera en que las personas aprenden y refuerzan ciertas conductas benéficas y evitan conductas que les sean perjudiciales.

El motivo personal del autor para realizar la presente investigación consiste en la problemática enfrentada por las autoridades académicas administrativas de la escuela de educación superior donde labora y observar la cantidad de horas hombre dedicadas a la tarea, período tras período de realizar dicha asignación. Con esa motivación en mente, esta tesis analizará el desempeño de la metaheurística de algoritmos genéticos en la solución de problemas de asignación de recursos académicos y buscará, mediante un estudio estadístico, identificar el impacto que

tienen dos de los principales parámetros de ese tipo de problemas en los resultados que se obtienen mediante la referida metodología.

Los capítulos que integran el presente trabajo consisten en:

Capítulo I: Se presentan los antecedentes del problema, así como la pregunta central de investigación, los objetivos e hipótesis general de la misma y la justificación para realizar este estudio.

Capítulo II: Trata el marco teórico de la investigación que permitirá el tratamiento de la tesis al ubicarla dentro de un contexto académico de estudios relacionados y que soporten el análisis a realizar.

Capítulo III: Explica la estrategia metodológica que se aplicará para obtener los resultados deseados.

Capítulo IV: Presenta el análisis de los resultados obtenidos de aplicar los estudios metodológicos descritos en el capítulo anterior.

Capítulo V: Plantea las conclusiones a las que se logra llegar posteriores al análisis de los datos resultantes del trabajo de investigación.

## **Capítulo 1. Naturaleza y dimensión del estudio**

### **1.1 Antecedentes del problema a estudiar**

En las escuelas de educación superior, se enfrenta periódicamente el problema de la asignación de recursos académicos, tales como: Docentes, Asignaturas, Horarios y Aulas. Esa toma de decisiones ocurre en, prácticamente, todas las dependencias del referido tipo.

Esa toma de decisiones es, matemáticamente, muy compleja de resolver debido a la cantidad de combinaciones resultantes posibles. Ante esta situación, usualmente se recurre a repetir periódicamente plantillas de asignaciones anteriores, comprobadas empíricamente y sin una metodología científica; logrando de esta manera establecer dichas asignaciones. Esa forma de solución puede considerarse una Heurística, del griego εὕρισκειν, “hallar, inventar” y “-tico”(RAE, 2012); ya que consiste en buscar una solución aceptable mediante estimaciones y aproximaciones empíricas.

El anterior enfoque, permite hacer dos principales cuestionamientos:

- a) ¿Toma en cuenta las variaciones estacionales que se pueden presentar en cada período? Por las cuales entenderemos:  
Cambios en la disponibilidad de la planta docente,  
Disponibilidad de aulas, Matricula esperada de estudiantes,  
Cambios en las credenciales de la planta docente, etcétera
- b) ¿Es la mejor asignación posible de dichos recursos a la que se llega?

Debido a que es poco probable que estos dos cuestionamientos sean respondidos afirmativamente, cabe preguntarse por qué no es así.

Ha habido estudios que avalan la dificultad de generar una asignación optimizada de dichas soluciones, y denominan a dichos problemas como de *Timetabling*. Siendo aún más precisos, el nombre específico de ese tipo de problemas se conoce como de *Class-TeacherTimetablingProblem* (CTTP) (Burke, Elliman, Ford, & Weare, 1996).

La lectura de literatura científica da a entender que, a nivel internacional, las escuelas de educación superior enfrentan este problema y que se han hecho intentos de acudir a diversos mecanismos de solución desde hace algún tiempo y, dado que se han encontrado investigaciones recientes, se considera pertinente el abordarlo (Azimi, 2004; Carter & Burke, 1998; de Werra, 1985, 1997)

En lo que se conoce por parte del autor, respecto a México y en el caso concreto de la zona metropolitana de Monterrey, las referidas escuelas enfrentan la misma situación; lo que se conoce de primera mano es que la magnitud de la cantidad de combinaciones variará de acuerdo a las dimensiones de la organización. A mayor cantidad de alumnado, planta docente, espacios y horarios; mayor dificultad existe para establecer una asignación eficiente y que se obtenga en períodos prácticos de tiempo y justamente por ello es que el caso que se tomará como inspiración para el estudio, que es de la Facultad de Contaduría Pública y Administración de la Universidad Autónoma de Nuevo León, se considera lo suficientemente complejo y amplio para justificar la solución mediante métodos metaheurísticos. Los dos objetivos a alcanzar por parte de la solución, constituyen



las variables dependientes de este estudio: a)La optimalidad de la solución obtenida y b)El tiempo computacional requerido para llegar a ella. Esto se estudiará mediante la explicación de la relación entre ellas y los parámetros estudiados de los problemas de asignación de recursos académicos. Los referidos parámetros constituirán nuestras variables independientes en los experimentos a realizar, los cuales se realizarán mediante la manipulación de los mismos y el análisis estadístico de los efectos de dichas manipulaciones en las variables dependientes definidas previamente.

## **1.2 Planteamiento del problema de investigación**

Actualmente, en múltiples escuelas de educación superior, no se asegura la sensibilidad a los requerimientos estacionales para la asignación de recursos académicos requeridos por la administración de las escuelas; dichas asignaciones tienen como propósito el cumplir con la obligación de contar con ellas para ejercerlas en los períodos académicos, ocasionando con esto múltiples retrabajos hasta lograr obtener resultados funcionales que puedan ser aplicados o retrasos en la asignación de docentes a las asignaturas.

### **1.2.1 Antecedentes teóricos del fenómeno a estudiar.**

A ese efecto de apoyar en la toma de decisiones administrativas en general, se desarrolló la Ciencia de la Administración (Management Science); la cual es una rama interdisciplinaria de matemáticas aplicadas que utiliza métodos analíticos tales como modelado matemático, estadística y algoritmos numéricos con miras a mejorar la capacidad de toma de decisiones que enfrenta un administrador. La Ciencia de la administración ha sido identificada como “El uso en los negocios de la investigación de operaciones” por BeerStaford en su obra del mismo título (Staford, 1967).

Si bien lo referido en el apartado anterior trata una problemática actual al tratarse del caso de estudio de vigente al momento de realizar la actual propuesta de investigación; el problema de CTTP ha sido estudiado ya por bastante tiempo, ya que pertenece a una categoría de problemas combinatorios denominados de Timetabling, los cuales lidian con las decisiones de programar secuencias de recursos en períodos preestablecidos o secuencias definidas (Barraclough, 1965; Schmidt, 1980; Thompson, 1965).

Es teóricamente posible el definir una solución exacta para cualquier grado de complejidad de los problemas CTTP; sin embargo, pese a los adelantos tecnológicos actuales, los tiempos de solución para tales métodos exactos en casos de gran cantidad de combinaciones posibles los convierten en intratables para todo fin práctico debido a las complejidades algorítmicas de dichos métodos y a la ya documentada pertenencia de los problemas CTTP a la categoría de NP-Hard (*Non-deterministic Polynomial-time Hard*); la cual se caracteriza porque el costo computacional de encontrar soluciones se incrementa exponencialmente de acuerdo al tamaño del problema (Pongcharoen, Promtet, Yenradee, & Hicks, 2008) y se considera a dichos problemas desde el punto de vista matemático como muy difíciles de resolver en términos de recursos ya que no se puede asegurar que se pueda calcular un tiempo exacto de solución, de allí el componente de la primera parte de su nombre: Non-deterministic Polynomial. La necesidad de catalogar los problemas en estas ha sido estudiada y documentada por múltiples estudios, a efectos de enfocar de mejor manera los esfuerzos al momento de buscar una solución a los mismos (Vélez & Montoya, 2007).

Es precisamente por la referida intratabilidad de dichos escenarios, que se desarrollaron las denominadas metaheurísticas; las cuales fueron denominadas de esta manera por primera vez por el Dr Fred. Glover (Glover, 1986). Una metaheurística consiste usualmente en la emulación del algún proceso de la naturaleza que nos ayude a identificar soluciones óptimas cercanas a la absoluta, pero en una fracción de tiempo mucho menor que los métodos Heurísticos empíricos e incluso que los métodos numéricos exactos.

Conceptualmente, se pueden representar todas las posibles soluciones a un problema en lo que se denomina un espacio de soluciones o espacio de búsqueda; en realidad las metaheurísticas mediante mecanismos diversos, según la que haya sido elegida, encuentran puntos específicos dentro de dicho espacio de soluciones que son soluciones candidatas a presentar como solución encontrada.

Las metaheurísticas pretenden lograr esto debido a que son métodos de solución que orquestan una interacción entre métodos de mejora local y estrategias de más alto nivel para crear un proceso capaz de escapar de los óptimos locales y realizar una búsqueda robusta de un espacio de soluciones con el propósito deseable de encontrar el óptimo global.

Al respecto, es pertinente aclarar que pueden encontrarse dos tipos de óptimos:

a) Los óptimos locales

Son puntos de mejores resultados en una vecindad específica del espacio de soluciones; esto es son soluciones a un problema que son mejores que todas las

otras soluciones que son ligeramente diferentes, pero que son peores que el óptimo global (Black, 2004b).

a) El óptimo global

Es el punto de mejores resultados en todo el espacio de soluciones; Esto es, es la mejor solución a un problema (Black, 2004a).

Aunque es lo deseable, las metaheurísticas no aseguran poder alcanzar a encontrar el óptimo global; lo que procuran es acercarse lo más posible al mismo pero en tiempos de ejecución prácticos y razonables mientras procuran escapar de los óptimos locales (Gendreau, 2010).

Una representación gráfica puede apreciarse en la Figura 1, que ilustra la existencia de ambos tipos de Óptimos. Nótese que para  $x^0$  se logra encontrar un valor *bajo*, pero no el *más bajo posible*, asumiéndose para la ilustración el problema busca el menor valor posible, ya que éste puede apreciarse que existe en  $x^1$ .

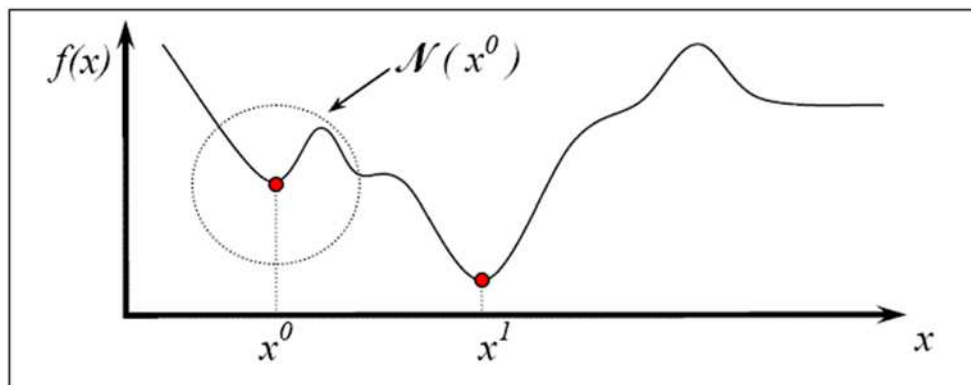


Figura 1 Óptimo Local VS Óptimo Global

Fuente: Vélez, M. C., & Montoya, J. A. (2007). METAHEURÍSTICOS: UNA ALTERNATIVA PARA LA SOLUCIÓN DE PROBLEMAS COMBINATORIOS EN ADMINISTRACIÓN DE OPERACIONES. Revista EIA, (8), 99–115.

Una de las metaheurísticas con mayor éxito en la resolución de problemas combinatorios y más específicamente de Timetabling y CTP es la denominada Algoritmos genéticos, la cual fue propuesta por el Dr. John Holland en 1975. Esta implementa una simulación del proceso de evolución natural que consiste en una técnica de búsqueda que permite explorar el espacio de manera eficiente el espacio de solución de un problema. El proceso de la búsqueda de la solución óptima está basado en la teoría de la evolución de Darwin, mediante el cual los mecanismos de genética y de selección natural aplicados en el proceso evolutivo estimulan la formación de nuevos organismos adaptados al medio ambiente (Lopez, 2004).

#### *1.2.1.1. El fenómeno a estudiar.*

El propósito de este experimento será, identificar y explicar los efectos que producen en la calidad de las soluciones obtenidas mediante la metaheurística de algoritmos genéticos los parámetros de una instancia de un problema de asignación de recursos académicos tales como: el tamaño de la misma, la afinidad de los docentes con los cursos a impartir en el programa de estudios y la disponibilidad horaria de los mismos docentes para la impartición de sus respectivas cátedras. Para los efectos del presente estudio, proponemos entender la calidad de la solución como un ratio compuesto por dos dimensiones cuantificables: a) La optimalidad de la solución obtenida (Cuan cerca está del óptimo global dicha solución encontrada o por lo menos cuan cerca de un umbral predeterminado para la función objetivo, se logró llegar) expresado mediante un porcentaje respecto a una cota superior y b) El tiempo computacional invertido para alcanzar dicha solución, lo cual es uno de los propósitos principales de aplicar una metaheurística para resolver algún problema en

particular (Glover & Laguna, 1999). Ha habido estudios que evalúan métricas relacionadas con las aquí propuestas, como por ejemplo la brecha de optimalidad alcanzada y el tiempo requerido para obtener dicho resultado. Este par de métricas se han evaluado anteriormente por separado como medidas de la calidad de las soluciones obtenidas, incluso en problemas del mismo tipo CTP (Naderi, 2016; A. J. Soria-Alcaraz et al., 2015a; Yazdani, Naderi, & Zeinali, 2017).

#### *1.2.1.2. Factores que influyen en el fenómeno a investigar*

Los factores que influyen en la determinación de la calidad de la solución en ambas de las dimensiones referidas son: a) El tamaño de la instancia el cual entenderemos como la cantidad de combinaciones totales del modelo obtenida a partir de la cantidad de elementos que deben interactuar y que representan a los diferentes recursos académicos a asignar, b) La afinidad de los docentes con las materias o cursos a impartir; que se refiere a la evaluación de las credenciales de cada docente con respecto a las diferentes materias que deben cursarse y c) La disponibilidad horaria de los docentes para impartir clases dentro del esquema horario de trabajo. Estos tres elementos en su conjunto se espera que afecten a una o ambas de las dimensiones de la calidad de la solución (Factor de segundo orden): la velocidad con que se obtiene dicha solución medida a través del tiempo que se requiera procesar para llegar a la solución y/o la optimalidad de la solución encontrada mediante la metaheurística, medida a través de el porcentaje de optimalidad alcanzado en cada ejecución comparado con una cota teórica superior que servirá como referencia. (Factores de primer orden).

Los anteriores factores se pueden apreciar sumariados y con el antecedente de quienes los han trabajado y desarrollado en la Tabla 1 que enlista los factores participantes en el fenómeno a estudiar. Se resalta la situación especial que presentan las dimensiones de la variable dependiente presentadas: a) Optimalidad de la solución y b) Tiempo computacional; debido esto a que, en la literatura hasta ahora encontrada, no se han hallado referencias a estudios empíricos que las refieran como un constructo específico de investigación. Prácticamente todos los estudios hasta ahora encontrados refieren los valores obtenidos o preestablecidos para ellos y sin embargo, como ya se mencionó, no se ha encontrado literatura que tenga como propósito específico el estudio de su comportamiento.

Tabla 1 Factores participantes en el fenómeno a estudiar

<b>Variables independientes</b>	<b>Definición</b>	<b>Autor</b>
Tamaño de la instancia	Cantidad posible de combinaciones entre los diferentes recursos a asigna	(Yazdani et al, 2017)
Afinidad de los docentes contra las materias a impartir	Calificación académica del docente para impartir cada materia del programa	(Naderi, 2016; Yazdani et al, 2017)
Disponibilidad de los docentes	Especificación de la disponibilidad de un docente para impartir clase en un tiempo específico	(Santos, Ochi, Souza, 2005)
<b>Variable dependiente</b>		
Y1: Calidad de la solución		(Glover & Laguna, 1997)
Dimensiones de la variable dependiente		
Tiempo de solución	El tiempo que la implementación de la metaheurística requiere para alcanzar una solución óptima	(Glover & Laguna, 1997; Soria, 2015; Naderi 2016; Yazdani et al, 2017)
Optimalidad de la solución	La optimalidad de la solución obtenida, entendiéndose como el porcentaje de optimalidad alcanzado.	(Glover & Laguna, 1997; Soria, 2015; Naderi 2016; Yazdani et al, 2017)

Fuente: Elaboración propia

### 1.2.1.3. Brechas y deficiencias teóricas.

La revisión de bases de datos científicas accesibles al autor de este trabajo, permitió encontrar trabajos previos que guardan relación con el presente (Figura 2); lo cual demuestra el diálogo académico existente desde hace tiempo y que continúa hasta la fecha; tanto, referido a la aplicación específica de la metaheurística de algoritmos genéticos, como a la de otras metaheurísticas aplicadas al mismo tipo de problema que se procura resolver que es el denominado CTPP.

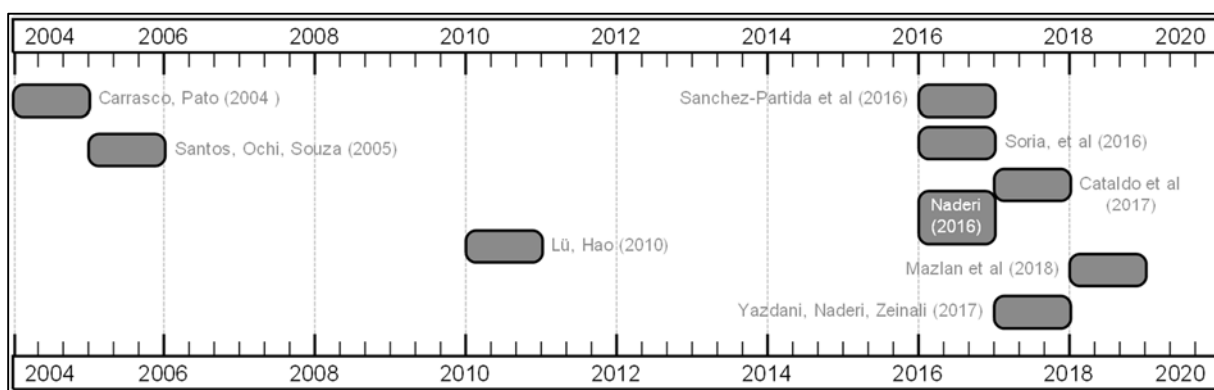


Figura 2 Literatura reciente encontrada y vinculada al tema

Fuente: Elaboración propia

Se encontró que Carrasco y Pato abordaron la solución del problema CTPP mediante la aplicación de la metaheurística de redes Neuronales encontrando mejores resultados mediante la aplicación de métodos discretos (Carrasco & Pato, 2004).

Así mismo, Santos, Ochi y Souza (Santos et al, 2005) trabajaron la resolución del mismo tipo de problema eligiendo la metaheurística de Tabú Search, enfocándose en las estrategias de diversificación aplicables procurando escapar de los óptimos locales.



Por su parte, Lü y Hao(Lü & Hao, 2010) realizaron estudios implementando especialmente estrategias de perturbación que documentan ayudan a diversificar la búsqueda del espacio de soluciones buscando romper con un estancamiento de las soluciones obtenidas.

Se encontró también que se ha intentado resolver problemas de tipo CTP empleando la metaheurística de recocido simulado(Sanchez-Partida, Baquela, Mora-Vargas, & Smith, 2016) encontrando soluciones aceptablemente buenas para instancias grandes.

Naderi(2016) refiere en su trabajo una métrica de desempeño similar a la que se emplea en la presente investigación, al considerar a la optimalidad alcanzada y al tiempo requerido para lograrla como indicador de la calidad de las soluciones generadas por el método de algoritmos genéticos.

De manera relacionada, Soria (A. J. Soria-Alcaraz et al., 2015a) aplicó la metodología de algoritmos genéticos maximizando el paralelismo en la ejecución de dicho método para resolver el mismo tipo de problemas combinatorios de recursos académicos.

Cataldo (Cataldo, Ferrer, Miranda, Rey, & Sauré, 2017) eligió aplicar un método de programación entera para resolver un problema de calendarización de exámenes, el cual es una variación de los problemas de tabla de tiempos aplicable en universidades.

Por su parte, Yazdani(Yazdani et al., 2017) realizó comparaciones entre el desempeño de múltiples metaheurísticas (sistemas inmunes, algoritmos genéticos y

recocido simulado) para la resolución de problemas del mismo tipo que se abordan en el presente estudio. Cabe aclarar que el enfoque de su estudio estaba orientado al funcionamiento interno de las referidas metaheurísticas y sus parámetros de configuración interna.

Finalmente, Mazlan(Mazlan, Makhtar, Firdaus Khair Ahmad Khairi, Afendee Mohamed, & Nordin Abdul Rahman, 2018), aplicó la metaheurística denominada colona de hormigas para atacar el tipo de problemas CTTP concluyendo que ofrece una opción viable para resolverlos, al obtener resultados comparables con los provenientes de otros métodosde solución en los casos de instancias grandes.

Por lo hasta aquí expuesto en este apartado, el tipo de problemas como el abordado en esta investigación ha sido abordado desde varios enfoques y con diversas metodologías, y se le sigue considerando un problema digno de estudiarse según se confirma en la literatura académica ya mencionada.

## 1.2.2 Mapa Conceptual del planteamiento del problema.

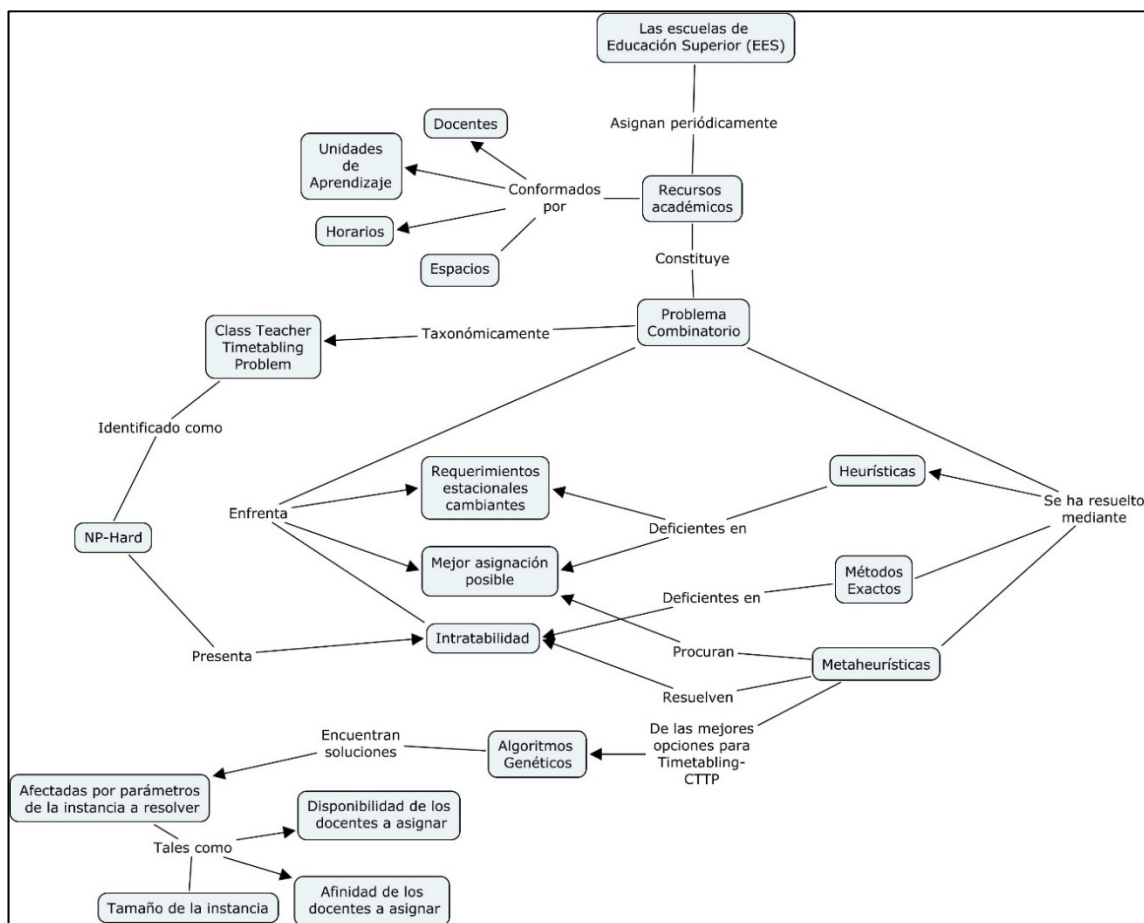


Figura 3 Mapa Conceptual del problema bajo estudio

Fuente: Elaboración propia

## 1.3 Pregunta central de investigación

¿De qué manera se ve afectado el desempeño de la metaheurística de algoritmos genéticos de acuerdo a las variaciones en tres de los parámetros con mayor ocurrencia en las diversas instancias de un problema de tipo CTP, definiéndolos como: El tamaño de la instancia (La cantidad de aulas, docentes, horarios y asignaturas a combinar), la afinidad de los docentes con las diferentes asignaturas y la disponibilidad de los docentes o afinidad de estos con los horarios de clase?

#### **1.4 Objetivo general de la investigación**

Determinar cuál de los tres parámetros de la instancia ya mencionados impacta de manera más significativa el desempeño de una solución mediante algoritmos genéticos para la resolución de problemas administrativos de asignación de recursos académicos, tales como los del tipo CTPP.

##### **1.4.1 Objetivos metodológicos de la investigación.**

- i. Proponer el modelo matemático que permita determinar la optimalidad de una asignación de recursos académicos para la enseñanza en un período determinado.
- ii. Medir la brecha en la optimalidad de la asignación de recursos académicos sujetos de estudio.
- iii. Identificar y evaluar las variaciones en los resultados obtenidos de acuerdo a las manipulaciones de los parámetros de las instancias a resolver para la asignación de carga académica en un problema del tipo CTPP.

##### **1.4.2 Objetivos específicos.**

- i. Identificar las variaciones a aplicar en la configuración de los parámetros de las instancias de problemas del tipo CTPP.
- ii. Determinar qué efecto tienen las variaciones en la configuración de los parámetros de la instancia en problemas del tipo CTPP con respecto a la calidad de las soluciones obtenidas.

#### **1.5 Hipótesis general de investigación**

Los parámetros de la instancia: Tamaño de la instancia, Afinidad de los docentes con las materias a impartir y Disponibilidad de los docentes para la

impartición de clases tienen un impacto significativo en la calidad de las soluciones obtenidas para problemas de tipo CTPP mediante la metaheurística de algoritmos genéticos.

### **1.6 Hipótesis Nula**

Con motivo de comprobar la existencia o no de la relación estudiada, de la pregunta de investigación se procede a definir la hipótesis nula de forma general.

**H<sub>0</sub>**: Los parámetros de la instancia: Tamaño de la instancia, Afinidad de los docentes con las materias a impartir y Disponibilidad de los docentes para la impartición de clases no tienen un impacto significativo en la calidad de las soluciones obtenidas para problemas de tipo CTPP mediante la metaheurística de algoritmos genéticos.

Si se comprueba el rechazo de la hipótesis nula, se tendrá evidencia de al menos una de las variables independientes del modelo que son: a) El Tamaño de la instancia, b) La afinidad de los docentes con las materias a impartir y c) La Disponibilidad de los docentes para la impartición de clases influye de manera significativa en la variable dependiente Calidad de las soluciones.

En caso contrario, si H<sub>0</sub> es aceptada, entonces la variable dependiente Calidad de las soluciones no es influenciada por las variables independientes ya referidas.

### **1.7 Metodología**

La investigación a realizar consiste en un caso del tipo cuantitativo con un diseño experimental puro. Esto debido a que se examinará la relación entre las variables determinadas, de las cuales manipularemos intencionalmente mediante un

experimento aquellas consideradas como independientes para analizar por medio de métodos estadísticos los efectos, medidos matemáticamente, de los referidos estímulos en las variables dependientes entre diferentes grupos de comparación equivalentes; y comprobar de esta manera las hipótesis planteadas.

## **1.8 Justificación y aportaciones del estudio**

### **1.8.1. Justificación práctica.**

El presente estudio realizará una aportación práctica ya que permitirá tomar decisiones mejor informadas respecto al método de solución a elegir para resolver problemas del tipo CTP en instituciones de educación superior. Permitiendo de esta forma aprovechar de la mejor manera posible los recursos de los que disponen las instituciones ya mencionadas atendiendo los requerimientos estacionales y realizando los ajustes pertinentes en cada instancia posterior a resolver.

### **1.8.2. Justificación teórica.**

Se ha encontrado literatura que versa sobre el resultado de ajustar parámetros específicos de la metaheurística de algoritmos genéticos o de comparar el funcionamiento de la misma contra otras alternativas de solución, sin que hasta ahora se hayan identificado estudios del efecto que los parámetros de la instancia tienen sobre el desempeño de la metaheurística referida, el presente estudio buscará realizar dicha aportación a las teorías involucradas en el mismo.

## **Capítulo 2. Marco teórico**

El presente capítulo presentará las evidencias teóricas antecedentes que permitirán abordar con detenimiento el problema de investigación, refiriéndonos al contexto de este en cuanto a la importancia de las diferentes opciones matemáticas y algorítmicas disponibles para su solución, así como la identificación de los efectos de

las variaciones en los parámetros de las instancias a resolver dentro de esta categoría de problemas.

Así mismo nos permitirá relacionar al presente estudio con sus predecesores y fundamentar la mención de las variables dependientes e independientes a tratar.

### **2.1.Contexto administrativo y de toma de decisiones**

De manera periódica, dentro de sus actividades administrativas, las escuelas de educación superior deben afrontar la tarea de asignar los recursos académicos con los que cuenta para afrontar las necesidades de un nuevo ciclo. Esto implica evaluar múltiples factores relativos principalmente a la idoneidad y a la disponibilidad de los mencionados recursos. Para efectos de la presente propuesta de estudio, los recursos académicos a asignar son los siguientes: a) Docentes, b) Asignaturas, c) Tiempos y d) Aulas.

Con referencia a cada uno de los recursos académicos enlistados, cada escuela puede tener políticas específicas que deben ser consideradas, por ejemplo:

- a) Especificar que los docentes de mayor antigüedad deben ser preferidos para la adjudicación de asignaturas o bien que dicha asignación se realice considerando como primer factor la calificación académica del docente para cada asignatura, b)
- Que las asignaturas procuren realizarse de acuerdo a la disponibilidad previamente manifiesta del docente, c) Que la cantidad de alumnos por asignatura para una aula no supere la capacidad de la misma; y así por el estilo. Un ejemplo de tales factores puede ser apreciado en la Tabla 2.

Tabla 2 Criterios de asignación para recursos académicos

Recurso académico	Factores a evaluar para la asignación
Docentes	Calificación académica Antigüedad o status laboral Disponibilidad horaria Experiencia
Asignaturas	Programa de estudio Área del conocimiento
Horarios	Disponibilidad de los docentes
Aulas	Cupo Equipamiento

Fuente: Elaboración propia

Se puede apreciar que la decisión implica un problema combinatorio desde el momento en que la solución conlleva a identificar la combinación que permita satisfacer de la mejor manera posible los requerimientos estacionales correspondientes.

Cabe señalar que el principal objetivo es conseguir una solución factible, pero lo deseable es que sea una que permita el cumplimiento de todas las exigencias planteadas. Puede llegarse el caso en que no sea posible cumplir simultáneamente con todas las demandas debido a la simple razón de que no se cuenta con los recursos suficientes para ello sin importar la combinación utilizada. Esta situación implica que puedan establecerse restricciones *duras* que son aquellas restricciones que obligatoriamente deben cumplirse para que la solución a encontrar pueda considerarse factible (Ragsdale, 2014) (por ejemplo, para nuestro caso de estudio, el que un docente no puede impartir dos asignaturas en el mismo espacio de tiempo) y



restricciones *suaves* que son aquellas que representan objetivos deseables pero que pueden no cumplirse o cumplirse de manera parcial como una manera de flexibilizar la búsqueda de una solución (Ragsdale, 2014).

Las restricciones duras deben cumplirse cabalmente y en su totalidad, no hay atenuantes ni discusiones; por otra parte, para las restricciones suaves, es deseable cumplirlas hasta donde esto sea posible, pero en caso de que no puedan cumplirse la solución encontrada aún se considera satisfactoria. Es evidente que lo deseable es que se cumplan por completo ambos tipos de restricciones, pero esta estrategia permite tener algunas restricciones que pueden no cumplirse por completo o incluso no cumplirse del todo y suelen utilizarse para evaluar la calidad de la solución (Yazdani et al., 2017).

### **2.1.1. Taxonomía matemática del problema.**

Cuando se examinan los problemas administrativos respecto a los recursos académicos a asignar por parte de las escuelas de educación superior invariablemente estaremos hablando de problemas de tipo Timetabling, las categorías más comunes pueden ser de acuerdo a Carrasco (Carrasco & Pato, 2004): a) ExaminationTimetabling (Programación de exámenes), b) CourseTimetabling (Programación de cursos) y c) Class/TeacherTimetabling (Programación de asignaturas/docentes).

De manera más específica se puede categorizar nuestro problema de estudio como de tipo CTP y por tanto perteneciente a la categoría de scheduling y específicamente a una subcategoría denominada recientemente UCTTP (UniversityClassTeacherTimetablingProblem) como puede verse en la figura 4, sin

embargo usualmente se ha considerado suficiente distinguir entre ETP (Examination Timetabling Problem) y CTP.

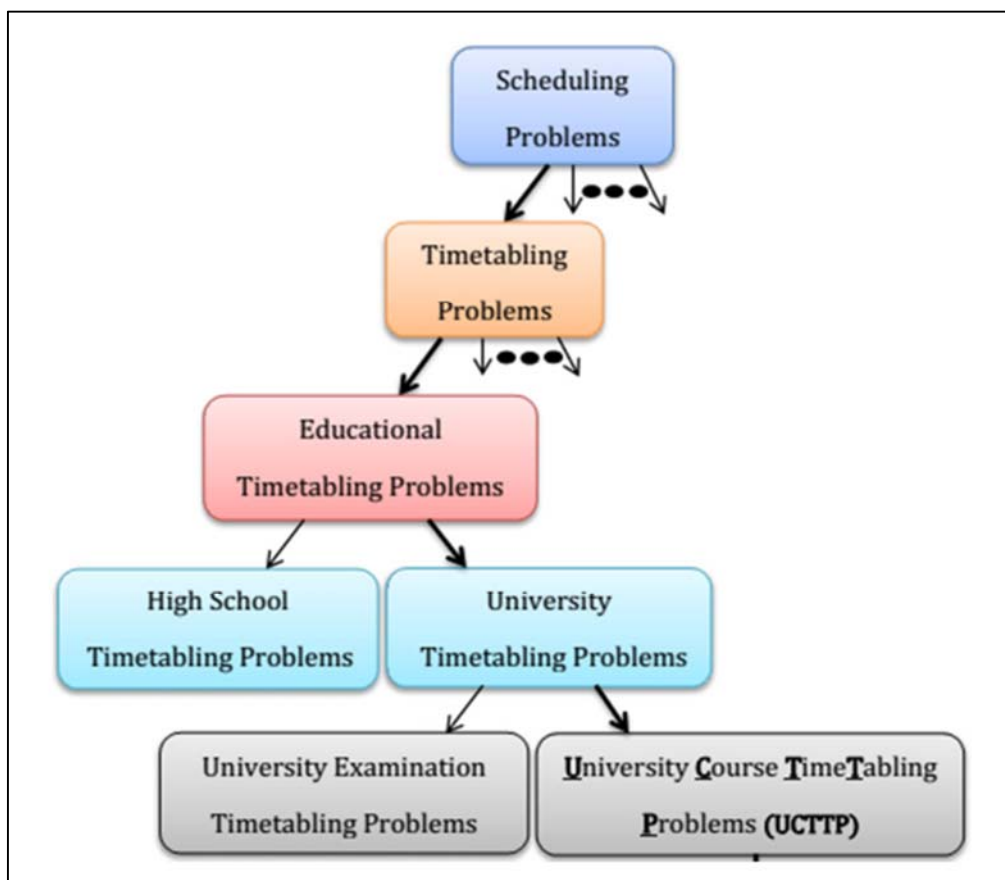


Figura 4 Taxonomía matemática para problemas de timetabling universitarios

Fuente: Babaei, H., Karimpour, J., & Hadidi, A. (2015). A survey of approaches for university course timetabling problem. *Computers & Industrial Engineering*, 86, 43–59. <http://doi.org/10.1016/j.cie.2014.11.010>

El tipo de problema a estudiar en el presente documento, corresponde a la clasificación denominada CTP, la cual consiste a su vez en un problema de categoría NP- Hard (Santos et al., 2005). Debido a lo cual, se considera intratable mediante métodos de búsqueda exhaustiva y los métodos heurísticos que suelen aplicarse realizan una exploración relativamente limitada del espacio de soluciones por lo que se recomienda que se considere a las metaheurísticas como una forma de

solución que explore de mejor manera el referido espacio de soluciones y en un tiempo aceptable ya que constituyen métodos de solución que dirigen una interacción entre procedimientos de mejora locales y estrategias de mayor nivel para crear un proceso capaz de escapar de los óptimos locales encontrados (Gendreau, 2010). De las metaheurísticas más promisorias para problemas de tipo combinatorio y específicamente del tipo CTP, se encuentra la denominada Algoritmos genéticos (Cortez, Rosales, Naupari, & Vega, 2010; Naderi, 2016; A. J. Soria-Alcaraz et al., 2015a; Yazdani et al., 2017).

## **2.2. Variable dependiente**

Una variable dependiente es el constructo que depende de las variables independientes, y es el resultado de la influencia de estas últimas (Creswell, 2009). La calidad de la solución encontrada por el método metaheurístico de algoritmos genéticos es la variable que depende de otras variables en la presente investigación. Debido a esto, a continuación se procede a explicar dicha variable y a presentar los fundamentos que sustentan su estudio.

### **2.2.1. Marco teórico de la variable dependiente Calidad de la solución obtenida.**

Se propone evaluar la calidad de la solución como un ratio obtenido a partir de dividir la optimalidad de la solución entre el tiempo computacional requerido para llegar a él, considerando por lo anterior que posee dos dimensiones: a) La *optimalidad* de la solución, y b) El tiempo computacional. Ya ha habido estudios anteriores que toman en consideración estos dos factores para estimar la calidad de la solución (Naderi, 2016; A. J. Soria-Alcaraz et al., 2015a). Para efectos de la

presente investigación, se propone interpretar dichas dimensiones de la siguiente manera:

a) Optimalidad de la solución

Definiremos la optimalidad de la solución como el porcentaje de optimalidad alcanzado por la mejor solución encontrada durante la ejecución del algoritmo genético comparada contra una cota superior teórica que refleja el que cada materia a impartir tenga asignado para su impartición al docente con una afinidad máxima contra la materia en cuestión y que solamente se asignen clases a dichos maestros en horarios que ellos establezcan como disponibles. Se propone considerar el valor de la función objetivo como el puntaje superior alcanzado por nuestro algoritmo.

Se considera que esta variable debe ser considerada para estudiarse porque es la que nos indicará cuan buena es la solución encontrada. Si las soluciones encontradas son consistentes en un patrón de optimalidad respecto a un nivel establecido de alguno de los parámetros de la instancia, podremos tener evidencias que sugieran la significatividad de dicho parámetro respecto a la calidad de la solución

b) Tiempo computacional

El tiempo computacional es simplemente el intervalo transcurrido entre el inicio de la ejecución del método y el punto de terminación alcanzado. Dicho momento puede ser determinado usualmente por una de dos situaciones (Gendreau, 2010): a)Se alcanzó una cantidad de iteraciones especificadas de antemano, b)Se encontró una solución factible que se considera razonablemente buena al alcanzar un umbral

predeterminado en la función objetivo o c) Después de una determinada cantidad de iteraciones sin una mejora en el valor de la función objetivo alcanzada.

El tiempo computacional es uno de los motivos fundamentales para la creación de las metaheurísticas, ya que estas procuran obtener una solución muy buena en un tiempo computacional razonable. Situación que es preferible a una búsqueda exhaustiva basada en la exploración detallada por medio de la fuerza bruta de todo el espacio de soluciones la cual implicaría un tiempo computacional excesivamente grande e impráctico. Precisamente como una alternativa a esas búsquedas exhaustivas, modelos de programación lineal entera y, usualmente, ante la ausencia de un algoritmo de solución que ejecute en tiempo polinomial para algún determinado tipo de problemas es que se crearon las metaheurísticas (Chong et al., 2013).

En nuestro caso, tomaremos como tiempo computacional el tiempo que transcurrió desde el inicio de la ejecución de la metaheurística hasta que el algoritmo logró converger hasta la mejor solución encontrada.

### **2.3. Marco teórico de las variables independientes**

Las variables independientes son aquellas que causan, influyen o afectan a otras variables o constructos (Creswell, 2009) las variables independientes que se proponen a considerar en el presente trabajo son: el tamaño de la instancia, la afinidad de los docentes con las diversas materias a impartir y la disponibilidad de horarios de los docentes. Estas variables independientes se explican con mayor detenimiento a continuación.

### **2.3.1. Variable independiente X1: Tamaño de la instancia.**

En el modelo que investigaremos podemos calcular el tamaño de la instancia como la multiplicación de los catálogos de elementos a combinar dentro de nuestra solución dado que un problema de tipo CTP es, en esencia, un problema de tipo combinatorio cuya solución consiste precisamente en encontrar la mejor de los óptimos encontrados por el algoritmo expresado mediante la combinación de dichos elementos (Carrasco & Pato, 2004; Naderi, 2016; J. A. Soria-Alcaraz, Özcan, Swan, Kendall, & Carpio, 2016; Yazdani et al., 2017). Dado lo anterior, dicha multiplicación nos dará la dimensión del espacio de soluciones a explorar por parte del algoritmo genético.

Para efectos de este estudio se propone establecer como valor del tamaño de la instancia tres categorías de tamaño: Bajo, Medio y Alto.

### **2.3.2. Variable independiente X2: Afinidad de los docentes contra las materias a impartir.**

Se refiere a la calificación de afinidad de un docente contra las materias que se imparten, y es útil porque permite conocer si un docente está mejor preparado que otro para impartir una determinada asignatura (Naderi, 2016; Yazdani et al., 2017). Se propone como significativa, ya que mientras mejor calificados se encuentren más docentes para impartir las asignaturas debería facilitar la búsqueda de opciones para impartir las asignaturas requeridas al brindar mayor diversidad de alternativas de asignación de docentes a una clase.

### **2.3.3. Variable independiente X3: Disponibilidad de los docentes.**

Otro factor que es candidato a influir en la calidad de la solución obtenida, es la especificación de la disponibilidad de los docentes respecto a los horarios de clase

que se requieran a efectos de que puedan atender las sesiones programadas por la solución (Carrasco & Pato, 2004; Cortez et al., 2010; Naderi, 2016; Sanchez-Partida et al., 2016; Santos et al., 2005; Yazdani et al., 2017). Esta variable se propone como significativa ya que es de esperarse que mientras mayor sea la disponibilidad de horario manifiesta, el algoritmo genético podrá encontrar más fácilmente combinaciones mejor calidad, ya que será deseable que se respete la disponibilidad horaria de los docentes que impartirán las asignaturas.

## **2.4 Métodos de solución**

### **2.4.1. Método heurístico.**

El método Heurístico que puede elegirse para resolver problemas del tipo CTP, suele consistir en replicar la estructura horaria y de asignación de períodos similares ya ejecutados previamente y, mediante la simple observación y libre criterio, realizar cambios que aunque pudieran parecer menores pueden tener un fuerte impacto en la optimalidad de la solución obtenida al propagar por la esta sus efectos. Esto presenta la desventaja de no tomar directamente en cuenta las variaciones estacionales que pueden presentarse, por ejemplo: el retiro o cambio de disponibilidad de algunos miembros de la planta docente, la variación entre la cantidad de grupos de alumnos inscritos para períodos similares, etcétera.

Lo anterior ocasiona la necesidad de realizar, en el mejor de los casos, retrabajos orientados a corregir las desviaciones necesarias como tarea posterior a la aplicación de este método.

### **2.4.2. Método exacto.**

Existe la posibilidad de resolver instancias de problemas de tipo CTP mediante los denominados métodos exactos, que consisten en la aplicación de

técnicas matemáticas, tales como la programación entera, que exploran la totalidad del espacio de soluciones en búsqueda de la mejor solución factible. Esta alternativa presenta la ventaja de que, en caso de ser factible, encontrará el óptimo absoluto. Sin embargo, la desventaja es el incremento exponencial del tiempo requerido conforme se incrementa el tamaño de la instancia a resolver.

Existen en la actualidad diversos productos de software que facilitan el trabajo con este tipo de herramientas tales como CPLEX<sup>MR</sup>, LINDO<sup>MR</sup>, Mathematica<sup>MR</sup>, por mencionar algunos. Sin embargo, la cantidad de opciones a explorar en los problemas combinatorios suele representar un muy grande costo computacional incluso para las capacidades actuales de los computadores, además que los referidos métodos exactos suelen enfocarse en encontrar el óptimo global pudiendo tomar tiempos muy largos en problemas de alta complejidad.

#### **2.4.3. Algoritmos genéticos**

Para el trabajo de investigación actual, se explorará la manera en que los parámetros de la instancia afectan a las soluciones alcanzadas mediante la metaheurística denominada Algoritmos genéticos, la cual procederemos a presentar y dar una explicación breve de la manera en que esta funciona(Lopez, 2004):

Los algoritmos genéticos fueron originalmente propuestos por el Dr. John H. Holland(Holland, 1992) y pretenden emular los dos principales procesos de la evolución Darwiniana(Darwin, 1968) que implican la competencia por sobrevivir:

- Proceso de selección natural: Mediante este proceso se identifica a los organismos mejor adaptados quienes tendrán mayores posibilidades



para sobrevivir y generar descendencia, y se descarta a aquellos considerados no aptos para su ambiente.

- Reproducción de los organismos: Mecanismo natural que permite que los organismos tengan oportunidad de reproducirse y propagar sus genes.

Un algoritmo genético opera sobre una población determinada de organismos (posibles soluciones al problema de optimización) y procede a evaluar el desempeño de cada uno de ellos; emulando el proceso de selección natural ya referido procediendo a repetir este proceso de generación de poblaciones y evaluación de sus organismos hasta que se cumpla algún hito especificado para detener dicho proceso; el cual puede ser que se alcance una cantidad específica de iteraciones, algún umbral de optimalidad o bien que durante una cantidad específica de tiempo o iteraciones no se haya logrado ninguna mejora significativa. Este proceso suele generar mejoras muy rápidas en las características de los individuos según avanzan las generaciones evaluadas y los mejores individuos van transmitiendo a su descendencia su código genético; sin embargo, de igual manera, conforme avanza el tiempo los avances evolutivos tienden a ser más pequeños demostrando un comportamiento logarítmico en cuanto a la calidad de las soluciones obtenidas.

Un elemento crucial para el funcionamiento de los algoritmos genéticos es la expresión de una solución al problema a resolver mediante una codificación de estructura cromosómica que esté relacionada con las variables de decisión de un problema de optimización. Dicho de otra manera, el código genético de cada organismo sobre los que operará el algoritmo genético consiste en una propuesta de

solución al problema a optimizar y los genes que conforman a los cromosomas deberán ser una adecuada representación de la solución tal que permita la evaluación de su adaptación. Cabe mencionar que la propuesta original de codificación de los cromosomas es en un formato binario, y es la que representaremos en esta explicación por simplicidad aclarando que pueden existir otras opciones de codificación de los genes en sus respectivos cromosomas.

Un algoritmo genético aplica un conjunto de operadores para cumplir con su propósito, entre ellos los siguientes:

- **Operador de selección:** Es la operación de seleccionar a aquellos organismos de la población que alcancen una mayor aptitud y determina la probabilidad de que los mejores individuos permanezcan o transmitan su aportación a la población y que los individuos menos aptos sean retirados para evitar su impacto negativo en las generaciones futuras. Lo anterior se logra mediante la evaluación de la función de aptitud para cada individuo y se le asigna una probabilidad para que sus cromosomas permanezcan en la siguiente generación poblacional.
- **Operador de cruce o reproducción:** Representa la etapa de intercambio de material genético entre los organismos sobrevivientes y su transmisión a la descendencia, en su expresión más simple consiste en intercambiar código genético de dos organismos sobrevivientes combinándolo mediante un único punto de corte para producir descendencia. Esto se ilustra en la figura 5

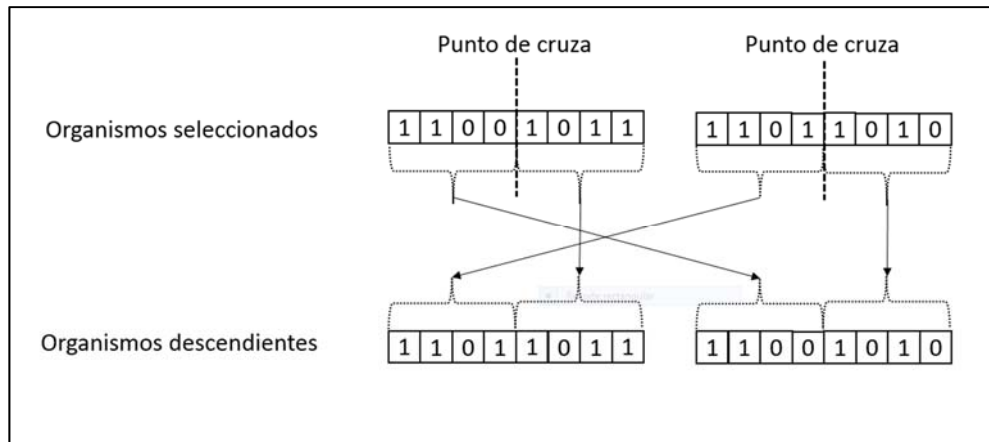


Figura 5 Operador de cruce simple de un algoritmo genético

Fuente: Elaboración propia

- Operador de mutación: Se utiliza para producir cambios aleatorios en una población, tiene como propósito estimular la diversidad genética de la misma mediante cambios que no se hubieran podido alcanzar mediante las operaciones de selección y cruce. Ese operador se controla mediante un factor de probabilidad que controla la frecuencia de su accionar y deberá cuidarse que no sea demasiado alto para evitar que la aleatoriedad pura sea el factor que decida el rumbo evolutivo de las poblaciones a producir. Este proceso se ejemplifica en la figura 6.

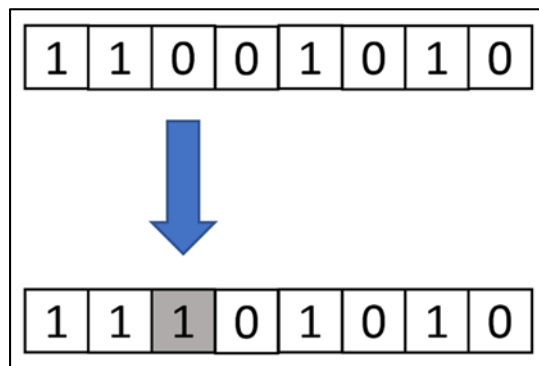


Figura 6 Operador de mutación de un algoritmo genético

Fuente: Elaboración propia

Cabe referir que existen diversas opciones que se pueden aplicar para mejorar el desempeño de un algoritmo genético en cuanto a estrategias evolutivas, por ejemplo incluir un factor de elitismo que conserve a individuos excepcionalmente buenos y sin cruzarse con otros en tanto sigan siendo altamente competitivos.

En esencia el modo de operación de un algoritmo genético se puede apreciar en el diagrama presentado en la figura 7.

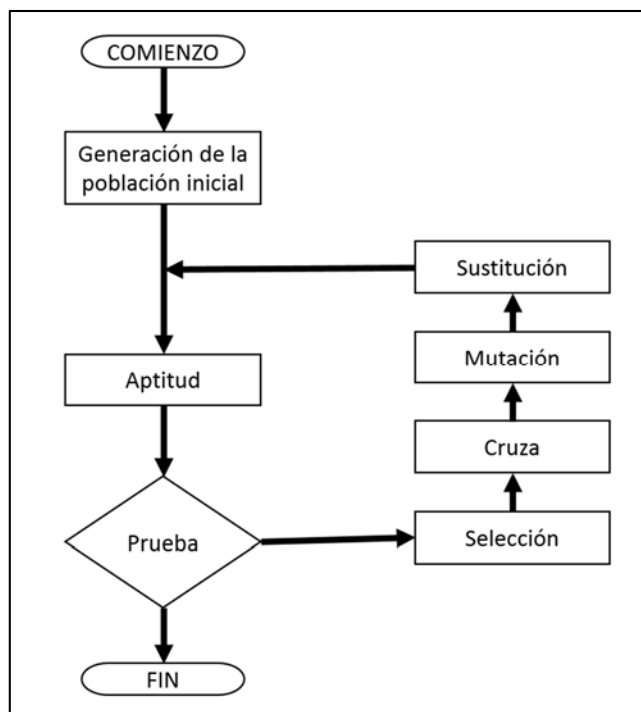


Figura 7 Modo de operación de un algoritmo genético simple.

Fuente: Cortez, A., Rosales, G., Naupari, R., & Vega, H. (2010). Sistema de apoyo a la generación de horarios basado en algoritmos genéticos. Revista de Investigación de Sistemas e Informática, 7(1).

Visto como un conjunto, los algoritmos genéticos procuran que los organismos de generaciones sucesivas sean cada vez mejores, con la consecuente mejora del promedio de la población y que los organismos no aptos sean retirados para dar lugar a cada vez mejores individuos.

## **2.5. Hipótesis específicas y/o Operativas**

### **2.5.1. Hipótesis de estudio.**

Los parámetros de configuración de la instancia tienen impactos significativamente diferentes en el resultado de la calidad de la solución obtenida a través de la metaheurística de Algoritmos genéticos para la resolución de problemas de administración académica del tipo Class Teacher Timetabling Problem (CTTP).

### **2.5.2. Hipótesis operativas de investigación.**

H1 El tamaño de la instancia contribuye de manera significativa en la calidad de la solución obtenida

H2 La afinidad de los docentes contra las materias a impartir contribuye de manera significativa en la calidad de la solución obtenida.

H3 La disponibilidad de los docentes contribuye de manera significativa en la calidad de la solución obtenida.

### **2.5.2. Modelo gráfico de la hipótesis.**

El modelo gráfico que se presenta en la Figura 8, se construye a partir de lo hasta aquí descrito en cuanto a la manera en que pueden impactar las variables independientes en la calidad de la solución obtenida. Se hace hincapié en que el propósito del estudio va más allá de simplemente identificar la direccionalidad del impacto de los parámetros del método de solución, sino que se pretende identificar la mejor configuración de dichos parámetros para el problema específico a resolver.

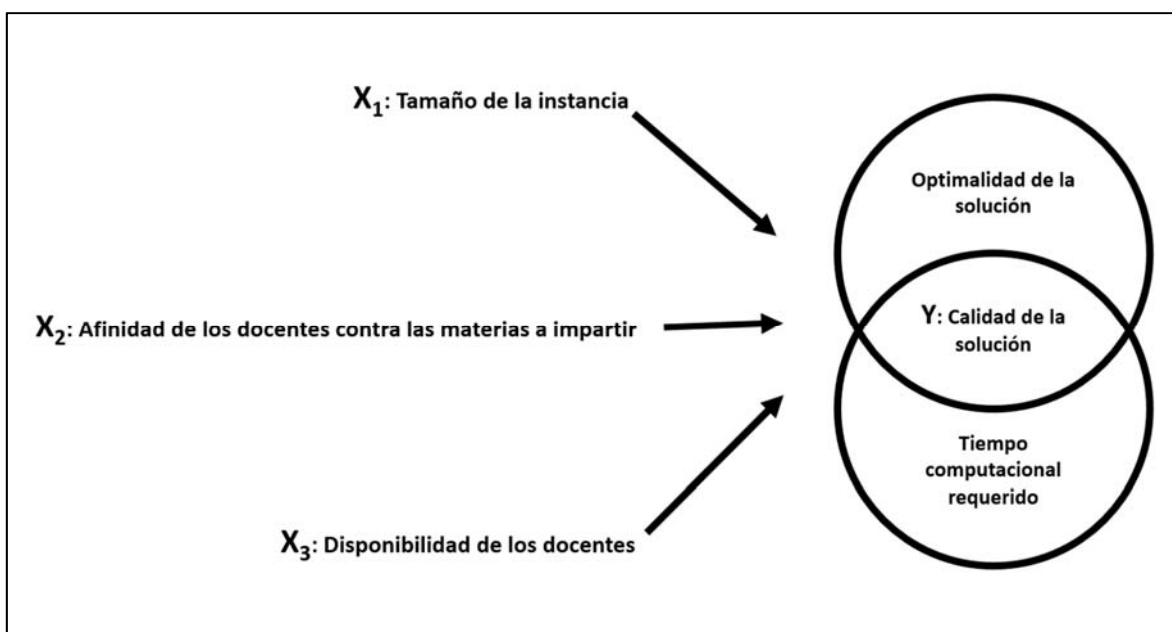


Figura 8 Modelo Gráfico

Fuente: Elaboración propia

### 2.5.3. Modelo de relaciones teóricas con las hipótesis.

Tabla 3 Relaciones teóricas

Referencia	X1	X2	X3	Y
Yazdani et al., 2017	X	X	X	X
Naderi, 2016		X	X	X
Santos et al., 2005			X	
Carrasco & Pato, 2004	X			
J. A. Soria-Alcaraz, Özcan, Swan, Kendall, & Carpio, 2016	X			
Carrasco & Pato, 2004			X	
Cortez et al., 2010			X	
Sanchez-Partida et al., 2016			X	

Fuente: Elaboración propia

## **Capítulo 3. Estrategia metodológica**

### **3.1. Tipo y diseño de la investigación**

El presente capítulo presentará la metodología a aplicar para la comprobación de las hipótesis de la presente investigación. Se identificará el tipo de investigación más conveniente, se abordará el tema del universo del estudio y la unidad de análisis, así como una descripción del qué se medirá, porqué se medirá y cómo se realizará dicha medición. También se describirá el proceso del experimento requerido para las comprobaciones a realizar y se justificará el tamaño de la muestra a examinar.

#### **3.1.1 Tipo de investigación.**

La investigación a realizar consiste en un caso del tipo cuantitativa con un diseño experimental puro. Esto debido a que se examinará la relación entre las variables determinadas, de las cuales manipularemos intencionalmente mediante un experimento aquellas consideradas como independientes para analizar por medio de métodos estadísticos los efectos, medidos matemáticamente, de los referidos estímulos en las variables dependientes entre diferentes grupos de comparación equivalentes; y comprobar de esta manera las hipótesis planteadas tal y como se ha definido académicamente por autores especializados en el tema (Creswell, 2009; Sampieri, 2014).

### **3.2 Universo del estudio**

#### **3.2.1. Unidad de análisis.**

La presente investigación tomará como caso de estudio y unidad de análisis un modelo relajado basado en las necesidades de asignación de recursos académicos de la Facultad de Contaduría Pública y Administración de la Universidad Autónoma de Nuevo León. Esto se debe a la coincidencia de dicha necesidad con

las condiciones establecidas para categorizarlo como un problema del tipo CTP, con el beneficio añadido de presentar una instancia de tales dimensiones que complican la aplicación tanto de métodos heurísticos como exactos propiciando esto último que se considere la evaluación de una metaheurística en aras de obtener los mejores resultados posibles en un tiempo práctico.

### **3.2.2. Tamaño de la muestra.**

El tamaño de la muestra se calculará en base a los grados de manipulación que se aplicarán en el experimento a las variables independientes, estableciendo que serán 3 los referidos grados de manipulación para cada una de las tres variables que recibirán los estímulos durante el experimento. Se decidió que fueran 3 los estímulos a aplicar a cada parámetro de la metaheurística con el propósito de identificar una tendencia de afectación de resultados

Por lo que, el tamaño de la muestra está determinado por la siguiente fórmula derivada a partir del conocimiento de que, si existen dos posibles valores para una posición en un valor binario, la cantidad posible de combinaciones a obtener esta para un conjunto de  $n$  valores dada por  $2^n$ :

$$n = i^j$$

Donde:

$i$  = Cantidad de valores que son los grados de manipulación a establecer durante el experimento para cada parámetro de la metaheurística.



$j$  = Cantidad de parámetros a ajustar que son la cantidad de variables independientes a manipular.

Sustituyendo para tres posibles valores en tres parámetros y ejecutando tres veces cada escenario:

$$n = (3^3)(3) = (27)(3) = 81$$

Se considera, por lo tanto, que con 3 grados de manipulación en cada una de las 3 variables y ejecutando cada escenario de acuerdo con lo indicado, resulta un tamaño muestral de 81 elementos que se distribuirán en los grupos experimentales con los que se trabajará.

### **3.3 Proceso de medición**

El proceso de medición que se propone hacer para obtener los datos que sustenten el presente estudio consiste en un experimento puro (Sampieri, 2014), en el cual los elementos de estudio los constituirán las 81 configuraciones de la instancia con la variación que resulte entre ellas de la aplicación de 3 estímulos (Saavedra, 2001) a cada una de las 3 variables independientes en cada grupo. Con los resultados se podrán tener mediciones con el propósito de observar cuantitativamente el efecto de dichos estímulos en cada grupo y seguir con el análisis estadístico de regresión lineal.

En esta investigación experimental se tratará a todas las variables independientes como experimentales de tratamiento, a través de las cuales los grupos recibirán la manipulación experimental que implica el tratamiento de parte del investigador (Creswell, 2009).

La representación de este experimento se desarrollará de acuerdo a la notación clásica utilizada para tal efecto (Campbell, D. T., Stanley, J. C., & Gage, 1963), Explicada mediante la siguiente lista basada en lo referido por Creswell (Creswell, 2009):

- G representa un grupo que recibirá un tratamiento específico.
- X Representa una exposición de un grupo a una variable experimental o evento, de la que se desea medir sus efectos.
- O Representa una observación o medida registrada en un instrumento
- X's y O's en un renglón determinado se aplican al mismo grupo
- X' y O's en la misma columna o colocados verticalmente respectivamente entre si, son simultáneos
- La dimensión izquierda a derecha indica el orden temporal de los procedimientos en el experimento

La separación de renglones paralelos por una línea horizontal indica que los grupos a comparar no son iguales por asignación aleatoria. Si no hay línea horizontal entre los grupos se indica la asignación aleatoria de individuos a los grupos de tratamiento.

En este caso de investigación se utilizará la misma dinámica que la tabla 4, con la diferencia de que no será solamente para 5 grupos y el 6 de control, sino para 26 elementos o grupos experimentales más uno de control. Los grupos contarán con tres individuos cada uno, debido a que dichos elementos representan una lectura

específica a comparar contra las demás. Nótese también que en el caso particular del grupo de control que en la tabla es el grupo 6, se indica explícitamente la falta de un estímulo, el cual establecerá un contraste hacia los otros grupos a efectos de proporcionar un elemento extra de referencia al representar el escenario con los niveles más bajos de estímulo en los tres parámetros.

Tabla 4 Representación estandarizada del experimento

G <sub>1</sub>	X1	O <sub>1</sub>	O <sub>2</sub>	O <sub>3</sub>
G1	X1	O <sub>4</sub>	O <sub>5</sub>	O <sub>6</sub>
G2	X2	O <sub>7</sub>	O <sub>8</sub>	O <sub>9</sub>
G2	X2	O <sub>10</sub>	O <sub>11</sub>	O <sub>12</sub>
G2	X2	O <sub>13</sub>	O <sub>14</sub>	O <sub>15</sub>
G3	X3	O <sub>16</sub>	O <sub>17</sub>	O <sub>18</sub>
G3	X3	O <sub>19</sub>	O <sub>20</sub>	O <sub>21</sub>
G3	X3	O <sub>22</sub>	O <sub>23</sub>	O <sub>24</sub>
G4	X4	O <sub>25</sub>	O <sub>26</sub>	O <sub>27</sub>
G4	X4	O <sub>28</sub>	O <sub>29</sub>	O <sub>30</sub>
G4	X4	O <sub>31</sub>	O <sub>32</sub>	O <sub>33</sub>
G5	X5	O <sub>34</sub>	O <sub>35</sub>	O <sub>36</sub>
G5	X5	O <sub>37</sub>	O <sub>38</sub>	O <sub>39</sub>
G5	X5	O <sub>40</sub>	O <sub>41</sub>	O <sub>42</sub>
G6	---	O <sub>43</sub>	O <sub>44</sub>	O <sub>45</sub>

Fuente: Elaboración propia

El proceso que el experimento propuesto seguirá se describe en la figura 9, En la cual se pueden encontrar las siguientes tareas que componen la secuencia de acciones del experimento.

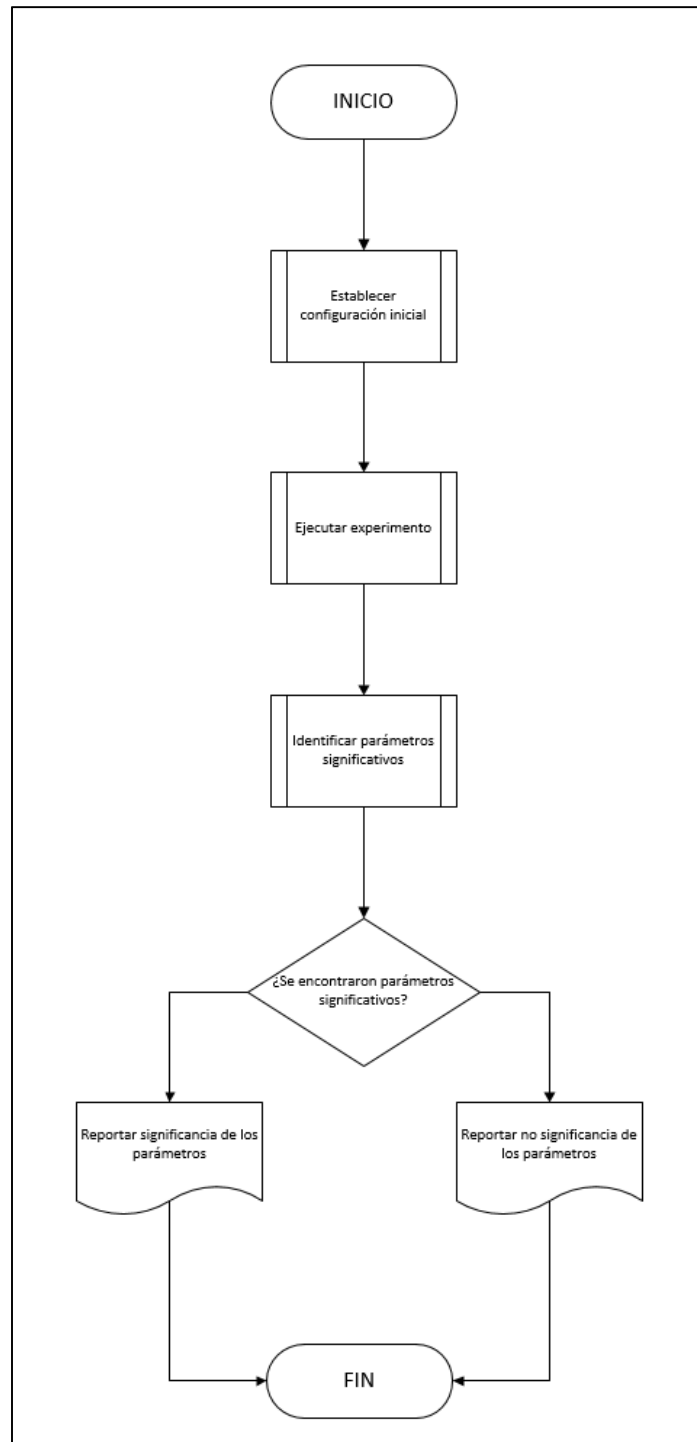


Figura 9 Diagrama de flujo del experimento

Fuente: Elaboración propia

La descripción narrativa de las diferentes actividades de la figura 6 se puede encontrar en la tabla 5

Tabla 5 Descripción de las actividades del experimento

Tarea	Descripción
Establecer configuración inicial	Se establecen los valores iniciales para los parámetros del experimento y se genera el grupo de control.
Ejecutar experimento	Se lleva a cabo la solución de la instancia del problema por parte de los diferentes 27 grupos a evaluar registrando los resultados cada una de las tres mediciones por grupo.
Identificar parámetro más significativo	Se realiza un análisis exploratorio de los resultados comparándolos por variación de los diferentes parámetros que pueda sugerir una mayor significatividad de alguno o algunos de ellos. Posteriormente se realiza un análisis estadístico mediante modelos de regresión lineal para identificar matemáticamente aquellos parámetros que resulten significativos.
¿Parámetro más significativo?	Se analizan los resultados de la prueba de regresión lineal en búsqueda de la significancia de los parámetros manipulados en el experimento. Si se encuentra alguno o más que hayan sido significativos, se procede a reportar sus resultados. De lo contrario, se documenta la no significancia de ninguno de ellos.
Reportar significancia de los parámetros	Basado en los indicadores de significancia de los parámetros encontrados mediante el modelo de regresión lineal, se procede a integrar la ecuación del modelo que explica el comportamiento de la variable dependiente con respecto a las variaciones de las variables independientes encontradas como significativas.
Reportar no significancia de los parámetros	Se procede a informar que el modelo de regresión lineal no logró encontrar como significativo a ninguno de los parámetros propuestos para con ese propósito.
FIN	

Fuente: Elaboración propia

### 3.4 Métodos de análisis

En primera instancia se realizará un análisis exploratorio de las lecturas obtenidas de las variables dependiente en conjugación con los diferentes tipos de

estímulos a aplicarles procurando identificar alguna sugerencia de influencia por parte de las variables independientes sobre la variable explicada.

Con respecto al análisis estadístico que se propone realizar, como ya se refería, consistirá en un análisis de regresión múltiple para identificar aquellos parámetros que de manera más significativa impactan en la calidad de la solución obtenida.

En caso de que la cantidad de variables significativas sea demasiado amplia para representar gráficamente la relación entre ellas y la calidad de la solución obtenida, se tiene planeado recurrir a métodos tales como análisis factorial o arboles de decisión con la intención de reducir la dimensionalidad del referido escenario y facilitar el despliegue de los resultados de esta investigación en cuanto a la exploración del espacio de soluciones

Se concluye el tercer capítulo que contiene la descripción del tipo y diseño de la investigación, el método de recolección de los datos a analizar, la presentación del proceso de cálculo del tamaño de la muestra que se empleará finalizando con la mención de los métodos que se utilizarán para el análisis de los datos, el resultado de los cuales se presentará en el siguiente capítulo.

#### **Capítulo 4. Análisis de resultados**

El presente capítulo presentará los resultados del estudio pertinente a la investigación. Presentaremos un modelo matemático de optimización a aplicar para el tipo de problemas a tratar y explicaremos la manera en que se establecerá la granularidad inicial de las variables a manipular para proporcionar los estímulos necesarios para contrastar las diferentes observaciones.

#### **4.1. Descripción del modelo matemático estudiado**

El modelo matemático de optimización para la resolución del problema de tipo CTP se presenta a continuación:

El modelo en cuestión, considera los siguientes recursos a combinar en su aprovechamiento: Docentes, Asignaturas, Horarios, Aulas y Grupos. Dada la anterior lista se puede apreciar que la solución del problema consistirá en buscar la mejor combinación posible de los recursos señalados atendiendo a las condiciones y objetivos que especificaremos a continuación y procurando los objetivos de factibilidad y optimalidad:

- a) Una aula no puede estar ocupada por dos grupos simultáneamente.
- b) Un docente no puede impartir dos asignaturas simultáneamente.
- c) Un docente debe impartir por lo menos la cantidad mínima de horas correspondiente a su situación laboral.
- d) Un docente no puede impartir una cantidad de horas superior a su máximo establecido.
- e) Un grupo no debe exceder la capacidad del aula asignada.
- f) Una asignatura debe tener impartidas todas las horas lectivas semanales correspondientes
- g) Una asignatura debe asignarse al docente mejor calificado
- h) La asignación de horas debe procurar respetar la disponibilidad de horario de los docentes

Lo anteriormente expresado se encuentra en concordancia con la literatura encontrada acerca de los problemas de tipo CTP, si bien en nuestro caso se implementó un modelo relajado que facilitara el proceso de experimentación que se buscó realizar, esto es congruente con que cada caso de un problema CTP es particular y expresa las necesidades específicas de cada institución educativa (Barraclough, 1965; Carrasco & Pato, 2004; Conant-Pablos, Magaña-Lozano, & Terashima-Marín, 2009; A. J. Soria-Alcaraz et al., 2015b).

#### 4.2. Planteamiento del modelo matemático de optimización

De acuerdo a López (2012), para formalizar el planteamiento del modelo de optimización, deberá estar expresado mediante una estructura que comprenda los siguientes conjuntos básicos de elementos: Parámetros, Variables de decisión, Restricciones y Función Objetivo.

El primer conjunto de elementos a enunciar serán los parámetros, esto es los valores conocidos del sistema. Dichos parámetros se encuentran expresados en la tabla 6:

Tabla 6 Parámetros del modelo matemático

Parámetro	Variable	Descripción
Docentes	D	Matriz que contiene la información de los docentes en cada uno de sus elementos horizontales (Nombre, HrsMin, HrsMax).
Asignaturas	A	Vector que contiene la cantidad de horas lectivas a la semana para cada asignatura.
Calificación	C	Matriz que contiene en el eje horizontal la lista de docentes, en el eje vertical la lista de asignaturas y en su intersección la calificación del docente para impartir esa asignatura.
Disponibilidad	I	Matriz que contiene en el eje horizontal la lista de docentes y en el eje vertical la lista de horas de impartición de clase.
Aulas	U	Vector que contiene la capacidad de cada una de las aulas a asignar.
Grupos	G	Vector que contiene la cantidad de estudiantes que están asignados a cada grupo.

Fuente: Elaboración propia



El siguiente conjunto de elementos a abordar lo constituyen las variables de decisión, que son aquellas que nuestro modelo modificará buscando encontrar la mejor combinación posible de los valores en ellas. Para este fines utiliza una matriz binaria de cinco dimensiones por lo que la representación gráfica no es posible. Cada una de esas dimensiones corresponden a uno de los recursos a asignar ya mencionados y cada una de las variables en dicha matriz corresponde a la intersección de los recursos indicando la ocurrencia o ausencia de dicha combinación.

$$X_{ijklm} \quad \text{BIN}$$

Donde:

i = Docente

j = Asignatura

k = Horario

l = Aula

m= Grupo

A continuación, presentaremos las restricciones del modelo descrito; de las cuales podemos mencionar que dividiremos en dos categorías: las restricciones duras que son aquellas que obligatoriamente deben cumplirse, y las restricciones suaves que son aquellas que son deseables pero que se considerará suficiente el procurar el mayor cumplimiento posible de ellas, estas pueden apreciarse en la tabla 7.

Tabla 7 Restricciones del modelo

Expresión narrativa	Expresión matemática
<b>Restricciones duras</b>	
Un aula no puede estar ocupada por dos grupos simultáneamente	$\sum_{i,j,m} X_{ijklm} \leq 1$
Un docente no puede impartir dos asignaturas simultáneamente.	$\sum_{j,l,m} X_{ijklm} \leq 1$
Un docente debe impartir por lo menos la cantidad mínima de horas correspondiente a su situación laboral.	$\sum_{j,k,l,m} X_{ijklm} \geq D_{i,2}$
Un docente no puede impartir una cantidad de horas superior a su máximo establecido.	$\sum_{j,k,l,m} X_{ijklm} \leq D_{i,3}$
Un grupo no debe exceder la capacidad del aula asignada.	$\sum_{k,l} X_{ijklm} \leq U_j$
Una asignatura debe tener impartidas todas las horas lectivas semanales correspondientes	$\sum_{k,l} X_{ijklm} \geq A_j$
<b>Restricción suave</b>	
Se debe procurar respetar la disponibilidad de los docentes	$\sum_{j,l,m} X_{ijklm} - D_{ik} + S_{ik} = D_{ik}$

Fuente: Elaboración propia

Por último se especifica la función objetivo, la cual determinará el valor alcanzado por el modelo y que representa también la relación matemática entre las variables de decisión y los parámetros y que además representa el objetivo o producto del sistema. En nuestro caso, está compuesta por dos conceptos: la desviación de las asignaciones contra la disponibilidad de los docentes y la asignación de las materias a los docentes más calificados.

Minimizar

$$Z = \left( \sum_{i,k} D_{i,k} \right) + (-1) \left[ \left( \sum_{i,j} X_{ijklm} \right) (C_{i,j}) \right]$$

### 4.3. Operacionalización de las variables de estudio

#### 4.3.1. Descripción de las variables.

Las variables independientes que se manipularán serán modificadas en intervalos fijos que dan origen a tres categorías de magnitud: Bajo, Medio y Alto.

Las variables independientes que se manipularán se expresarán en unidades que representen una categoría de estímulo, la variación entre cada nivel de estímulo para cada una de las variables se puede ver en la tabla 8, en la columna denominada “Escala propuesta para el estudio”.

Tabla 8 Operacionalización de las variables de estudio

Variables independientes	Dominio	Escala propuesta para el estudio	Autores	Unidad de medición
Tamaño de la instancia	1 - No acotado	Bajo: 22,500 Medio: 360,000 Alto: 5,760,000	Carrasco & Pato, 2004; Naderi, 2016; J. A. Soria-Alcaraz et al., 2016	Cantidad de combinaciones
Afinidad de los docentes contra las materias a impartir	0-100%	Bajo: 40% Medio: 50% Alto: 60%	Naderi, 2016; Yazdani et al., 2017	Porcentaje Ponderado que se calcula en base a la calificación multiplicada por la cantidad de veces que ocurre, contra la máxima afinidad posible.
Disponibilidad de los docentes	0-100%	Bajo: 40% Medio: 50% Alto: 60%	Santos et al., 2005; Cortez et al., 2010; Sanchez-Partida et al., 2016	Porcentaje de horas marcadas como disponibles por los docentes para dar clase respecto al total de espacios de tiempo para asignar un evento.

Fuente: Elaboración propia

#### **4.3.2. Grados de manipulación de las variables independientes.**

Para cada variable se ha realizado una definición de los grados de manipulación que se aplicarán y que constituirán el estímulo a registrar en cada caso. Dicha definición de los grados de manipulación tomó en consideración los valores empleados en estudios previos que consideraron las referidas variables y están presentados bajo la columna “Escala propuesta para el estudio” de la tabla 8 y se explican de la siguiente manera: El parámetro correspondiente al tamaño de la instancia se expresa en cuanto a la cantidad de posibles combinaciones entre los conjuntos de elementos a asignar: a) Cantidad de docentes, b) Cantidad de materias, c) Cantidad de aulas y d) Cantidad de horas/clase a asignar. Para esto se toma como base que el nivel bajo de tamaño de la instancia está dado por el resultado de calcular las referidas combinaciones considerando: 15 docentes, 15 aulas, 10 materias, 10 horas de clase. Esto es:  $(15)(15)(10)(10) = 22,500$ . Por otra parte, los parámetros de Afinidad de los docentes con las asignaturas y la disponibilidad horaria de los mismos docentes, la variación entre cada nivel adyacente se estableció en 10%, estableciendo el nivel medio de ambos parámetros en 50%.

De acuerdo con lo anterior la variación del parámetro de tamaño de la instancia fue tal que cada incremento corresponde al doble del tamaño anterior; esto es: teniendo como nivel base el nivel bajo, el nivel medio corresponde al doble de tamaño en cada una de sus cuatro dimensiones a considerar y a su vez el nivel superior del tamaño de la instancia corresponde al doble de tamaño que el corresponde al nivel medio. En el caso del parámetro de Tamaño de la instancia el cambio entre niveles tiene una proporción mayor, ya que en cada nivel se dobló la cantidad de cada uno de los cuatro elementos a combinar (Docentes, aulas, materias

y horas de clase) Ocasionando un crecimiento exponencial en la variación de este parámetro evidenciado en la tabla 8 resultando en que el nivel medio posee 16 veces más combinaciones que el nivel bajo y que el nivel alto posee 16 veces más combinaciones que el nivel medio y 256 veces más que el nivel bajo.

Por lo que corresponde a los parámetros de Afinidad de los docentes con las asignaturas se determinó considerando una escala de cuatro valores posibles que abarca desde 1 (Pésimamente calificado) hasta 4 (Altamente calificado) y se consideró un cálculo ponderado estimado mediante la presencia de cada valor por su aportación sumativa al total de la afinidad en la matriz generada para tal efecto al combinar los docentes con las materias. El cálculo de la disponibilidad horaria de los mismos docentes siguió un concepto similar, excepto por ser dicotómico ya que el docente podía manifestar su disposición para dar clase en ese horario (Estableciendo la conjunción en el valor de 1), o bien indicar que no desearía impartir clase en ese horario (Obteniendo esa combinación el valor de 0). Por lo tanto, para estos dos últimos parámetros la variación entre cada nivel adyacente se estableció en 10%, estableciendo el nivel medio de ambos parámetros en 50%.

La literatura académica en que se encontró referencia a los grados de manipulación para dichas variables se refiere en la tabla 8 bajo la columna "Autores".

Con la anterior configuración, y siguiendo lo estipulado en el proceso experimental, se procederá a conducir las mediciones correspondientes con miras a obtener las lecturas a analizar posteriormente, teniendo presente que estaremos iniciando un proceso perfectible para obtener un modelo lo suficientemente bueno para explicar el fenómeno a estudiar (Baird, 1991).

#### 4.4. Resultados

Se presenta en primera instancia el detalle de los resultados de las ejecuciones del algoritmo genético para resolver cada escenario enfrentado y las tres lecturas asociadas a cada uno de ellos, posteriormente se presentará un análisis exploratorio gráfico sobre la relación entre dichos resultados y las categorías de estímulo por cada uno de los parámetros para a continuación presentar los resultados del análisis numérico de dichos resultados mediante el método de regresión lineal en busca de identificar las variables que resulten más significativas y que mejor expliquen a la variable dependiente.

##### 4.4.1. Resultados de las pruebas de ejecución

El detalle de las diferentes ejecuciones puede apreciarse en la tabla 9 presentada a continuación.

Tabla 9 Resultados de las pruebas de ejecución

Tamaño	Afinidad	Disponibilidad	Ratio obtenido		
			Lectura 1	Lectura 2	Lectura 3
1	1	1	0.0102	0.0050	0.0055
1	1	2	0.0137	0.0109	0.0102
1	1	3	0.0122	0.0093	0.0119
1	2	1	0.0065	0.0091	0.0197
1	2	2	0.0055	0.0059	0.0082
1	2	3	0.0067	0.0063	0.0105
1	3	1	0.0124	0.0138	0.0126
1	3	2	0.0078	0.0066	0.0068
1	3	3	0.0085	0.0067	0.0075
2	1	1	0.0008	0.0006	0.0007
2	1	2	0.0019	0.0005	0.0010
2	1	3	0.0009	0.0011	0.0012
2	2	1	0.0010	0.0009	0.0011
2	2	2	0.0008	0.0019	0.0012
2	2	3	0.0017	0.0016	0.0010
2	3	1	0.0010	0.0011	0.0010
2	3	2	0.0008	0.0023	0.0013

Fuente: elaboración propia

Tabla 9 Resultados de las pruebas de ejecución (Continuación)

Tamaño	Afinidad	Disponibilidad	Ratio obtenido		
			Lectura 1	Lectura 2	Lectura 3
2	3	3	0.0010	0.0021	0.0018
3	1	1	0.0002	0.0004	0.0002
3	1	2	0.0001	0.0013	0.0009
3	1	3	0.0001	0.0002	0.0003
3	2	1	0.0003	0.0004	0.0003
3	2	2	0.0006	0.0008	0.0004
3	2	3	0.0002	0.0005	0.0004
3	3	1	0.0005	0.0003	0.0004
3	3	2	0.0007	0.0009	0.0006
3	3	3	0.0010	0.0004	0.0007

Fuente: Elaboración propia

#### 4.4.2. Análisis exploratorio gráfico

A continuación se muestran gráficas que comparan la media de los ratios obtenidos entre los diferentes valores de los parámetros ajustados.

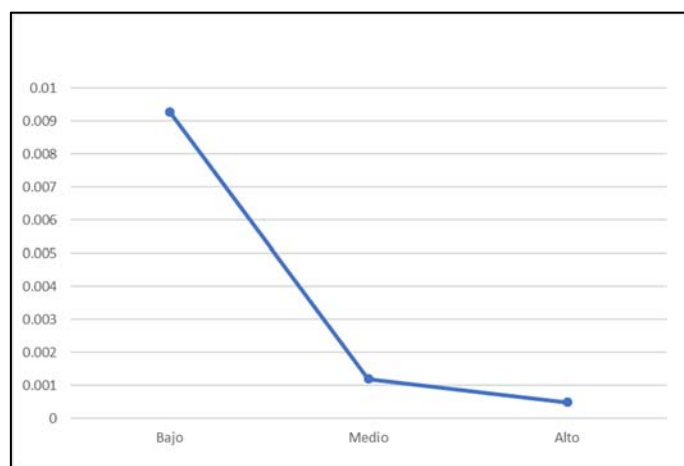
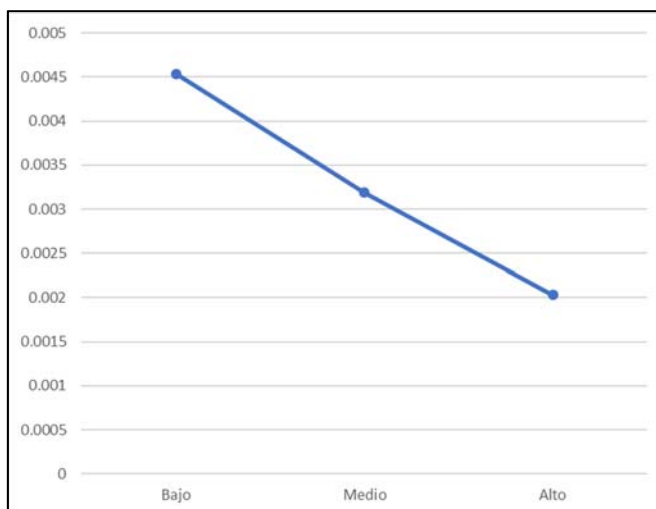


Figura 10 Media de ratios alcanzados por categoría de tamaño

Fuente: Elaboración propia

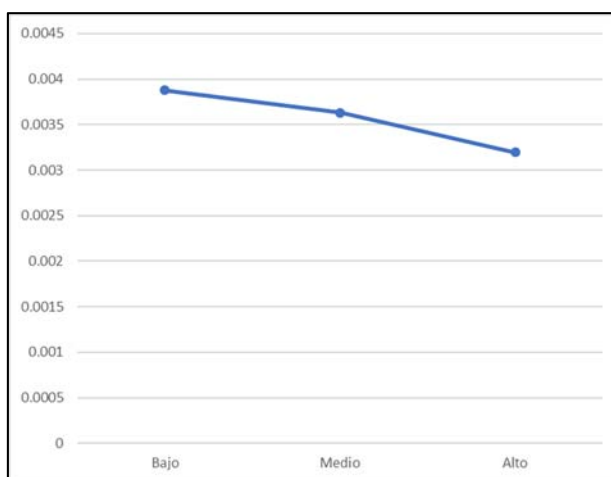
En la figura 10, puede apreciarse que la media del ratio demuestra un marcado comportamiento a la baja conforme se incrementa el tamaño de la instancia, además de una mayor variación de las medias entre los niveles bajo y alto del parámetro examinado.



*Figura 11* Media de los ratios alcanzados por categoría de afinidad de los docentes

Fuente: Elaboración propia

Por otra parte, en la figura 11 se puede apreciar un comportamiento a la baja de las medias obtenidas con una pendiente más suave y con una menor proporción de variación entre los niveles examinados de la variable de afinidad de los docentes contra las materias a impartir.



*Figura 12* Media de los ratios alcanzados por categoría de disponibilidad de los docentes.

Fuente: Elaboración propia



En figura 12 podemos ver que la media de ratios obtenida sugiere la que parece ser la pendiente más suave conforme varía el nivel de la disponibilidad de los docentes.

#### 4.4.3. Análisis estadístico mediante pruebas de hipótesis

Como un proceso de análisis estadístico en búsqueda de contrastes entre los diferentes niveles de las variables independientes, se proceden a realizar pruebas de hipótesis para medias con un alfa de 0.05 que pudieran sugerir algún efecto derivado de los niveles de cada una de ellas.

Por lo anterior, y para este fin, se establecieron hipótesis nulas a evaluar mediante el método referido, las cuales se enlistan en la tabla 10.

Tabla 10 Hipótesis nulas para las pruebas de hipótesis t

H0n	Variable	Hipótesis nula
H01	Tamaño	TamañoBajo = TamañoMedio
H02	Tamaño	TamañoMedio = TamañoAlto
H03	Tamaño	TamañoBajo = TamañoMedio
H04	Afinidad	AfinidadBaja = AfinidadMedia
H05	Afinidad	AfinidadMedia = AfinidadAlta
H06	Afinidad	AfinidadBaja = AfinidadAlta
H07	Disponibilidad	DisponibilidadBaja = DisponibilidadMedia
H08	Disponibilidad	DisponibilidadMedia = DisponibilidadAlta
H09	Disponibilidad	DisponibilidadBaja = DisponibilidadAlta

Fuente: Elaboración propia

Al realizar las correspondientes pruebas, se obtuvieron los resultados mostrados en la tabla 11.

Tabla 11 Comprobaciones de hipótesis de diferencia de medias

H0n	Resultados	Interpretación
H01	Estadístico t: 12.208 Valor crítico: 2.0518	Se rechaza H01
H02	Estadístico t: 6.7030 Valor crítico: 2.0141	Se rechaza H02
H03	Estadístico t: 13.4218 Valor crítico: 2.0555	Se rechaza H03
H04	Estadístico t: 2.0560 Valor crítico: 1.9960	Se rechaza H04
H05	Estadístico t: -0.9597 Valor crítico: 2.0040	No se rechaza H05
H06	Estadístico t: 1.0721 Valor crítico: 2.003	No se rechaza H06
H07	Estadístico t: 1.0139 Valor crítico: 1.9960	No se rechaza H07
H08	Estadístico t: 0.1173 Valor crítico: 1.9990	No se rechaza H08
H09	Estadístico t: 0.6160 Valor crítico: 1.9983	No se rechaza H09

Fuente: Elaboración propia

En los resultados mostrados en la tabla 11 podemos apreciar que: considerando las variables como grupo, la única de ellas que logró evidenciar que las medias son diferentes en cada una de las comparaciones de niveles es la correspondiente al tamaño de la instancia (H01, H02 y H03), por otra parte se permite la observación de que la hipótesis de igualdad que contrastó el nivel bajo de la variable afinidad con el nivel medio de la misma (H04) también fue rechazada, lo cual sugiere un posible efecto por parte de dicha variable aunque no se identificó el

rechazo de las otras dos hipótesis asociadas a esa variable (H05 y H06); y en lo que corresponde a la variable de disponibilidad, ninguna de las hipótesis nulas planteadas se rechazó (H07, H08 y H09); por lo tanto parece indicar que esta última variable no tendrá un efecto en cuanto a la variable dependiente estudiada. En los análisis posteriores se buscará la confirmación de este indicio.

#### 4.4.4. Análisis estadístico mediante regresión lineal

En este apartado presentaremos los resultados obtenidos de analizar los datos de ejecución de nuestro experimento bajo el método de regresión lineal utilizando el software de análisis estadístico IBM SPSSv20. El método de ejecución aplicado es el denominado “Paso a paso” (Stepwise, por su nombre en inglés), considerando a la variable dependiente como el ratio obtenido y como variables independientes las ya referidas: Tamaño, Afinidad y Disponibilidad.

El análisis realizado nos indica los siguientes resultados obtenidos que se muestran en las tablas a continuación; considerando a la variable del ratio obtenido como la variable dependiente en cada uno de los casos:

Puede observarse en la tabla 12, que solamente un modelo logró sobrevivir al proceso de regresión por pasos consecutivos, y que dicho modelo consideró significativa solamente a la variable que corresponde al tamaño de la instancia, descartando al resto de las variables independientes

Tabla 12 Variables introducidas al modelo de regresión lineal, método paso a paso.

Modelo	Variables introducidas	Variables eliminadas	Método
1	Tamaño	.	Por pasos (criterio: Prob. de F para entrar <= .050, Prob. de F para salir >= .100).

Fuente: Elaboración propia

En la tabla 13, se puede apreciar que el modelo encontrado logra explicar razonablemente bien el comportamiento de la variable dependiente al contar con una  $R^2$  de 0.654.

Tabla 13 Resumen del modelo de regresión lineal

Modelo	R	R cuadrado	R cuadrado corregida	Error típ. de la estimación
1	.809a	0.654	0.65	0.0026382

Fuente: Elaboración propia

Nótese en la tabla 14 que se logra identificar el valor del intercepto, así como la beta de la única variable que se encontró significativa (Tamaño de la instancia) y que demuestra una relación inversa con la variable dependiente.

Tabla 14 Tabla de coeficientes

Modelo		Coeficientes no estandarizados		Coeficientes tipificados	t	Sig.
		B	Error típ.	Beta		
1	(Constante)	0.012	0.001		16.021	0.000
	Tamaño	-0.004	0	-0.809	-12.23	0.000

Fuente: Elaboración propia

Finalmente en la tabla 15, podemos ver la lista de variables independientes que no lograron entrar al modelo presentado; se trata de las variables de Afinidad de los maestros con las clases a impartir y de la Disponibilidad horaria de los mismos.

Tabla 15 Variables excluidas						
Modelo		Beta dentro	t	Sig.	Correlación parcial	Estadísticos de colinealidad
						Tolerancia
1	Afinidad	-.003b	-0.038	0.97	-0.004	1
	Disponibilidad	-.034b	-0.514	0.609	-0.058	1

Fuente: Elaboración propia

#### **4.5. Comprobación de Hipótesis**

La hipótesis general de investigación para esta tesis es:

Los parámetros de la instancia: Tamaño de la instancia, Afinidad de los docentes con las materias a impartir y Disponibilidad de los docentes para la impartición de clases tienen un impacto significativo en la calidad de las soluciones obtenidas para problemas de tipo CTP mediante la metaheurística de algoritmos genéticos.

##### **4.5.1. Hipótesis Nula**

Como comprobación de la hipótesis se utilizarán elementos del análisis estadístico realizado y se retoma el planteamiento de la hipótesis nula.

**H<sub>0</sub>:** Los parámetros de la instancia: Tamaño de la instancia, Afinidad de los docentes con las materias a impartir y Disponibilidad de los docentes para la impartición de clases no tienen un impacto significativo en la calidad de las soluciones obtenidas para problemas de tipo CTP mediante la metaheurística de algoritmos genéticos.

Como prueba para aceptar o rechazar la hipótesis nula, podemos referirnos a la tabla 14, la cual indica que el modelo de regresión lineal por el método de paso a paso si logra considerar a una de las variables independientes (Tamaño de la instancia) con una relación de causalidad respecto a la variable dependiente (Calidad de la solución), rechazando de esta manera H<sub>0</sub>.

##### **4.5.2. Hipótesis Específicas**

Procedemos a enunciar las hipótesis específicas de investigación derivadas del modelo gráfico presentado en la figura 8:

Ha1 El tamaño de la instancia contribuye de manera significativa en la calidad de la solución obtenida

Ha2 La afinidad de los docentes contra las materias a impartir contribuye de manera significativa en la calidad de la solución obtenida.

Ha3 La disponibilidad de los docentes contribuye de manera significativa en la calidad de la solución obtenida.

Las cuales procederemos a responder basados en el resultado del método de regresión lineal paso a paso y se han plasmado en la tabla 16.

Tabla 16 Comprobación de las hipótesis específicas de la investigación.

Hipótesis específica	Resultado del método de regresión lineal paso a paso	Evaluación de Hipótesis
Ha1	Variable introducida	Se rechaza H01
Ha2	Variable excluida	No se rechaza H01
Ha3	Variable excluida	No se rechaza H01

Fuente: Elaboración propia

Dados los resultados hasta este momento expuestos, podemos plantear el modelo de regresión lineal múltiple resultante como:

$$f[x] = C + \beta_1 X_1 \text{Tamaño} + \varepsilon$$

Sustituyendo por los respectivos coeficientes obtenemos la ecuación del modelo resultante:

$$F[x] = 0.012 + (-0.004) X_1 \text{Tamaño}$$

## 5. Conclusiones y discusión

Conforme a las evidencias encontradas durante la conducción de la presente investigación podemos comentar que el desempeño del método de solución de algoritmos genéticos para problemas de tipo `ClassTeacherTimetablingProblem` (CTTP), se ve afectado de una manera significativa por el tamaño de la instancia a resolver, lo cual se considera en concordancia con el hecho de que el incremento del referido parámetro implica un crecimiento del espacio de soluciones a explorar.

Vale la pena señalar que fueron, en general, congruentes los resultados obtenidos mediante los instrumentos de pruebas de hipótesis que se realizaron como análisis inicial con los resultados obtenidos de la ejecución del modelo de regresión lineal que al aislar los elementos e indicar una causalidad nos permiten referir la aseveración del efecto observado.

Se considera interesante que no se haya encontrado evidencia fuerte de la significatividad de los dos parámetros excluidos del modelo, ya que pudiera parecer que la proporción de docentes calificados y de su disponibilidad ayudarían a encontrar soluciones de mayor calidad y lo encontrado en el presente estudio sugiere que no es así.

Quedan pendientes para futuros trabajos dos líneas de investigación: a) Evaluar comparativamente métodos alternos de solución ya sea en el rubro de las metaheurísticas u otro tipo de recursos, o b) Continuar el presente análisis aplicando otras herramientas multivariantes tales como los sistemas de ecuaciones estructurales.

Con respecto a la utilidad del conocimiento desprendido de este estudio, se considera que constituye un elemento más de información para la adecuada elección de los métodos disponibles para resolver problemas de tipo CTPP.



### Referencias bibliográficas

- Azimi, Z. N. (2004). Comparison of metaheuristic algorithms for Examination Timetabling Problem. *Journal of Applied Mathematics and Computing*, 16(1–2), 337–354. <https://doi.org/10.1007/BF02936173>
- Baird, D. C. (1991). *Experimentación: Una introducción a la teoría de mediciones y al diseño de experimentos* (2nd ed.). Prentice-Hall.
- Barracough, E. D. (1965). The application of a digital computer to the construction of timetables. *The Computer Journal*, 8(2), 136–146. <https://doi.org/10.1093/comjnl/8.2.136>
- Black, P. E. (2004a). global optimum. Retrieved May 18, 2015, from <http://xlinux.nist.gov/dads/HTML/globalOptimum.html>
- Black, P. E. (2004b). local optimum. Retrieved May 18, 2015, from <http://xlinux.nist.gov/dads/HTML/localoptimum.html>
- Burke, E., Elliman, D., Ford, P., & Weare, R. (1996). Examination timetabling in British Universities: A survey. *Practice and Theory of Automated Timetabling*, 1153, 76–90. <https://doi.org/10.1007/3-540-61794-9>
- Campbell, D. T., Stanley, J. C., & Gage, N. L. (1963). Experimental and quasi-experimental designs in prevention research. *NIDA Research Monograph*. [https://doi.org/10.1016/0306-4573\(84\)90053-0](https://doi.org/10.1016/0306-4573(84)90053-0)
- Carrasco, M. P., & Pato, M. V. (2004). A comparison of discrete and continuous neural network approaches to solve the class/teacher timetabling problem. *European Journal of Operational Research*, 153(1), 65–79. [https://doi.org/10.1016/S0377-2217\(03\)00099-7](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(03)00099-7)
- Carter, M., & Burke, E. (1998). *Practice and Theory of Automated Timetabling II*. (E. Burke & M. Carter, Eds.) (Vol. 1408). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/BFb0055877>
- Cataldo, A., Ferrer, J.-C., Miranda, J., Rey, P. A., & Sauré, A. (2017). An integer programming approach to curriculum-based examination timetabling. *Annals of Operations Research*, 258(2), 369–393. <https://doi.org/10.1007/s10479-016-2321-2>
- Conant-Pablos, S. E., Magaña-Lozano, D. J., & Terashima-Marín, H. (2009). Pipelining Memetic Algorithms, Constraint Satisfaction, and Local Search for Course Timetabling. In A. H. Aguirre, R. M. Borja, & C. A. R. Garcíá (Eds.), *MICAI 2009: Advances in Artificial Intelligence: 8th Mexican International Conference on Artificial Intelligence, Guanajuato, México, November 9-13, 2009. Proceedings* (pp. 408–419). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. [https://doi.org/10.1007/978-3-642-05258-3\\_36](https://doi.org/10.1007/978-3-642-05258-3_36)
- Cortez, A., Rosales, G., Naupari, R., & Vega, H. (2010). Sistema de apoyo a la generación de horarios basado en algoritmos genéticos. *Revista de Investigación de Sistemas e Informática*, 7(1).
- Creswell, J. W. (2009). *Research Design Qualitative, Quantitative and Mixed Methods Approaches* (3rd ed.). SAGE.
- Darwin, C. (1968). *ON THE ORIGIN OF SPECIES BY MEANS OF NATURAL SELECTION*. (Murray, Ed.). London.
- de Werra, D. (1985). An introduction to timetabling. *European Journal of Operational Research*, 19(2), 151–162. [https://doi.org/10.1016/0377-2217\(85\)90167-5](https://doi.org/10.1016/0377-2217(85)90167-5)

- de Werra, D. (1997). The combinatorics of timetabling. *European Journal of Operational Research*, 96(3), 504–513. [https://doi.org/10.1016/S0377-2217\(96\)00111-7](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(96)00111-7)
- Gendreau, M. (2010). *Handbook of Metaheuristics* (2nd ed.). <https://doi.org/10.1007/978-1-4419-1665-5>
- Glover, F., & Laguna, M. (1997). Tabu Search. *Journal of Computational Biology a Journal of Computational Molecular Cell Biology*, 16(12), 1689–1703. <https://doi.org/10.1089/cmb.2007.0211>
- Glover, Fred. (1986). Future paths for integer programming and links to artificial intelligence. *Computers & Operations Research*, 13(5), 533–549. [https://doi.org/10.1016/0305-0548\(86\)90048-1](https://doi.org/10.1016/0305-0548(86)90048-1)
- Glover, Fred, & Laguna, M. (1999). Tabu Search. In D.-Z. Du & P. M. Pardalos (Eds.) (pp. 2093–2229). Springer US. Retrieved from [http://link.springer.com/chapter/10.1007/978-1-4613-0303-9\\_33](http://link.springer.com/chapter/10.1007/978-1-4613-0303-9_33)
- Holland, J. H. (1992). *Adaptation in natural and artificial systems: an introductory analysis with applications to biology, control, and artificial intelligence*. MIT press.
- Lopez, F. (2004). *Aplicación de un algoritmo genético generacional para un problema de logística de ruteo con entrega y recolección de producto y con ventanas de horario negociable*. Universidad Autónoma de Nuevo León.
- Lopez, F. (2012). *Optimización combinatoria y modelos multivariantes robustos*. Saarbrücken.
- Lü, Z., & Hao, J.-K. (2010). Adaptive Tabu Search for course timetabling. *European Journal of Operational Research*, 200(1), 235–244. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2008.12.007>
- Mazlan, M., Makhtar, M., Firdaus Khair Ahmad Khairi, A., Afendee Mohamed, M., & Nordin Abdul Rahman, M. (2018). Ant colony optimisation for solving university course timetabling problems. *International Journal of Engineering & Technology*, 7(2.15), 139. <https://doi.org/10.14419/ijet.v7i2.15.11371>
- Naderi, B. (2016). Modeling and Scheduling University Course Timetabling Problems. *International Journal of Research in Industrial Engineering*, 5(1(4)), 1–15. <https://doi.org/10.22105/RIEJ.2017.49167>
- Pongcharoen, P., Promtet, W., Yenradee, P., & Hicks, C. (2008). Stochastic Optimisation Timetabling Tool for university course scheduling. *International Journal of Production Economics*, 112(2), 903–918. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2007.07.009>
- RAE. (2012). Real Academia Española - Heurística. Retrieved May 22, 2015, from <http://lema.rae.es/drae/?val=heurística>
- Ragsdale, C. T. (2014). *Spreadsheet Modeling and Decision Analysis: A Practical Introduction to Business Analytics* (7th ed.).
- Saavedra, M. S. (2001). *Elaboración de tesis profesionales* (1st ed.). Editorial Pax México.
- Sampieri, R. H. (2014). *Metodología de la investigación* (6th ed.). McGraw Hill.
- Sanchez-Partida, D., Baquela, E. G., Mora-Vargas, J., & Smith, N. R. (2016). Case study: Simulated annealing for improving the educational timetable: EBSCOhost. *Nova Scientia*, 8(17), 340–360. <https://doi.org/10.21640/ns.v8i17.631>

- Santos, H. G., Ochi, L. S., & Souza, M. J. F. (2005). A Tabu search heuristic with efficient diversification strategies for the class/teacher timetabling problem. *Journal of Experimental Algorithmics*, 10, 2.9. <https://doi.org/10.1145/1064546.1180621>
- Schmidt, G. (1980). Timetable construction - an annotated bibliography. *The Computer Journal*, 23(4), 307–316. <https://doi.org/10.1093/comjnl/23.4.307>
- Soria-Alcaraz, A. J., Carpio, M., Puga, H., Swan, J., Melin, P., Terashima, H., & Sotelo-Figueroa, A. M. (2015a). Parallel Meta-heuristic Approaches to the Course Timetabling Problem. In P. Melin, O. Castillo, & J. Kacprzyk (Eds.), *Design of Intelligent Systems Based on Fuzzy Logic, Neural Networks and Nature-Inspired Optimization* (pp. 391–417). Cham: Springer International Publishing. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-17747-2\\_30](https://doi.org/10.1007/978-3-319-17747-2_30)
- Soria-Alcaraz, A. J., Carpio, M., Puga, H., Swan, J., Melin, P., Terashima, H., & Sotelo-Figueroa, M. (2015b). Parallel Meta-heuristic Approaches to the Course Timetabling Problem. In P. Melin, O. Castillo, & J. Kacprzyk (Eds.), *Design of Intelligent Systems Based on Fuzzy Logic, Neural Networks and Nature-Inspired Optimization*.
- Soria-Alcaraz, J. A., Özcan, E., Swan, J., Kendall, G., & Carpio, M. (2016). Iterated local search using an add and delete hyper-heuristic for university course timetabling. *Applied Soft Computing*, 40, 581–593. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.asoc.2015.11.043>
- Staford, B. (1967). *Management Science: The Business Use of Operations Research*. Aldus.
- Thompson, G. L. (1965). *A method for scheduling students to classes*. Pittsburgh, Pennsylvania.
- Vélez, M. C., & Montoya, J. A. (2007). METAHEURÍSTICOS: UNA ALTERNATIVA PARA LA SOLUCIÓN DE PROBLEMAS COMBINATORIOS EN ADMINISTRACIÓN DE OPERACIONES. *Revista EIA*, (8), 99–115. Retrieved from [http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1794-12372007000200009&lng=en&nrm=iso&tlng=es](http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1794-12372007000200009&lng=en&nrm=iso&tlng=es)
- Yazdani, M., Naderi, B., & Zeinali, E. (2017). Algorithms for university course scheduling problems. *Tehnicki Vjesnik - Technical Gazette*, 24(Supplement 2). <https://doi.org/10.17559/tv-20130918133247>

### **Anexo A: Glosario**

**Algoritmos Genéticos.** Metaheurística que pretende encontrar buenas soluciones a problemas de optimización mediante emular el proceso natural de la evolución.

**Class Teacher Timetabling Problem.** Categoría de problemas combinatorios que parten de la necesidad básica de asignar un docente a una asignatura en una programación de sesiones.

**Ciencia de la administración.** Véase *Management Science*.

**CTTP.** Véase *Class Teacher Timetabling Problem*.

**Espacio de búsqueda.** Representación conceptual de las diferentes combinaciones que pueden dar respuesta a un problema.

**Espacio de soluciones.** Véase *Espacio de búsqueda*.

**Heurística.** Búsqueda de un método de solución empírico no formal para un problema.

**Instancia.** Conjunto de valores para los diferentes parámetros y datos de un problema que constituye un caso particular de estudio.

**Management Science.** Rama interdisciplinaria de matemáticas aplicadas a la administración.

**Metaheurística.** Emulación de un proceso natural que ayude a encontrar la mejor solución posible a un problema en un tiempo aceptable.

**NP-Hard.** *Non-deterministic Polynomial-time Hard.* Clasificación de problemas cuyo tiempo de solución crece exponencialmente conforme se incrementa la cantidad de opciones a evaluar.

**Optimalidad.** Término que pretende representar la calidad de una solución encontrada a un problema.

**Óptimo global.** Mejor resultado absoluto posible dentro de un espacio de soluciones.

**Óptimo local.** Mejor resultado encontrado en un momento determinado dentro de un proceso de búsqueda en el *espacio de soluciones* antes de empeorar de continuar la búsqueda con los parámetros utilizados hasta ese momento.

**Problema combinatorio.** Categoría de problema que consiste en evaluar diferentes combinaciones de elementos.

**Ratio.** Razón o cociente de dos números

**Solución factible.** Solución que satisface al menos las condiciones elementales impuestas en el problema a evaluar.

**Timetabling.** Programación de eventos en tiempo y/o secuencia

**TS.** Véase *Tabú Search*