

UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE INFORMÁTICA
VALPARAÍSO - CHILE



“ALGORITMO METAHEURÍSTICO PARA EL BALANCEO
DE MALLAS CURRICULARES PERSONALIZADAS:
CASO INGENIERÍA CIVIL INFORMÁTICA UTFSM”

EVA WANG

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL EN INFORMÁTICA

Profesor Guía: María Cristina Riff
Profesor Correferente: Pedro Godoy

Julio - 2026



CONSTANCIA DE VALIDACIÓN Y CONFIDENCIALIDAD DE MONOGRAFÍA A REPOSITORIO ACADÉMICO

1.- IDENTIFICACIÓN DEL TRABAJO ACADÉMICO

Tipo de monografía (marcar una opción): ☒ Memoria o trabajo de título ☐ Tesis de Postgrado

Título del trabajo: Algoritmo metaheurístico para el balanceo de mallas curriculares personalizadas: caso Ingeniería Civil Informática UTFSM

Nombre del candidato(a): Eva Wang

Carrera / Grado: Ingeniería Civil en Informática

Campus: Casa Central

Departamento: Informática

2.- VALIDACIÓN DEL PROFESOR GUÍA/DIRECTOR DE TESIS

Yo, María Cristina Riff, en mi calidad de profesor(a) guía/director(a) del trabajo académico mencionado anteriormente **DEJO CONSTANCIA** que:

- He revisado esta versión del documento y corresponde a la versión final aprobada del trabajo.
- El trabajo cumple con los requisitos académicos y de formato establecidos por la institución.

3.- EVALUACIÓN DE CONFIDENCIALIDAD POR PROPIEDAD INDUSTRIAL (marcar una opción)

☒ El trabajo **NO contiene** información que amerite confidencialidad y puede ser publicado de inmediato en repositorio con acceso abierto.

☐ El trabajo **CONTIENE** información con potenciales implicancias de propiedad industrial o intelectual y requiere un periodo de confidencialidad (**embargo**) por (**marcar una opción**):

☐ 6 meses ☐ 12 meses ☐ 2 años ☐ 3 años ☐ 5 años ☐ 10 años

Fundamentación de la necesidad de confidencialidad (obligatorio si se solicita embargo):

4.- FIRMAS

Profesor(a) guía o director(a) de memoria o tesis:

Fecha: 24/7/2026

Firma:

Estudiante o Candidato(a):

Fecha: 24/7/2026

Firma:

Este formulario debe ser insertado como página 2 de la memoria o tesis, completado y firmado por estudiante y profesor(a) antes de la entrega en portal PRISMA de Biblioteca USM.

DEDICATORIA

Para mi mamá y el resto de mi familia, quienes con sus esfuerzos y sacrificios han hecho posible que hoy esté terminando una carrera universitaria. Muchas gracias.

AGRADECIMIENTOS

Durante estos seis años en la universidad, tuve la oportunidad de conocer personas muy distintas, quienes me permitieron comprender que no existe una única forma de recorrer este camino: detrás de cada persona hay historia, esfuerzo, dificultades, aprendizajes y una forma única de enfrentar la vida universitaria. Muchas de estas amistades, conversaciones y vivencias no solo marcaron mi experiencia académica, sino que también influyeron la forma en que entendí el problema abordado en esta memoria. Por ello, quiero agradecer a todas las personas con las que compartí grupos de estudio, largas jornadas de trabajo y especialmente momentos de descanso de la vida universitaria. Gracias por la compañía, el apoyo y las experiencias que me acompañarán mucho más allá de esta memoria.

Quiero agradecer también a todas las personas que hicieron posible esta memoria. A mi profesora guía, María Cristina Riff, por confiar en mí y darme la oportunidad de desarrollar este tema de memoria tan interesante. Agradezco su orientación y su apoyo, incluso en el proceso de difusión de encuestas. Al jefe de carrera, Pedro Godoy, quien facilitó información necesaria para la investigación y fue un gran apoyo en la difusión de encuestas. A Paolo G. M., por dedicar su tiempo libre a revisar esta memoria y señalar puntos de mejora. Finalmente, quiero agradecer a todas las personas que se dieron el tiempo de usar mi herramienta y contestar mis encuestas. Su tiempo, disposición y opinión son de lo más valioso y permitieron validar esta memoria.

Quiero agradecer especialmente a mi mamá y el resto de mi familia. La vida no siempre presenta las mismas oportunidades para todas las personas, y soy consciente de los esfuerzos y sacrificios que hicieron para que hoy esté terminando una carrera universitaria.

Muchas gracias a todas las personas que aportaron de alguna manera a este camino.

RESUMEN

Resumen— La formulación clásica del *Balanced Academic Curriculum Problem* (BACP) no considera la experiencia real de los estudiantes, lo que es limitante en carreras con alta flexibilidad curricular como Ingeniería Civil Informática de la UTFSM. El presente trabajo propuso un modelo que extiende el BACP considerando el desempeño académico del estudiante, su percepción de carga académica y la tasa histórica de reprobación de asignaturas, mediante un enfoque de programación por metas ponderadas que balanceó cuatro objetivos académicos: carga formal, carga percibida, riesgo académico y tiempo de titulación. El problema se resolvió mediante un algoritmo evolutivo capaz de generar múltiples opciones de planificación. La validación experimental confirmó la factibilidad de las soluciones y su respuesta a variaciones de parámetros, metas y pesos, mientras que una evaluación cualitativa con estudiantes evidenció una percepción general positiva respecto a la calidad y utilidad de la herramienta.

Palabras Clave—*Balanced Academic Curriculum Problem*; personalización; algoritmo evolutivo.

ABSTRACT

Abstract— The classical formulation of the *Balanced Academic Curriculum Problem* (BACP) does not consider students' actual academic experience, which is a limitation in programs with high curricular flexibility such as Computer Science at UTFSM. This work proposed a model that extends the BACP by considering the student's actual academic performance, their perceived academic workload and the historical course failure rates, through a weighted goal programming approach that balanced four academic objectives: formal load, perceived load, academic risk, and time to graduation. The problem was solved using an evolutionary algorithm capable of generating multiple planning options. Experimental validation confirmed the feasibility of the solutions and their responsiveness to variations in parameters, goals and weights, while a qualitative evaluation with students showed a generally positive perception regarding the quality and usefulness of the tool.

Keywords—*Balanced Academic Curriculum Problem*; personalization; evolutionary algorithm.

GLOSARIO

ACO: Algoritmo de la colonia de hormigas.

AG: Algoritmo genético.

B&B: *Branch and Bound*.

BACP: *Balanced Academic Curriculum Problem*.

CAE: Crédito con Aval del Estado.

CJE: Centro de Estudios Avanzados sobre Justicia Educacional.

CP: Programación con restricciones (*Constraint Programming*).

CRUCH: Consejo de Rectores y Rectoras de las Universidades Chilenas. Es un organismo que reúne a las universidades chilenas y ha promovido la estandarización del sistema de créditos SCT-Chile.

CSOP: problema de optimización combinatoria (*Constraint Satisfaction Optimization Problem*).

CSP: problema de satisfacción de restricciones (*Constraint Satisfaction Problem*).

CSPLib: *Constraint Satisfaction Problem Library*.

DBACP: *Dynamic Balanced Academic Curriculum Problem*.

DCPP: *Department Course Planning Problem*.

DEA: Dirección de Enseñanza Aprendizaje.

DI: Departamento de Informática.

DSS: Sistema de soporte de decisiones (*Decision support system*).

ECM: Error cuadrático medio.

GBACP: *Generalized Balanced Academic Curriculum Problem*.

IMT: Instituto de Minas y Telecomunicaciones (*Institut Mines-Télécom*).

IP: Programación entera (*Integer Programming*).

LA: *Learning Analytics*.

LTCP: *Long-term Course Planning*.

MILP: Programación entera mixta (*Mixed-integer Linear Programming*).

MINEDUC: Ministerio de Educación de Chile.

OCDE: Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos. Es una organización internacional que reúne a países comprometidos políticas orientadas a mejorar el bienestar económico y social mediante la cooperación entre sus países miembros, el análisis de datos y la formulación de recomendaciones basadas en evidencia.

OFAT: *One-Factor-at-a-Time*.

PCSP: *Personalized Course Selection Problem*.

PUCV: Pontificia Universidad Católica de Valparaíso.

QIP: Programación entera cuadrática o *Quadratic Integer Programming*.

QUBO: *Quadratic Unconstrained Binary Optimization.*

SA: *Simulated Annealing.*

SCPP: *Student Course Planning Problem.*

SCT/SCT-Chile: Sistema de Créditos Transferibles.

SIES: Servicio de Información de Educación Superior. Es una entidad del Ministerio de Educación de Chile encargada de recopilar y publicar estadísticas oficiales sobre educación superior.

SIGA: Sistema de Información y Gestión Académica.

SIMEL: Sistema de Información del Mercado Laboral. Es una plataforma del Instituto Nacional de Estadísticas (INE) de Chile que reúne y disponibiliza indicadores relacionados con el mercado laboral de Chile.

TIC: Tecnologías de la Información y las Comunicaciones.

TS: *Tabu Search.*

UC: Pontificia Universidad Católica de Chile.

UET: Universidad de Ingeniería y Tecnología.

UPLA: Universidad de Playa Ancha.

UTAD: Unidad Técnica de Apoyo a la Docencia.

UTFSM: Universidad Técnica Federico Santa María.

WGP: *Weighted Goal Programming* o Programación por metas ponderada.

WSL2: *Windows Subsystem for Linux 2.*

ÍNDICE DE CONTENIDOS

RESUMEN	IV
ABSTRACT	IV
GLOSARIO	V
ÍNDICE DE FIGURAS	IX
ÍNDICE DE TABLAS	IX
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO 1: DEFINICIÓN DEL PROBLEMA	3
1.1 Contexto	3
1.2 Situación actual	5
1.3 Problema	8
1.4 Objetivo de una solución	10
1.4.1 Objetivo general	10
1.4.2 Objetivos específicos	10
CAPÍTULO 2: MARCO CONCEPTUAL	11
2.1 Formulación y evolución del problema	11
2.2 Personalización del problema	13
2.3 Técnicas de resolución	15
2.4 Validación de la solución	19
2.5 Resumen	20
CAPÍTULO 3: PROPUESTA DE SOLUCIÓN	22
3.1 Antecedentes	22
3.2 Modelo matemático	23
3.2.1 Enfoque	23
3.2.2 Parámetros	24
3.2.3 Variables de decisión	25
3.2.4 Variables auxiliares	25
3.2.5 Restricciones	26
3.2.6 Función objetivo	26
3.3 Algoritmo de resolución	28
3.3.1 Enfoque	28
3.3.2 Representación de la solución	28
3.3.3 Espacio de búsqueda	29
3.3.4 Manejo de restricciones	29
3.3.5 Algoritmo evolutivo	32
3.3.6 Población inicial	32

3.3.7 Reemplazo	34
3.3.8 Operador de selección	35
3.3.9 Operador de mutación	36
3.3.10 Operador de cruzamiento	36
3.3.11 Histórico	37
CAPÍTULO 4: VALIDACIÓN DE LA SOLUCIÓN	39
4.1 Evaluación experimental	39
4.1.1 Instancias	39
4.1.2 Procedimiento	40
4.1.3 Análisis de factibilidad	43
4.1.4 Análisis de sensibilidad de parámetros del algoritmo	44
4.1.5 Análisis de sensibilidad de pesos y metas	45
4.1.6 Análisis comparativo de funciones de evaluación de referencia	47
4.2 Evaluación cualitativa	49
4.2.1 Diseño	49
4.2.2 Procedimiento	53
4.2.3 Resultados	54
CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES	59
5.1 Conclusiones generales	59
5.2 Cumplimiento de objetivos	60
5.3 Trabajo futuro	61
ANEXOS	63
Anexo 1: Malla interactiva	63
Anexo 2: Instancias base	63
Anexo 3: Datos de la instancia ejecutada por la aplicación web	69
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	71

ÍNDICE DE FIGURAS

1	Malla curricular de Ingeniería Civil Informática (código 7313) de la UTFSM. . .	4
2	Carga formal y carga percibida por asignatura de la malla curricular de Ingeniería Civil Informática (código 7313) de la UTFSM. Fuente: Elaboración propia. . .	9
3	Representación de un individuo. Fuente: Elaboración propia.	29
4	Representación de una población. Fuente: Elaboración propia.	30
5	Estado académico en la aplicación web. Fuente: Captura de pantalla de la aplicación web [Wang, 2026a].	50
6	Objetivos académicos y botón de generación de mallas curriculares en la aplicación web. Fuente: Captura de pantalla de la aplicación web [Wang, 2026a]. . .	51
7	Resultados generados y botón de acceso a encuesta en la aplicación web. Fuente: Captura de pantalla de la aplicación web [Wang, 2026a].	52
8	Procedimiento de evaluación cualitativa con estudiantes. Fuente: Elaboración propia.	54
9	Menciones por subcategoría. Fuente: Elaboración propia.	56
10	Malla interactiva de Ingeniería Civil Informática (código 7313) de la UTFSM. Fuente: Captura de pantalla del sitio web de la malla interactiva [LABCOMP, 2026].	63

ÍNDICE DE TABLAS

1	Asignaturas impartidas por el DI de la malla curricular de Ingeniería Civil Informática (código 7313) de la UTFSM con tasas históricas de reprobación superiores a 20 % en el Campus Casa Central durante el año 2025. Fuente: Elaboración propia a partir de datos proporcionados por el jefe de carrera. . . .	6
2	Trabajos revisados. Fuente: Elaboración propia.	21
3	Tipos de restricciones. Fuente: Elaboración propia.	31
4	Instancias base. Fuente: Elaboración propia.	40
5	Configuraciones en la generación de instancias sintéticas. Fuente: Elaboración propia.	41
6	Configuraciones en la ejecución del algoritmo. Fuente: Elaboración propia. . .	42
7	Configuraciones de penalización de restricciones blandas en la ejecución del algoritmo. Fuente: Elaboración propia.	42
8	Promedio de violaciones por restricción. Fuente: Elaboración propia.	43
9	Aptitud y tiempo de ejecución promedio por parámetro del algoritmo. Fuente: Elaboración propia.	44
10	Configuración de referencia de los parámetros del algoritmo tras el análisis de sensibilidad. Fuente: Elaboración propia.	46
11	Valor promedio y tasa de insatisfacción por meta. Fuente: Elaboración propia. .	46
12	Valor promedio y tasa de insatisfacción por peso. Fuente: Elaboración propia .	47
13	Tiempo de ejecución, aptitud y ECM promedio por función de evaluación. Fuente: Elaboración propia.	48

14	Promedio, mediana y mejor valor de aptitud, excluyendo penalizaciones, junto con su óptimo conocido, para cada instancia base usando la función de evaluación de [Castro y Manzano, 2001]. Fuente: Elaboración propia.	48
15	Preguntas de tipo Likert y pregunta abierta utilizadas en la encuesta de evaluación cualitativa. Fuente: Elaboración propia.	53
16	Promedio, mediana y desviación estándar por dimensión de las preguntas de tipo Likert en la encuesta de evaluación cualitativa. Fuente: Elaboración propia.	54
17	Promedio, mediana y desviación estándar por pregunta de tipo Likert en la encuesta de evaluación cualitativa. Fuente: Elaboración propia.	55
18	Datos de asignaturas utilizados en la instancia ejecutada por la aplicación web. Fuente: Elaboración propia.	69
19	Valores de referencia de los parámetros del algoritmo y de los parámetros de la instancia ejecutada por la aplicación web. Fuente: Elaboración propia.	70

INTRODUCCIÓN

El diseño de la malla curricular de un plan de estudios no se limita a distribuir la secuencia de asignaturas a lo largo de los semestres; también requiere considerar múltiples restricciones académicas, la duración óptima de la carrera y asegurar que se cumplan las exigencias necesarias para optar al título académico. Esto es conocido como el problema de optimización combinatoria *Balanced Academic Curriculum Problem* (BACP), el cual busca distribuir asignaturas en los distintos semestres optimizando el equilibrio de la carga académica y cumpliendo restricciones académicas.

Sin embargo, la formulación clásica del BACP es limitada porque no considera la experiencia académica real de los estudiantes. Esto resulta relevante en carreras como Ingeniería Civil Informática de la Universidad Técnica Federico Santa María (UTFSM) porque los estudiantes cuentan con flexibilidad para escoger y ordenar sus asignaturas, lo que influye directamente en su avance curricular y en la duración real de sus estudios. En particular, en la carrera se ha documentado una duración real 36,4 % superior a su duración formal, brechas de hasta 80 % entre la carga académica del plan de estudios y la percibida por los estudiantes, y que el 82,2 % de ellos reporta haber tenido que reorganizar su malla curricular por reprobación de asignaturas o congelamiento de estudios.

El presente trabajo propone un modelo y una solución computacional para la generación de mallas curriculares personalizadas, extendiendo el BACP al incorporar como parámetros el desempeño académico actual del estudiante, su percepción de carga académica de las asignaturas y la tasa histórica de reprobación. El modelo usa un enfoque de programación por metas ponderada, en el cual el propio estudiante define metas y pesos para cuatro objetivos académicos que el modelo debe balancear: carga formal, carga percibida, riesgo académico y tiempo de titulación.

El problema del presente trabajo es NP-completo y multiobjetivo. Además, no existe una única solución óptima que satisfaga a todos los estudiantes, ya que sus objetivos y condiciones son altamente heteorgéneos. Por esta razón, se opta por una estrategia de resolución basada en un algoritmo evolutivo, el cual permite explorar múltiples regiones del espacio de búsqueda en paralelo, lo que permite evaluar distintos balances entre los objetivos académicos de forma más eficiente.

La propuesta se valida mediante dos enfoques complementarios. Por un lado, se realiza una evaluación experimental sobre instancias sintéticas, generadas a partir de *benchmarks* de la literatura y de mallas curriculares reales de la UTFSM, con el objetivo de analizar la factibilidad de las soluciones y la sensibilidad del algoritmo frente a sus parámetros, metas y pesos. Por otro lado, se desarrolla una aplicación web que permite a los estudiantes interactuar con el algoritmo sin necesidad de conocimientos técnicos, la cual se utiliza para realizar una evaluación cualitativa mediante una encuesta aplicada a estudiantes de la carrera, recogiendo su percepción sobre calidad de los resultados del algoritmo y utilidad de la herramienta.

El presente trabajo se organiza en cinco capítulos. En el Capítulo 1 se presenta la definición del problema, detallando el contexto y la situación actual de la carrera, para luego formular el problema y los objetivos del trabajo. En el Capítulo 2 se revisa la formulación y evolución del BACP en la literatura, junto con los enfoques de personalización, las técnicas de resolución y las estrategias de validación utilizadas en trabajos previos. En el Capítulo 3 se detalla la propuesta de solución, incluyendo el modelo matemático y el algoritmo evolutivo implementado para resolverlo. En el Capítulo 4 se presenta la validación de la solución, distinguiendo entre la evaluación experimental del algoritmo y la evaluación cualitativa con estudiantes. Finalmente, en el Capítulo 5 se presentan las conclusiones del trabajo, discutiendo el cumplimiento de los objetivos planteados y las líneas de trabajo futuro identificadas.

CAPÍTULO 1

DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

1.1. Contexto

Ingeniería Civil Informática es una carrera de pregrado del Departamento de Informática (DI) de la Universidad Técnica Federico Santa María (UTFSM). Fue creada en el año 1980 y es impartida desde 1981 en el Campus Casa Central y desde 2002 en el Campus San Joaquín. Es una carrera que combina conocimientos científicos, tecnológicos y de gestión para formar profesionales capaces de modelar, diseñar, evaluar, implementar y gestionar sistemas informáticos, apoyándose en el uso de las Tecnologías de la Información y las Comunicaciones (TIC) [DI UTFSM, 2026].

Como toda carrera de educación superior, se estructura a través de un plan de estudios que define las exigencias curriculares que un estudiante debe cumplir para optar al título académico. Este plan se representa en una malla curricular, la cual organiza la secuencia de asignaturas semestrales, incluyendo las relaciones de prerrequisitos y su carga académica [MINEDUC, 2026]. La carga académica corresponde al tiempo total de dedicación del estudiante, generalmente medida mediante el Sistema de Créditos Transferibles SCT-Chile; en la UTFSM, 1 crédito SCT son 27 horas cronológicas de trabajo semestral [UTFSM, 2020].

La malla curricular de Ingeniería Civil Informática de la UTFSM está compuesta por asignaturas obligatorias que cubren los ejes fundamentales de la disciplina, junto con asignaturas electivas y libres que permiten adaptarse a los intereses de cada estudiante y ofrecer una formación flexible en una profesión caracterizada por su constante evolución tecnológica [DI UTFSM, 2026]. Dentro de estas asignaturas se incluye la formación en idioma inglés, así como asignaturas orientadas al fortalecimiento de habilidades profesionales y humanas, tanto en el DI como en otros departamentos de la universidad.

Ingeniería Civil Informática de la UTFSM se rigió por un plan de estudios identificado con el código 7313 para los estudiantes que ingresaron hasta el año 2024. Su malla curricular tiene 59 asignaturas, de las cuales 51 son obligatorias y 8 electivas, distribuidas a lo largo de 11 semestres académicos. En cuanto a la carga académica, tiene un total de 300 créditos SCT y 61 % del total de asignaturas tiene 5 créditos SCT. En el caso de las 28 asignaturas obligatorias impartidas por el DI, 96 % de las asignaturas tienen 5 créditos SCT, lo que implica una asignación relativamente uniforme de carga académica.

En el año 2025, la carrera actualizó su plan de estudios a uno identificado con el código 7310, el cual aplica para los estudiantes que ingresaron desde ese año. Este nuevo plan de estudios redujo la duración formal de la carrera a 10 semestres académicos y 57 asignaturas.

En la UTFSM, el proceso de planificación, construcción y actualización del plan de estudios de

ALGORITMO METAHEURÍSTICO PARA EL BALANCEO DE MALLAS CURRICULARES PERSONALIZADAS:
CASO INGENIERÍA CIVIL INFORMÁTICA UTFSM

Malla Curricular Ingeniería Civil Informática										Plan 73 13	
AÑO 1		AÑO 2		AÑO 3		AÑO 4		AÑO 5		AÑO 5 1/2	
SEMESTRE I	SEMESTRE II	SEMESTRE III	SEMESTRE IV	SEMESTRE V	SEMESTRE VI	SEMESTRE VII	SEMESTRE VIII	SEMESTRE IX	SEMESTRE X	SEMESTRE XI	
IWI-131 ① Programación 3 5	QUI-010 ⑥ Química y Sociedad 3 5	INF-134 ⑫ Estructuras de Datos ① 3 5	INF-253 ⑮ Lenguajes de Programación ⑫ 3 5	INF-239 ⑫ Bases de Datos ⑫ 3 5	INF-236 ⑮ Análisis y Diseño de Software ⑮ ⑮ 3 5	INF-225 ⑮ Ingeniería de Software ⑮ 3 5	INF-322 ⑫ Diseño Interfaces Usuaras ⑮ 3 5	INF-302 ⑫ Electivo Informática II 3 5			
MAT-021 ② Matemáticas I 5 8	MAT-022 ⑦ Matemáticas II ② 5 7	MAT-023 ⑮ Matemáticas III ⑦ 4 7	MAT-024 ⑮ Matemáticas IV ⑮ 4 6	INF-245 ⑮ Arquitectura y Organización de Computadores ⑫ 3 5	INF-246 ⑮ Sistemas Operativos ②⑤ 3 5	INF-256 ⑮ Redes de Computadores ③① 3 5	INF-343 ⑮ Sistemas Distribuidos ③⑦ 3 5	INF-303 ⑮ Electivo Informática III 3 5	INF-304 ⑮ Electivo Informática IV 3 5		
FIS-100 ③ Introducción a la Física 3 6	FIS-110 ⑧ Física General I ② ③ 5 8	FIS-130 ⑮ Física General III ⑦ ⑧ 4 8	FIS-120 ⑮ Física General II ⑦ ⑧ 4 8	FIS-140 ⑮ Física General IV ⑫ ②⑥ 4 8	INF-276 ⑮ Ingeniería, Informática y Sociedad ②⑥ 3 5	ICN-270 ⑮ Información y Matemáticas Financieras ②② 3 5	INF-301 ⑮ Electivo Informática I 3 5	INF-311 ⑮ Electivo I 3 5	INF-313 ⑮ Electivo III 3 5		
	IWG-101 ⑨ Introducción a la Ingeniería 2 3	INF-152 ⑮ Estructuras Discretas ① ② 3 5	INF-155 ⑮ Informática Teórica ⑫ ⑮ 3 5	INF-280 ⑮ Estadística Computacional ① ③ 3 5	INF-221 ⑮ Algoritmos y Complejidad ⑮ ⑮ 3 5	INF-285 ⑮ Computación Científica ⑮ ③③ 3 5	INF-295 ⑮ Inteligencia Artificial ②④ ③③ 3 5	INF-312 ⑮ Electivo II 3 5	INF-314 ⑮ Electivo IV 3 5		
HRW-132 ④ Humanístico I 2 3	HRW-133 ⑩ Humanístico II 2 3	INF-260 ⑮ Teoría de Sistemas ⑨ 3 5	IWN-170 ⑮ Economía IA ⑮ 3 5	INF-270 ⑮ Organizaciones y Sistemas de Información ⑮ 3 5	INF-292 ⑮ Optimización ⑮ 3 5	INF-293 ⑮ Investigación de Operaciones ③④ 3 6	INF-266 ⑮ Sistemas de Gestión ③② 3 5	INF-360 ⑮ Gestión de Proyectos de Informática ②④ ④⑥ 3 5	INF-228 ⑮ Taller Desarrollo de Proyecto de Informática ③② 6 10		
DEW-100 ⑤ Educación Física I 1 2	DEW-101 ⑪ Educación Física II ⑤ 1 2	INF-1 ⑮ Libre1/ Actividad co-curricular 1 2	INF-2 ⑮ Libre2/ Actividad co-curricular 1 2	INF-3 ⑮ Libre3/ Actividad co-curricular 1 2	INF-4 ⑮ Libre4/ Actividad co-curricular 1 2	INF-5 ⑮ Libre5/ Actividad co-curricular 1 2	INF-6 ⑮ Libre6/ Actividad co-curricular 1 2	INF-7 ⑮ Libre7/ Actividad co-curricular 1 2	INF-309 ⑮ Trabajo de Título 1 ②⑥ ③② 1 2	INF-310 ⑮ Trabajo de Título 2 ③⑦ ③⑧ 12 20	
14 24				17 30				16 27			
18 28				16 27				16 27			
18 32				16 28				12 20			
18 31				16 27				12 20			
BACHILLER EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA				LICENCIADO EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA							
Código asignatura FIS-110 ① Física General I Pre Requisito ② ③ ⑤ ⑧ Número asignatura Nombre asignatura Matemáticas, Físicas y Química Transversal y de Integración Humanistas, Educación Física y Libres Industrial y Comercial Fundamentos de Informática Sistemas de Información y de Decisión Ingeniería de Software y Datos Infraestructura TIC Computación Aplicada en Ciencia e Ingeniería Electivos Informática y Electivos i Al reverso perfil de egreso, inglés, prácticas, titulación, otros Departamento de Informática Universidad Técnica Federico Santa María											

Figura 1: Malla curricular de Ingeniería Civil Informática (código 7313) de la UTFSM.
Fuente: DI UTFSM.

una carrera se conoce como innovación curricular, a partir del cual se establecen los propósitos, se organiza la trayectoria formativa, los resultados de aprendizaje y las competencias a desarrollar para el logro de un perfil de egreso [UTFSM, 2024]. Este proceso es responsabilidad de una Comisión Curricular, compuesta por docentes jornada completa de la carrera, tanto de la especialidad como de disciplinas complementarias que considere el jefe de carrera, acompañados por asesores de la Dirección de Enseñanza Aprendizaje (DEA) y la Unidad Técnica de Apoyo a la Docencia (UTAD).

El diseño de la malla curricular de un plan de estudios no se limita a distribuir la secuencia de asignaturas a lo largo de los semestres; también requiere considerar múltiples restricciones académicas como los prerrequisitos, los límites mínimos y máximos de carga semestral, la duración óptima de la carrera y asegurar que se cumplan las exigencias necesarias para optar al título académico.

Esto es conocido como el problema de optimización combinatoria *Balanced Academic Curriculum Problem* (BACP), el cual busca distribuir asignaturas en los distintos semestres optimizando el equilibrio de la carga académica y cumpliendo restricciones académicas.

1.2. Situación actual

En cada malla curricular se establece la duración formal como el tiempo estimado en semestres en el que un estudiante debiese completar la carrera y la duración real como el tiempo efectivamente requerido para completar una carrera. A pesar de esto, los estudiantes se demoran más tiempo en titularse que lo establecido por la duración formal. En Ingeniería Civil Informática (código 7313) de la UTFSM, la duración real es 15 semestres [MINEDUC, 2026a], aproximadamente 36,4 % más que su duración formal de 11 semestres.

Estudios de la Organización para la Cooperación y Desarrollo Económico (OCDE) reportan que menos de la mitad de los estudiantes logra titularse de carreras de pregrado dentro de la duración formal. En Chile, la tasa de titulación oportuna es 13 %, la más baja dentro de los países de la OCDE; sin embargo, al ampliar el horizonte de titulación a la duración formal más tres años, el porcentaje aumenta a 60 % [OCDE, 2025]. Por otra parte, el Servicio de Información de Educación Superior (SIES) muestra que los estudiantes de carreras de pregrado se demoran 27,4 % semestres más en titularse respecto a la duración formal [SIES, 2025b] y alcanzan un 83,4 % del avance curricular esperado según su año de ingreso [SIES, 2025a]. En particular, la carrera de Ingeniería Civil Informática tiene una tasa de avance curricular de 74,2 %, la segunda más baja entre todas las carreras de pregrado del país.

Esto quiere decir que no es que los estudiantes tengan un porcentaje de completitud de estudios superiores bajo, sino que el tiempo que requieren para completarlos es mayor a la duración formal [Carpentier, 2021]. Como consecuencia, las mallas curriculares que los estudiantes efectivamente cursan están desalineadas de aquellas originalmente planificadas por las unidades académicas y docentes.

Según Andrés Bernasconi, director del Centro de Estudios Avanzados sobre Justicia Educacional (CJE) de la Pontificia Universidad Católica de Chile (UC), el sistema de educación superior chileno debe avanzar hacia una mayor flexibilidad académica. Bernasconi sostiene que las mallas curriculares con alta carga académica, presencia de múltiples prerrequisitos y elevada cantidad de asignaturas por semestre dificultan el avance de los estudiantes. Por ejemplo, en Chile es habitual tener siete u ocho asignaturas por semestre, mientras que en universidades extranjeras los estudiantes cursan en promedio cuatro asignaturas por semestre [UC, 2024].

El exceso de duración en carreras implica consecuencias económicas y socioemocionales significativas [Carpentier, 2021], que incluyen costos proporcionales a los semestres adicionales cursados asociados a matrículas, aranceles, alojamiento, transporte y materiales de estudio. En particular, el pago del arancel es una carga económica importante para los estudiantes y sus hogares: el arancel anual de Ingeniería Civil Informática de la UTFSM (\$7.110.000 [UTFSM, 2026b]) es aproximadamente 11,6 veces el ingreso mensual mediano de la población ocupada en Chile (\$611.162 [SIMEL, 2026]). En el caso de estudiantes con gratuidad, el cual es un beneficio que financia las matrículas y aranceles de estudiantes de mayor vulnerabilidad económica durante la duración formal de su carrera, los semestres adicionales deben ser financiados por cuenta propia. En el caso de recurrir a otros mecanismos de finan-

ciamiento como el Crédito con Aval del Estado (CAE), implica asumir una deuda que incluye el pago de intereses y puede prolongarse por varios años posteriores a la titulación.

El exceso de duración también implica un costo de oportunidad, ya que el estudiante retrasa su ingreso al mercado laboral, lo que pospone la obtención de un salario acorde a su profesión y reduce los beneficios asociados a una mayor calificación. Asimismo, el ingreso tardío de profesionales al mercado laboral reduce temporalmente la disponibilidad de fuerza laboral calificada y posterga la contribución fiscal asociada a sus ingresos [Carpentier, 2021].

Adicionalmente, el avance curricular se encuentra sujeto a restricciones institucionales relacionadas con la permanencia en la carrera. En la UTFSM, la duración máxima de los estudios corresponde a 50 % adicional a la duración formal de la carrera [UTFSM, 2003].

El rezago, entendido como el retraso en el avance respecto de lo esperado en la malla curricular, es causado principalmente por reprobaciones de asignaturas, donde incluso aquellas sin prerrequisitos inmediatos se van acumulando [Muñoz, 2024]. En la UTFSM, reprobado una asignatura no solamente obliga volver a cursarla en el siguiente semestre en que esta es ofrecida, sino que también restringe el avance curricular en asignaturas dependientes debido a las relaciones de prerrequisitos, obligando a los estudiantes a reorganizar su trayectoria y pudiendo generar retrasos acumulativos.

De manera similar, el congelamiento de estudios introduce una discontinuidad temporal, ya que al reincorporarse el estudiante debe reorganizarse de acuerdo a la oferta de asignaturas.

Según una encuesta aplicada a 45 estudiantes de Ingeniería Civil Informática de la UTFSM en 2026, 82,2 % de ellos tuvieron que reorganizar su malla curricular por reprobación o congelamiento. Además, en el año 2025, 8 asignaturas impartidas por el DI de la malla curricular de Ingeniería Civil Informática (código 7313) de la UTFSM reportaron tasas de reprobación superiores al 20 % en el Campus Casa Central, lo que indica que al menos uno de cada cinco inscripciones terminó en reprobación, como se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1: Asignaturas impartidas por el DI de la malla curricular de Ingeniería Civil Informática (código 7313) de la UTFSM con tasas históricas de reprobación superiores a 20 % en el Campus Casa Central durante el año 2025. Fuente: Elaboración propia a partir de datos proporcionados por el jefe de carrera.

Semestre	Asignatura	Tasa histórica de reprobación	Dependencias directas	Dependencias indirectas
1	IWI131 - Programación	47,2 %	4	22
3	INF134 - Estructuras de datos	26,1 %	5	12
3	INF152 - Estructuras discretas	21,4 %	2	1
4	INF253 - Lenguajes de programación	37,8 %	2	7
5	INF280 - Estadística Computacional	31,1 %	1	0
6	INF221 - Algoritmos y Complejidad	22,3 %	1	0
7	INF285 - Computación Científica	40,5 %	0	0
8	INF343 - Sistemas Distribuidos	31,6 %	0	0

Como se puede observar, varias de las asignaturas con mayores tasas de reprobación se concentran en etapas tempranas de la malla curricular y tienen dependencias directas e indirectas a través de las relaciones de prerrequisitos, por lo que su reprobación genera retrasos acumulativos en el avance curricular.

Si bien el rezago académico responde principalmente a restricciones curriculares, también responde a factores asociados al contexto educativo como la sobrecarga académica y la gestión docente, así como a dimensiones socioemocionales y de salud como el estrés y la salud mental de los estudiantes [Muñoz, 2024]. Al respecto, Bernasconi plantea que el diseño de las mallas curriculares no prioriza suficientemente las necesidades de los estudiantes por sobre criterios institucionales [UC, 2024].

En la UTFSM, si bien todas las asignaturas de la malla curricular deben ser aprobadas para optar al título académico, el avance curricular depende principalmente de la forma en que los estudiantes organizan su trayectoria. Durante el primer año de carrera la inscripción de asignaturas es gestionada por la universidad de manera interna, pero a partir del segundo año los estudiantes pasan a ser responsables de inscribir sus asignaturas cada semestre, debiendo respetar restricciones curriculares tales como las solicitudes académicas, la oferta de asignaturas y las relaciones de prerrequisitos, además de un máximo de 35 créditos SCT por semestre [UTFSM, 2026a].

Esta flexibilidad implica que el avance curricular de los estudiantes está determinado por las decisiones que toman al inscribir asignaturas. Estas decisiones no solo responden restricciones curriculares, sino también a su experiencia personal y académica [Bryce Wilhelm y Comegys, 2004], así como condiciones de información limitada e incertidumbre respecto a su desempeño futuro, lo que introduce criterios adicionales en la planificación curricular de los estudiantes.

En la UTFSM, los estudiantes usan herramientas para apoyar su planificación curricular, entre las cuales destaca la malla interactiva [LABCOMP, 2024]. Esta herramienta permite consultar dinámicamente información de las mallas curriculares de la UTFSM, tales como la carga académica de las asignaturas y sus relaciones de prerrequisitos, además de permitir visualizar el progreso del estudiante marcando las asignaturas aprobadas (ver Anexo 1). Sin embargo, deja la planificación curricular en manos de las decisiones del estudiante.

En este contexto, la carga académica es clave en las decisiones de inscripción de asignaturas de los estudiantes y tiene dos dimensiones: la carga formal y la carga percibida. La carga formal es aquella definida por las unidades académicas y docentes al momento de diseñar la malla curricular y se expresa mediante el SCT-Chile, sistema que busca mejorar la calidad y la eficiencia de la enseñanza, al centrarse en cuantificar los resultados del aprendizaje y la carga de trabajo de los estudiantes [CRUCH, 2007]. Sin embargo, aunque es útil para cuantificar el tiempo de trabajo dedicado al aprendizaje, no necesariamente cuantifica el grado de dificultad de la tarea, lo que se ve alterado por la realidad heterogénea de los estudiantes.

Por lo tanto, la carga percibida se relaciona directamente con la experiencia académica de los

estudiantes, lo que va más allá de la adquisición de conocimientos y se ve influida por diversos factores, desde el diseño de asignaturas hasta las expectativas personales y el trasfondo educativo. La mínima modificación en aspectos como resultados de aprendizaje, actividades, tareas, recursos, sistema de evaluación y el propio sistema de la experiencia didáctica influye en la carga percibida del estudiante [Araneda *et al.*, 2023].

En el caso de Ingeniería Civil Informática (código 7313) de la UTFSM, la carga percibida ha sido previamente estudiada. En [Valenzuela *et al.*, 2021] se identifican asignaturas como INF236 - Análisis y Diseño de Software, INF280 - Estadística Computacional y INF245 - Arquitectura y Organización de Computadores como aquellos asociados a mayores niveles de sobrecarga académica. Entre las razones, se destaca los métodos de evaluación y el tiempo de dedicación requerido, ya sea por la cantidad de tareas, la complejidad de los contenidos o el uso de tecnologías que requieren tiempo adicional de aprendizaje autónomo. Asimismo, se señala que es común que los estudiantes adopten estrategias de priorización, concentrando sus esfuerzos en aprobar asignaturas percibidas más difíciles incluso a costa de reprobando otras percibidas más fáciles.

En este contexto, se aplicó una encuesta a 45 estudiantes de Ingeniería Civil Informática (código 7313) de la UTFSM del Campus Casa Central en 2025, solicitando identificar la carga percibida de asignaturas de la malla curricular con 5 créditos SCT entre los semestres 3 a 10, en una escala equivalente de 1 a 10 créditos SCT. Los resultados se presentan en la Figura 2 y evidencian una brecha de hasta 80 % entre la carga formal y la carga percibida por los estudiantes. Mientras algunas asignaturas se perciben con cargas inferiores a los 5 créditos SCT, otras alcanzan valores cercanos a los 7 u 8 créditos SCT. En particular, asignaturas como Computación Científica, Algoritmos y Complejidad y Sistemas Distribuidos son aquellas percibidas con mayor carga.

Particularidades como estas generan un alto grado de complejidad curricular para carreras como Ingeniería Civil Informática de la UTFSM, por lo que una malla única, estática y global no es suficiente para garantizar una trayectoria académica eficiente.

1.3. Problema

Esta situación evidencia una limitación del BACP clásico, ya que no considera la experiencia académica real de los estudiantes; por ejemplo, no considera índices históricos de las asignaturas (como tasas históricas de reprobación), el desempeño académico individual ni la percepción de carga académica reportada por los estudiantes. Incorporar estos elementos convierte el diseño de la malla curricular en un problema complejo, ya que una distribución de asignaturas apropiada tiene impacto directo en la carga y en el desempeño académico de los estudiantes [Bar *et al.*, 2008], y requiere soluciones que integren criterios académicos, la percepción social y la realidad académica de los estudiantes.

Esta combinación de factores genera un espacio de soluciones extremadamente grande. El

Comparación entre carga formal y carga percibida por asignatura

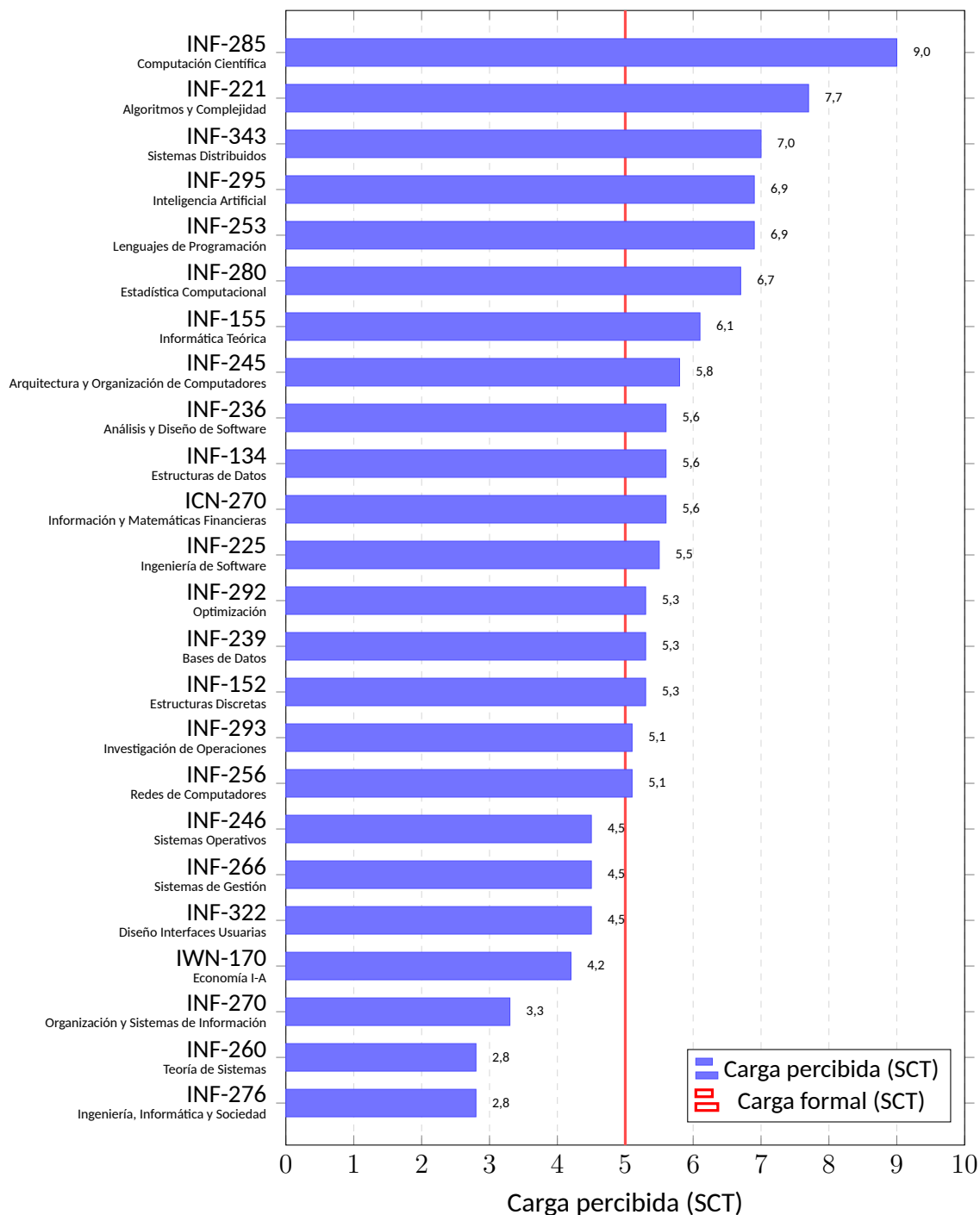


Figura 2: Carga formal y carga percibida por asignatura de la malla curricular de Ingeniería Civil Informática (código 7313) de la UTFSM. Fuente: Elaboración propia.

BACP es un problema NP-completo [Chiarandini *et al.*, 2012], lo que significa que, incluso para un número moderado de asignaturas, la cantidad de posibles distribuciones crece exponencialmente. La personalización de BACP mantiene esta complejidad, lo que hace necesario recurrir a enfoques computacionales avanzados que permitan obtener soluciones factibles en un tiempo razonable. En particular, las metaheurísticas o técnicas de resolución basadas en búsqueda incompleta son capaces de generar soluciones factibles en tiempos razonables sin explorar exhaustivamente todas las combinaciones posibles. Al no existir un único enfoque óptimo, es importante analizar distintas técnicas de resolución para identificar la más efectiva según las características particulares de la carrera y los objetivos de optimización.

Además, no existe una única solución óptima que satisfaga a todos los estudiantes, ya que sus objetivos y condiciones personales son altamente heterogéneos: por ejemplo, algunos pueden priorizar minimizar el riesgo de reprobación, otros pueden preferir equilibrar la carga académica, mientras que un tercer grupo puede optar por reducir la duración total de la carrera asumiendo mayores exigencias. En consecuencia, el problema a resolver no se limita a generar una única malla curricular válida, sino en ofrecer un conjunto de alternativas factibles que reflejen las distintas realidades y permitan a los estudiantes elegir aquella que mejor se ajuste a sus intereses.

1.4. Objetivo de una solución

1.4.1. Objetivo general

Desarrollar un modelo y una solución computacional enfocada en técnicas de búsqueda incompleta para la generación de mallas curriculares personalizadas para los estudiantes de la carrera de Ingeniería Civil Informática de la UTFSM, considerando índices históricos de las asignaturas, desempeño académico individual y la percepción de carga académica de los estudiantes.

1.4.2. Objetivos específicos

1. Modelar el problema de generación de mallas curriculares personalizadas, incorporando como parámetros la tasa histórica de reprobación de asignaturas, el desempeño académico individual y la percepción estudiantil de la carga académica.
2. Diseñar y desarrollar una estrategia de resolución enfocada en técnicas de búsqueda incompleta capaz de resolver el problema generando múltiples alternativas de planificación curricular personalizadas.
3. Validar el algoritmo mediante encuestas aplicadas a estudiantes de la carrera de Ingeniería Civil Informática de la UTFSM.

CAPÍTULO 2

MARCO CONCEPTUAL

2.1. Formulación y evolución del problema

El *Balanced Academic Curriculum Problem* (BACP) fue introducido por primera vez en [Castro y Manzano, 2001] para abordar el problema de planificación de mallas curriculares universitarias. Su formulación se desarrolló a partir de las tres carreras del área informática impartidas por la UTFSM en el año 2001, con duraciones de 8, 10 y 12 semestres.

En su formulación original, el BACP es un problema que consiste en distribuir un conjunto de asignaturas en un número fijo de semestres de una malla curricular bajo restricciones curriculares de prerrequisitos entre asignaturas, número mínimo y máximo de créditos por semestre, y número mínimo y máximo de asignaturas por semestre. Su objetivo es balancear la carga académica entre los semestres, es decir, hacer que la cantidad de créditos sea lo más homogénea posible, lo que se formalizó matemáticamente mediante la minimización de la carga académica del semestre con la mayor cantidad de créditos.

Junto con la formulación del problema, en [Castro y Manzano, 2001] se definió un conjunto de instancias de prueba con distintos tamaños y estructuras de prerrequisitos, denominadas bacp8, bacp10 y bacp12 según el número de semestres considerados, correspondientes a las tres mallas curriculares mencionadas anteriormente. Posteriormente, el BACP fue incorporado como el problema 30 de CSPLib [Gent y Walsh, 1999], una biblioteca de referencia para problemas usados en inteligencia artificial y ciencia de la computación. Gracias a su amplia adopción en la literatura, estas instancias se consolidaron como *benchmarks* para la evaluación y comparación de técnicas de resolución del BACP.

A partir de la formulación original, en [Hnich et al., 2002] se estudiaron distintas formas de modelar el BACP mediante variaciones en la representación de las variables y las restricciones. Los autores concluyeron que la representación del modelo impacta en la eficiencia de las técnicas de resolución utilizadas para resolverlo.

En [Monette et al., 2007] se analizaron tres funciones objetivo que se pueden utilizar para dimensionar el balance de la carga académica:

- **Máxima desviación:** minimiza la mayor diferencia absoluta entre la carga académica de cada semestre y la carga académica promedio.
- **Desviación media absoluta:** minimiza el promedio de las diferencias.
- **Desviación cuadrática media:** minimiza el promedio de las diferencias elevadas al cuadrado. Esta función permite penalizar con mayor fuerza a los semestres que se alejan

significativamente de la carga académica promedio, entregando mejor información sobre la diversidad de cargas académicas entre semestres y haciendo más fácil interpretar qué tan alejada está cada solución del balance óptimo.

Los autores concluyeron que la desviación cuadrática media favoreció la generación de mallas curriculares con carga académica más balanceada, pero a costa de una mayor complejidad computacional. Por lo tanto, recomiendan la desviación media absoluta como un buen compromiso entre la calidad de las soluciones y la eficiencia computacional. Además, señalan que la desviación media absoluta puede complementarse con la máxima desviación, permitiendo obtener soluciones con un mejor balance de carga académica.

En [Chiarandini et al., 2012] se propuso el *Generalized Balanced Academic Curriculum Problem* (GBACP), que busca acercarse más a los requerimientos de la planificación de mallas curriculares universitarias en contextos reales. Es una variante que extiende la formulación original incorporando la existencia de diferentes especializaciones dentro de una malla curricular y preferencias de los profesores respecto de las asignaturas y los semestres que dictan.

En su modelo, las restricciones de la formulación original se mantienen como restricciones duras. Por otra parte, las preferencias de los profesores se representan como una restricción blanda, debido a que en la práctica no siempre es posible satisfacerlas sin afectar el resto de las restricciones del problema.

De esta forma, el GBACP se convierte en un problema de optimización multiobjetivo, ya que se busca tanto balancear la carga académica como minimizar la violación de las preferencias de los profesores. Aunque existen distintas formas de abordar problemas de este tipo, los autores optaron por minimizar una suma ponderada de ambos objetivos, tratando las preferencias como restricciones blandas cuyo incumplimiento genera una penalización.

Luego de que gran parte de la literatura sobre el BACP utilizara créditos académicos genéricos, en [Villalobos-Cid et al., 2019] se incorporó explícitamente el SCT-Chile. Este sistema establece que un año académico es equivalente a 60 créditos SCT en programas de jornada completa, donde 1 SCT equivale a aproximadamente 30 horas de trabajo de un estudiante. Esto implicó considerar en el modelo el tipo de programa del estudiante (jornada completa, estudiante trabajador o media jornada), la carga académica anual recomendada por cada tipo de programa y una restricción de carga académica entre pares de semestres consecutivos. Además, se redefinió la función objetivo para minimizar la desviación respecto a la carga académica anual recomendada.

En sus experimentos, los autores complementaron las instancias clásicas del BACP con el *dataset* ing1-ing6, compuesto por seis instancias correspondientes a mallas curriculares reales del área de la ingeniería. Sus resultados mostraron que su formulación permite identificar desequilibrios en la distribución anual de la carga académica. En particular, encontraron que algunas de las mallas curriculares ya respetaban adecuadamente la carga académica anual recomendada por el SCT-Chile, mientras que otras mallas curriculares presentaban años sobrecargados o subcargados. Además, mostraron que su modelo puede proponer nuevas dis-

tribuciones de asignaturas que mejoran el balance de carga académica por año, aunque en algunos casos esto implicó aumentar la carga académica máxima.

En [Aguilera et al., 2025] se introdujo el *Dynamic Balanced Academic Curriculum Problem* (DBACP), una variante del BACP que se planteó desde una perspectiva del estudiante, buscando generar mallas curriculares adaptadas al progreso académico actual, un semestre objetivo de titulación y la oferta de asignaturas. Análogo al presente trabajo, se desarrolló a partir de la malla curricular de Ingeniería Civil Informática (código 7313) de la UTFSM.

El DBACP parte de una malla curricular definida y del estado académico actual del estudiante, es decir, asignaturas aprobadas y pendientes. A partir de esto, se distribuyen las asignaturas pendientes hasta el semestre objetivo de titulación del estudiante. Además de tener las mismas restricciones curriculares que la formulación original del BACP, incluye como restricción la oferta de asignaturas, ya que algunas asignaturas se ofrecen solamente en determinados semestres académicos. La calidad de las soluciones se evalúa mediante la minimización de la desviación cuadrática media, criterio respaldado por los resultados obtenidos en [Monette et al., 2007].

2.2. Personalización del problema

El BACP ha evolucionado desde un problema centrado en la distribución de asignaturas bajo restricciones curriculares duras hacia modelos que buscan reflejar mejor la complejidad de la vida académica de los estudiantes.

En [Shakhsi-Niaei y Abuei-Mehrizi, 2020] se abordó el problema de la planificación de asignaturas explícitamente desde la perspectiva del estudiante. Los autores propusieron un sistema de soporte de decisiones (DSS) basado en optimización para el *Long-term Course Planning* (LTCP), el cual se define como el problema de distribuir las asignaturas pendientes en un número de semestres de acuerdo a las preferencias de cada estudiante.

Para ello, el DSS incorpora como parámetros información ingresada por el estudiante: semestre de inicio, semestre objetivo de titulación, historial de asignaturas aprobadas, semestres congelados, preferencias sobre las asignaturas electivas, decisión de activar o no semestres de verano, cantidad de créditos preferidos por semestre, complejidad percibida de las asignaturas pendientes, y complejidad promedio preferida por semestre. Además, respeta las mismas restricciones que la formulación original del BACP, así como los requisitos de titulación del estudiante y la oferta de asignaturas.

A nivel de función objetivo, el modelo combina tres criterios: priorizar la selección de asignaturas electivas preferidas, acercar la dificultad promedio percibida de cada semestre a la deseada por el estudiante y ajustar la carga académica de cada semestre a la deseada por el estudiante. De forma similar a [Chiarandini et al., 2012], se aborda un problema de optimización multiobjetivo. En particular, su enfoque se basa en programación por metas ponderada

(*Weighted Goal Programming*, WGP), que consiste en que el estudiante define un valor como meta para cada objetivo, con el fin de penalizar la desviación entre la solución propuesta del algoritmo y la meta deseada. Para garantizar la comparabilidad entre objetivos de distinta naturaleza, cada desviación es normalizada mediante escalamiento por meta, dividiendo la desviación por la meta misma.

En [Khamechian y Petering, 2022] se distinguieron dos problemas de planificación de asignaturas. En primer lugar, *Department Course Planning Problem* (DCPP) es el problema desde la perspectiva del departamento universitario que ofrece asignaturas y consiste en decidir qué asignaturas ofrecer y en qué semestres con el objetivo de facilitar la titulación oportuna de los estudiantes. En segundo lugar, *Student Course Planning Problem* (SCPP) es el problema desde la perspectiva del estudiante y representa la necesidad de los estudiantes de diseñar una malla curricular que les permita titularse oportunamente.

El SCPP integra información y preferencias personalizadas del estudiante en una malla curricular compuesta por asignaturas obligatorias y electivas. De forma similar al trabajo en [Shakhsi-Niaei y Abuei-Mehrizi, 2020], considera la preferencia del estudiante sobre el semestre objetivo de titulación, la complejidad percibida de las asignaturas, la carga académica preferida, las preferencias sobre las asignaturas electivas y la oferta de asignaturas. Además, permite considerar la opción de congelar semestres y respeta correquisitos y restricciones de nivel académico, siendo esto último un aspecto característico del sistema universitario estadounidense. La función objetivo busca minimizar el número total de semestres requeridos para titularse.

En [Nguyen et al., 2021] se adoptó un enfoque distinto. Se desarrolló un sistema de recomendación de asignaturas que, a partir del rendimiento académico histórico de un estudiante, predice sus resultados de aprendizaje en asignaturas futuras utilizando técnicas de minería de datos y *learning analytics* (LA).

En primer lugar, usaron datos reales de los resultados de aprendizaje en la carrera de Tecnologías de la Información de la Universidad de Ingeniería y Tecnología (UET) entre los años 2015 y 2019, evaluaron distintos métodos y concluyeron que la técnica más efectiva de predicción del desempeño académico es la factorización de matrices, la cual consiste en descomponer las calificaciones en factores latentes asociados a los estudiantes y las asignaturas.

Luego, con estas predicciones, los autores propusieron un modelo de recomendación de asignaturas que sugiere las asignaturas más apropiadas para que el estudiante tome en los siguientes semestres, respetando las restricciones curriculares. A diferencia del BACP y sus variantes, no construye una malla curricular completa ni resuelve explícitamente un problema de optimización, sino que recomienda asignaturas para los siguientes semestres a corto plazo, logrando un enfoque de personalización a través de las predicciones del desempeño de cada estudiante.

Por otra parte, en [Ota et al., 2024] se definió el *Personalized Course Selection Problem* (PCSP), que se enfoca en la planificación personalizada de asignaturas en el horario semestral

del estudiante. El objetivo no sólo es satisfacer la carga académica requerida, sino también optimizar la calidad del horario del estudiante, maximizando la evaluación promedio de la percepción de las asignaturas y minimizando el número de días de asistencia a la universidad, la cantidad de bloques vacíos y el tiempo total de clases. Todo lo anterior se modela respetando que no haya tope de asignaturas en un mismo bloque y el mínimo de créditos requerido. Aunque aborda un problema similar al BACP y sus variantes, la unidad de planificación ya no es la malla curricular, sino el horario semestral de cada estudiante; además, optimiza dimensiones logísticas y de bienestar relevantes para los estudiantes.

En [Pinos Ullaauri et al., 2025] se propuso un sistema de recomendación de asignaturas de posgrado basado en habilidades blandas utilizando un enfoque inspirado en la psicometría, un área de la psicología enfocada en cuantificar variables psicológicas. En este modelo, tanto los estudiantes como las asignaturas se representan mediante perfiles de habilidades blandas (por ejemplo, comunicación, liderazgo o trabajo en equipo) y, a partir de un enfoque psicométrico, se recomiendan aquellas asignaturas cuyo perfil se ajusta mejor al perfil del estudiante. A diferencia del BACP y sus variantes, su foco está en la educación formativa y el desarrollo de habilidades no cognitivas, ampliando la noción de personalización y demostrando que puede alinearse con objetivos de desarrollo personal y profesional más amplios. Para su evaluación, se utilizaron datos reales de tres cohortes de estudiantes graduados de IMT Nord Europe entre los años 2021 y 2023, y los resultados mostraron que las recomendaciones del sistema permiten a los estudiantes cumplir mejor los objetivos de habilidades blandas en comparación con las asignaturas que realmente cursaron.

En conjunto, estos trabajos muestran que la personalización en la planificación curricular puede construirse a partir de distintas fuentes de información, tales como preferencias explícitas, historial académico o características individuales de los estudiantes.

2.3. Técnicas de resolución

La literatura sobre el BACP y sus variantes ha explorado diversas técnicas de resolución, desde métodos exactos hasta metaheurísticas y enfoques híbridos:

- Los **métodos exactos** garantizan obtener la solución óptima porque exploran sistemáticamente todas las soluciones posibles del espacio de búsqueda, pero se caracterizan por escalar pobremente en instancias grandes.
- Las **metaheurísticas o técnicas incompletas** son métodos de búsqueda aproximada o local, que exploran el espacio de soluciones de manera guiada sin garantizar optimalidad, pero obteniendo soluciones de buena calidad en tiempos razonables.
- Las **técnicas híbridas** combinan distintas técnicas para aprovechar sus ventajas.

Los primeros trabajos abordaron el BACP mediante dos técnicas: programación entera (IP), una técnica completa de resolución de problemas adecuada cuando las variables de decisión toman valores enteros y tanto las restricciones como la función objetivo son lineales; y programación con restricciones (CP), una técnica completa de resolución de problemas adecuada para modelar restricciones y funciones objetivo complejas, típicamente en problemas de optimización combinatoria como el BACP.

En [Castro y Manzano, 2001] evaluaron ambas técnicas sobre las instancias *benchmark* del BACP. Implementaron IP en el solver Ip-solve utilizando el algoritmo *Branch & Bound* (B&B), un algoritmo que explora el espacio de búsqueda dividiéndolo y descartando grandes porciones que no pueden contener soluciones mejores a la actual. Luego implementaron CP en el lenguaje de programación Oz mediante un algoritmo *backtracking*, complementado con heurísticas de ordenamiento de valores. *Backtracking* es un algoritmo de búsqueda sistemática que construye soluciones incrementalmente y retrocede cuando una asignación parcial viola alguna restricción, mientras que las heurísticas complementan este proceso guiando la búsqueda de forma inteligente priorizando ciertas asignaturas o combinación de asignaturas. Sus resultados mostraron que las heurísticas implementadas redujeron el espacio de búsqueda significativamente y, por lo tanto, la complejidad computacional.

En [Hnich et al., 2002] y [Monette et al., 2007] se realizaron análisis comparativos utilizando las mismas instancias *benchmark*. En [Hnich et al., 2002] se evaluó un modelo de IP resuelto con el solver CPLEX y dos modelos de CP desarrollados en el lenguaje de programación OPL, que difieren en la formulación de sus restricciones y en las heurísticas utilizadas para resolverlos. También se implementaron técnicas híbridas que las combinan: una que integra ambos modelos de CP y otra que combina IP con CP resuelta con una técnica de resolución híbrida. En sus resultados, ambos modelos híbridos obtuvieron mejor desempeño que los modelos puros, incluso cuando esto implicó un aumento en el número de variables y restricciones. En particular, el modelo híbrido que integra ambos modelos de CP obtuvo la solución óptima más rápido, mientras que el modelo híbrido que combina IP con CP destacó por su rapidez para probar optimalidad.

En [Monette et al., 2007], los autores introdujeron una heurística de ordenamiento de valores *ad-hoc*, que selecciona de forma inteligente el semestre menos cargado para asignar cada asignatura, resultando ser más eficiente que la heurística estándar *first-fail*, que simplemente elige la asignatura con menor dominio. Además, estudiaron el uso de relaciones de dominancia para descartar asignaciones parciales que no pueden conducir a soluciones mejores, es decir, asignaciones subóptimas, lo que reduce el espacio de búsqueda. Sin embargo, los autores observaron que al aplicarlas de forma masiva al iniciar la búsqueda es contraproducente, debido a que la información disponible aún es insuficiente, lo que implica eliminar demasiado temprano asignaciones válidas que pueden conducir a soluciones óptimas.

En cuanto a técnicas de resolución, los autores compararon tres enfoques. En primer lugar, utilizaron *Branch & Bound*. En segundo lugar, usaron una estrategia híbrida que combina *Branch & Bound* con *Tabu Search* (TS), la cual consiste en usar *Tabu Search* para encontrar rápidamente una solución de buena calidad que sirve como cota inicial en *Branch & Bound*,

reduciendo significativamente el espacio de búsqueda. *Tabu Search* es una metaheurística que evita volver a soluciones previamente exploradas mediante una lista tabú. En tercer lugar, utilizaron una búsqueda iterativa de satisfacción, que consistió en resolver problemas de satisfacción de restricciones de forma sucesiva, imponiendo cotas cada vez más estrictas sobre el balance de carga académica. Los problemas de satisfacción de restricciones (CSP) son formulaciones donde simplemente se busca encontrar una asignación de variables que cumpla las restricciones del problema, lo cual contrasta con los problemas de optimización combinatoria (CSOP) como el BACP que, además de cumplir las restricciones, buscan la mejor solución posible de acuerdo a una función objetivo.

En sus resultados observaron que, cuando la función objetivo minimiza la desviación cuadrática media de la carga académica, la técnica híbrida es la opción más efectiva y resuelve la mayor proporción de instancias dentro del tiempo límite. Sin embargo, cuando la función objetivo minimiza la desviación media absoluta, la búsqueda iterativa de satisfacción presenta ligeramente mejor rendimiento.

Por otra parte, otros autores abordaron modelos de programación entera mixta (MILP), una técnica completa donde la función objetivo y las restricciones son lineales, pero algunas variables deben ser enteras mientras que otras pueden ser continuas. Este enfoque fue utilizado en [Shakhsi-Niaei y Abuei-Mehrizi, 2020], quienes resolvieron su modelo utilizando el solver CPLEX y considerando casos de estudio reales con estudiantes del Departamento de Ingeniería Industrial de la Universidad de Yazd. En [Khamechian y Petering, 2022] también formularon el problema como un MILP y lo resolvieron con el solver Gurobi, evaluando casos de estudio ficticios basados en la malla curricular de Ingeniería Industrial de la Universidad de Wisconsin-Milwaukee en el año 2021. Ambos trabajos demostraron que un enfoque MILP permite obtener soluciones óptimas para las instancias consideradas.

De manera complementaria, en [Chiarandini et al., 2012] se estudió tanto un modelo de IP similar al trabajo en [Castro y Manzano, 2001] como una metaheurística basada en *Simulated Annealing* (SA), una técnica inspirada en el proceso físico de recocido de metales, donde el material se calienta y luego se enfría lentamente para alcanzar una estructura de mínima energía. Para su evaluación, los autores utilizaron las instancias UD1-UD10, compuestas por datos históricos de la Escuela de Ingeniería de la Universidad de Udine. Concluyeron que el modelo de IP sirve para obtener buenas cotas inferiores y, en instancias pequeñas, logra los mejores resultados y permite probar optimalidad. Sin embargo, en la mayoría de las instancias de mayor tamaño, la metaheurística basada en *Simulated Annealing* encontró mejores cotas superiores y escaló mejor computacionalmente. En este sentido, los autores sugirieron la posibilidad de una técnica híbrida, donde se integren las fortalezas de ambas, de manera similar a la estrategia híbrida analizada en [Monette et al., 2007].

En [Villalobos-Cid et al., 2019], el BACP se abordó mediante programación entera cuadrática (QIP), formulando una función objetivo cuadrática que mide la desviación respecto al balance de carga académica recomendada, y lo resolvieron con el solver CPLEX.

Además, construyeron un algoritmo genético (AG), una metaheurística inspirada en la evolu-

ción biológica que mantiene una población de soluciones y la mejora iterativamente mediante selección, cruzamiento y mutación. En su implementación, representaron cada solución como una matriz de asignaturas por cada semestre y basaron la función de evaluación en el balance anual de carga académica, que llamaron *ECM score*. Para generar la población inicial, construyeron un grafo de prerequisites que representa las relaciones y caminos entre asignaturas; luego, para cada solución, fueron asignando de manera aleatoria las asignaturas a los semestres respetando las restricciones. En cuanto a la búsqueda, su operador de cruzamiento identifica diferencias entre padres y utiliza un pivote para recombinar y reconstruir soluciones respetando restricciones; su operador de mutación consiste en mover asignaturas desde semestres con alta carga académica hacia otros con menor carga académica; y, como método de selección, utilizan torneo binario, que consiste en seleccionar aleatoriamente dos soluciones y elegir como ganador aquella de mejor calidad. Además, ajustaron los parámetros automáticamente del algoritmo genético mediante el algoritmo irace, un paquete diseñado para la configuración automática de parámetros de algoritmos.

En el sistema de recomendación de asignaturas propuesto en [Pinos Ullaúri *et al.*, 2025] también se utilizó un algoritmo genético para resolver el problema. Cada individuo de la población fue representado como un conjunto de asignaturas que el estudiante puede tomar y la función de evaluación mide qué tan bien un conjunto de asignaturas ayuda al estudiante a acercarse al perfil objetivo de habilidades blandas. Construyeron la población inicial aleatoriamente y emplearon selección por ruleta, mutación controlada y elitismo, permitiendo guiar el proceso genético sin perder soluciones de alta calidad. Además, para el cruzamiento, combinaron asignaturas de manera inteligente, buscando preservar las asignaturas con mayor aporte a la función de evaluación, y completando las asignaturas faltantes con aleatoriedad controlada, evitando duplicados y manteniendo el tamaño fijo.

En [Aguilera *et al.*, 2025], implementaron un *Tabu Search*. Primero generaron una solución inicial factible a partir de dos heurísticas: priorizar asignaturas con menor rango (número de semestres posibles) y priorizar ubicar asignaturas en el semestre con menor carga académica. Luego, aplicaron la búsqueda moviendo una asignatura desde el semestre con mayor carga académica hacia otro semestre factible con menor carga académica, utilizando una lista tabú cuyo tamaño es aproximadamente la mitad del número de asignaturas. Esta estrategia permitió explorar de manera eficiente el espacio de soluciones sin ciclos prematuros.

Por su parte, en [Rubio *et al.*, 2013] se aplicó una variante del algoritmo de la colonia de hormigas (ACO), una técnica inspirada en la comunicación química entre hormigas que actualiza feromonas para guiar la búsqueda hacia buenas asignaciones. Específicamente, utilizaron la variante *Best-Worst Ant System*, que refuerza las decisiones de la mejor hormiga, penaliza las de la peor y aplica mutación sobre la mejor solución para equilibrar convergencia rápida y exploración del espacio de búsqueda. En su formulación, la matriz de feromonas modela la preferencia por asignaciones. Además, incorporaron reinicios para evitar estancamiento y búsqueda local para refinar soluciones. Para evaluar su técnica, complementaron las instancias clásicas con instancias reales compuestas por mallas curriculares de Ingeniería Informática de la Pontificia Universidad Católica de Valparaíso (PUCV) y la Universidad de Playa

Ancha (UPLA), logrando soluciones de alta calidad que en muchos casos alcanzan el óptimo e incluso superan mallas curriculares reales en términos de balance de carga académica.

Finalmente, en una línea distinta, en [Ota et al., 2024] se resolvió el PCSP con una formulación QUBO (*Quadratic Unconstrained Binary Optimization*), un modelo ampliamente utilizado en computación cuántica y heurísticas avanzadas. Este problema fue resuelto con una máquina de Ising, un dispositivo físico o simulado que minimiza funciones cuadráticas mediante dinámicas inspiradas en sistemas magnéticos. Los autores, utilizando instancias en base a la malla curricular del Programa de Ciencia e Ingeniería de la Universidad de Waseda en el año 2023, compararon su desempeño frente a técnicas clásicas como *Simulated Annealing* y observaron que su técnica era más eficiente, lo que abre una línea de investigación hacia técnicas inspiradas en computación cuántica.

2.4. Validación de la solución

Clásicamente, la validación de soluciones de problemas de optimización combinatoria, incluyendo el BACP, suele centrarse en realizar análisis de los resultados de las técnicas de resolución bajo escenarios experimentales utilizando métricas de optimización, tales como tiempo de ejecución del algoritmo y calidad de las soluciones. Para ello, es habitual utilizar instancias *benchmarks* que permiten comparar distintas formulaciones y técnicas de resolución. Este enfoque se observa en los trabajos de [Castro y Manzano, 2001], [Hnich et al., 2002], [Monette et al., 2007], [Chiarandini et al., 2012], [Rubio et al., 2013], [Villalobos-Cid et al., 2019], [Khamechian y Petering, 2022], [Ota et al., 2024] y [Aguilera et al., 2025]. De manera similar, los trabajos orientados a la recomendación personalizada evaluaron sus propuestas con métricas asociadas a la calidad de las recomendaciones o predicciones realizadas, lo que se observa en [Nguyen et al., 2021] y [Pinos Ullauri et al., 2025].

Sin embargo, en [Shakhsi-Niaei y Abuei-Mehrizi, 2020] se incorporó explícitamente la perspectiva del estudiante como parte del proceso de validación. Para ello, se utilizaron tres mecanismos de evaluación:

- **Validación de factibilidad:** los autores verificaron manualmente que todos los resultados generados satisficieran las restricciones del modelo.
- **Análisis de sensibilidad de las metas:** se evaluó el efecto de modificar el peso asociado a las distintas metas del modelo, observando que las soluciones cambiaban de manera coherente con las preferencias especificadas por el estudiante.
- **Validación con estudiantes:** tres grupos de estudiantes con años de ingreso y avance académico utilizaron el DSS. Los autores reportaron que los estudiantes consideraron razonables los resultados.

No obstante, esta evaluación con estudiantes se limitó a una evaluación cualitativa de las soluciones generadas, sin emplear instrumentos sistemáticos de medición, tales como cuestionarios estructurados o métricas cuantitativas de satisfacción.

2.5. Resumen

En conjunto, estos trabajos muestran una transición desde modelos de planificación curricular estáticos y centrados en restricciones institucionales hacia enfoques personalizados que incorporan preferencias, condiciones y trayectorias académicas del estudiante. La Tabla 2 resume los trabajos revisados, indicando para cada estudio la referencia bibliográfica, el problema abordado, la técnica de resolución empleada, el enfoque de personalización considerado (institucional o centrado en el estudiante) y el conjunto de datos utilizado para la evaluación de la propuesta.

Tabla 2: Trabajos revisados. Fuente: Elaboración propia.

Referencia	Aspectos clave	Problema	Técnica	Personalización	Dataset
[Castro y Manzano, 2001]	Formulación original del BACP.	BACP	Completa (IP B&B, CP Backtracking).	-	bacp8, bacp10, bacp12.
[Hnich et al., 2002]	Comparación de formulaciones y modelos híbridos de IP y CP.	BACP	Completa (IP, CP), híbrida.	-	bacp8, bacp10, bacp12.
[Monette et al., 2007]	Análisis de funciones objetivo para medir el balance de la carga académica.	BACP	Completa (CP B&B), híbrida (CP + TS), búsqueda iterativa de satisfacción.	-	bacp8, bacp10, bacp12.
[Chiarandini et al., 2012]	Extensión del BACP con especializaciones y preferencias docentes.	GBACP	Completa (IP), metaheurística (SA).	Institución	UD1-UD10.
[Villalobos-Cid et al., 2019]	Incorporación del sistema SCT-Chile.	BACP	Completa (QIP), metaheurística (AG).	-	bacp8, bacp10, bacp12, ing1-ing6.
[Aguilera et al., 2025]	Planificación de la malla académica que se adapta al progreso actual del estudiante.	DBACP	Metaheurística (TS).	Estudiante	bacp8, bacp10, bacp12, datos de Informática de la UTFSM (2023).
[Shakhsi-Niaei y Abuei-Mehrizi, 2020]	Planificación de la malla curricular desde el progreso académico actual y las preferencias del estudiante. Validación con estudiantes.	LTCP	Completa (MILP).	Estudiante	Datos del Departamento de Ingeniería Industrial de la Universidad de Yazd.
[Khamechian y Petering, 2022]	Planificación de la malla curricular con distinción entre la perspectiva institucional y estudiantil.	DCPP, SCPP	Completa (MILP).	Institución, estudiante	Datos de Ingeniería Industrial de la Universidad de Wisconsin-Milwaukee (2021).
[Nguyen et al., 2021]	Sistema de recomendación de asignaturas basado en predicción del desempeño académico	-	Minería de datos, LA.	Estudiante	Datos de Tecnologías de la Información en la UET (2015-2019).
[Ota et al., 2024]	Optimización del horario semestral.	PCSP	Máquina de Ising.	Estudiante	Datos del Programa de Ciencia e Ingeniería de la Universidad de Waseda (2023).
[Pinos Ullauri et al., 2025]	Sistema de recomendación de asignaturas basado en habilidades blandas.	-	Metaheurística (AG).	Estudiante	Datos del IMT Nord Europe (2021-2023).
[Rubio et al., 2013]	Resolución del BACP con ACO (Best-Worst Ant System).	BACP	Metaheurística (ACO).	-	Datos de Ingeniería Informática de la PUCV y UPLA.

CAPÍTULO 3

PROPUESTA DE SOLUCIÓN

3.1. Antecedentes

A partir de la revisión bibliográfica realizada en la sección anterior, se extrajeron las siguientes ideas clave:

- El BACP es un problema de optimización combinatoria que distribuye asignaturas en los distintos semestres de una malla curricular cumpliendo restricciones académicas y buscando optimizar el equilibrio de la carga académica. Es la principal base conceptual para la planificación de mallas curriculares.
- La literatura muestra un interés por incorporar información individual del estudiante en la planificación curricular. El DBACP, propuesto en [Aguilera *et al.*, 2025], extiende el BACP considerando el estado académico actual del estudiante, el semestre objetivo de titulación y la oferta de asignaturas. Además, factores como el historial académico, las preferencias personales y la complejidad de las asignaturas han sido utilizados para personalizar las recomendaciones en [Shakhsi-Niaei y Abuei-Mehrizi, 2020] y [Khamechian y Petering, 2022].
- Los enfoques revisados sugieren que el criterio de evaluación de calidad de la planificación curricular no depende únicamente de la carga académica, sino también de objetivos de cada estudiante. Un enfoque de programación por metas ponderada, como el propuesto en [Shakhsi-Niaei y Abuei-Mehrizi, 2020], incorpora múltiples objetivos en la función de evaluación en base a metas establecidas por los estudiantes, permitiendo personalizar las recomendaciones a distintos perfiles de usuarios.
- Debido a la naturaleza combinatoria del problema, distintos trabajos han utilizado metaheurísticas como *Tabu Search*, *Simulated Annealing*, algoritmos evolutivos y ACO para explorar eficientemente el espacio de soluciones.

Finalmente, se propone generar múltiples alternativas de solución, permitiendo al estudiante comparar distintas opciones según sus preferencias personales.

3.2. Modelo matemático

3.2.1. Enfoque

La estructura base del modelo matemático proviene de la estructura definida en [Castro y Manzano, 2001], donde se modela la distribución de asignaturas en un número fijo de semestres, sujeto a restricciones duras de prerrequisitos y límites de carga formal y asignaturas. Esta base es extendida con el enfoque dinámico de [Aguilera et al., 2025], donde se ajusta el modelo al estado académico actual del estudiante, incorporando la estacionalidad de la oferta de asignaturas y un semestre objetivo de titulación.

El modelo matemático se basa en cuatro objetivos académicos de evaluación:

- **Carga formal:** son los créditos académicos formales, los cuales establecen el tiempo total de dedicación del estudiante para cada asignatura, definido en la malla curricular del plan de estudios por las unidades académicas y docentes de la universidad. La carga formal es medida en SCT-Chile, donde 1 crédito SCT corresponde a 27 horas cronológicas de trabajo semestral en la UTFSM [UTFSM, 2020].
- **Carga percibida:** son los créditos académicos percibidos, los cuales establecen el tiempo real de dedicación del estudiante en base al grado de dificultad para cada asignatura, definido por la experiencia de los mismos estudiantes.
- **Riesgo académico:** es el índice que representa la propensión de que un estudiante experimente dificultades en una asignatura, lo que podría derivar en reprobación. Este objetivo académico se basa en la tasa histórica de reprobación y el historial de reprobación del estudiante para cada asignatura.
- **Tiempo de titulación:** es el número total de semestres en el que se busca completar todas las asignaturas del plan de estudios.

En este contexto, el estudiante define dos tipos de parámetros:

- **Metas:** valores objetivo que busca alcanzar para cada objetivo académico.
- **Pesos:** importancia relativa dentro de la función objetivo que asigna a cada objetivo académico.

Y posteriormente se calculan porcentajes de insatisfacción para cada objetivo académico, los cuales cuantifican qué tan alejada se encuentra la solución respecto a las metas definidas por el estudiante.

Para evitar que los objetivos académicos se combinen de forma implícita en la función objetivo, se adopta un enfoque de programación por metas, inspirado en

[Shakhsi-Niaei y Abuei-Mehrizi, 2020]. Este enfoque permite comparar cada objetivo académico con una meta y representar su importancia relativa dentro de la función objetivo a través del peso.

3.2.2. Parámetros

- m : número de asignaturas que faltan por cursar.
- k : semestre actual del estudiante.
- N : máximo número de semestres adicionales permitidos para titularse.
- $Y_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{si la asignatura } i \text{ se dicta en el semestre } j \\ 0 & \text{en caso contrario} \end{cases}, \forall j = k, \dots, k + N.$
- β : mínima carga formal por semestre.
- γ : máxima carga formal por semestre.
- δ : cantidad mínima de asignaturas por semestre.
- ϵ : máxima cantidad de asignaturas por semestre.
- α_i : carga formal de la asignatura i , en créditos SCT, $\forall i = 1, \dots, m$.
- ρ_i : carga percibida de la asignatura i , en créditos SCT, $\forall i = 1, \dots, m$.
- ζ_i : tasa histórica de reprobación de la asignatura i , $\forall i = 1, \dots, m$.
- θ_i : cantidad de veces que el estudiante reprobó la asignatura i , $\forall i = 1, \dots, m$.
- c^* : meta de carga formal en cada semestre.
- p^* : meta de carga percibida en cada semestre.
- r^* : riesgo académico objetivo en cada semestre.
- t^* : meta del tiempo de titulación, es decir, número de semestres adicionales para titularse.
- w_c^* : peso de la carga formal en la función objetivo.
- w_p^* : peso de la carga percibida en la función objetivo.
- w_r^* : peso del riesgo académico en la función objetivo.
- w_t^* : peso del tiempo de titulación en la función objetivo.

3.2.3. Variables de decisión

- $x_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{si la asignatura } i \text{ se cursa en el semestre } j \\ 0 & \text{en caso contrario} \end{cases}, \forall j = k, \dots, k + N.$

3.2.4. Variables auxiliares

- t : semestre real de titulación.

$$t = \max\{j : \exists i \text{ tal que } x_{ij} = 1\} \quad (1)$$

Corresponde al último semestre en el que se planifica alguna asignatura.

- c_j : carga formal del semestre $j, \forall j = k, \dots, k + N.$

$$c_j = \sum_{i=1}^m \alpha_i \cdot x_{ij}, \forall j = k, \dots, k + N \quad (2)$$

Es la suma de las cargas formales de las asignaturas asignadas al semestre.

- p_j : carga percibida del semestre $j, \forall j = k, \dots, k + N.$

$$p_j = \sum_{i=1}^m \rho_i \cdot x_{ij}, \forall j = k, \dots, k + N \quad (3)$$

Es la suma de las cargas percibidas de las asignaturas asignadas al semestre.

- ϕ_i : riesgo académico de la asignatura $i, \forall i = 1, \dots, m.$

$$\phi_i = \zeta_i \cdot (1 + \theta_i) \quad (4)$$

El riesgo académico de la asignatura i se calcula a partir de la tasa histórica de reprobación ζ_i y el número de reprobaciones previas θ_i . La tasa histórica de reprobación refleja la dificultad histórica de la asignatura, mientras que las reprobaciones previas incorporan antecedentes individuales del estudiante. Cuando $\theta_i = 0$, el riesgo académico coincide con la tasa histórica de reprobación.

- r_j : riesgo académico del semestre $j, \forall j = k, \dots, k + N.$

$$r_j = \sum_{i=1}^m \phi_i \cdot x_{ij}, \forall j = k, \dots, k + N \quad (5)$$

Es la suma de los riesgos académicos de las asignaturas asignadas al semestre.

3.2.5. Restricciones

Las restricciones definen el espacio de soluciones factibles, garantizando que la malla curricular propuesta sea académicamente válida y posible.

- **Asignación única:** todas las asignaturas i deben ser asignadas a un semestre j .

$$\sum_{j=k}^{k+N} x_{ij} = 1, \forall i = 1, \dots, m \quad (6)$$

- **Prerrequisitos:** si la asignatura b tiene como prerrequisito a la asignatura a , entonces a debe ser asignada a un semestre previo al semestre en el que se asigna b .

$$\sum_{r=k}^{j-1} x_{ar} \geq x_{bj}, \forall j = k, \dots, k + N \quad (7)$$

- **Límites de carga formal:** carga formal mínima y máxima por semestre.

$$\beta \leq c_j \leq \gamma, \forall j = k, \dots, k + N \quad (8)$$

- **Límites de cantidad de asignaturas:** número de asignaturas mínimo y máximo por semestre.

$$\delta \leq \sum_{i=1}^m x_{ij} \leq \epsilon \quad (9)$$

- **Oferta académica:** la asignatura i se puede cursar en el semestre j solo si la asignatura i se dicta en el semestre j .

$$x_{ij} \leq Y_{ij}, \forall j = k, \dots, k + N, i = 1, \dots, m \quad (10)$$

- **Inscripción inmediata por reprobación:** la asignatura reprobada i debe cursarse en el próximo semestre j en que se dicte.

$$\theta_i > 0 \Rightarrow x_{ij} = 1, j = \min\{j \in [k, k + N] : Y_{ij} = 1\} \quad (11)$$

3.2.6. Función objetivo

La función objetivo establece una métrica de calidad para las soluciones generadas. Dado que el problema es multiobjetivo, se busca un equilibrio de los cuatro objetivos académicos.

Utilizando programación por metas ponderada, la función objetivo minimiza la suma ponderada de los porcentajes de insatisfacción asociados a los objetivos académicos de carga

formal, carga percibida y riesgo académico en cada semestre, junto con la tasa de insatisfacción asociada al tiempo de titulación.

$$\text{mín } f(x) = \sum_{j=k}^t (w_c^* \cdot C_j + w_p^* \cdot P_j + w_r^* \cdot R_j) + w_t^* \cdot T \quad (12)$$

donde:

- C_j : tasa de insatisfacción de la carga formal de la solución respecto a la meta en el semestre j , $\forall j = k, \dots, k + N$.

$$C_j = \left(\frac{c_j - c^*}{c^*} \right)^2, \forall j = k, \dots, k + N \quad (13)$$

- P_j : tasa de insatisfacción de la carga percibida de la solución respecto a la meta en el semestre j , $\forall j = k, \dots, k + N$.

$$P_j = \left(\frac{p_j - p^*}{p^*} \right)^2, \forall j = k, \dots, k + N \quad (14)$$

- R_j : tasa de insatisfacción del riesgo académico de la solución respecto a la meta en el semestre j , $\forall j = k, \dots, k + N$.

$$R_j = \left(\frac{r_j - r^*}{r^*} \right)^2, \forall j = k, \dots, k + N. \quad (15)$$

- T : tasa de insatisfacción del tiempo de titulación de la solución respecto a la meta.

$$T = \left(\frac{\text{máx}\{0, t - t^*\}}{t^*} \right)^2 \quad (16)$$

A diferencia de los otros objetivos académicos, T implementa penalización unilateral, ya que solo genera insatisfacción cuando el tiempo de titulación de la solución supera la meta.

La tasa de insatisfacción se calcula mediante la desviación o diferencia entre el valor alcanzado por la solución y la meta definida por el estudiante. La diferencia es normalizada mediante escalamiento por meta, es decir, dividida por la meta misma, transformando los objetivos académicos de distinta naturaleza en valores adimensionales comparables entre sí. Por último, el resultado se eleva al cuadrado, ya que, de forma análoga a la desviación cuadrática implementada por [Monette et al., 2007], se incentiva a generar mallas curriculares más balanceadas penalizando de forma no lineal las diferencias más grandes.

Cabe destacar que, si bien las asignaturas pueden ser distribuidas en el intervalo de semestres $[k, k + N]$, la función objetivo $f(x)$ se calcula únicamente hasta el semestre real de titulación t , lo que permite evaluar la planificación curricular únicamente en el tiempo efectivo en que el estudiante cursa asignaturas.

3.3. Algoritmo de resolución

3.3.1. Enfoque

El espacio de búsqueda del BACP es el conjunto de todas las posibles soluciones, es decir, asignaciones de asignaturas a los distintos semestres que podrían conformar la malla curricular. El BACP es un problema NP-completo [Chiarandini et al., 2012], por lo que a medida que aumenta el número de asignaturas y semestres de la instancia, la cantidad de soluciones posibles crece exponencialmente. Para el presente trabajo, incorporar múltiples objetivos académicos incrementa la complejidad del problema.

Por lo tanto, obtener soluciones mediante métodos exactos resulta computacionalmente ineficiente. En cambio, las metaheurísticas permiten explorar eficientemente el espacio de búsqueda y obtener soluciones de buena calidad en tiempos razonables. Dentro de las metaheurísticas utilizadas en la literatura para abordar el BACP y sus variantes destacan enfoques como *Tabu Search*, *Simulated Annealing*, algoritmos evolutivos y ACO.

En particular, los algoritmos evolutivos son metaheurísticas inspiradas en la evolución biológica, que mantienen una población de soluciones y las mejoran en paralelo de forma iterativa mediante operadores de selección, cruzamiento y mutación. Han sido aplicados exitosamente en el BACP en los trabajos de [Villalobos-Cid et al., 2019] y [Pinos Ullauri et al., 2025]. También presentan características adecuadas para el problema estudiado, tal como la exploración de múltiples regiones del espacio de búsqueda en paralelo, lo que permite evaluar distintos balances entre los objetivos académicos de forma más eficiente.

Además, no existe una única solución óptima que satisfaga a todos los estudiantes, ya que sus objetivos y condiciones personales son altamente heterogéneos. En consecuencia, el algoritmo de resolución no debe limitarse a generar una única malla curricular válida, sino en ofrecer un conjunto de alternativas factibles que reflejen las distintas realidades y permitan a los estudiantes elegir aquella que mejor se ajuste a sus intereses.

La implementación del algoritmo se realizó en C++, bajo el estándar C++17. El código fuente desarrollado se encuentra disponible en un repositorio de GitHub [Wang, 2026b].

3.3.2. Representación de la solución

Una solución candidata x al problema es una malla curricular que asigna todas las asignaturas pendientes a los semestres pendientes. En el algoritmo evolutivo, cada solución del problema se representa mediante un individuo o cromosoma, y el algoritmo opera iterativamente sobre un conjunto de individuos denominado población.

Para la implementación del algoritmo evolutivo, cada individuo se representa como un vector

de dimensión igual a la cantidad de asignaturas que faltan por cursar m , donde el índice (gen) i corresponde a la asignatura y el valor (alelo) $x_i \in \{k, k + 1, \dots, k + N\}$ corresponde al semestre en que se cursa dicha asignatura. Formalmente, se representa como:

$$x = [x_1, x_2, \dots, x_m] \quad (17)$$

Esta representación es de tipo entera, ya que cada índice puede tomar valores discretos correspondientes a los semestres disponibles. De esta forma, se representa y manipula de manera directa la asignación de asignatura a semestres, pero no garantiza el cumplimiento de las restricciones del problema.

La Figura 3 muestra la representación gráfica de un individuo. Por otra parte, la Figura 4 muestra la representación de una población compuesta por $P_{\text{máx}}$ individuos.

Asignatura 1	Asignatura 2	Asignatura 3		Asignatura m
Semestre (k, k+N)	Semestre (k, k+N)	Semestre (k, k+N)	...	Semestre (k, k+N)

Figura 3: Representación de un individuo. Fuente: Elaboración propia.

3.3.3. Espacio de búsqueda

El espacio de búsqueda V del problema es el conjunto de todas las posibles asignaciones de las m asignaturas restantes a los semestres disponibles en el intervalo $[k, k + N]$. Dado que cada asignatura puede ser asignada a cualquiera de los semestres, el espacio de búsqueda puede representarse como:

$$V \in \{k, k + 1, \dots, k + N\}^m \quad (18)$$

No obstante, no todas las soluciones en V son factibles, ya que deben satisfacer las restricciones del modelo.

3.3.4. Manejo de restricciones

El manejo de restricciones se realiza mediante un enfoque híbrido, en el cual las restricciones del problema son clasificadas en:

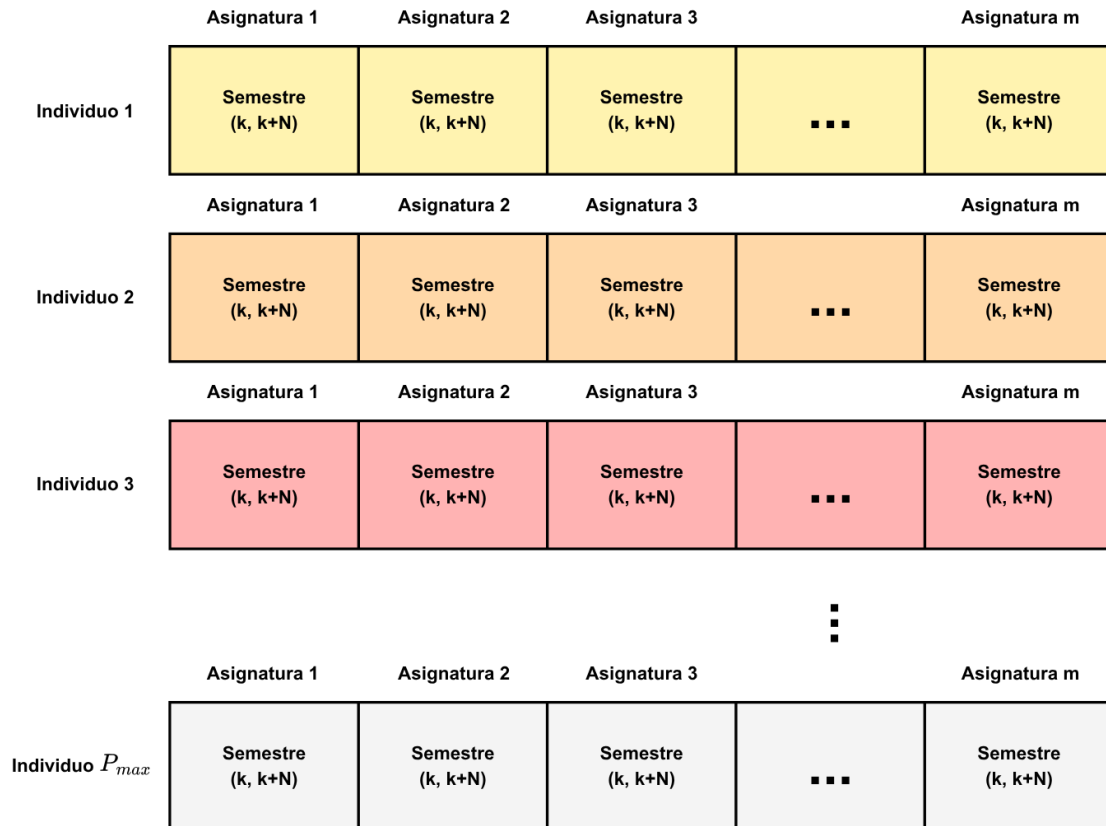


Figura 4: Representación de una población. Fuente: Elaboración propia.

- **Restricciones duras:** son condiciones obligatorias para que una solución sea factible. Definir todas las restricciones como duras reduce de forma significativa el espacio de búsqueda factible, lo que dificulta la generación de soluciones iniciales e incluso puede impedir la construcción de una población inicial completa en instancias complejas.
- **Restricciones blandas:** son condiciones cuya violación no hace infactible la solución, por lo que habilitan regiones del espacio de búsqueda que de otro modo quedarían excluidas. Si bien las soluciones que incumplen restricciones blandas no se descartan, implican una penalización proporcional a la magnitud de la violación en la función de evaluación, afectando negativamente la calidad de la solución.

Se clasifican algunas restricciones del modelo como duras y otras como blandas de acuerdo a reglamentos en la carrera de Ingeniería Civil Informática (código 7313) de la UTFSM, lo cual se detalla en la Tabla 3.

La oferta académica es una restricción dura, ya que su incumplimiento es impedido directamente por el sistema de inscripción de asignaturas de la UTFSM. Los prerrequisitos y la carga formal máxima de 35 créditos SCT por semestre también son restricciones duras, ya

Tabla 3: Tipos de restricciones. Fuente: Elaboración propia.

Restricción	Tipo de restricción
Asignación única	Restricción dura
Prerrequisitos	Restricción dura
Oferta académica	Restricción dura
Máxima carga formal	Restricción dura
Mínima carga formal	Restricción blanda
Límites de número de asignaturas	Restricción blanda
Inscripción inmediata por reprobación	Restricción blanda

que son límites reglamentarios de la UTFSM. Si bien para los estudiantes existe la posibilidad de enviar solicitudes académicas para relajar estas últimas dos restricciones, el jefe de carrera confirmó que la carrera no se acoge a esta posibilidad¹.

En contraste, las restricciones asociadas a la carga formal mínima, el número de asignaturas y la inscripción inmediata por reprobación fueron modeladas como restricciones blandas debido a su mayor flexibilidad normativa en la UTFSM:

- Si bien el sistema de inscripción de asignaturas inscribe automáticamente las asignaturas reprobadas en el siguiente semestre en que estas se encuentren disponibles, los estudiantes pueden enviar una solicitud académica para postergarlo por un período de hasta cuatro semestres, previa autorización del jefe de carrera [UTFSM, 2003].
- El estudiante puede enviar una solicitud académica para tener una carga formal menor a 17 créditos SCT en un semestre, cambiando su condición a alumno regular de dedicación parcial [UTFSM, 2003].
- No existe evidencia reglamentaria de un límite inferior o superior para el número de asignaturas inscritas por semestre. En las propias mallas curriculares de la UTFSM la cantidad de asignaturas por semestre presenta una alta variabilidad; por ejemplo, el último semestre de la malla curricular de Ingeniería Civil Informática (código 7313) de la UTFSM contempla una sola asignatura, mientras que la malla curricular de Ingeniería Civil Eléctrica de la UTFSM (código 2311) alcanza hasta siete asignaturas por semestre. Sin embargo, se mantiene la restricción por herencia del modelo original del BACP de [Castro y Manzano, 2001], donde se utiliza para promover una distribución balanceada de la carga formal entre semestres

Por lo tanto, la función de evaluación utilizada incorpora penalizaciones asociadas a las restricciones blandas, y se define como:

¹Correo electrónico institucional de difusión masiva enviado por Pedro Godoy (Jefe de Carrera de Ingeniería Civil Informática UTFSM), 14 de enero de 2025.

$$F(x) = f(x) + \sum \text{penalizaciones}_k(x) \quad (19)$$

donde el segundo sumando es la suma de los términos de penalización asociados a cada restricción blanda violada por la solución x .

3.3.5. Algoritmo evolutivo

Un algoritmo evolutivo explora el espacio de búsqueda mediante la mejora iterativa de una población, combinando operadores de selección, cruzamiento y mutación, junto con un criterio elitista para preservar soluciones de alta calidad.

El algoritmo trabaja con una población de tamaño fijo $P_{\text{máx}}$ y se estructura en dos niveles de iteración: reinicios y generaciones. Se realizan $R_{\text{máx}}$ reinicios y, en cada uno de ellos, se construye una población inicial que es iterada durante $G_{\text{máx}}$ generaciones.

En cada generación, se preservan los mejores $E_{\text{máx}}$ individuos mediante elitismo. Posteriormente, el resto de la nueva población se completa mediante selección, cruzamiento y mutación. Los nuevos individuos generados son evaluados e incorporados a la población hasta alcanzar nuevamente el tamaño $P_{\text{máx}}$. Una vez completada la nueva generación, la población anterior es reemplazada completamente con la nueva y se actualiza un conjunto histórico de soluciones, el cual almacena las $H_{\text{máx}}$ mejores soluciones encontradas durante toda la ejecución del algoritmo.

Los parámetros del algoritmo influyen directamente en el equilibrio entre exploración e intensificación. El parámetro $R_{\text{máx}}$ favorece la exploración al permitir reiniciar la búsqueda en distintas regiones del espacio de búsqueda. Por su parte, $G_{\text{máx}}$ incrementa la intensificación, ya que permite refinar las soluciones durante un mayor número de iteraciones.

El Algoritmo 1 describe el algoritmo evolutivo implementado.

3.3.6. Población inicial

La población inicial es el conjunto de soluciones candidatas sobre la cual comienza la ejecución del algoritmo. La construcción de la población inicial es un proceso importante en el desempeño del algoritmo, ya que influye directamente en la calidad como en la diversidad de las soluciones que se iterarán.

La población inicial se construye generando iterativamente individuos factibles hasta alcanzar el tamaño de población $P_{\text{máx}}$ o un número máximo de intentos $T_{\text{máx}}$. El parámetro $P_{\text{máx}}$ influye en la diversidad mantenida en cada generación y, en consecuencia, en la explora-

Algorithm 1 Algoritmo evolutivo

Require: Instancia del problema, $H_{\text{máx}}$, $R_{\text{máx}}$, $G_{\text{máx}}$, $P_{\text{máx}}$, $E_{\text{máx}}$, p_c , p_m , $topK$

Ensure: Histórico de mejores soluciones H

```
1:  $H \leftarrow \emptyset$ 
2: for  $r = 1$  to  $R_{\text{máx}}$  do
3:    $P \leftarrow$  Generar población inicial
4:   for  $g = 1$  to  $G_{\text{máx}}$  do
5:     Ordenar  $P$  según aptitud
6:      $Q \leftarrow$  mejores  $E_{\text{máx}}$  individuos de  $P$ 
7:     while  $|Q| < P_{\text{max}}$  do
8:        $x \leftarrow \text{Selección}(P)$ 
9:        $y \leftarrow \text{Selección}(P)$ 
10:       $z \leftarrow x$ 
11:      if  $\text{rand}() < p_c$  then
12:         $z \leftarrow \text{Cruzamiento}(x, y)$ 
13:      end if
14:      if  $\text{rand}() < p_m$  then
15:         $z \leftarrow \text{Mutación}(z)$ 
16:      end if
17:      Evaluar  $z$ 
18:      Incorporar  $z$  a  $Q$ 
19:    end while
20:     $P \leftarrow Q$ 
21:    Actualizar  $H$  con las mejores soluciones de  $P$ 
22:  end for
23: end for
24: return  $H$ 
```

ción del espacio de búsqueda mientras que el parámetro $T_{\text{máx}}$ permite finalizar el algoritmo cuando no logra construir una población inicial completa en un número fijo de iteraciones.

En términos generales, existen dos enfoques posibles para construir la población inicial:

- **Construcción aleatorizada:** incorpora componentes estocásticos, generando individuos distintos a partir de una misma instancia. Esto favorece la diversidad de la población inicial, lo que permite explorar distintas regiones del espacio de búsqueda.
- **Construcción determinística:** utiliza reglas o heurísticas basadas en conocimiento del problema, generando individuos iguales a partir de la misma instancia. Este enfoque suele producir soluciones de mayor calidad, aunque en algoritmos evolutivos reduce la diversidad de la población inicial.

En un algoritmo evolutivo, una población inicial poco diversa puede llevar a una convergencia

prematura hacia óptimos locales, mientras que una población inicial de baja calidad puede dificultar la mejora progresiva de las soluciones. Por esta razón, se propone un procedimiento que combina ambos enfoques, que se detalla a continuación:

1. En primer lugar, las asignaturas con reprobaciones previas se asignan obligatoriamente al primer semestre en el que se encuentren disponibles, lo que garantiza el cumplimiento de la restricción asociada.
2. Para cada asignatura, se calcula su número de sucesores. Un sucesor se define como otra asignatura que depende directa o indirectamente de ella a través de las relaciones de prerrequisitos.
3. Luego, el algoritmo recorre secuencialmente los semestres en el rango $[k, k + N]$ hasta asignar todas las asignaturas a un semestre. Para cada semestre:
 - a) Se construye un conjunto de asignaturas candidatas que cumplen las restricciones duras del problema. Para cada asignatura candidata i en el semestre j , se calcula un puntaje que permite ordenarlo, definido como:

$$\text{puntaje}_{ij} = s_i + \alpha_i - |(c_j + \alpha_i) - \bar{c}| + \sum \text{penalización}_k(x_{ij}) \quad (20)$$

donde:

- s_i : número de sucesores de la asignatura i .
 - c_j : créditos formales del semestre j , antes de asignar i .
 - $\bar{c}$: promedio de créditos formales por semestre.
 - $\text{penalización}_k(x_{ij})$: penalización por límite de créditos formales o límite de número de asignaturas.
- b) Se seleccionan iterativamente asignaturas candidatas mediante una estrategia Greedy: en cada iteración, las asignaturas candidatas se ordenan de mayor a menor puntaje y se selecciona aleatoriamente uno de los $\text{top}K$ mejores, el cual es asignado al semestre. De esta forma, el parámetro $\text{top}K$ influye directamente en la diversidad de la población inicial.

Finalmente, las asignaturas que no logran ser asignadas durante este proceso se incorporan en un paso de respaldo, asignándolas al primer semestre disponible que cumpla las restricciones duras del problema.

El Algoritmo 2 describe el procedimiento de generación de un individuo.

3.3.7. Reemplazo

En el reemplazo se construye la siguiente generación de individuos, seleccionando y construyendo un conjunto de nuevos individuos que reemplaza a la generación actual.

Algorithm 2 Generación de individuo

Require: Instancia del problema, $topK$

Ensure: Individuo x

- 1: Inicializar individuo vacío x , asignaciones y carga formal
 - 2: Asignar asignaturas con reprobaciones previas al primer semestre disponible
 - 3: Calcular número de sucesores s_i para cada asignatura
 - 4: **for** cada semestre $j = k, \dots, k + N$ **do**
 - 5: **while** existen asignaturas no asignadas factibles en el semestre j **do**
 - 6: Construir conjunto de candidatos Q_j que cumplen restricciones duras
 - 7: **for** cada asignatura $i \in Q_j$ **do**
 - 8: Calcular puntaje q_{ij}
 - 9: **end for**
 - 10: Ordenar Q_j de forma decreciente según q_{ij}
 - 11: Seleccionar subconjunto R_j con los $topK$ mejores candidatos
 - 12: Seleccionar aleatoriamente una asignatura $i \in R_j$
 - 13: Asignar i al semestre j
 - 14: Actualizar carga formal del semestre y conjunto de asignaciones
 - 15: **end while**
 - 16: **end for**
 - 17: Asignar asignaturas restantes al primer semestre que cumpla restricciones duras
 - 18: **return** x
-

Se implementa con un enfoque elitista, preservando un subconjunto de los mejores $E_{\max}$ individuos a la siguiente generación para no perder las soluciones de mejor calidad ya encontradas. De esta forma, valores altos del parámetro $E_{\max}$ favorecen la intensificación, porque preservan más soluciones de mejor calidad entre generaciones.

El resto de la generación se completa iterativamente generando nuevos individuos mediante los operadores de selección, mutación y cruzamiento.

El reemplazo balancea intensificación al preservar las mejores soluciones, y diversificación al introducir nuevos individuos mediante operadores estocásticos. Esto permite mantener la diversidad de la población mientras se guía la búsqueda hacia regiones de mejor calidad en el espacio de búsqueda.

3.3.8. Operador de selección

Para seleccionar individuos se utiliza un torneo binario, que consiste en seleccionar dos individuos de manera aleatoria y retornar el que tiene mejor calidad.

Este método favorece la propagación de individuos de mejor calidad permitiendo al mismo tiempo que individuos con menor calidad puedan ser seleccionados, lo que introduce diver-

sidad en la población y evita una convergencia prematura. Además, su simplicidad y baja complejidad computacional lo hace adecuado para ser ejecutado repetidamente.

El Algoritmo 3 describe el procedimiento de selección.

Algorithm 3 Selección

Require: Población P

Ensure: Individuo seleccionado x

```
1: Seleccionar aleatoriamente dos individuos  $x_1, x_2 \in P$ 
2: if  $F(x_1) < F(x_2)$  then
3:   return  $x_1$ 
4: else
5:   return  $x_2$ 
6: end if
```

3.3.9. Operador de mutación

La mutación consiste en realizar modificaciones sobre una solución, bajo una probabilidad de mutación p_m . Introduce diversidad en la población, permitiendo escapar de óptimos locales y promoviendo la exploración de nuevas regiones del espacio de búsqueda.

Se implementa mediante una reasignación del semestre de una asignatura. Para el individuo a mutar, se escoge aleatoriamente una asignatura y se intenta reasignarla aleatoriamente a otro semestre en el que está disponible. La reasignación solo se acepta si la solución resultante cumple las restricciones duras del problema; en caso contrario, se intenta con otro semestre. En caso de que ningún semestre genere una reasignación factible, se conserva la asignación original.

El Algoritmo 4 describe el procedimiento de mutación.

3.3.10. Operador de cruzamiento

El cruzamiento combina información de dos individuos (denominados padres) para generar un nuevo individuo (denominado hijo), bajo una probabilidad de cruzamiento p_c . Favorece la explotación, ya que el algoritmo combina información de soluciones existentes.

Se implementa cruzamiento en un punto (*one-point crossover*) que consiste en, dado dos individuos seleccionados, escoger aleatoriamente un punto de corte y construir un hijo que hereda una parte de las asignaciones del primer padre y el resto del segundo padre. El hijo solo se retorna si cumple las restricciones duras del problema; en caso contrario, se repite el proceso con otro punto de corte aleatorio. En caso de que ningún punto de corte genere un hijo factible, se retorna el mejor de los padres.

Algorithm 4 Mutación

Require: Individuo x , instancia

Ensure: Individuo mutado x

```
1: Seleccionar aleatoriamente una asignatura  $i$ 
2: Guardar semestre actual  $j_{old} \leftarrow x[i]$ 
3: Generar una permutación aleatoria de semestres  $S$  donde  $i$  está disponible
4: for cada semestre  $j \in S$  do
5:   if  $j = j_{old}$  then
6:     Continuar
7:   end if
8:   Asignar temporalmente  $x[i] \leftarrow j$ 
9:   if  $x$  cumple restricciones duras then
10:    return  $x$ 
11:   end if
12:   Restaurar  $x[i] \leftarrow j_{old}$ 
13: end for
14: return  $x$ 
```

El Algoritmo 5 describe el procedimiento de cruzamiento.

Algorithm 5 Cruzamiento

Require: Padres X, Y

Ensure: Hijo H

```
1: Generar una permutación aleatoria de puntos de corte  $C$ 
2: for cada punto de corte  $c \in C$  do
3:   Construir hijo  $H$  combinando prefijo de  $X$  y sufijo de  $Y$  según  $c$ 
4:   if  $H$  cumple restricciones duras then
5:     return  $H$ 
6:   end if
7: end for
8: if  $F(X) \leq F(Y)$  then
9:   return  $X$ 
10: else
11:   return  $Y$ 
12: end if
```

3.3.11. Histórico

Retornar únicamente la población final no es suficiente para el objetivo del problema, ya que el algoritmo puede converger hacia una única solución y los individuos de la población final puede tener peor calidad que otras soluciones encontradas en generaciones anteriores. El objetivo del modelo es entregar múltiples alternativas de soluciones factibles, que sean de

buena calidad y con la suficiente diversidad para permitir al estudiante comparar las mallas curriculares según sus preferencias.

Para abordar esto, se mantiene un conjunto de soluciones denominado histórico, de tamaño H_{max} , el cual almacena las mejores soluciones factibles encontradas a lo largo de todo el algoritmo evolutivo. El histórico representa el conjunto final de soluciones que serán entregadas al estudiante.

Al finalizar cada generación, cada individuo de la nueva población es evaluado para incluirse en el histórico, siempre que no exista un individuo igual, es decir, que tenga las mismas asignaciones de asignaturas a semestres. En el caso de que el histórico tenga $H_{máx}$ individuos, una nueva solución solo reemplaza a la peor solución del histórico si es de mejor calidad; en el caso de tener menos de $H_{máx}$ individuos, simplemente se intenta completar el histórico incorporando cualquier solución.

El Algoritmo 6 describe el procedimiento de actualización del histórico.

Algorithm 6 Actualización del histórico

Require: Población P , histórico H , tamaño máximo H_{max}

Ensure: Histórico actualizado H

```
1: for cada individuo  $x \in P$  do
2:   if  $x$  es factible then
3:     if  $x$  no está contenido en  $H$  then
4:       if  $|H| < H_{max}$  then
5:         Incorporar  $x$  a  $H$ 
6:       else
7:         Reemplazar en  $H$  la peor solución si  $x$  es mejor
8:       end if
9:     end if
10:  end if
11: end for
12: return  $H$ 
```

CAPÍTULO 4

VALIDACIÓN DE LA SOLUCIÓN

La validación de la propuesta de solución se realizó en dos etapas: por un lado, una evaluación experimental que incluyó análisis de factibilidad, análisis de sensibilidad de parámetros del algoritmo, análisis de sensibilidad de metas y pesos, y comparación con funciones de evaluación de referencia; por otra parte, una evaluación cualitativa con estudiantes.

4.1. Evaluación experimental

La evaluación experimental consiste en analizar los resultados del algoritmo propuesto bajo escenarios experimentales utilizando métricas de optimización, tales como tiempo de ejecución del algoritmo y calidad de las soluciones.

4.1.1. Instancias

Se generaron instancias sintéticas a partir de instancias base que corresponden tanto a *benchmarks* extraídos de la literatura como a mallas curriculares reales de la UTFSM, estandarizadas bajo la misma estructura. La estructura de las instancias base se define a partir de los parámetros originalmente propuestos en [Castro y Manzano, 2001], los cuales son: número de semestres, asignaturas, carga formal por asignatura, prerequisites por asignatura, límite de asignaturas por semestre, y límite de carga formal por semestre.

Las instancias base corresponden a los *benchmarks* bacp8, bacp10 y bacp12, junto con tres mallas curriculares del área informática impartidas por la UTFSM en el año 2026. Estas últimas se construyeron manualmente a partir de información disponible en el sitio web institucional de la UTFSM, considerando el número de semestres correspondiente a la duración máxima permitida en la carrera, la cual es un 50 % adicional respecto de la duración formal de la carrera [UTFSM, 2003] (ver Anexo 2). Las instancias base se resumen en la Tabla 4.

Para completar los parámetros faltantes en las instancias base, se desarrolló un generador de instancias sintéticas. El generador utiliza los parámetros presentes en las instancias base y asigna valores pseudoaleatorios dentro de rangos definidos a los parámetros faltantes de acuerdo a lo siguiente:

- La carga percibida por asignatura se obtiene multiplicando su carga formal por un factor aleatorio $\lambda_p \sim U(0, 7; 1, 3)$. Esto representa la carga percibida de una asignatura hasta un 30 % más exigente o más liviana que su carga formal.

Tabla 4: Instancias base. Fuente: Elaboración propia.

Instancia	Descripción	Nº semestres	Nº asignaturas	Nº prerrequisitos	Máx. carga	Mín. carga	Máx. asig.	Mín. asig.
bacp8	Benchmark [Castro y Manzano, 2001]	8	46	38	24	10	10	2
bacp10	Benchmark [Castro y Manzano, 2001]	10	42	34	24	10	10	2
bacp12	Benchmark [Castro y Manzano, 2001]	12	66	65	24	10	10	2
utfsm2920	Malla curricular de Ingeniería Informática (código 2920) UTFSM	12	46	29	35	17	8	1
utfsm7310	Malla curricular de Ingeniería Civil Informática (código 7310) UTFSM	15	57	43	35	17	8	1
utfsm7313	Malla curricular de Ingeniería Civil Informática (código 7313) UTFSM	16	59	51	35	17	8	1

- La tasa histórica de reprobación por asignatura se obtiene en función de su carga formal y un factor aleatorio $\lambda_{\zeta} \sim U(0,03; 0,45)$, ajustado por la proporción de carga formal de la asignatura respecto de la asignatura con mayor carga formal de la malla curricular. Esto representa una mayor tasa histórica de reprobación en asignaturas con mayor carga formal.
- El número de reprobaciones del estudiante por asignatura se obtiene únicamente para asignaturas que no poseen prerrequisitos pendientes. Primero, se asigna una probabilidad de reprobación entre 0,05 y 0,2; en caso de haber reprobado, se asigna aleatoriamente entre una y tres reprobaciones.
- La disponibilidad de las asignaturas se determina según la paridad del semestre. Cada asignatura puede estar disponible en semestres pares, en semestres impares o ambos. La probabilidad de disponibilidad en ambos semestres se fija en 75 %; la probabilidad de disponibilidad únicamente en semestres impares se genera aleatoriamente entre 10 % y 15 %, mientras que la probabilidad restante corresponde a la disponibilidad únicamente en semestres pares.

Además, se considera el semestre actual k como el semestre 0, mientras que el número de semestres de la instancia base se establece como el semestre máximo de la malla curricular N . Por su parte, los parámetros asociados a metas y pesos se definen como entradas del generador con el objetivo de permitir el análisis experimental.

4.1.2. Procedimiento

Se desarrolló un archivo por lotes que automatiza las distintas etapas del proceso experimental de forma secuencial, el cual consistió en las siguientes etapas:

1. **Generación de instancias sintéticas:** se generó instancias sintéticas utilizando dos tipos de configuración de pesos y metas. Cada configuración se replicó con cinco semillas distintas: 4, 8, 48, 84 y 88.

Los tipos de configuración son los siguientes:

- **Configuración de referencia:** se generaron instancias sintéticas utilizando valores de referencia de pesos y metas. Esto generó 30 instancias sintéticas, las cuales son utilizadas para el análisis de sensibilidad de los parámetros del algoritmo.
- **Configuración One-Factor-at-a-Time (OFAT):** se generaron instancias variando los valores de pesos y metas mediante un procedimiento OFAT, que consiste en modificar un único peso o meta mientras los restantes permanecen en su configuración de referencia. Esto generó 720 instancias sintéticas, las cuales son utilizadas para el análisis de sensibilidad de pesos y metas.

Las configuraciones utilizadas se detallan en la Tabla 5. En el caso de la meta del tiempo de titulación t^* , a diferencia de los demás objetivos académicos, su valor de referencia no se definió como una constante única debido a que instancias con distinto número de semestres máximos N requieren metas de titulación proporcionalmente distintas.

Tabla 5: Configuraciones en la generación de instancias sintéticas. Fuente: Elaboración propia.

Parámetro	Instancia base	Configuración de referencia	Configuración OFAT
Pesos ($w_c^*, w_p^*, w_r^*, w_t^*$)	–	1	(0,5; 1; 2)
Meta de carga formal (c^*)	–	22	(15, 22, 30)
Meta de carga percibida (p^*)	–	22	(15, 22, 30)
Meta de riesgo académico (r^*)	–	1,5	(1; 1,5; 2)
Meta de tiempo de titulación (t^*)	bacp8, bacp10, bacp12	N	$(N, N - 2, N - 3)$
	utfsm2920, utfsm7310, utfsm7313	$\lfloor \frac{2N}{3} \rfloor$	$(\lfloor \frac{2N}{3} \rfloor, \lfloor \frac{2N}{3} \rfloor - 2, \lfloor \frac{2N}{3} \rfloor - 3)$

En total se generaron 750 instancias sintéticas, las cuales son todas utilizadas para el análisis de factibilidad de las soluciones.

2. **Ejecución del algoritmo:** se ejecutó el algoritmo con cada instancia sintética, utilizando dos tipos de configuración de parámetros del algoritmo. Cada configuración se replicó con cinco semillas distintas: 4, 8, 48, 84 y 88.

Los tipos de configuración son los siguientes:

- **Configuración de referencia:** todas las instancias sintéticas son ejecutadas con valores de referencia de los parámetros del algoritmo. Los parámetros $G_{\max}, P_{\max}, p_m, p_c$ fueron fijados de acuerdo a valores reportados en

[Villalobos-Cid *et al.*, 2019], mientras que los parámetros restantes se determinaron mediante experimentación preliminar. Se ejecutó el algoritmo 3.750 veces, cuyas soluciones son usadas para el análisis de sensibilidad de metas y pesos.

- **Configuración OFAT:** las instancias sintéticas generadas con configuración de referencia son ejecutadas mediante un procedimiento OFAT, modificando un parámetro del algoritmo mientras los restantes permanecen en su configuración de referencia. En el caso de las penalizaciones asociadas a las restricciones blandas, se agruparon sus valores y se definieron tres perfiles de penalización: bajo, medio y alto. Se ejecutó el algoritmo 3.600 veces, cuyas soluciones son usadas para el análisis de sensibilidad de los parámetros del algoritmo.

Las configuraciones utilizadas se detallan en las Tablas 6 y 7.

Tabla 6: Configuraciones en la ejecución del algoritmo. Fuente: Elaboración propia.

Parámetro	Configuración de referencia	Configuración OFAT
Número de intentos ($T_{\text{máx}}$)	100.000	-
Tamaño de histórico ($H_{\text{máx}}$)	20	-
Número de reinicios ($R_{\text{máx}}$)	5	(1, 5, 10)
Número de generaciones ($G_{\text{máx}}$)	10	(25, 50, 100)
Tamaño de población ($P_{\text{máx}}$)	100	(50, 100, 200)
Tamaño de elitismo ($E_{\text{máx}}$)	10	(5, 10, 20)
Probabilidad de mutación (p_m)	0,3	(0,1; 0,3; 0,5)
Probabilidad de cruzamiento (p_c)	0,5	(0,3; 0,6; 0,9)
$topK$	5	(3, 5, 10)
Penalizaciones	Medio	(Bajo, Medio, Alto)

Tabla 7: Configuraciones de penalización de restricciones blandas en la ejecución del algoritmo. Fuente: Elaboración propia.

Penalización	Bajo	Medio	Alto
Mín. carga formal por semestre	5	10	20
Máx. n° de asignaturas por semestre	2	5	10
Mín. n° de asignaturas por semestre	2	5	10
Inscripción inmediata con reprobación	5	10	20

En total se ejecutó el algoritmo 7.350 veces y se generaron 146.968 individuos, los cuales son todos utilizados para el análisis de factibilidad de las soluciones. La diferencia respecto al máximo teórico de 147.000 individuos se debe a que algunas ejecuciones no completaron su histórico de 20 individuos.

3. **Evaluación de soluciones:** los resultados de las ejecuciones del algoritmo, es decir cada individuo retornado en el histórico, son procesados por un módulo que reconstruye la asignación de asignaturas a semestres y calcula métricas de factibilidad y calidad.

En términos de calidad, se evalúa la tasa de insatisfacción de cada objetivo académico (C, P, R, T). Para la carga formal, la carga percibida y el riesgo académico, esta se calcula como la suma de la tasa de insatisfacción de cada semestre (C_j, P_j, R_j). Junto con esto, se evalúa el promedio de carga formal por semestre ($\bar{c}$), el promedio de carga percibida por semestre ($\bar{p}$), el riesgo académico promedio por semestre ($\bar{r}$) y el semestre real de titulación (t). Por otro lado, en términos de factibilidad, se cuantifica la violación de cada restricción como la magnitud de su desviación respecto de su límite definido.

Los resultados y sus métricas son registrados en un archivo de formato CSV, que es posteriormente analizado en Power BI.

La plataforma de hardware utilizada para los experimentos corresponde a un computador con procesador Intel(R) Celeron(R) N4500 @ 1.10GHz en conjunto con 8,0 GB de RAM. El entorno corresponde a Ubuntu ejecutado mediante Windows Subsystem for Linux 2 (WSL2), sobre sistema operativo Windows 11, utilizando el compilador g++ 11.4.0.

4.1.3. Análisis de factibilidad

El análisis de factibilidad tiene como objetivo evaluar el cumplimiento de las restricciones del problema en el conjunto de todos los individuos generados.

Los resultados obtenidos en las ejecuciones experimentales se muestran en la Tabla 8.

Tabla 8: Promedio de violaciones por restricción. Fuente: Elaboración propia.

Tipo de restricción	Restricción	Promedio de violaciones
Dura	Asignación única	0
	Prerrequisitos	0
	Oferta académica	0
	Carga formal máxima	0
Blanda	Carga formal mínima	0,03
	Número de asignaturas máximo	0,11
	Número de asignaturas mínimo	0
	Inscripción inmediata por reprobación	0

Los resultados muestran que el algoritmo cumple adecuadamente las restricciones duras y las soluciones generadas son factibles, ya que no se registran violaciones de las restricciones duras en ninguna de las ejecuciones del algoritmo.

En cuanto a restricciones blandas, se observan violaciones promedio bajas en las restricciones de carga formal mínima y número máximo de asignaturas por semestre, lo que es coherente con su rol de restricciones cuyo cumplimiento es más deseable que obligatorio.

4.1.4. Análisis de sensibilidad de parámetros del algoritmo

El análisis de sensibilidad de parámetros del algoritmo tiene como objetivo evaluar la influencia de estos sobre su desempeño. Esto permite identificar configuraciones con mayor impacto y observar la estabilidad de la solución frente a variaciones en sus parámetros, así como analizar el *trade-off* entre calidad de solución y costo computacional.

Los resultados obtenidos en las ejecuciones experimentales se muestran en la Tabla 9.

Tabla 9: Aptitud y tiempo de ejecución promedio por parámetro del algoritmo. Fuente: Elaboración propia.

Parámetro	Valor	Aptitud promedio	Tiempo de ejecución promedio [s]
$R_{\text{máx}}$	1	6,371 (+0,492)	0,284 (−0,057)
	5 (referencia)	5,879	1,341
	10	5,791 (−0,088)	2,709 (+1,368)
$G_{\text{máx}}$	10 (referencia)	5,879	1,341
	25	5,387 (−0,492)	2,604 (+1,263)
	50	5,295 (−0,584)	4,748 (+3,407)
	100	5,259 (−0,620)	8,509 (+7,168)
$P_{\text{máx}}$	50	6,133 (+0,254)	0,620 (−0,721)
	100 (referencia)	5,879	1,341
	200	5,738 (−0,141)	2,868 (+1,527)
$E_{\text{máx}}$	5	5,861 (−0,018)	1,430 (+0,089)
	10 (referencia)	5,879	1,341
	20	5,906 (+0,027)	1,263 (−0,078)
p_m	0,1	6,086 (+0,207)	1,212 (−0,129)
	0,3 (referencia)	5,879	1,341
	0,5	5,797 (−0,082)	1,453 (+0,112)
p_c	0,3	5,937 (+0,058)	1,153 (−0,188)
	0,5 (referencia)	5,879	1,341
	0,6	5,869 (−0,010)	1,474 (+0,133)
	0,9	5,807 (−0,072)	1,681 (+0,340)
$topK$	3	6,020 (+0,141)	1,330 (−0,011)
	5 (referencia)	5,879	1,341
	10	5,906 (+0,027)	1,342 (+0,001)
Penalización	Bajo	5,853 (−0,026)	1,397 (+0,056)
	Medio (referencia)	5,879	1,341
	Alto	5,898 (+0,019)	1,347 (−0,006)

Los parámetros del algoritmo presentan distintos niveles de impacto sobre la aptitud y el tiempo de ejecución. Aquellos relacionados con el tamaño de la búsqueda, como el número de reinicios ($R_{\text{máx}}$), el número de generaciones ($G_{\text{máx}}$) y el tamaño de la población ($P_{\text{máx}}$), son los que generan las mayores mejoras en la aptitud de las soluciones, aunque a costa de un incremento en el tiempo de ejecución.

El parámetro con mayor impacto es el número de generaciones: al aumentar su valor desde 10 hasta 100 generaciones, la aptitud promedio mejora 0,62 puntos, indicando que el algoritmo continúa encontrando soluciones de mejor calidad a medida que más itera. Además, el tiempo de ejecución aumenta de forma aproximadamente lineal. Un comportamiento similar se observa al aumentar el número de reinicios y el tamaño de población.

Por otro lado, los parámetros asociados a los operadores evolutivos presentan un impacto menor sobre el desempeño del algoritmo. La probabilidad de mutación (p_m) y la probabilidad de cruzamiento (p_c) producen variaciones reducidas en la aptitud, inferiores a 0,21 puntos. No obstante, se observa una ligera tendencia a obtener mejor aptitud con probabilidades relativamente altas, sin afectar significativamente el tiempo de ejecución.

Por otra parte, el tamaño del elitismo, $topK$ y el perfil de penalización de restricciones blandas muestran un impacto casi despreciable sobre la calidad de las soluciones, produciendo variaciones inferiores a 0,15 puntos, lo que indica que el algoritmo tiene un comportamiento estable frente a variaciones moderadas de estos parámetros.

A partir de los resultados, se seleccionó un conjunto de valores de parámetros del algoritmo. En esta selección se priorizó obtener soluciones de mejor calidad por sobre la reducción del tiempo de ejecución, ya que no corresponde a un problema con restricciones de tiempo real y se realiza de manera ocasional durante la planificación académica. En este contexto, un mayor tiempo de ejecución resulta aceptable si permite obtener recomendaciones de mejor calidad. Para los parámetros $E_{\text{máx}}$ y $topK$ se buscó mantener la misma proporción relativa al tamaño de la población $P_{\text{máx}}$ en la configuración de referencia; para las penalizaciones se escogió un perfil alto para reforzar el cumplimiento de las restricciones blandas. Además, se reduce el valor de $H_{\text{máx}}$ en la evaluación cualitativa con el objetivo de no abrumar al estudiante con muchas alternativas. La configuración se detalla en la Tabla 10 y será utilizada en el análisis comparativo de funciones de evaluación de referencia y la evaluación cualitativa.

4.1.5. Análisis de sensibilidad de pesos y metas

El análisis de sensibilidad de metas y pesos de los objetivos académicos tiene como propósito estudiar cómo estos influyen en el comportamiento de las soluciones obtenidas.

A diferencia de los otros objetivos académicos, cuyas metas se definieron como valores fijos independientes, la meta de tiempo de titulación t^* se definió como un desplazamiento relativo del valor de referencia de cada instancia, detallado en la Tabla 9. Los resultados obtenidos

Tabla 10: Configuración de referencia de los parámetros del algoritmo tras el análisis de sensibilidad. Fuente: Elaboración propia.

Parámetro	Configuración de referencia
Número de intentos ($T_{\text{máx}}$)	100.000
Tamaño de histórico ($H_{\text{máx}}$)	20 (Evaluación experimental) 10 (Evaluación cualitativa)
Número de reinicios ($R_{\text{máx}}$)	10
Número de generaciones ($G_{\text{máx}}$)	100
Tamaño de población ($P_{\text{máx}}$)	200
Tamaño de elitismo ($E_{\text{máx}}$)	20
Probabilidad de mutación (p_m)	0,5
Probabilidad de cruzamiento (p_c)	0,9
$topK$	10
Penalizaciones	Alto

en las ejecuciones experimentales se muestran en las Tablas 11 y 12.

Tabla 11: Valor promedio y tasa de insatisfacción por meta. Fuente: Elaboración propia.

Parámetro	Valor	Promedio	C	P	R	T
c^*	15	23,815	4,573 (+3,825)	0,662 (-0,078)	1,635 (+0,256)	0,029 (-0,004)
	22 (base)	24,910	0,748	0,740	1,379	0,033
	30	25,450	0,497 (-0,251)	0,844 (+0,104)	1,256 (-0,123)	0,034 (+0,001)
p^*	15	23,592	0,673 (-0,075)	4,389 (+3,649)	1,630 (+0,251)	0,031 (-0,002)
	22 (base)	24,615	0,748	0,740	1,379	0,033
	30	25,164	0,872 (+0,124)	0,532 (-0,208)	1,251 (-0,128)	0,034 (+0,001)
r^*	1,0	1,118	0,746 (-0,002)	0,739 (-0,001)	1,797 (+0,418)	0,03 (-0,003)
	1,5 (base)	1,138	0,748	0,740	1,379	0,033
	2,0	1,141	0,749 (+0,001)	0,737 (-0,003)	2,138 (+0,759)	0,033
t^*	t^* (base)	8,470	0,748	0,740	1,379	0,033
	$t^* - 2$	8,460	0,757 (+0,009)	0,747 (+0,007)	1,369 (-0,010)	0,047 (+0,014)
	$t^* - 3$	8,440	0,765 (+0,017)	0,755 (+0,015)	1,354 (-0,025)	0,135 (+0,102)

Los resultados muestran que las soluciones se ajustan de manera consistente a los cambios de valores de las metas. Al aumentar una meta, el valor promedio del objetivo académico correspondiente también tiende a aumentar, mientras que al disminuirla ocurre el comportamiento opuesto. Sin embargo, este cambio en el valor promedio no implica necesariamente una mejora de su tasa de insatisfacción, ya que la brecha entre el valor de la solución y la meta puede aumentar aún cuando las soluciones se desplacen en la dirección esperada.

De forma similar, modificar los pesos permite priorizar los distintos objetivos académicos durante la optimización. Al aumentar el peso, la tasa de insatisfacción del objetivo académico correspondiente disminuye, mientras que al disminuirla ocurre el comportamiento opuesto.

Tabla 12: Valor promedio y tasa de insatisfacción por peso. Fuente: Elaboración propia

Parámetro	Valor	Promedio	C	P	R	T
w_c^*	0,5	25,130	0,803 (+0,055)	0,785 (+0,045)	1,321 (−0,058)	0,033
	1,0 (base)	24,910	0,748	0,740	1,379	0,033
	2,0	24,639	0,693 (−0,055)	0,690 (−0,050)	1,463 (+0,084)	0,033
w_p^*	0,5	24,818	0,788 (+0,040)	0,782 (+0,042)	1,322 (−0,057)	0,033
	1,0 (base)	24,650	0,748	0,740	1,379	0,033
	2,0	24,366	0,706 (−0,042)	0,688 (−0,052)	1,463 (+0,084)	0,033
w_r^*	0,5	1,129	0,698 (−0,050)	0,689 (−0,051)	1,490 (+0,111)	0,033
	1,0 (base)	1,138	0,748	0,740	1,379	0,033
	2,0	1,153	0,860 (+0,112)	0,840 (+0,100)	1,250 (−0,129)	0,034 (+0,010)
w_t^*	0,5	8,470	0,747 (−0,001)	0,738 (−0,002)	1,382 (+0,003)	0,033
	1,0 (base)	8,470	0,748	0,740	1,379	0,033
	2,0	8,470	0,752 (+0,004)	0,741 (+0,001)	1,379	0,033

Además, al modificar un peso es esperable observar variaciones en las tasas de insatisfacción de los demás objetivos, reflejando el compromiso existente entre ellos.

No obstante, el objetivo académico de tiempo de titulación presenta una sensibilidad menor frente a las variaciones de su meta y peso, ya que la tasa de insatisfacción solo penaliza aquellas soluciones cuyo semestre efectivo de titulación supera la meta establecida. En consecuencia, mientras las soluciones impliquen titularse antes o en la meta, la tasa de insatisfacción permanece en cero. Únicamente al establecer una meta más exigente se observa un cambio en su valor promedio y en su tasa de insatisfacción.

En conjunto, los resultados muestran que el algoritmo responde de manera consistente a las metas y pesos.

4.1.6. Análisis comparativo de funciones de evaluación de referencia

Se realizaron ejecuciones adicionales del algoritmo con el objetivo de comparar la función de evaluación propuesta con dos funciones de evaluación de referencia: la propuesta en [Castro y Manzano, 2001] y la propuesta en [Aguilera et al., 2025]. Para ello, se ocuparon las instancias generadas con la configuración de referencia y cada instancia se ejecutó con la configuración de parámetros del algoritmo detallada en la Tabla 10 para las cinco semillas (4, 8, 48, 84, 88) y para cada una de las tres funciones de evaluación. En total, se realizaron 450 ejecuciones del algoritmo, generando 9.000 individuos adicionales.

Dado que las funciones de evaluación no son directamente comparables, se calculó el error cuadrático medio (ECM) de la carga formal de las soluciones y la tasa de insatisfacción de cada objetivo académico (C, P, R, T) bajo cada función de evaluación. Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 13.

Tabla 13: Tiempo de ejecución, aptitud y ECM promedio por función de evaluación.
Fuente: Elaboración propia.

Función de evaluación	Tiempo de ejecución promedio [s]	Aptitud promedio	ECM promedio	C	P	R	T
Presente trabajo	43,06	5,30	53,94	0,41	0,39	1,50	0,00
[Castro y Manzano, 2001]	42,10 (-0,96)	22,55	50,47 (-3,47)	0,47 (+0,06)	0,50 (+0,11)	2,25 (+0,75)	0,04 (+0,04)
[Aguilera et al., 2025]	40,99 (-2,07)	447,99	40,78 (-13,16)	0,51 (+0,10)	0,55 (+0,16)	2,15 (+0,65)	0,02 (+0,02)

Como era esperable, el costo computacional es prácticamente el mismo y, dado que únicamente el presente trabajo incorpora las metas y pesos del estudiante en su formulación, esta obtiene las menores tasas de insatisfacción para los cuatro objetivos académicos. Por otra parte, la función de evaluación del presente trabajo obtiene el mayor ECM; sin embargo, esta comparación favorece naturalmente a las funciones de [Castro y Manzano, 2001] y [Aguilera et al., 2025], ya que optimizan exclusivamente el balance de la carga formal, mientras que la función propuesta reparte su capacidad de optimización entre cuatro objetivos académicos simultáneos.

En el caso de la función de evaluación de [Castro y Manzano, 2001], que minimiza la carga formal del semestre con la mayor cantidad de créditos, se puede profundizar el análisis comparando las mejores soluciones obtenidas por el algoritmo propuesto, excluyendo penalizaciones, con los valores óptimos conocidos para las instancias *benchmark*, que es presentado en la Tabla 14. Para las instancias basadas en mallas curriculares reales de la UTFSM no se dispone de un óptimo conocido.

Tabla 14: Promedio, mediana y mejor valor de aptitud, excluyendo penalizaciones, junto con su óptimo conocido, para cada instancia base usando la función de evaluación de [Castro y Manzano, 2001]. Fuente: Elaboración propia.

Instancia base	Aptitud promedio	Aptitud mediana	Aptitud mejor	Valor óptimo
bacp8	17,70 (+0,70)	17,00	17,00	17 ([Castro y Manzano, 2001])
bacp10	16,68 (+2,68)	16,00 (+2,00)	15,00 (+1,00)	14 ([Rubio et al., 2013])
bacp12	19,64 (+1,64)	20,00 (+2,00)	18,00	18 ([Rubio et al., 2013])
utfsm2920	25,43	26,00	23,00	-
utfsm7310	27,74	28,00	25,00	-
utfsm7313	28,12	28,00	26,00	-

Al ser una metaheurística, el algoritmo no garantiza optimalidad y presenta resultados variables, lo cual es reflejado en el promedio y la mediana de la aptitud. No obstante, los resultados muestran que el algoritmo es capaz de alcanzar soluciones iguales o cercanas a los óptimos conocidos. En la instancia bacp8, la que tiene la menor cantidad de semestres, al menos la mitad de los resultados alcanzaron el valor óptimo y tiene una desviación promedio de 0,7 créditos respecto a este, siendo la instancia que más se acerca en promedio y en

mediana. La instancia bacp12 también logra alcanzar el óptimo, pero tiene una desviación en promedio y en mediana mayor que bacp8. La instancia bacp10 es la única de las instancias *benchmark* que no logra alcanzar el óptimo en ninguna ejecución, y además tiene una desviación promedio mayor que bacp12.

4.2. Evaluación cualitativa

Si bien la evaluación experimental permite evaluar el desempeño de la solución desde una perspectiva técnica, resulta relevante incorporar la percepción de los propios estudiantes para evaluar si la solución responde adecuadamente a sus necesidades.

Para la evaluación cualitativa se consideró como participantes a los estudiantes de Ingeniería Civil Informática (código 7313) del Campus Casa Central de la UTFSM, ya que cuenta con al menos cuatro generaciones de estudiantes que han cursado una mayor proporción del plan de estudios, permitiendo obtener una muestra más amplia y con más experiencia académica para validar la solución. En cambio, el plan de estudios de código 7310 cuenta con aproximadamente solo dos generaciones de estudiantes cursándola, por lo que una gran parte de las asignaturas de la malla curricular aún no ha sido impartida y tiene representación limitada, junto con un enlace que redirige al estudiante a una encuesta de evaluación.

4.2.1. Diseño

La evaluación cualitativa implicó el diseño de los siguientes insumos:

1. Aplicación web:

Ya que el algoritmo por su cuenta requiere configurar parámetros de la instancia mediante archivos de texto y su ejecución desde una terminal, se desarrolló una aplicación web con el objetivo de facilitar y reducir la fricción de uso para los estudiantes.

La aplicación web permite su acceso desde cualquier dispositivo con conexión a internet y tiene una distribución de una sola página, donde contiene tres secciones: en la primera sección, el estudiante ingresa los parámetros relacionados con su estado académico actual, lo cual incluye el semestre actual que está cursando, las asignaturas aprobadas, reprobadas y pendientes, el número de reprobaciones por asignatura pendiente y la carga percibida por asignatura pendiente; en la segunda parte, el estudiante ingresan las metas y pesos de cada objetivo académico; en la última parte, los estudiantes ejecutan el algoritmo y visualizarán los resultados. Solamente una vez ejecutado el algoritmo y retornado los resultados, la aplicación web muestra un enlace que redirige a una encuesta. Las Figuras 5, 6 y 7 muestran las secciones descritas.

Ya que el diseño de la aplicación web se orientó a facilitar y reducir la fricción en la interacción del usuario, se incorporaron ayudas contextuales (*tooltips*), descripciones

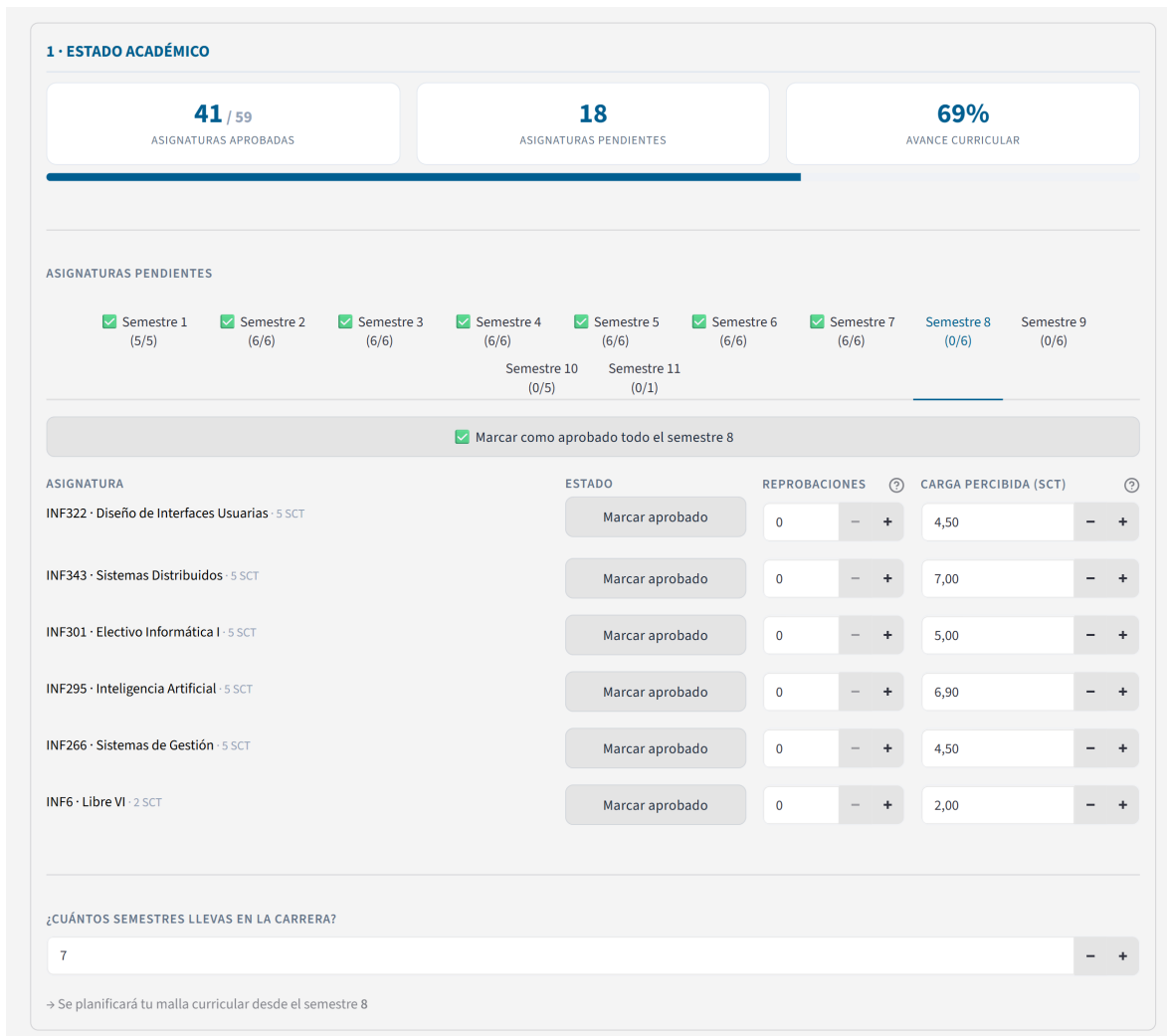


Figura 5: Estado académico en la aplicación web. Fuente: Captura de pantalla de la aplicación web [Wang, 2026a].

breves para especificar conceptos claves del dominio del problema y valores por defecto en distintos parámetros de la instancia, de modo de disminuir la carga cognitiva asociada a la configuración inicial.

La configuración de parámetros del algoritmo utilizada se detalla en la Tabla 10.

La aplicación web se implementó en el lenguaje de programación Python utilizando la librería Streamlit, y posteriormente se desplegó en Streamlit Community Cloud [Wang, 2026a]. Esta librería se seleccionó debido a su capacidad de construir aplicaciones web de forma rápida y sencilla, además de permitir su despliegue en la nube sin requerir una configuración compleja de infraestructura.

2. Instancia:

La aplicación web se basó en la instancia base utfsm7313, la cual representa la malla

2 · OBJETIVOS ACADÉMICOS

El planificador buscará **balancear** tus asignaturas de forma que todos los semestres se acerquen lo más posible a tus metas, evitando semestres muy por encima o muy por debajo de ellas.

Carga formal (SCT) **Carga percibida (SCT)** **Riesgo académico** **Semestre de titulación**

META POR SEMESTRE META POR SEMESTRE META POR SEMESTRE META

27,00 27,00 1,50 11

IMPORTANCIA RELATIVA IMPORTANCIA RELATIVA IMPORTANCIA RELATIVA IMPORTANCIA RELATIVA

0.50 0.50 0.50 0.50

GENERAR MALLAS CURRICULARES BALANCEADAS Y PERSONALIZADAS

Figura 6: Objetivos académicos y botón de generación de mallas curriculares en la aplicación web. Fuente: Captura de pantalla de la aplicación web [Wang, 2026a].

curricular de Ingeniería Civil Informática (código 7313) de la UTFSM. Esta instancia incluye las asignaturas, sus prerrequisitos y las restricciones académicas asociadas, las cuales fueron detalladas en la Tabla 4. A esta instancia base se le incorporó tres componentes adicionales derivados de información histórica del DI:

- **Tasa de reprobación histórica por asignatura:** se construyó con datos del año 2025 obtenidos del Sistema de Información y Gestión Académica (SIGA) de la UTFSM para asignaturas impartidas por el DI. Se calculó como la razón entre el número de estudiantes reprobados y el número total de estudiantes inscritos en cada asignatura durante el período.
- **Carga percibida por asignatura:** se obtuvo a partir de una encuesta aplicada a 45 estudiantes de Ingeniería Civil Informática (código 7313) del Campus Casa Central de la UTFSM durante el año 2025. En la encuesta, se solicitó a los participantes asignar una carga percibida en créditos SCT para asignaturas obligatorias del plan de estudios con 5 créditos SCT entre los semestres 3 a 10.
- **Disponibilidad por asignatura:** las asignaturas se consideraron disponibles en ambos semestres (pares e impares), salvo en aquellos casos en que se observó una disponibilidad consistente en un solo semestre. En esos casos, la disponibilidad se restringe a los semestres de la misma paridad que su semestre nominal en la malla curricular. Esto se construyó a partir de información obtenida del período entre el primer semestre de 2023 y el primer semestre de 2026 a través del SIGA de la UTFSM.

La instancia se personaliza mediante los parámetros ingresados por el estudiante en la aplicación web. En caso de no ingresar alguno de estos valores, el sistema utiliza valores de referencia que permiten mantener una instancia válida para la ejecución del algoritmo. Además, si bien se tienen valores de carga percibida obtenidas a través de la encuesta, se usan como valores de referencia y pueden ser modificados por el estudiante de acuerdo a sus propias percepciones.

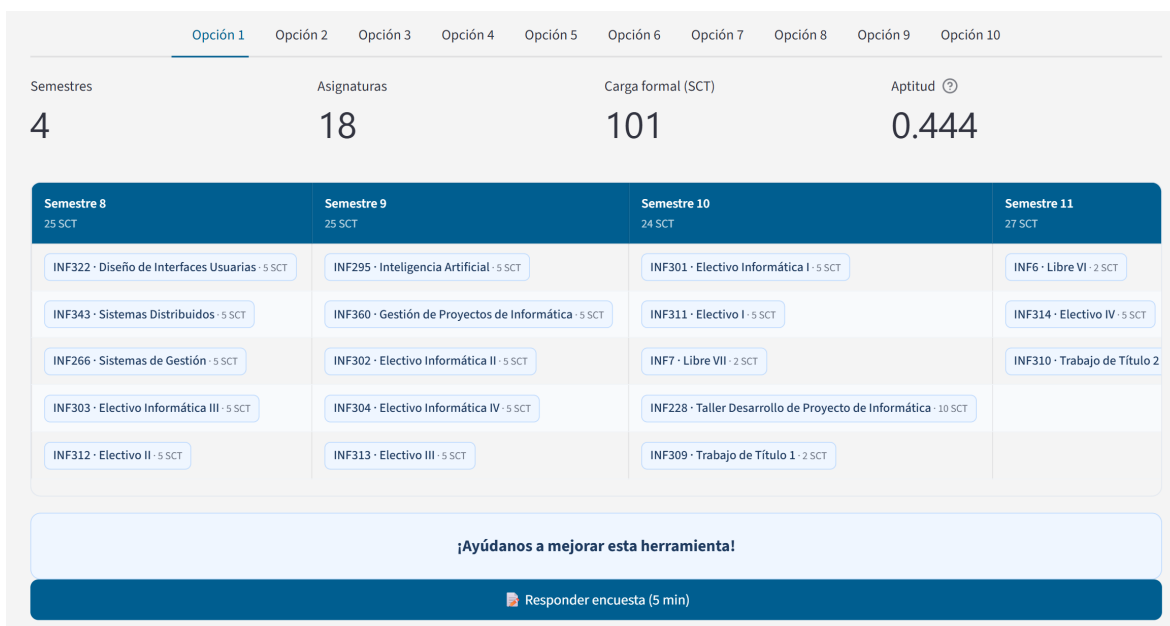


Figura 7: Resultados generados y botón de acceso a encuesta en la aplicación web. Fuente: Captura de pantalla de la aplicación web [Wang, 2026a].

Los valores de referencia de los parámetros de la instancia se detallan en la Tabla 19 del Anexo 3.

3. Encuesta:

Se diseñó una encuesta para evaluar la opinión de los estudiantes sobre los resultados del algoritmo, que incluyó preguntas de caracterización de los participantes, preguntas de escala Likert y una pregunta abierta.

Las preguntas de tipo Likert usan una escala de cinco niveles, donde 1 corresponde a 'Totalmente en desacuerdo' y 5 a 'Totalmente de acuerdo', y se organizan en dos dimensiones: calidad y utilidad. Las preguntas de calidad tienen como objetivo evaluar los resultados generados por el algoritmo desde la perspectiva de los estudiantes, considerando aspectos como la coherencia con metas y los pesos ingresados, el tiempo de respuesta, el respeto de restricciones y la consistencia general de las soluciones. Por otro lado, las preguntas de utilidad tienen como objetivo evaluar el aporte de la herramienta, que comprende tanto la aplicación web como los resultados generados por el algoritmo, dentro del proceso de planificación académica de los estudiantes, considerando aspectos como la utilidad percibida, la confianza en los resultados y la disposición a recomendar la herramienta.

Por último, la pregunta abierta busca recopilar comentarios y sugerencias de los estudiantes, con el fin de identificar oportunidades de mejora de la herramienta.

La Tabla 15 presenta el conjunto de preguntas de tipo Likert y la pregunta abierta utilizadas en la encuesta. Todas ellas son obligatorias.

Tabla 15: Preguntas de tipo Likert y pregunta abierta utilizadas en la encuesta de evaluación cualitativa. Fuente: Elaboración propia.

Sección	Tipo	Ítem	Pregunta
Calidad	Likert (1-5)	P4	Los resultados generados son coherentes con mi estado académico actual.
	Likert (1-5)	P5	Los resultados generados son coherentes con las metas que ingresé en el sistema.
	Likert (1-5)	P6	Los resultados generados son coherentes con las importancias relativas que asigné a cada meta.
	Likert (1-5)	P7	Los resultados se generan en un tiempo adecuado para su uso.
	Likert (1-5)	P8	Los resultados generados son coherentes con las reglas de la carrera.
Utilidad	Likert (1-5)	P9	Los resultados generados me aportan información útil para mi planificación académica.
	Likert (1-5)	P10	Tener distintas opciones de mallas curriculares me aporta información útil para mi planificación académica.
	Likert (1-5)	P11	Confiaría en los resultados generados.
	Likert (1-5)	P12	Utilizaría esta herramienta para planificar mis próximos semestres.
	Likert (1-5)	P13	Recomendaría esta herramienta a otros estudiantes.
Observaciones	Pregunta abierta	P14	¿Qué aspectos mejorarías, modificarías o agregarías en una versión futura?

La encuesta se implementó en Microsoft Forms para facilitar la recolección de respuestas de manera rápida, centralizada y segura, además de permitir su distribución controlada a estudiantes de la UTFSM.

4.2.2. Procedimiento

El procedimiento de evaluación consistió en lo siguiente:

1. **Difusión de la herramienta:** se difundió la herramienta a estudiantes de Ingeniería Civil Informática (código 7313) del Campus Casa Central de la UTFSM a través de canales institucionales y espacios de comunicación de estudiantes de la carrera.
2. **Interacción de los participantes:** los participantes acceden e interactúan con la aplicación web, ejecutando el algoritmo y analizando sus resultados. Luego, tienen la opción de resolver la encuesta.

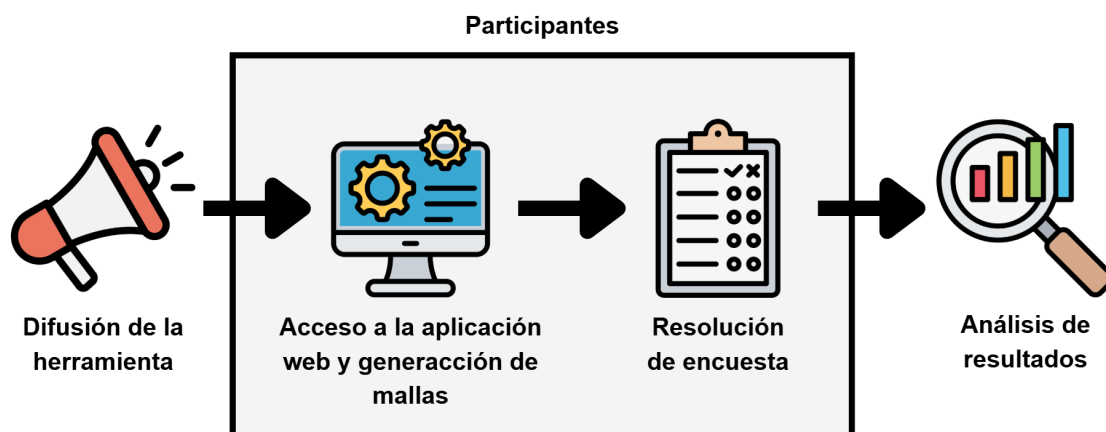


Figura 8: Procedimiento de evaluación cualitativa con estudiantes. Fuente: Elaboración propia.

3. **Análisis de resultados:** se recopilan las respuestas en Microsoft Forms y se procesan en Power BI. Las preguntas de tipo Likert se transformaron a valores numéricos entre 1 y 5, donde 1 corresponde a 'Totalmente en desacuerdo' y 5 a 'Totalmente de acuerdo'. En cuanto a la pregunta abierta, las respuestas se revisaron y clasificaron manualmente en categorías y subcategorías con el objetivo de identificar temas recurrentes.

4.2.3. Resultados

La encuesta fue respondida por 45 estudiantes, entre los días 30 de junio y 6 de julio de 2026. Las Tablas 16 y 17 muestran el detalle de los resultados.

Tabla 16: Promedio, mediana y desviación estándar por dimensión de las preguntas de tipo Likert en la encuesta de evaluación cualitativa. Fuente: Elaboración propia.

Dimensión	Promedio	Mediana	Desviación estándar
General	4,53	4,60	0,61
Calidad	4,56	4,60	0,61
Utilidad	4,49	4,60	0,67

Los resultados de las preguntas de tipo Likert muestran una percepción general positiva de la herramienta por parte de los estudiantes, con un promedio global de 4,53 puntos sobre 5 y una mediana de 4,6 puntos. La distribución de respuestas se concentra en los valores superiores de la escala Likert.

Al desagregar por dimensiones, la evaluación de calidad presenta un promedio ligeramente superior al de utilidad. Esta diferencia, aunque leve, sugiere que los estudiantes opinan que

Tabla 17: Promedio, mediana y desviación estándar por pregunta de tipo Likert en la encuesta de evaluación cualitativa. Fuente: Elaboración propia.

Dimensión	Ítem	Pregunta	Promedio	Mediana	Desviación estándar
Calidad	P4	Los resultados generados son coherentes con mi estado académico actual.	4,60	5	0,74
	P5	Los resultados generados son coherentes con las metas que ingresé en el sistema.	4,62	5	0,68
	P6	Los resultados generados son coherentes con las importancias relativas que asigné a cada meta.	4,60	5	0,74
	P7	Los resultados se generan en un tiempo adecuado para su uso.	4,60	5	0,88
	P8	Los resultados generados son coherentes con las reglas de la carrera.	4,40	5	0,85
Utilidad	P9	Los resultados generados me aportan información útil para mi planificación académica.	4,56	5	0,83
	P10	Tener distintas opciones de mallas curriculares me aporta información útil para mi planificación académica.	4,62	5	0,74
	P11	Confiaría en los resultados generados.	4,40	5	0,74
	P12	Utilizaría esta herramienta para planificar mis próximos semestres.	4,27	5	0,94
	P13	Recomendaría esta herramienta a otros estudiantes.	4,62	5	0,74

los resultados generados por el algoritmo son ligeramente más consistentes en términos de coherencia con su situación académica, metas y restricciones, en comparación con el impacto directo de la herramienta en el proceso de planificación académica.

Al analizar las preguntas de forma individual, se observa que todas tienen promedios por sobre los 4,2 puntos, sin variaciones significativas entre preguntas. La pregunta P12 (Utilizaría esta herramienta para planificar mis próximos semestres) obtuvo el promedio más bajo de la encuesta (4,27), pero de todas formas se mantiene dentro de un rango positivo.

Por otro lado, los resultados de la pregunta abierta se clasificaron manualmente en las siguientes tres categorías:

- **General:** comentarios de carácter global sobre la herramienta.

- **Algoritmo:** comentarios relacionados con el modelo, desempeño o resultados del algoritmo.
- **Aplicación web:** comentarios asociados a la experiencia de uso de la herramienta.

Y luego cada categoría se desagregó en una o más subcategorías. Los resultados de la clasificación se presentan en la Figura 9. Cabe destacar que una respuesta puede contribuir a más de una categoría y subcategoría cuando contiene observaciones sobre distintos temas y, para facilitar la interpretación de los resultados, se calculó el porcentaje asociado a cada subcategoría respecto al total de respuestas obtenidas, y no respecto al número total de menciones.

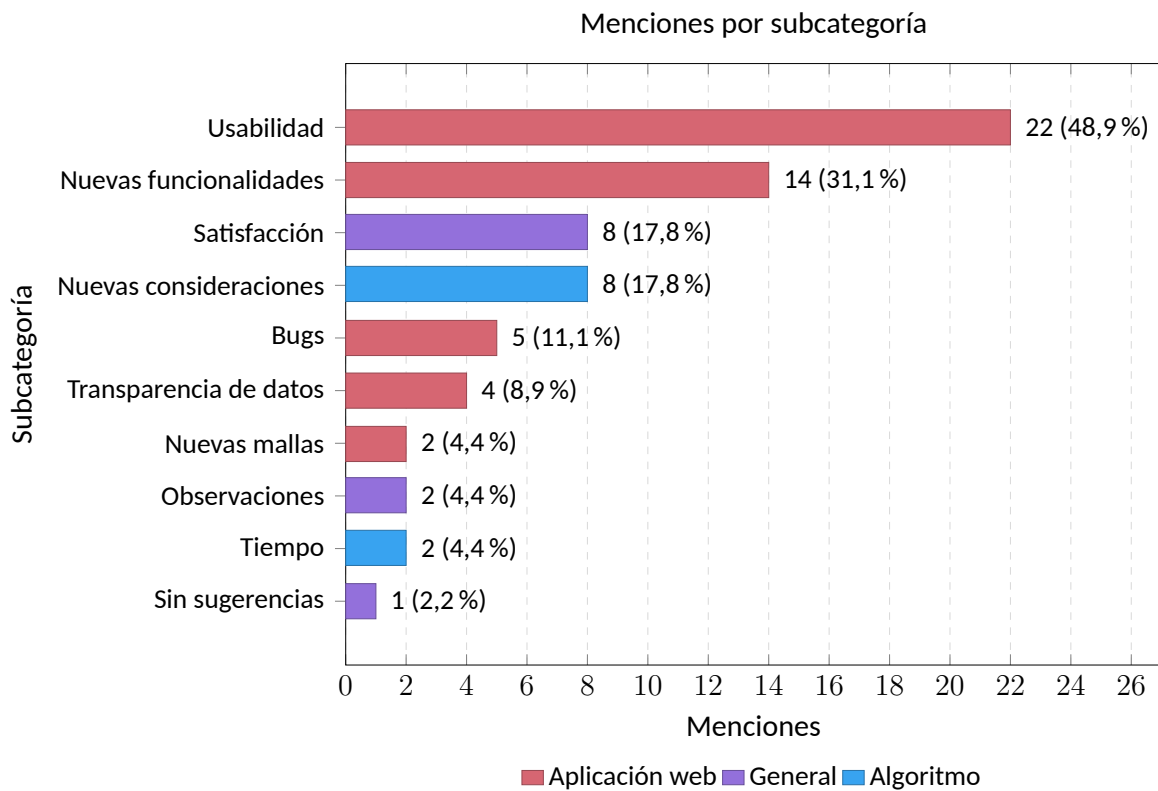


Figura 9: Menciones por subcategoría. Fuente: Elaboración propia.

En cuanto al algoritmo, se obtuvieron 8 (17,8 %) respuestas proponiendo nuevas consideraciones del modelo del problema:

- 2 (4,4 %) respuestas proponen considerar el desempeño del estudiante según áreas temáticas de la malla curricular.
- 2 (4,4 %) respuestas proponen personalizar asignaturas Libres y Electivas (INF311 - Electivo I a INF314 - Electivo IV y INF301 - Electivo Informática I a INF304 - Electivo

Informática IV) según la asignatura específica que el estudiante efectivamente cursa, en lugar de utilizar un valor genérico por defecto en todo el bloque.

- 2 (4,4 %) respuestas proponen incluir horarios semestrales en el modelo del problema, lo cual es típicamente conocido como un problema de programación de horarios o *Timetabling Problem*. El trabajo de [Ota et al., 2024] aborda esta problema.
- 1 (2,2 %) respuesta propone priorizar asignaturas de Matemáticas (MAT021 - Matemáticas I a MAT024 - Matemáticas IV) y Físicas (FIS110 - Física General I a FIS140 - Física General IV) durante los primeros años de carrera.
- 1 (2,2 %) respuesta propone considerar el resultado del examen de inglés rendido en primer año dentro del modelo del problema. Esta sugerencia se relaciona con un aspecto específico de la malla curricular de Ingeniería Civil Informática (código 7313) de la UTFSM: el examen de inglés determina si el estudiante debe cursar asignaturas de inglés según su dominio del idioma, las cuales son convalidadas como una o más asignaturas Libres (INF1 - Libre I a INF7 - Libre VII) de acuerdo a reglas de la carrera. Cabe destacar que las asignaturas de inglés tienen una carga formal superior (3 créditos SCT) a las asignaturas Libres (2 créditos SCT), lo cual influye en el balance del modelo.

Además, 2 respuestas (4,4 %) sugirieron disminuir el tiempo de ejecución del algoritmo. Al ejecutar cinco veces el algoritmo a través de la interfaz web considerando los valores por defecto (es decir, todas las asignaturas pendientes) se obtuvo un tiempo de ejecución promedio de 40,87 segundos. Si bien el tiempo de ejecución es una métrica del algoritmo, el tiempo observado está condicionado tanto por el diseño del algoritmo como por la configuración de parámetros utilizada al ejecutarlo en la aplicación web. Como se mencionó en la Sección 4.1.4, la configuración de parámetros utilizada prioriza obtener soluciones de mejor calidad por sobre la reducción del tiempo de ejecución de acuerdo a la naturaleza del problema. Las respuestas sugieren que la definición de una configuración de parámetros adecuada no responde únicamente a decisiones técnicas, sino también a decisiones relacionadas con la experiencia de uso del estudiante.

En esta línea, la mayoría de las respuestas mencionan aspectos de la experiencia de uso de la aplicación web, lo que sugiere que una fuente de fricción se encuentra en la forma en que las soluciones del algoritmo son presentadas e interpretadas por los usuarios:

- 22 (48,9 %) respuestas incluyeron observaciones sobre usabilidad, entendida como la facilidad de uso, claridad de la información presentada y fluidez de la interacción con el sistema. En particular, algunas observaciones sobre usabilidad fueron causadas por falta de información específica del modelo en la aplicación web (por ejemplo, cuáles restricciones son consideradas duras y cuáles blandas).
- 14 (31,1 %) respuestas sugieren nuevas funcionalidades a nivel de interfaz.
- 5 (11,1 %) respuestas hicieron observaciones sobre *bugs* de la aplicación web.

- 4 (8,9 %) respuestas consultan sobre el origen de los datos utilizados (en particular, la tasa histórica de reprobación y la carga percibida).
- 2 (4,4 %) respuestas proponen extender la herramienta a otras mallas curriculares de la UTFSM.

Asimismo, dentro de estas respuestas se registraron 6 (13,3 %) menciones a la malla interactiva como punto de comparación a nivel de interfaz (Ver Anexo 1).

Por otro lado, 2 (4,4 %) respuestas señalan que, a medida que disminuye el número de asignaturas pendientes, las alternativas de planificación curricular tienen menos variaciones. Esto es consistente con el propio diseño del algoritmo: al reducirse el número de asignaturas, el espacio de búsqueda se reduce drásticamente, por lo que las soluciones tienden a ser más similares entre sí. Además, las asignaturas Electivas representadas como bloques genéricos tienden a percibirse como la misma asignatura, lo que reduce la percepción de diversidad en las distintas alternativas de planificación curricular.

En 2 (4,4 %) respuestas se observa que los resultados permitieron a los estudiantes identificar aspectos de la malla curricular que no conocían previamente, tal como la posibilidad de cursar asignaturas en conjunto con INF310 - Trabajo de Título II. La inscripción de esta asignatura es un caso particular, ya que está definida por el jefe de carrera en función del avance curricular del estudiante.

En general, los resultados evidencian una evaluación positiva de la herramienta por parte de los estudiantes, tanto en las preguntas de tipo Likert como en las respuestas de la pregunta abierta. En particular, además de las valoraciones cuantitativas favorables, se identificaron 8 (17,8 %) respuestas que expresan explícitamente satisfacción con la herramienta, junto con observaciones adicionales recibidas a través de otros medios de retroalimentación no estructurados en la encuesta durante el proceso de difusión.

CAPÍTULO 5

CONCLUSIONES

5.1. Conclusiones generales

El presente trabajo extendió el modelo original de BACP propuesto por [Castro y Manzano, 2001], que busca exclusivamente balancear la carga formal, hacia un modelo que balancea cuatro objetivos académicos (carga formal, carga percibida, riesgo académico y tiempo de titulación) mediante un enfoque de programación por metas ponderadas, a partir del estado académico actual del estudiante y la oferta de asignaturas. Este enfoque permitió personalizar el problema a estudiantes de Ingeniería Civil Informática de la UTFSM, incorporando información individual del estudiante y de la carrera y capturando la heterogeneidad de los objetivos y condiciones de la experiencia académica.

Para resolver el problema, se implementó un algoritmo evolutivo, que mantiene un histórico de las mejores soluciones encontradas a lo largo de toda la ejecución, permitiendo ofrecer al estudiante múltiples alternativas de planificación curricular.

Los resultados experimentales demostraron que se obtienen soluciones factibles en todas las ejecuciones y se responde de manera consistente a los parámetros del algoritmo y a las preferencias ingresadas por los estudiantes mediante los parámetros de metas y pesos: a mayor meta, aumenta el valor promedio del objetivo académico; y, a mayor peso, disminuye la tasa de insatisfacción del objetivo académico correspondiente. Asimismo, se observa un compromiso natural entre los objetivos académicos, consistente con la naturaleza de un problema multiobjetivo. Por otra parte, la comparación con funciones de evaluación de referencia demostró que el algoritmo distribuye su capacidad de optimización entre cuatro objetivos académicos y se aproxima a los óptimos conocidos en instancias *benchmark* del BACP de forma acorde a la naturaleza de un algoritmo metaheurístico.

No obstante, más allá de los resultados experimentales, la evaluación cualitativa con estudiantes de Ingeniería Civil Informática de la UTFSM implicó abordar una dimensión poco explorada en el proceso de validación de soluciones del BACP: la percepción del usuario final. Para realizar esto, se implementó una aplicación web a través de la cual los estudiantes pueden interactuar de forma dinámica con el algoritmo y una encuesta para recopilar sus opiniones y sugerencias de mejora.

Los resultados de la encuesta mostraron una percepción general positiva de la herramienta por parte de los estudiantes. En particular, los estudiantes percibieron los resultados del algoritmo como coherentes con su estado académico, sus objetivos y las reglas de la carrera, y valoraron tener múltiples alternativas de planificación curricular. Por otra parte, los resultados también relevaron que gran parte de las oportunidades de mejora no se encuentran en el algoritmo, sino en la experiencia de uso de la aplicación web. Esto indica que en un

problema centrado en el estudiante, la calidad de las soluciones depende también de cómo es presentado e interpretado el algoritmo.

En conjunto, los resultados sugieren un alto potencial de la herramienta como apoyo a la planificación curricular estudiantil frente a las herramientas actualmente disponibles para los estudiantes de Ingeniería Civil Informática de la UTFSM.

5.2. Cumplimiento de objetivos

El resultado final de este trabajo puede evaluarse a partir del cumplimiento de los objetivos específicos definidos en la sección 1.4. Estos objetivos son:

1. **Modelar el problema de generación de mallas curriculares personalizadas, incorporando como parámetros la tasa histórica de reprobación de asignaturas, el desempeño académico individual y la percepción estudiantil de la carga académica:**

Se cumplió mediante la formulación del modelo matemático en la Sección 3.2, que incluye explícitamente como parámetros la carga percibida ρ_i y el riesgo académico ϕ_i en función de la tasa histórica de reprobación ζ_i y las reprobaciones previas del estudiante θ_i , diferenciándose así del BACP clásico.

2. **Diseñar y desarrollar una estrategia de resolución enfocada en técnicas de búsqueda incompleta capaz de resolver el problema generando múltiples alternativas de planificación curricular personalizadas:**

Se cumplió mediante el algoritmo evolutivo propuesto en la Sección 3.3, cuyo mecanismo de histórico descrito en la Sección 3.3.11 fue diseñado específicamente para preservar un conjunto diverso de las mejores soluciones encontradas a lo largo de la ejecución, en lugar de converger a una única solución. La factibilidad de las soluciones fue confirmada experimentalmente en la Sección 4.1.3.

3. **Validar el algoritmo mediante encuestas aplicadas a estudiantes de la carrera de Ingeniería Civil Informática de la UTFSM:**

Se cumplió a través de la evaluación cualitativa descrita en la Sección 4.2, que incluyó el desarrollo de una aplicación web para facilitar la interacción de los estudiantes con el algoritmo, la aplicación de una encuesta estructurada a 45 estudiantes de la carrera de Ingeniería Civil Informática de la UTFSM y el análisis de sus resultados.

En conjunto, el cumplimiento de los objetivos específicos permite declarar el cumplimiento del objetivo general, el cual es: **desarrollar un modelo y una solución computacional enfocada en técnicas de búsqueda incompleta para la generación de mallas curriculares personalizadas para los estudiantes de la carrera de Ingeniería Civil Informática de la UTFSM, considerando índices históricos de las asignaturas, desempeño académico individual y la percepción de carga académica de los estudiantes.**

5.3. Trabajo futuro

1. Extensiones del modelo:

Si bien se buscó personalizar el BACP incorporando información individual del estudiante y de la carrera en el modelo, es complejo abarcar la totalidad de factores que componen la experiencia académica de los estudiantes debido a su naturaleza heterogénea y multidimensional. El modelo puede seguir enriqueciéndose incorporando nuevas consideraciones.

Las propuestas destacables de los resultados de la evaluación cualitativa son:

- Personalizar la selección de asignaturas Libres y Electivas. Esta mejora permitiría generar mayor diversidad en las soluciones, especialmente cuando quedan menos asignaturas por cursar.
- Incorporar el desempeño académico del estudiante según las distintas áreas temáticas de la malla curricular.
- Extender el modelo hacia un problema de programación de horarios.

Asimismo, una limitación importante del presente trabajo es el tamaño y alcance de la muestra utilizada en la evaluación cualitativa. Dado que el modelo matemático y el algoritmo propuestos fueron diseñados pensando principalmente en Ingeniería Civil Informática (código 7313) de la UTFSM, se podría extender a otras mallas curriculares de la UTFSM u otras universidades, generalizando y escalando la propuesta. Especialmente, sería ideal extender la aplicación web a otras mallas curriculares porque se podría realizar una evaluación cualitativa con un conjunto de participantes mucho más amplio y diverso, quienes no necesariamente tienen conocimientos sobre problemas de optimización combinatoria.

2. Comparación con otras técnicas de resolución:

Aunque en el presente trabajo se diseñó e implementó un algoritmo evolutivo, sería ideal implementar una o más técnicas de resolución sobre el mismo modelo matemático para comparar los resultados en términos de calidad, tiempo de ejecución y diversidad de las soluciones. Esto permitiría determinar si el algoritmo evolutivo es efectivamente la alternativa más adecuada para este problema particular o si otras técnicas pueden ofrecer mejores resultados bajo ciertas condiciones, como el tamaño de las instancias (muchas o pocas asignaturas pendientes).

De esta forma, una comparación sistemática de distintas técnicas de resolución permitiría evaluar estrategias adaptativas que seleccionen automáticamente la técnica de resolución más apropiada según la instancia del problema.

3. Experiencia de usuario:

La evaluación cualitativa mostró que la mayor parte de la retroalimentación de los estudiantes se relaciona con la experiencia de uso de la aplicación web, más que con

el algoritmo en sí. Esto sugiere que mejorar la interfaz concentra el mayor margen de mejora a corto plazo.

En primer lugar, se debe mejorar la usabilidad de la aplicación web, idealmente tomando como referencia herramientas ampliamente conocidas por los estudiantes como la malla interactiva, así como incorporar las nuevas funcionalidades sugeridas durante la retroalimentación.

Asimismo, se debe estudiar la elección de una configuración de parámetros del algoritmo que ofrezca un tiempo de ejecución adecuado desde la perspectiva del usuario, minimizando la fricción asociada a la espera sin comprometer significativamente la calidad de las soluciones entregadas. De forma alternativa, podría ofrecerse la posibilidad de que el propio estudiante ajuste estos parámetros según sus preferencias, es decir, privilegiando rapidez o calidad de las soluciones.

Sin embargo, esta mejora va más allá del diseño de la interfaz de la aplicación web. El modelo del problema tiene diversas definiciones (objetivos académicos, metas y pesos) y consideraciones, y requiere que el estudiante ingrese una cantidad considerable de parámetros (asignaturas aprobadas, pendientes y reprobadas, carga percibida por asignatura, y metas y pesos por objetivo académico), lo que es inconsistente con una herramienta de uso simple y de baja fricción. Se debe analizar qué información es estrictamente necesaria solicitar al usuario, cuál puede inferirse o precargarse automáticamente y cómo comunicar de forma progresiva la complejidad del modelo sin saturar al estudiante.

Además, surge la interrogante sobre la transparencia de los datos utilizados en el modelo, en particular la tasa histórica de reprobación y la carga percibida por asignatura. Se debe analizar si estos valores deben ser expuestos explícitamente a los usuarios, considerando el compromiso entre transparencia del proceso de planificación curricular de los estudiantes y los eventuales efectos que la exposición de estos datos podría tener sobre la percepción de los estudiantes respecto a las asignaturas.

Por último, sería ideal complementar el presente trabajo con estudios específicos de experiencia de usuario, con el propósito de aislar el efecto de los distintos factores que influyen en la percepción del usuario sobre los resultados observados en la encuesta y orientar efectivamente futuras mejoras en herramientas de planificación curricular.

ANEXOS

Anexo 1: Malla interactiva



Figura 10: Malla interactiva de Ingeniería Civil Informática (código 7313) de la UTFSM.

Fuente: Captura de pantalla del sitio web de la malla interactiva [LABCOMP, 2026].

Anexo 2: Instancias base

Listing 1: Instancia base utfsm2920. Fuente: Elaboración propia.

```

1 p = 12;
2 a = 17;
3 b = 35;
4 c = 1;
    
```

```
5 d = 8;
6
7 courses = {
8     mat100b, ein412b, ein413b, efi100t, hrw101b, hcw100t,
9     mat001b, qma001b, ein423b, efi101t, hrw102b, hcw101t,
10    mat021b, fis009b, ein080b, ein079b, ein009b, hcw102t,
11    hmn295t, fis007b, ein081b, ein083b, ein082b, mat006b,
12    hmn292t, ein088b, ein084b, ein085b, ein086b, ein087b,
13    hmn293t, ein089b, ein093b, ein090b, ein091b, ein092b,
14    ein095b, ein096b, ein097b, ein098b, ein099b,
15    ein100b, ein101b, ein102b, ein103b, ein104b
16 };
17
18 credit = [
19     6, 5, 5, 2, 3, 2,
20     6, 5, 6, 2, 3, 2,
21     6, 5, 6, 6, 6, 2,
22     5, 5, 5, 5, 5, 4,
23     3, 3, 4, 6, 5, 6,
24     3, 3, 6, 6, 6, 6,
25     6, 6, 6, 6, 3,
26     6, 6, 6, 5, 6
27 ];
28
29 prereq = {
30     <mat001b, mat100b>,
31     <ein423b, ein413b>,
32     <efi101t, efi100t>,
33     <hrw102b, hrw101b>,
34     <hcw101t, hcw100t>,
35     <mat021b, mat001b>,
36     <ein080b, ein423b>,
37     <ein009b, ein423b>,
38     <hcw102t, hcw101t>,
39     <hmn295t, mat100b>,
40     <fis007b, mat100b>,
41     <fis007b, fis009b>,
42     <ein081b, ein080b>,
43     <ein083b, ein079b>,
44     <ein082b, ein080b>,
45     <ein082b, ein009b>,
46     <mat006b, mat021b>,
47     <hmn292t, hmn295t>,
48     <ein086b, ein082b>,
49     <ein087b, mat006b>,
50     <ein089b, hmn292t>,
51     <ein089b, ein088b>,
```

```
52     <ein090b, ein085b>,
53     <ein091b, ein009b>,
54     <ein091b, ein086b>,
55     <ein092b, ein087b>,
56     <ein098b, ein088b>,
57     <ein098b, ein093b>,
58     <ein103b, ein098b>
59 };
```

Listing 2: Instancia base utfsm7310. Fuente: Elaboración propia.

```
1  p = 15;
2  a = 17;
3  b = 35;
4  c = 1;
5  d = 8;
6
7  courses = {
8      inf129, mat070, mat060, fis100, hwx006, efi200,
9      iwq400, mat071, mat061, fis110, hwx007, efi201,
10     inf131, inf132, mat081, fis112, hwx008, aux200,
11     inf133, inf135, mat053, fis114, hwx009, aux201,
12     inf138, inf140, inf141, inf143, inf229, inf142,
13     inf146, inf145, inf147, inf144, inf148, hwx012,
14     inf156, inf154, inf157, inf153, inf158, aux202,
15     inf165, inf164, aux219, inf166, inf167, inf163,
16     inf302, inf169, inf170, inf171, inf168,
17     inf539, inf540, inf541, inf538
18 };
19
20 credit = [
21     7, 6, 6, 6, 3, 2,
22     7, 6, 6, 6, 3, 2,
23     6, 5, 6, 6, 3, 4,
24     6, 6, 5, 6, 3, 4,
25     5, 5, 5, 5, 5, 5,
26     5, 5, 6, 6, 5, 3,
27     5, 6, 6, 5, 5, 3,
28     5, 5, 5, 5, 5, 5,
29     5, 6, 6, 6, 7,
30     4, 6, 6, 14
31 ];
32
33 prereq = {
34     <mat071, mat070>,
35     <mat061, mat060>,
36     <fis110, fis100>,
```

```
37      <hwx007, hwx006>,
38      <efi201, efi200>,
39      <inf131, inf129>,
40      <inf132, mat070>,
41      <mat081, mat071>,
42      <mat081, mat061>,
43      <fis112, fis110>,
44      <hwx008, hwx007>,
45      <inf133, inf131>,
46      <inf135, inf129>,
47      <fis114, fis112>,
48      <hwx009, hwx008>,
49      <aux201, aux200>,
50      <inf138, inf133>,
51      <inf140, inf133>,
52      <inf141, inf133>,
53      <inf143, inf132>,
54      <inf229, inf133>,
55      <inf142, iwq400>,
56      <inf146, inf138>,
57      <inf145, inf140>,
58      <inf147, inf133>,
59      <inf144, inf133>,
60      <inf148, inf135>,
61      <hwx012, hwx009>,
62      <inf156, inf146>,
63      <inf154, inf140>,
64      <inf157, inf147>,
65      <inf153, mat053>,
66      <inf158, inf135>,
67      <aux202, aux201>,
68      <inf165, inf146>,
69      <inf164, inf145>,
70      <inf166, inf157>,
71      <inf167, inf142>,
72      <inf163, inf144>,
73      <inf302, aux219>,
74      <inf168, aux202>,
75      <inf539, inf168>,
76      <inf538, inf164>
77  };
```

Listing 3: Instancia base utfsm7313. Fuente: Elaboración propia.

```
1  p = 16;
2  a = 17;
3  b = 35;
```

```
4 c = 1;
5 d = 8;
6
7 courses = {
8     iwi131, mat021, fis100, hrw132, dew100,
9     qui010, mat022, fis110, iwg101, hrw133, dew101,
10    inf134, mat023, fis130, inf152, inf260, inf1,
11    inf253, mat024, fis120, inf155, iwn170, inf2,
12    inf239, inf245, fis140, inf280, inf270, inf3,
13    inf236, inf246, inf276, inf221, inf292, inf4,
14    inf225, inf256, icn270, inf285, inf293, inf5,
15    inf322, inf343, inf301, inf295, inf266, inf6,
16    inf302, inf303, inf311, inf312, inf360, inf7,
17    inf304, inf313, inf314, inf228, inf309,
18    inf310
19 };
20
21 credit = [
22     5, 8, 3, 3, 2,
23     5, 7, 8, 3, 3, 2,
24     5, 7, 8, 5, 3, 2,
25     5, 6, 8, 5, 5, 2,
26     5, 5, 8, 5, 5, 2,
27     5, 5, 5, 5, 5, 2,
28     5, 5, 5, 5, 5, 2,
29     5, 5, 5, 5, 5, 2,
30     5, 5, 5, 5, 5, 2,
31     5, 5, 5, 10, 2,
32     20
33 ];
34
35 prereq = {
36     <mat022, mat021>,
37     <fis110, mat021>,
38     <fis110, fis100>,
39     <dew101, dew100>,
40     <inf134, iwi131>,
41     <mat023, mat022>,
42     <fis130, mat022>,
43     <fis130, fis110>,
44     <inf152, iwi131>,
45     <inf152, mat021>,
46     <inf260, iwg101>,
47     <inf253, inf134>,
48     <mat024, mat023>,
49     <fis120, mat022>,
50     <fis120, fis110>,
```

```
51      <inf155, inf134>,  
52      <inf155, inf152>,  
53      <iwn170, mat023>,  
54      <inf239, inf134>,  
55      <inf245, inf134>,  
56      <fis140, fis130>,  
57      <fis140, fis120>,  
58      <inf280, iwi131>,  
59      <inf280, mat023>,  
60      <inf270, inf260>,  
61      <inf236, inf239>,  
62      <inf236, inf253>,  
63      <inf246, inf245>,  
64      <inf276, inf270>,  
65      <inf221, inf152>,  
66      <inf221, inf253>,  
67      <inf292, iwi131>,  
68      <inf292, mat023>,  
69      <inf225, inf236>,  
70      <inf256, inf246>,  
71      <icn270, iwn170>,  
72      <inf285, mat024>,  
73      <inf285, inf221>,  
74      <inf293, inf280>,  
75      <inf293, inf292>,  
76      <inf322, inf225>,  
77      <inf343, inf256>,  
78      <inf295, inf134>,  
79      <inf295, inf292>,  
80      <inf266, inf276>,  
81      <inf360, inf322>,  
82      <inf360, inf266>,  
83      <inf228, inf360>,  
84      <inf309, inf360>,  
85      <inf310, inf228>,  
86      <inf310, inf309>  
87  };
```

Anexo 3: Datos de la instancia ejecutada por la aplicación web

Tabla 18: Datos de asignaturas utilizados en la instancia ejecutada por la aplicación web.
Fuente: Elaboración propia.

Asignatura	Carga percibida (SCT)	Tasa histórica de reprobación (%)	Oferta académica (semestres)
ICN270 - Información y Matemática Financiera	5,6	-	Par / Impar
INF134 - Estructuras de Datos	5,6	26,1	Par / Impar
INF152 - Estructuras Discretas	5,3	21,4	Par / Impar
INF155 - Informática Teórica	6,1	17,2	Par / Impar
INF221 - Algoritmos y Complejidad	7,7	22,3	Par / Impar
INF225 - Ingeniería de Software	5,5	2,0	Par / Impar
INF228 - Taller de Desarrollo de Proyectos de Informática	—	0	Par
INF236 - Análisis y Diseño de Software	5,6	8,0	Par / Impar
INF239 - Bases de Datos	5,3	7,7	Par / Impar
INF245 - Arquitectura y Organización de Computadores	5,8	17,3	Par / Impar
INF246 - Sistemas Operativos	4,5	1,1	Par / Impar
INF253 - Lenguajes de Programación	6,9	37,8	Par / Impar
INF256 - Redes de Computadores	5,1	1,5	Par / Impar
INF260 - Teoría de Sistemas	2,8	8,4	Par / Impar
INF266 - Sistemas de Gestión	4,5	0	Par / Impar
INF270 - Organización y Sistemas de Información	3,3	1,8	Par / Impar
INF276 - Ingeniería, Informática y Sociedad	2,8	1,2	Par / Impar
INF280 - Estadística Computacional	6,7	31,1	Par / Impar
INF285 - Computación Científica	9,0	40,5	Par / Impar
INF292 - Optimización	5,3	8,2	Par / Impar
INF293 - Investigación de Operaciones	5,1	5,2	Par / Impar
INF295 - Inteligencia Artificial	6,9	12,8	Par / Impar
INF309 - Trabajo de Título I	—	3,1	Par / Impar
INF310 - Trabajo de Título II	—	-	Par / Impar
INF322 - Diseño Interfaces Usuarías	4,5	1,3	Par
INF343 - Sistemas Distribuidos	7,0	31,6	Par / Impar
INF360 - Gestión de Proyectos de Informática	—	0	Impar
IWG101 - Introducción a la Ingeniería	—	-	Par
IWI131 - Programación	—	47,2	Par / Impar
IWN170 - Economía I-A	4,2	-	Par / Impar

Tabla 19: Valores de referencia de los parámetros del algoritmo y de los parámetros de la instancia ejecutada por la aplicación web. Fuente: Elaboración propia.

Parámetro	Valor por defecto
Carga académica percibida por asignatura (ρ_i)	Resultado de la encuesta a estudiantes; si no existe, carga académica formal (c_i)
Tasa histórica de reprobación por asignatura (ζ_i)	0,25
Número de reprobaciones de asignatura pendiente (θ_i)	0
Carga académica formal por semestre (c^*)	27 SCT
Carga académica percibida por semestre (p^*)	27 SCT
Riesgo académico por semestre (r^*)	1,5
Tiempo de titulación (t^*)	11 semestres
Carga académica formal por semestre (w_c^*)	0,5
Carga académica percibida por semestre (w_p^*)	0,5
Riesgo académico por semestre (w_r^*)	0,5
Tiempo de titulación (w_t^*)	0,5

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [Aguilera et al., 2025] Aguilera, D., Riff, M. C., y Godoy, P. (2025). An algorithm for dynamic load balancing of university academic curriculum. En *Proceedings of the Chilean Computer Science Society Conference (SCCC)*. IEEE.
- [Araneda et al., 2023] Araneda, P., Córdova, A., Díaz, A., Jeldes, S., y Jerez, O. (2023). Factores que podrían influir en la carga académica percibida. Technical report, Facultad de Medicina, Universidad de Chile.
- [Bar et al., 2008] Bar, T., Kadiyali, V., y Zussman, A. (2008). Quest for knowledge and pursuit of grades: Information, course selection, and grade inflation. Technical Report 13-07, Johnson School Research Paper Series. Online.
- [Bryce Wilhelm y Comegys, 2004] Bryce Wilhelm, W. y Comegys, C. (2004). Course selection decisions by students on campuses with and without published teaching evaluations. *Practical Assessment, Research & Evaluation*, 9(16).
- [Carpentier, 2021] Carpentier, S. (2021). Determinantes del exceso de duración en la educación terciaria en Chile. *Calidad en la Educación*, (54):212-244.
- [Castro y Manzano, 2001] Castro, C. y Manzano, S. (2001). Variable and value ordering when solving balanced academic curriculum problems. En *Proceedings of the 6th Workshop of the ERCIM WG on Constraints*, Prague, Czech Republic.
- [Chiarandini et al., 2012] Chiarandini, M., Di Gaspero, L., Gualandi, S., y Schaerf, A. (2012). The balanced academic curriculum problem revisited. *Journal of Heuristics*, 18(1):119-148.
- [CRUCH, 2007] CRUCH (2007). Guía práctica para la instalación del SCT-Chile. Technical report, Consejo de Rectores de las Universidades Chilenas (CRUCH).
- [DI UTFSM, 2026] DI UTFSM (2026). Pregrado. Accedido: 22 de marzo de 2026.
- [Gent y Walsh, 1999] Gent, I. y Walsh, T. (1999). Csplib: A benchmark library for constraints. En *CP'99: Proceedings of the 5th International Conference on Principles and Practice of Constraint Programming*, pp. 480-481.
- [Hnich et al., 2002] Hnich, B., Kızıltan, Z., y Walsh, T. (2002). Modelling a balanced academic curriculum problem. En *Proceedings of the 4th International Conference on Integration of AI and OR Techniques in Constraint Programming for Combinatorial Optimization Problems (CP-AI-OR 2002)*, pp. 121-131.
- [Khamechian y Petering, 2022] Khamechian, M. y Petering, M. E. H. (2022). A mathematical modeling approach to university course planning. *Computers & Industrial Engineering*, 168:107855.

- [LABCOMP, 2026] LABCOMP (2026). Malla interactiva. Accedido: 6 de julio de 2026.
- [MINEDUC, 2026a] MINEDUC (2026a). Empleabilidad e ingresos. <https://www.mifuturo.cl/buscador-de-empleabilidad-e-ingresos/>. Accedido: 22 de marzo de 2026.
- [MINEDUC, 2026b] MINEDUC (2026b). Solicitud de constancias de planes y programas de estudio y carga horaria de ies cerradas. Accedido: 22 de marzo de 2026.
- [Monette et al., 2007] Monette, J.-N., Schaus, P., Zampelli, S., Deville, Y., y Dupont, P. (2007). A cp approach to the balanced academic curriculum problem. En *Proceedings of the Seventh International Workshop on Symmetry and Constraint Satisfaction Problems (Sym-Con'07)*.
- [Muñoz, 2024] Muñoz, F. F. (2024). Percepción de los y las estudiantes ante el rezago de su trayectoria académica de la carrera de licenciatura en educación. Memoria de licenciatura, Universidad Metropolitana de Ciencias de la Educación.
- [Nguyen et al., 2021] Nguyen, V. A., Nguyen, H.-H., Nguyen, D.-L., y Le, M.-D. (2021). A course recommendation model for students based on learning outcome. *Education and Information Technologies*, 26(5):5389–5415.
- [OCDE, 2025] OCDE (2025). Education at a glance 2025: Oecd indicators. Technical report, Organisation for Economic Co-operation and Development, Paris.
- [Ota et al., 2024] Ota, T., Fukada, K., y Togawa, N. (2024). Personalized course selection optimization using an ising machine. En *2024 IEEE International Conference on Quantum Computing and Engineering (QCE)*, volumen 02, pp. 430–431.
- [Pinos Ullauri et al., 2025] Pinos Ullauri, L. A., Lebis, A., Karami, A., Vermeulen, M., Fleury, A., y Den Noortgate, W. V. (2025). A recommender system of postgraduate courses based on soft skills: A psychometric-inspired approach. *International Journal of Artificial Intelligence in Education*, 35:2117–2153.
- [Rubio et al., 2013] Rubio, J.-M., Palma, W., Rodriguez, N., Soto, R., Crawford, B., Paredes, F., y Cabrera, G. (2013). Solving the balanced academic curriculum problem using the aco metaheuristic. *Mathematical Problems in Engineering*, 2013:1–11.
- [Shakhsi-Niaei y Abuei-Mehrizi, 2020] Shakhsi-Niaei, M. y Abuei-Mehrizi, H. (2020). An optimization-based decision support system for students' personalized long-term course planning. *Computer Applications in Engineering Education*, 28(5):1247–1264.
- [SIES, 2025a] SIES (2025a). Informe de avance curricular en educación superior 2025. Technical report, Subsecretaría de Educación Superior, Ministerio de Educación de Chile.
- [SIES, 2025b] SIES (2025b). Informe duración real y sobreduración de las carreras y/o programas de educación superior 2025. Technical report, Subsecretaría de Educación Superior, Ministerio de Educación de Chile.

- [SIMEL, 2026] SIMEL (2026). Ingreso mediano real de la población ocupada nacional y regional, según sexo. Accedido: 13 de julio de 2026.
- [UC, 2024] UC (2024). Debate sobre duración de las carreras universitarias: ¿en qué está la uc? Accedido: 31 de mayo de 2026.
- [UTFSM, 2003] UTFSM (2003). Reglamento general n°1 del régimen curricular. https://sigas.usm.cl/pag/documento/reglamento/Reglamento_1.pdf.
- [UTFSM, 2020] UTFSM (2020). Usm establece nueva duración de hora pedagógica y equivalencia de créditos transferibles. <https://eli.usm.cl/2020/12/15/usm-establece-nueva-duracion-de-hora-pedagogica-y-equivalencia-de-creditos-transferibles/>.
- [UTFSM, 2024] UTFSM (2024). Guía para desarrollar innovación curricular en programas de pregrado y postgrado. https://pregrado.usm.cl/wp-content/uploads/sites/5/2024/06/Innovacion_Curricular_para_la_Excelencia.pdf.
- [UTFSM, 2026a] UTFSM (2026a). Circular proceso de inscripción de asignaturas. <https://dee.usm.cl/wp-content/uploads/2026/01/2026-1-Circular-proceso-de-inscripcion%CC%81n-2026.pdf>.
- [UTFSM, 2026b] UTFSM (2026b). Pagos de derecho de matrícula y arancel anual para estudiantes de primer año. Accedido: 13 de julio de 2026.
- [Valenzuela *et al.*, 2021] Valenzuela, M., Reyes, C., y Hevia, L. (2021). Modelo de evaluación de la carga real de trabajo de las asignaturas del plan de estudios de la carrera de ingeniería civil informática en la utfsm. Technical report, Universidad Técnica Federico Santa María.
- [Villalobos-Cid *et al.*, 2019] Villalobos-Cid, M., Orellana, M., Vásquez, O. C., Pinto-Sothers, E., e Inostroza-Ponta, M. (2019). Dealing with the balanced academic curriculum problem considering the chilean academic credit transfer system. En *2019 38th International Conference of the Chilean Computer Science Society (SCCC)*, pp. 1–7. IEEE.
- [Wang, 2026a] Wang, E. (2026a). Algoritmo metaheurístico para el balanceo de mallas curriculares personalizadas: Aplicación web. <https://mallas-personalizadas.streamlit.app/>.
- [Wang, 2026b] Wang, E. (2026b). Algoritmo metaheurístico para el balanceo de mallas curriculares personalizadas: Código fuente. <https://github.com/evwng/Algoritmo-metaheuristico-para-el-balanceo-de-mallas-curriculares-personalizadas>.