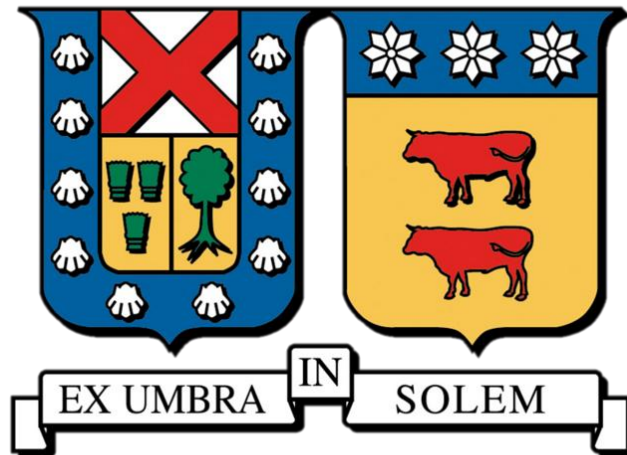


UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE OBRAS CIVILES
CAMPUS SANTIAGO



“PROPUESTA PRELIMINAR DE UN PLAN DE
MANTENIMIENTO Y REHABILITACIÓN DE PAVIMENTOS DE
LA RED PRIMARIA DE AEROPUERTOS A PARTIR DE
OPTIMIZACIÓN HEURÍSTICA”

STEFAN ANTONIO GIDI MÉNDEZ

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL

Profesor Guía:
Felipe Araya

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: “PROPUESTA PRELIMINAR DE UN PLAN DE MANTENIMIENTO Y REHABILITACIÓN DE PAVIMENTOS DE LA RED PRIMARIA DE AEROPUERTOS A PARTIR DE OPTIMIZACIÓN HEURÍSTICA”

Nombre del candidato(a): Stefan Antonio Gidi Méndez

Carrera / Grado: Ingeniería civil

Campus: San Joaquín **Departamento:** Obras Civiles

2.- VALIDACIÓN DEL PROFESOR GUÍA/DIRECTOR DE TESIS

Yo, Felipe Araya, 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: 04-03-2026

Firma: _____



Estudiante o Candidato(a):

Fecha: 04-03-2026

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.

Agradecimientos

Este trabajo es parte del proyecto FONDEF ID23I10113 “Desarrollo y validación de sistema de gestión de pavimentos aeroportuarios para la red primaria de Chile”, financiado por ANID. Este proyecto es conformado por distintos estudiantes y docentes de la Universidad Técnica Federico Santa María y de la Pontificia Universidad Católica de Valparaíso. El objetivo de este proyecto es el desarrollo de un SGPA que mejore la gestión de los pavimentos aeroportuarios de manera ajustada a las condiciones locales de cada aeropuerto. Sin el apoyo de esta institución y de los distintos equipos de trabajo, no se hubiera podido realizar esta memoria.

Resumen

Esta investigación propone una metodología de optimización para el mantenimiento y rehabilitación de los pavimentos aeroportuarios de la red primaria de Chile, basándose en la heurística, para el proyecto FONDEF ID23I10113.

Se analizaron los distintos tipos de tratamientos que se utilizan nacional e internacionalmente, y su efecto en el pavimento, para incluir en la base de datos de la investigación. Posteriormente, se procede a seleccionar el aeropuerto que es utilizado como caso de estudio. Se definió por utilizar el Aeródromo de La Florida, ubicado en la ciudad de La Serena, por su cantidad de datos disponibles. Específicamente, se utiliza la pista central PI-1 de este aeródromo.

Los planes de mantenimiento y rehabilitación son de 20 años a futuro, y buscan maximizar la efectividad del pavimento. Se elaboran dos metodologías de optimización para lograr este objetivo: una manual y una heurística. La metodología manual consiste en realizar la intervención del pavimento observando el comportamiento de la curva de deterioro, utilizando distintos criterios para cada plan de mantenimiento. Al revisar la literatura, existen distintas metodologías heurísticas, pero para este caso, como el objetivo es maximizar el pavimento, se escoge la optimización genética de un objetivo, y se elabora un algoritmo para solucionar este problema.

Al comparar ambas metodologías, se observa que los resultados del algoritmo genético alcanzan una mayor efectividad que el plan de mantenimiento y rehabilitación de efectividad más alta de la metodología manual. Se concluye que el algoritmo cumple con mejorar el cuidado de los pavimentos, pero como limitación se tiene que solo busca optimizar la efectividad del pavimento, y en investigaciones futuras se podría agregar más restricciones, como económicas y sociales.

Contenido

1	Introducción.....	8
1.1	Infraestructura Aeroportuaria Nacional.....	8
1.2	Conservación de los Aeropuertos.....	9
1.3	Propuesta preliminar de optimización de pavimentos aeroportuarios	9
2	Revisión de Literatura	10
2.1	Metodología PCI.....	10
2.1.1	Determinación del índice PCI.....	10
2.2	Pavimentos Aeroportuarios	14
2.2.1	Tipos de Pavimento.....	14
2.2.2	Actividades de M&R	16
2.2.3	Tipos de deterioro y opciones de reparación	16
2.2.4	Tratamientos considerados	19
2.3	Sistemas de gestión de pavimentos aeroportuarios	20
2.3.1	Niveles de un SGPA.....	20
2.3.2	Componentes de un SGPA	21
2.3.3	Beneficios de un SGPA	22
3	Objetivos	23
4	Metodología.....	23
4.1	Caso estudio	23
4.2	Planes de mantenimiento	25
4.2.1	Planificación a corto plazo	25
4.2.2	Planificación a largo plazo	26
4.3	Metodologías de optimización.....	27
4.3.1	Optimización manual	27
4.3.2	Optimización genética.....	28
5	Resultados	29
5.1	Planes de optimización manuales.....	29
5.2	Planes de optimización entregados por el algoritmo genético	37
6	Discusión.....	43
6.1	Contribuciones del trabajo	44
7	Conclusiones.....	45
8	Referencias	46

Índice de Figuras

Figura 1. Red Aeroportuaria Nacional	8
Figura 2. Ejemplo de formulario de evaluación para pavimentos rígidos.....	12
Figura 3. Concepto de la preservación de pavimentos.....	13
Figura 4. Curva típica PCI de la vida de un pavimento.	13
Figura 5. Estructura típica de un pavimento.....	14
Figura 6. Aeródromo La Florida.....	24
Figura 7. Secciones del aeropuerto.....	24
Figura 8. Curva de deterioro PI-1	25
Figura 9. Cálculo de la efectividad de un tratamiento.....	27
Figura 10. Gráfico del plan de mantenimiento 1	30
Figura 11. Gráfico del plan de mantenimiento 2	30
Figura 12. Gráfico del plan de mantenimiento 3	31
Figura 13. Gráfico de plan de mantenimiento 4.	32
Figura 14. Gráfico plan de mantenimiento 5.....	33
Figura 15. Gráfico plan de mantenimiento 6.....	33
Figura 16. Gráfico plan de mantenimiento 7.....	34
Figura 17. Gráfico plan de mantenimiento 8.....	35
Figura 18. Gráfico pan de mantenimiento 9.....	35
Figura 19. Gráfico plan de mantenimiento 10.....	36
Figura 20. Evolución del área bajo la curva realizada por el algoritmo genético.....	37
Figura 21. Gráfico del plan 11.....	39
Figura 22. Gráfico del plan 12.....	39
Figura 23. Gráfico del plan 13.....	40
Figura 24. Gráfico del plan 15.....	40
Figura 25. Gráfico del plan 16.....	41
Figura 26. Gráfico del plan 18.....	41
Figura 27. Gráfico del plan 20.....	42
Figura 28. Gráfico del plan 21.....	42
Figura 29. Gráfico del plan 24.....	43

Índice de Tablas

Tabla 1. Rangos de PCI y su clasificación.	10
Tabla 2. Deterioros característicos para pavimentos flexibles.	16
Tabla 3. Deterioros característicos para pavimentos rígidos.	18
Tabla 4. Deterioros encontrados en la sección PI-1.	24
Tabla 5. Datos de entrada	29
Tabla 6. Área bajo la curva plan de mantenimiento 1	30
Tabla 7. Área bajo la curva plan de mantenimiento 2	31
Tabla 8. Área bajo la curva plan de mantenimiento 3	31
Tabla 9. Área bajo la curva plan de mantenimiento 4	32
Tabla 10. Área bajo la curva plan de mantenimiento 5	33
Tabla 11. Área bajo la curva plan de mantenimiento 6.	34
Tabla 12. Área bajo la curva plan de mantenimiento 7	34
Tabla 13. Área bajo la curva plan de mantenimiento 8	35
Tabla 14. Área bajo la curva plan de mantenimiento 9.	36
Tabla 15. Área bajo la curva plan de mantenimiento 10.	36
Tabla 16. Tabla resumen de los planes de mantenimiento manuales.	37
Tabla 17. Planes generados por el algoritmo genético.	38

1 Introducción

1.1 Infraestructura Aeroportuaria Nacional

La infraestructura aeroportuaria es vital para el desarrollo de un país, realizando un rol clave en el transporte de personas y bienes, contribuyendo al comercio nacional e internacional (Hajek, Hall, & Hein, 2011). En Chile, el organismo encargado de regular este servicio de infraestructura es la dirección de Aeropuertos (DAP), la cual es dependiente del Ministerio de Obras Públicas (MOP). Esta institución busca establecer estándares de calidad, seguridad y eficiencia para poder satisfacer las necesidades de los diversos actores del sistema de transporte aéreo (DAP, 2025).

Actualmente, la red aeroportuaria nacional está conformada por 319 recintos aeroportuarios, 124 helipuertos y 7 aeropuertos distribuidos desde Arica a la Antártida, incluyendo los territorios insulares. La dirección General de Aeronáutica Civil (DGAC), administra directamente 102 de ellos (propiedad fiscal) y en 42 hay personal DGAC, quienes brindan servicios aeroportuarios y de navegación aérea, además de ejercer labores de fiscalización y control, las que realiza también en la totalidad de la Red Aeroportuaria Nacional (DGAC, 2025). En la figura 1 se muestran los principales aeropuertos y aeródromos de la red aeroportuaria nacional.

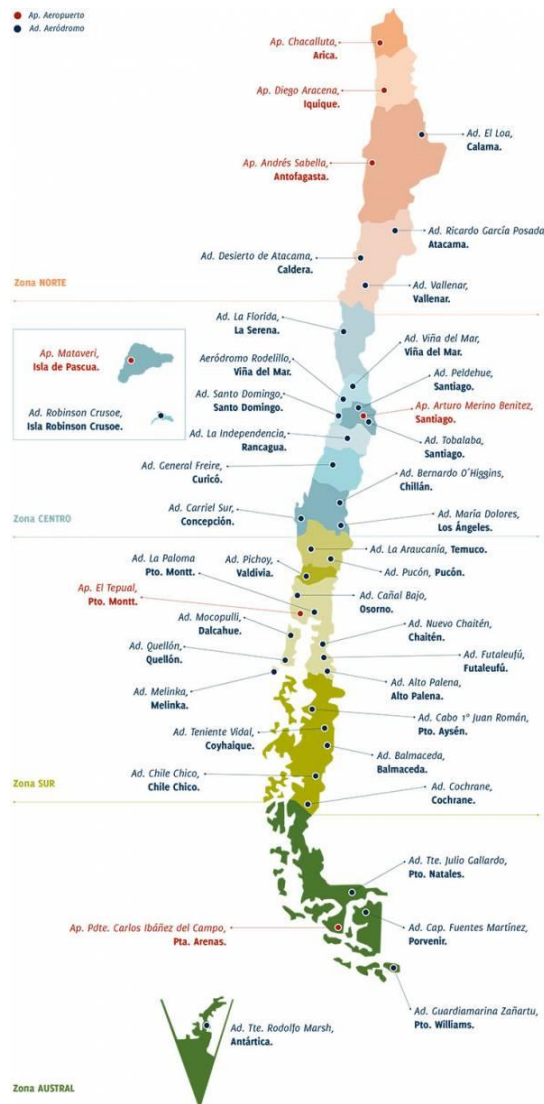


Figura 1. Red Aeroportuaria Nacional

Fuente: (DGAC, <https://www.dgac.gob.cl/aeropuertos/red-aeroportuaria-nacional/red-aeroportuaria/>, 2025)

De los 319 recintos aeroportuarios que conforman la red nacional de aeropuertos, 11 son de uso militar. El resto de ellos se distribuyen de la siguiente forma (DAP, 2025):

- **Red Primaria:** Esta red está conformada por 17 recintos aeroportuarios (7 aeropuertos y 10 aeródromos), ubicados en 13 regiones. Al ser utilizados frecuentemente por las grandes aerolíneas para el transporte de pasajeros y carga, abarcan aproximadamente el 99,5% de los pasajeros registrados. En estos lugares la DAP interviene de manera periódica para la realización de obras de conservación, mejoramiento o ampliación de pistas, plataformas de estacionamiento de aeronaves, calles de rodaje, márgenes de seguridad y cercos perimetrales. También efectúa trabajos de mantenimiento y ampliación a terminales de pasajeros en los recintos no concesionados.
- **Red Secundaria:** Esta red es conformada por 12 aeródromos que registran operaciones de carga y pasajeros en aeronaves de menor tamaño que las utilizadas por las líneas aéreas de alto tráfico. Estos recintos realizan una labor esencial en permitir la conectividad aérea entre ciudades ubicadas en zonas que no están suficientemente cubiertas por la red primaria. En conjunto, estos aeródromos efectúan alrededor de 100 mil operaciones anuales.
- **Pequeños Aeródromos:** Se trata de 279 recintos, de los cuales 101 son de uso público. Por lo general, cuentan con pistas de menor extensión y son usadas principalmente por pequeñas aeronaves. Su principal función es de carácter social, ya que tienen una gran importancia para conectar lugares aislados y posibilitar operaciones aéreas en casos de emergencias, catástrofes o control de incendios forestales.

1.2 Conservación de los Aeropuertos

El deterioro en los pavimentos es causado por distintos factores, como lo son el tipo de construcción y su calidad, el uso del pavimento, el clima y el mantenimiento. Considerando esto, el mantenimiento y rehabilitación (M&R) de los pavimentos aeroportuarios se debe realizar considerando una planificación a largo plazo de manera programada, y no de manera reactiva debido a una necesidad inmediata. La falta de un plan de M&R a largo plazo puede poner en riesgo la seguridad operacional y además resulta en una mala gestión de los recursos económicos disponibles (FAA, 2014a).

Los sistemas de gestión de pavimentos aeroportuarios (SGPA) son utilizados para apoyar las actividades técnicas y de gestión del personal del aeropuerto para así mantener una infraestructura segura y eficiente. Esta herramienta recomienda procedimientos de manera objetiva para mantener el estado de la infraestructura monitoreando su estado, escogiendo el tratamiento correcto para el pavimento correcto en el momento correcto, planeando y presupuestando las actividades de preservación y evaluando la costo-efectividad de las acciones de preservación anteriores (Hajek, Hall, & Hein, 2011).

Por estos motivos, se han implementado SGPA para poder cumplir con las demandas de los usuarios con las restricciones presupuestarias. En EE. UU., el 64% de los aeropuertos del país han implementado un SGPA con un tiempo de uso de 9 años y que el 23% estaba en el proceso de desarrollo de uno. Además, el 30% de los aeropuertos calificaron su SGPA como excelente y esencial (Hajek, Hall, & Hein, 2011).

1.3 Propuesta preliminar de optimización de pavimentos aeroportuarios

Considerando lo mencionado anteriormente, se busca desarrollar una metodología de optimización que entregue una propuesta preliminar de un plan de M&R para los pavimentos aeroportuarios de la red primaria de aeropuertos, utilizando como caso de estudio el Aeródromo de La Florida, ubicado en la ciudad de La Serena en la región de Coquimbo. Este plan de mantenimiento busca entregar las acciones a realizar durante el ciclo de vida del pavimento par así mantener un buen nivel de servicio.

2 Revisión de Literatura

2.1 Metodología PCI

Un componente vital de cualquier SGPA es la capacidad de poder realizar un seguimiento del deterioro del pavimento y determinar las causas de este deterioro. Esto requiere de un método de evaluación que sea objetivo y repetible. Una metodología que cumple con lo anterior es el Pavement Condition Index (PCI), que en español se traduce como el índice de condición de pavimentos (FAA, 2014b). La metodología PCI es un indicador numérico que clasifica la condición de la superficie del pavimento y su integridad estructural. Se basa en una medición objetiva del tipo, severidad y cantidad de deterioros en el pavimento. Al realizar evaluaciones periódicas de PCI se pueden elaborar modelos que muestran el cambio en el desempeño del pavimento en el tiempo. Los valores de PCI varían en un rango entre 0 y 100 como se observa en la siguiente tabla, en donde 0 indica un pavimento fallado y 100 representa un pavimento nuevo. (FAA, 2014a).

Tabla 1. Rangos de PCI y su clasificación.
Fuente: FAIC (2021)

Rango PCI	Clasificación Pavimento	Clasificación Pavimento DAP
86-100	Excelente	Adecuado
71-85	Muy Bueno	
56-70	Bueno	En Degradación
41-55	Regular	Insatisfactorio
26-40	Malo	
11--25	Muy Malo	
0-10	Falla	

2.1.1 Determinación del índice PCI

Primero, se debe establecer el inventario de pavimentos, en donde se definen los siguientes conceptos (FAA, 2014a):

- **Red:** Unidad lógica para organizar pavimentos de manera estructurada para su gestión. Una red consiste en una o más ramas, que en si consisten en una o varias secciones. La red es el punto de origen de la jerarquía de la gestión de pavimentos. Por ejemplo, una red puede contener todos los pavimentos de un aeropuerto o todos los pavimentos de una región.
- **Rama:** Una parte identificable de la red con una función distintiva. Por ejemplo, en un aeropuerto las pistas de aterrizaje, calles de rodaje y plataformas son ramas distintas. Cada rama consiste en por menos una sección.
- **Sección:** La sección es la unidad de gestión más pequeña cuando se considera la aplicación y selección de tratamientos de M&R de una rama. Cada rama consiste en por lo menos una sección, pero puede consistir en más de una si las características del pavimento varían dentro de la rama. Algunos factores por considerar al definir las secciones son: estructura, tipo y edad del pavimento, composición del tráfico (presente y futuro), historial de construcción, facilidades de drenaje, entre otros. La sección es una parte de la rama, que a su vez es una parte de la red.

Para el cálculo del índice PCI, las secciones se deben separar en unidades de muestras (UM), cuyas dimensiones dependen del tipo de pavimento:

- **Pavimentos de asfalto:** 450 m² ± 180 m²
- **Pavimentos de hormigón:** 20 losas ± 8 losas

El número de UM que se necesita para tener un nivel de confianza de 95% se calcula de la siguiente manera:

$$n = \frac{Ns^2}{\left(\frac{e^2}{4}\right)(N - 1) + s^2}$$

Donde:

n = Número de UM a evaluar

s = Desviación estándar preliminar, se asume que es 10 para pavimentos flexibles y 15 para pavimentos rígidos

N = Número de UM total en la sección

e = Error de 5% al medir el PCI de la sección.

Una vez determinado el número de UM a inspeccionar, se debe calcular el intervalo de espaciado (i) con el resultado del cociente entre N y n, y posteriormente redondear al entero más bajo. Se selecciona aleatoriamente la primera UM entre 1 y i, y para las UM siguientes se suman intervalos de “i” UM.

La evaluación en terreno se realiza inspeccionando cada UM seleccionada, realizando un diagrama de esta en una hoja de registro y resumiendo los distintos deterioros encontrados y su severidad. La norma ASTM D5340 define los tipos de deterioro para pavimentos flexibles y para pavimentos rígidos. Estos deterioros y sus tratamientos se pueden encontrar en 2.2.3 . Un ejemplo del formulario de evaluación de pavimentos se puede encontrar en la siguiente ilustración.

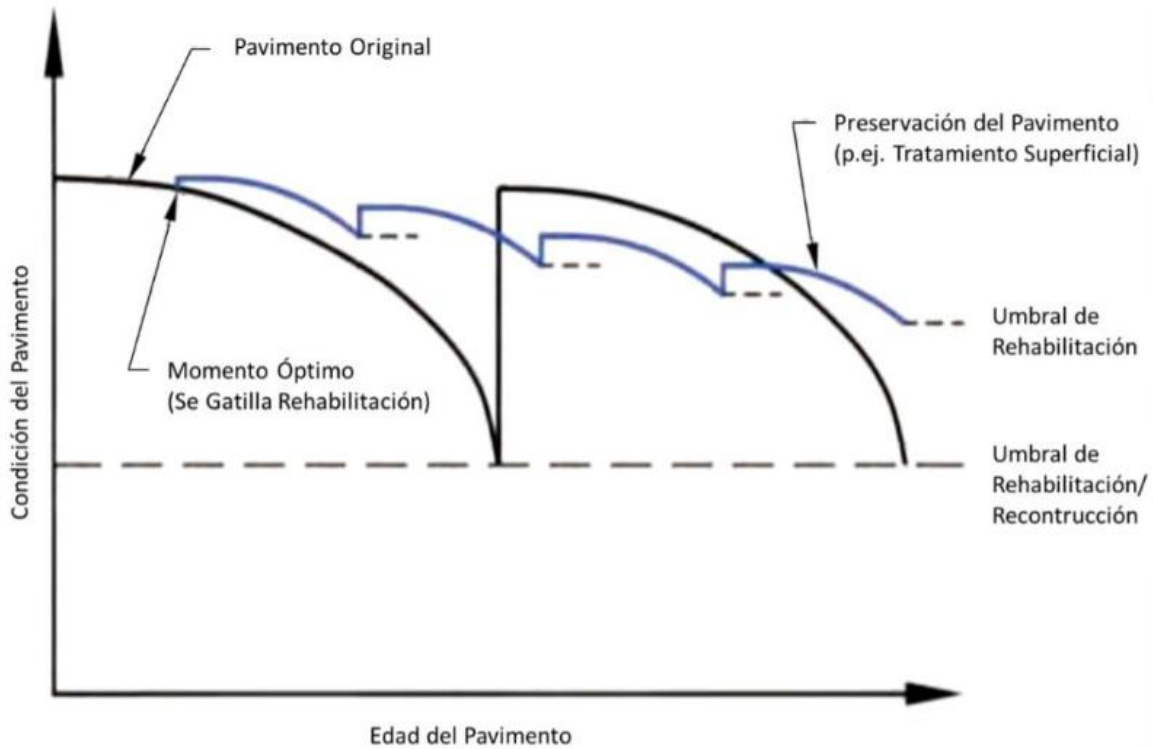


Figura 3. Concepto de la preservación de pavimentos, Fuente: (Olea, 2021), adaptado de FAA (2014)

A medida que el pavimento se deteriora, su costo de rehabilitación aumenta de manera drástica. Cuando el PCI alcanza un valor cercano a 70, el deterioro se acelera significativamente. Al rango de valores en donde se produce la inflexión de la curva se le denomina rango de PCI crítico, y las políticas de conservación deben dirigirse a mantener el PCI sobre este rango crítico (Olea, 2021). En la siguiente ilustración se observa este concepto.

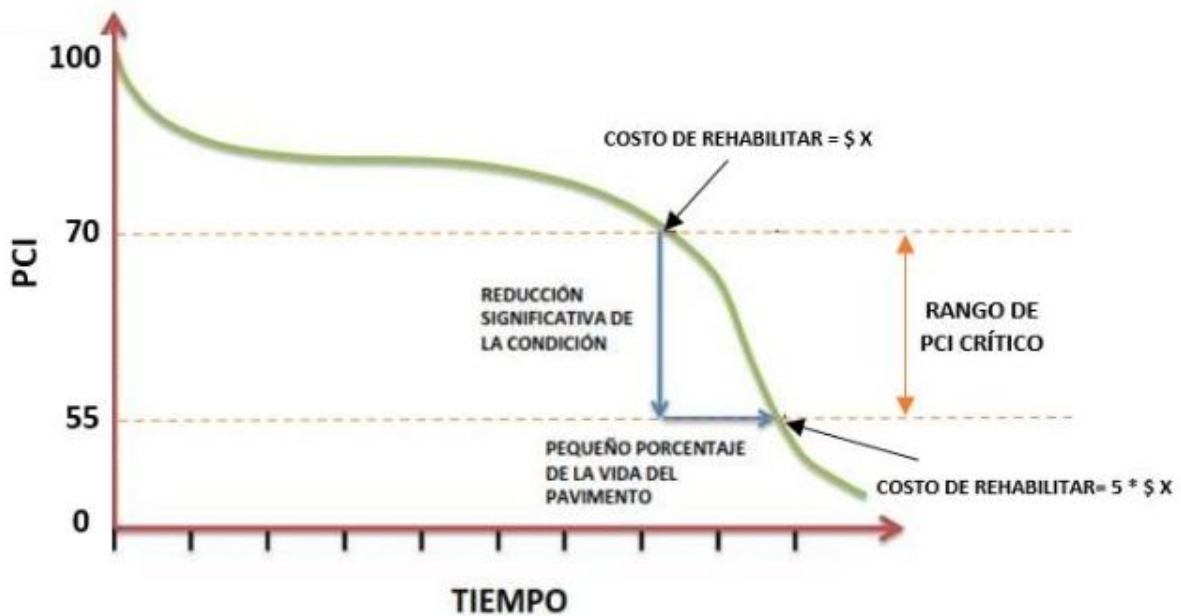


Figura 4. Curva típica PCI de la vida de un pavimento. Fuente: Olea (2021).

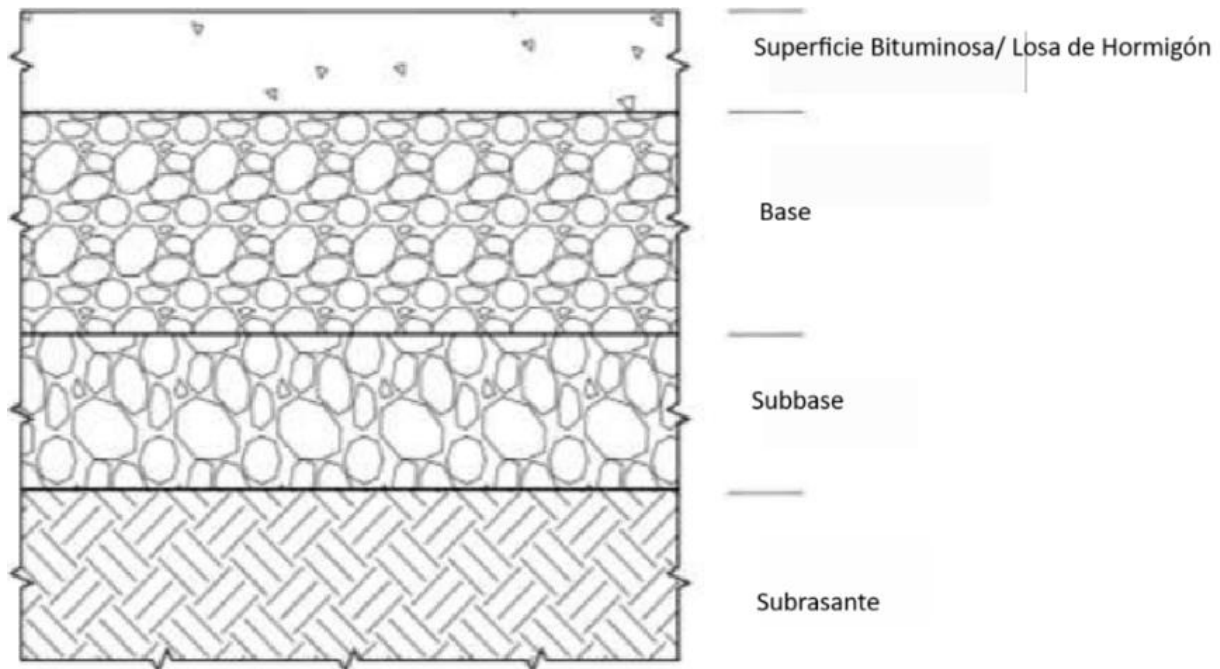
2.2 Pavimentos Aeroportuarios

Los pavimentos aeroportuarios son diseñados, construidos y mantenidos para soportar las cargas críticas impuestas por las aeronaves. La calidad y espesor del pavimento debe asegurar que este no falle ante las cargas impuestas y el pavimento debe ser lo suficientemente resistente para tolerar las acciones abrasivas del tráfico aéreo, condiciones climáticas adversas y otras influencias que puedan deteriorar su estado. Para asegurar la resistencia necesaria del pavimento y para prevenir la formación de deterioros incontrolables, se deben considerar distintos parámetros de diseño, construcción y materiales (FAA, 2014b).

En Chile, el diseño de pavimentos aeroportuarios se rige según la Normas Aeronáuticas (DAN) de la DGAC, específicamente la norma DAN 14 154, la cual rige el diseño de aeródromos.

2.2.1 Tipos de Pavimento

Se identifican dos tipos de pavimentos, flexibles y rígidos. La siguiente figura muestra la estructura típica para ambos tipos de pavimento.



*Figura 5. Estructura típica de un pavimento
Fuente: Adaptado de (FAA, 2014b).*

2.2.1.1 Pavimentos flexibles

Los pavimentos flexibles soportan cargas por medio de la transferencia de cargas. están formados por distintas capas de materiales meticulosamente seleccionados para distribuir gradualmente las cargas desde la superficie del pavimento hacia las capas inferiores. El diseño asegura que la carga traspasada a cada capa sucesiva no exceda la capacidad de carga de la capa (FAA, 2014b). Este tipo de pavimento está compuesto por las capas descritas a continuación.

- **Superficie Bituminosa:** La superficie bituminosa está formada de una mezcla de distintos agregados unidos mediante cemento asfáltico u otros ligante bituminoso. El material utilizado en la superficie es frecuentemente llamado mezcla asfáltica en caliente, o HMA por su sigla en inglés. Este material busca prevenir la penetración del agua hacia las capas inferiores, mantiene una superficie suave sin partículas desprendidas que podrían ser un peligro para las aeronaves

o las personas, resiste el estrés causado por las cargas de las aeronaves y otorga una superficie antideslizante sin causar desgaste en los neumáticos.

- **Base:** La base funciona como el componente estructural principal del pavimento flexible. Distribuye las cargas impuestas por las ruedas hacia las capas inferiores. La base debe poseer la calidad y espesor suficiente para prevenir fallas en la subbase y la subrasante, resistir los esfuerzos producidos desde la base, resistir presiones verticales que producen consolidación y distorsión en la superficie, y resistir cambios de volumen causados por las variaciones de humedad. La calidad de la base depende de su composición, propiedades físicas y compactación del material. Los materiales que componen esta capa deben ser agregados duros y resistentes, que generalmente son estabilizados y granulares. Las bases estabilizadas están formadas por material triturado o no triturado, unido por un estabilizador, como cemento Portland (PCC) o cemento asfáltico. Las bases granulares consisten en agregado triturado o no triturado construido sobre una subbase preparada.
- **Subbase:** Esta capa es utilizada en zonas geográficas donde hay congelación severa o donde el suelo de la subrasante es débil. La subbase funciona como una base, pero los requisitos materiales para la subbase no son tan estrictos como para la base ya que la subbase recibe menos carga. La subbase consiste en material granular estabilizado o compactado correctamente.
- **Subrasante:** La subrasante es la capa de suelo que forma la fundación del pavimento. Es la capa que recibe menos carga. Como la carga disminuye con la profundidad, el estrés se concentra en la parte superior de la subrasante. El espesor combinado entre la base, subbase y superficie debe ser lo suficientemente grande para reducir la carga que ocurre en la subrasante a valores que no causen una deformación excesiva o un desplazamiento de la subrasante.

2.2.1.2 Pavimentos rígidos

Los pavimentos rígidos soportan cargas mediante flexión. Usualmente, utilizan PCC como elemento estructural principal. Dependiendo de las condiciones, el diseño puede ser con hormigón liso, ligeramente reforzado, continuamente reforzado o pretensado. La losa se suele colocar en una subbase granular compactada o tratada, apoyada por una subrasante compactada. La subbase otorga un apoyo estable y uniforme y puede además proveer drenaje en la superficie. La losa posee una considerable resistencia a la flexión y propaga las cargas sobre áreas mayores. La resistencia del pavimento está en la losa misma, lo que permite utilizar materiales de menor costo en las capas inferiores (FAA, 2014b). Un pavimento rígido está compuesto por las capas descritas a continuación.

- **Losa de hormigón:** La losa otorga soporte estructural a las aeronaves, provee una superficie antideslizante y además evita la infiltración de agua hacia las capas inferiores.
- **Base:** La base otorga un apoyo uniforme para la losa de hormigón. La base también ayuda a controlar la congelación, permite drenaje, controlar la hinchazón de la subrasante, provee una plataforma estable para la construcción del pavimento, y previene el bombeo de partículas finas. Los pavimentos rígidos requieren de una base de por lo menos 10 centímetros.
- **Base estabilizada:** Todos los pavimentos rígidos que son diseñados para tolerar 45.000 kilos o más deben tener una base estabilizada. El beneficio que aporta a una sección de pavimento se refleja en el módulo de reacción de la rasante.
- **Subbase:** Esta capa es utilizada en zonas geográficas donde hay congelación severa o donde el suelo de la subrasante es débil. La subbase funciona como una base, pero los requisitos materiales para la subbase no son tan estrictos como para la base ya que la subbase recibe menos carga. La subbase consiste en material granular estabilizado.
- **Subrasante:** La subrasante es la capa de suelo que forma la fundación del pavimento. Es la capa que recibe menos carga. Como la carga disminuye con la profundidad, el esfuerzo de diseño se concentra en la parte superior de la subrasante. Condiciones inusuales, como variación en la humedad o una subrasante estratificada, pueden causar un cambio en la

ubicación del esfuerzo de diseño. La estructura por sobre la subrasante debe ser lo suficientemente grande para reducir la carga que ocurre en la subrasante a valores que no causen una deformación excesiva o un desplazamiento de la subrasante.

2.2.2 Actividades de M&R

Existen distintos trabajos de conservación, dependiendo del tipo de pavimento y su PCI, y se separan en tres grupos (FAIC, 2021):

- **Conservación localizada preventiva:** Se definen como el conjunto de actividades de reparación de los deterioros existentes, sin importar el lugar donde se ubiquen, efectuadas con el objetivo de detener la tasa de deterioro de PCI. Buscan atacar el problema de manera puntual, pero para los casos donde haya deterioros con un nivel medio de severidad.
- **Conservación global preventiva:** Estos tratamientos se aplican a secciones completas, con el objetivo de demorar la tasa de deterioro de PCI. Se aplican a pavimentos por sobre el PCI crítico.
- **Rehabilitación mayor:** Se considera necesario cuando el pavimento se encuentra por debajo del PCI crítico, o cuando cumpla ciertos criterios de edad de pavimento, vida residual, entre otros.

2.2.3 Tipos de deterioro y opciones de reparación

Como se mencionó en 2.1.1, la norma ASTM D-5340 identifica los deterioros para pavimentos flexibles y para pavimentos rígidos, cada deterioro puede tener una severidad distinta (baja, media y alta). Si no se señala una opción de reparación para alguna severidad, significa que aún no es necesario intervenir.

2.2.3.1 Pavimento flexible

En la siguiente tabla, se describen los deterioros característicos para pavimentos flexibles, sus posibles causas y las medidas de corrección aplicables.

Tabla 2. Deterioros característicos para pavimentos flexibles.
Fuente: ASTM D5340, (Camarena, 2018), (Olea, 2021)

Deterioro (Descripción)	Posible Causa	Opción de reparación
Piel de cocodrilo (grietas interconectadas, que forman polígonos con ángulos agudos)	Repetición de carga de tránsito que provoca una falla por fatiga en la capa de rodadura.	Parqueo para una condición localizada. Recapar o reconstruir para una condición media o alta.
Exudación (película de material bituminoso en la superficie del pavimento)	Exceso de asfalto en la mezcla o un bajo contenido de vacíos de aire.	No se definen niveles de severidad: Aplicar calor, esparcir arena y remover material suelto.
Grieta de bloque (grietas interconectadas que dividen el pavimento en piezas aproximadamente rectangulares)	Contracción del asfalto y variaciones de temperatura. Su aparición implica rigidización del asfalto.	Para una severidad media y alta: sellado de grietas, reciclar la superficie, escarificar en caliente y recapar.
Ondulación (serie de valles y crestas perpendiculares a la dirección del tránsito)	Acción del tráfico combinada con una superficie o base inestable.	Para severidad media y alta: reconstrucción.
Depresiones (superficie tiene elevación ligeramente menor que la zona que la rodea)	Asentamientos del terreno de la fundación o durante construcción.	Para severidad media y alta: Parqueo a profundidad parcial o total.
Erosión por chorro de turbina (áreas oscuras en la superficie)	Ligante bituminoso ha sido quemado o carbonizado.	No se definen niveles de severidad: Aplicar Parqueo de profundidad parcial

Deterioro (Descripción)	Posible Causa	Opción de reparación
Grietas por reflexión de juntas (exclusivo en pavimento de asfalto contruidos sobre pavimentos de hormigón)	Movimiento de las losas bajo la superficie asfáltica inducido por temperatura o humedad.	Para severidad baja: Sellar grietas. Para severidad media: sellar grietas, parchar a profundidad parcial. Para severidad alta: Sella grietas, parchar a profundidad total, reconstruir.
Grietas longitudinales/transversales (Las primeras son grietas paralelas al eje de la pista. Las segundas se extienden en ángulos aproximadamente rectos al eje de la pista)	Juntas pobremente construidas, contracción de la superficie del asfalto por cambios de temperatura o endurecimiento del asfalto.	Para severidad baja y media: Sellado de grietas. Para severidad alta: Sellado de grietas y parcheo a profundidad parcial.
Deterioro por derrame de combustible (ablandamiento de la superficie del pavimento)	Derrame de combustible, aceite o solvente hidrocarburo	No tiene niveles de severidad. Parchar a profundidad parcial o total.
Bacheo, reparaciones o parches (área de pavimento que ha sido reemplazada por un parche)	Parche para reparar el pavimento existente	Para severidad media: Sellado de grietas, reemplazar parche. Para severidad alta: Reemplazar parche.
Desprendimiento y efecto de la intemperie (desgaste en la superficie del pavimento)	Desprendimiento de agregados y pérdida de capacidad del ligante asfáltico por endurecimiento	Para severidad alta: Recapar, reciclar, reconstruir.
Ahuellamiento (depresión de la superficie del pavimento en la zona de transito de la aeronave)	Deformación permanente en laguna capa del pavimento o en la subrasante por consolidación o desplazamiento de los materiales por las cargas de tráfico	Para severidad media y alta: Parcheo a profundidad parcial o total, recapar.
Grietas por deslizamiento (grietas con forma de medialuna apuntando a la dirección del tráfico)	Frenado de ruedas causa un deslizamiento y deformación de la superficie por baja adherencia entre superficie y la siguiente capa del pavimento	No tiene niveles de severidad. Parcheo a profundidad parcial o total.
Hinchamiento (hinchamiento de la masa en la superficie pavimentada)	Provocado por congelamiento en la subrasante o hinchamiento de los suelos	Para severidad media y alta: Reconstruir.
Agregados pulidos (desgaste de agregados por efecto del tráfico)	Baja porción de agregados sobre el asfalto, falta de rugosidad o partículas angulares del agregado pierden su resistencia al deslizamiento	No tiene niveles de severidad: Recapado, ranurado.

2.2.3.2 Pavimento rígido

En la siguiente tabla, se describen los deterioros característicos para pavimentos rígidos, sus posibles causas y las medidas de corrección aplicables.

Tabla 3. Deterioros característicos para pavimentos rígidos.
Fuente: ASTM D5340, (Olea, 2021)

Deterioro (Descripción)	Posible Causa	Opción de reparación
Levantamiento de losas por dilatación (cuando no se puede desarrollar libremente la expansión, se produce un movimiento ascendente en los bordes de la losa, con daño cerca de la junta)	Se produce por falta de espacio en juntas cuando hay clima caluroso. Ancho insuficiente de la junta se produce por acumulación de material incomprensible dentro de esta	Para severidad baja, media y alta: Parcheo parcial o total, reemplazo de losas.
Grietas de esquina (grieta que intercepta los bordes de una losa, a una distancia menor o igual a la mitad de la longitud de cada borde, medidos desde la esquina de la losa)	Repeticiones de carga, combinadas con pérdidas de soporte y tensiones de alabeo son causas comunes	Para severidad baja: Sellado de grietas. Para severidad media y alta: Sellado de grietas, parcheo a profundidad, reemplazo de losa.
Grietas longitudinales, transversales y diagonales (grietas que dividen la losa en dos o tres sectores)	Cargas repetidas, tensiones de alabeo y tensiones de fraguado	Para severidad baja y media: Sellar grietas. Para severidad alta: sellar grietas, parcheo a profundidad total, reemplazar losa.
Grietas tipo “D” (se presentan como una configuración de grietas paralelas a la junta de la losa y se acompañan de una coloración oscura a su alrededor)	Incapacidad del hormigón para soportar factores ambientales, como los ciclos de hielo-deshielo	Para severidad media: Parcheo a profundidad total, reconstruir las juntas. Para severidad alta: Reemplazo de losa.
Daño al sello de juntas (cualquier condición capaz de permitir que partículas de suelo o piedras se acumulen en las juntas, o que permita una infiltración de agua)	Desconche del material sellante, extrusión del sello, crecimiento de malezas, oxidación del material sellante, pérdida de adherencia, ausencia o pérdida de material sellante en junta	Para severidad media y alta: Sello de juntas.
Parches menores o iguales a 0.5 m² (área donde el pavimento original ha sido reemplazado por un material de relleno)	Parche para reparar el pavimento existente	Para severidad media y alta: Reemplazar parche.
Parches mayores a 0.5 m² (área donde el pavimento original ha sido reemplazado por un material de relleno)	Parche para reparar el pavimento existente	Para severidad media: Sellar grietas, reparar área deteriorada, reemplazar parche. Para severidad alta: Reemplazar parche, reemplazar losa.
Pérdidas repentinas (pequeñas partes del pavimento que se desprenden de la superficie)	Efecto hielo-deshielo con agregados expansivos	No se define nivel de severidad. No es necesario reparar.

Deterioro (Descripción)	Posible Causa	Opción de reparación
Bombeo (expulsión del material arrastrado por el agua, a través de las juntas o grietas causadas por la deflexión de la losa bajo la acción de cargas pesadas)	La expulsión del agua transporta partículas de las capas inferiores, produciendo una pérdida de soporte del pavimento.	No se define nivel de severidad: Sellar grietas y juntas, sellar la base.
Escamaduras, Grietas Tipo Mapeo y Cuarteaduras (red de fisuras que se extienden por la parte superior de la superficie del hormigón en ángulos de 120°)	Excesivo manipuleo del hormigón en la terminación. Aplicación de anticongelantes, ciclos hielo-deshielo. Reacción entre álcalis presentes en cementos	Para severidad media y alta: Reemplazar la losa.
Escalonamiento (diferencia de nivel en la junta o grieta)	Solevamiento o consolidación	Para severidad media: Pulir superficie de la losa. Para severidad alta: Pulir superficie de la losa, reemplazar losa.
Grietas de bloque (grietas interconectadas que rompen la losa en cuatro o más partes)	Sobrecarga, soporte inadecuado	Para severidad baja: Sellar grietas. Para severidad media: Sellar grietas, parchar a profundidad total, reemplazar losa. Para severidad alta: Parchar a profundidad total. Reemplazar losa.
Grietas de retracción (fisuras de poca longitud que no se extienden por toda la losa)	Se forman durante la colocación y curado del hormigón	No se define nivel de severidad. No es necesario reparar.
Desprendimiento de juntas longitudinales y transversales (rotura de los bordes de la losa dentro de una distancia de 60 cm respecto de la junta)	Tensiones excesivas en junta o grieta, causadas por la infiltración de materiales incompresibles o cargas de tráfico. Otra causa en la combinación de hormigón débil y cargas de tráfico	Para severidad media y alta: Parchar a profundidad parcial.
Desprendimiento de esquina (rotura de la losa dentro de una distancia de 60 cm de su esquina, intercepta las juntas en un ángulo)	Repeticiones de carga, combinadas con pérdidas de soporte y tensiones de alabeo son causas comunes	Para severidad media y alta: Parchar a profundidad parcial.

2.2.4 Tratamientos considerados

En esta sección se encuentran los tratamientos considerados para los planes de M&R. En el contexto de este trabajo, solo se consideran pavimentos flexibles, por lo que la no inclusión de tratamientos para pavimentos rígidos es una limitación. El cálculo de aumento de PCI de los tratamientos se estima calculando el efecto que tienen en los modelos de deterioro, ya que su efecto se calcula como “prolongación de vida”, la cual se mide años y no es un número fijo, pero para este trabajo se calcula un valor de aumento de PCI utilizando el promedio de la prolongación de vida.

Los tratamientos que son considerados en este SGPA son los siguientes:

- **Sellado de grietas:** Este proceso corresponde a la limpieza y sellado o resellado de grietas en pavimentos flexibles y rígidos, para prevenir el ingreso de agua que puede dañar la estructura del pavimento. Se utiliza sellante asfáltico elastomérico, de aplicación en caliente; el cual debe cumplir los requerimientos de las normas ASTM-D 3405 o ASTM-D 1190. La prolongación de vida que otorga este tratamiento al pavimento es de 3 años, la que se aproxima a 14 puntos de PCI, y tiene un costo de 0.197 UF por metro cuadrado (IDOM, 2022; Moses, Hulsey, & Connor, 2009).
- **Lechada asfáltica:** También llamado Slurry seal, este tratamiento corresponde a una mezcla de asfalto emulsionado, agregados, aditivos y agua, la cual es propagada por la superficie del pavimento. Se rige por la especificación técnica general N°3. La prolongación de vida que le otorga al pavimento en promedio es de 6 años, lo que aproximadamente equivale a 22 puntos de PCI, y tiene un costo de 0.13 UF por metro cuadrado (IDOM, 2022; Moses, Hulsey, & Connor, 2009; (Chapman, Ploeger, Peshkin, & Speidel, 2015)).
- **Riego neblina:** También conocido como Fog seal, este tratamiento consiste en la aplicación de una emulsión de asfalto diluido sin agregados en la superficie del pavimento, sellando levemente la superficie. Se rige según la especificación técnica general N°2. La prolongación de vida es de un año, lo que se aproxima a 5 puntos de PCI, y tiene un costo de 0.062 UF por metro cuadrado (IDOM, 2022; Moses, Hulsey, & Connor, 2009; (Chapman, Ploeger, Peshkin, & Speidel, 2015)).
- **Fresado y recapado:** El fresado corresponde a texturización del pavimento para mejorar su fricción y se realiza utilizando una máquina fresadora. El recapado corresponde a la aplicación de una capa de asfalto en el pavimento existente. Primero se realiza el fresado y después el recapado. Se rige por la especificación técnica N°25. Este tratamiento reinicia el PCI del pavimento, siempre volverá a ser 100. Tiene un costo de 1.022 UF por metro cuadrado (IDOM, 2022; Hajek, Hall, & Hein, 2011; (Chapman, Ploeger, Peshkin, & Speidel, 2015)).

2.3 Sistemas de gestión de pavimentos aeroportuarios

Los aeropuertos históricamente han tomado las decisiones de M&R basadas en la necesidad inmediata o la experiencia de expertos por encima de la planificación a largo plazo o también del uso de la información documentada sobre tratamientos de M&R efectivos. Este enfoque no permite evaluar el costo efectividad de las distintas alternativas de M&R, lo que conlleva al uso ineficiente de los recursos disponibles (FAA, 2014a).

Los SGPA son una herramienta implementada para administrar los pavimentos aeroportuarios. Es un sistema de apoyo para la toma de decisiones relacionado para elaborar estrategias técnica y económicamente sustentables para mantener los pavimentos aeroportuarios en condiciones óptimas según las legislaciones actuales y para un periodo definido de tiempo (Di Mascio & Moretti, 2019).

2.3.1 Niveles de un SGPA

En el contexto de la gestión de pavimento aeroportuarios, se identifican dos niveles de gestión (Hajek, Hall, & Hein, 2011):

- **Nivel de Red:** Las actividades a nivel de red están ligadas a todos o una gran parte de los pavimentos aeroportuarios. Las decisiones hechas a nivel de red son usualmente decisiones de planificación, presupuestarias o políticas.
- **Nivel de Proyecto:** Las actividades a nivel de proyecto están ligadas a una sección específica del pavimento. Después de decidir que secciones son seleccionadas para recibir tratamientos de preservación genéricos a nivel de red, las decisiones a nivel de proyecto resultan en la selección de tratamientos de preservación específicos para el proyecto que se va a realizar, esto incluye la selección de materiales y procedimientos para su implementación. Otras actividades que se

consideran a nivel de proyecto son la construcción y el monitoreo del rendimiento del tratamiento.

La primera fase de las actividades es a nivel de red, seguidas por las actividades a nivel de proyecto. Se enfatizan las actividades a nivel de red en vez de las actividades a nivel de proyecto debido a que las actividades realizadas en este nivel de gestión, como la evaluación objetiva de la condición de la red de pavimentos, pueden ser aplicadas de manera universal, no así las actividades a nivel de proyecto, que dependen del aeropuerto. Las prácticas de preservación de los pavimentos a nivel de red son fundamentales en la preservación de los pavimentos. El mayor desafío de los aeropuertos no es la selección de tratamientos de preservación para utilizar en alguna sección, sino que es el justificar que los tratamientos de M&R son necesarios y obtener presupuesto para su implementación (Hajek, Hall, & Hein, 2011).

2.3.2 Componentes de un SGPA

Para obtener el mayor provecho del SGPA, la información de la condición del pavimento debe ser recolectada y continuamente actualizada. Estrategias alternativas de rehabilitación deben ser identificadas junto con criterios de decisión y una política de mantenimiento que va a determinar que procedimientos de rehabilitación serán empleados. Además, el SGPA necesita de modelos de deterioro de los pavimentos, costos de estrategias alternativas y procedimientos de optimización que consideren el ciclo de vida completo de los pavimentos (FAA, 2014a).

Un sistema que logre estos objetivos incluye:

- Un sistema para recolectar información sobre la estructura y condición de los pavimentos.
- Un sistema objetivo y repetible para evaluar la condición del pavimento.
- Procedimientos para predecir la condición futura de los pavimentos.
- Procedimientos para modelar la condición pasada y futura del desempeño de los pavimentos.
- Procedimientos para determinar los requisitos de presupuesto para alcanzar los niveles de serviciabilidad, como por ejemplo el presupuesto necesario para mantener el PCI de un pavimento en cierto nivel.
- Procedimientos para formular y priorizar proyectos de M&R.

Los componentes de un SGPA incluyen (FAA, 2014a):

2.3.2.1 Base de datos

Existen distintos elementos críticos para realizar buenas decisiones de M&R: Inventario y estructura del pavimento, historia de M&R, estado de los pavimentos e información de tráfico. Estos datos son almacenados en una base de datos del SGPA (FAA, 2014a):

- **Inventario:** Ubicación de todas las pistas de aterrizaje, calles de rodaje y plataformas. Dimensiones, tipos de pavimento, año de construcción y rehabilitación más reciente.
- **Estructura:** Tener el conocimiento de la composición estructural del pavimento y trabajos que se hayan realizado después de su construcción es vital para analizar sus problemas y diseñar soluciones. Planos “as built” contienen esta información. En caso de que no estén disponibles, podría ser necesario realizar ensayos destructivos para determinar el espesor y la composición de las capas estructurales.
- **Historia de M&R:** La historia de todos los trabajos de M&R y sus costos asociados otorgan información relacionada a la efectividad de los distintos trabajos de M&R en los pavimentos. Los aeropuertos deben documentar las actividades de mantenimiento rutinarias que se realizan incluyendo los tipos de deterioros reparados y su severidad, tipo de trabajo, cantidades y costos de mano de obra para determinar la efectividad de los distintos trabajos de M&R dentro del SGPA.

- **Estado del pavimento:** Un componente fundamental de cualquier SGPA es la habilidad de monitorear el estado del pavimento. Esto requiere de un proceso de evaluación que sea objetivo, sistemático y repetible, como, por ejemplo, la metodología PCI. La recolección constante de información de la condición del pavimento es esencial para monitorear su rendimiento, modelándolo para así determinar cuándo realizar intervenciones de M&R. Cambios en la condición del pavimento, documentados en inspecciones rutinarias, pueden requerir de inspecciones de PCI más detalladas, ya que la condición estructural del pavimento no puede ser determinada mediante inspección visual.
- **Información de tráfico:** Información relacionada al tráfico actual, necesidades operacionales futuras y tipo de aeronave utilizando el pavimento es beneficiosa para analizar causas probables de deterioro y al evaluar procesos de M&R.

2.3.2.2 Capacidades del sistema

- **Predicción de la condición presente y futura del pavimento:** Un SGPA debe ser capaz de predecir la condición presente y futura del pavimento, Las predicciones de condición son necesarias para desarrollar planes de M&R a largo plazo. El deterioro del pavimento es causado por distintos factores incluyendo el ambiente, la condición de la superficie, la condición estructural, cambio en el tráfico, entre otros. La condición del pavimento no puede ser determinada solamente con los resultados de las inspecciones de pavimento.
- **Determinar planes óptimos de M&R para un presupuesto fijo:** Un SGPA Debe ser capaz de elaborar un plan óptimo de M&R que identifique cuando y donde una intervención es requerida y cuánto va a costar aproximadamente. Esta información es necesaria para la priorización dentro del presupuesto de M&R.
- **Determinar presupuesto requerido para alcanzar objetivos de serviciabilidad:** Un SGPA debe ser capaz de determinar el presupuesto requerido para alcanzar los niveles de serviciabilidad objetivos. Estos se refieren a mantener los pavimentos sobre cierto nivel de condición y/o eliminar requerimientos de M&R mayores en un número específico de años.
- **Formulación y priorización de proyectos de M&R:** Además de desarrollar planes de M&R óptimos a nivel de red, un SGPA de formular y priorizar los distintos proyectos de M&R. hay que considerar que el juicio ingenieril sigue siendo un componente vital para transformar los planes de M&R óptimos en proyectos ejecutables.

2.3.3 Beneficios de un SGPA

Los beneficios principales de la implementación de un SGPA son los siguientes (Di Mascio & Moretti, 2019):

- Fomentan la creación de una base computarizada para organizar, almacenar y consultar información sobre pavimentos.
- Promueven el monitoreo de los pavimentos y su evaluación sistemática y objetiva del nivel de deterioro.
- Predicen la evolución del deterioro, luego identifican los tratamientos de M&R necesarios y cuando aplicarlos, considerando la vida de servicio de las intervenciones aplicadas y el costo/beneficio de aplicar estos trabajos.
- Seleccionan y optimizan el listado de tratamientos de M&R para ser implementado de acuerdo con los recursos disponibles.
- Permiten la identificación sistemática y documentable de la necesidad de intervenir, apoyando así las peticiones de presupuesto.
- Permite mayor flexibilidad y adaptabilidad para realizar cambios en recursos tanto financieros como humanos.

3 Objetivos

El objetivo principal consiste en desarrollar una propuesta preliminar de una metodología de optimización para la mantención de los pavimentos aeroportuarios de la red primaria utilizando criterios técnicos y económicos.

Los objetivos específicos se identifican como:

- Elaborar bases de datos relacionadas a los criterios de evaluación de pavimentos.
- Desarrollar un algoritmo que entregue un plan de M&R considerando los criterios de restricción.
- Aplicar el algoritmo en el caso de estudio del Aeródromo de La Florida.

4 Metodología

Para poder cumplir con los objetivos propuestos, se presenta a continuación el procedimiento realizado que se divide en los siguientes puntos:

- Revisión y compilación literaria: Corresponde a la etapa de búsqueda de material relacionado al tema de esta investigación, como el análisis del estado del arte y su uso en la práctica a nivel internacional.
- Análisis de la información recolectada: En esta etapa se estudian los documentos recolectados y se determinan aquellos que serán utilizados en las distintas bases de datos a realizar. Además, se determina el algoritmo a utilizar para la entrega del plan de M&R.
- Desarrollo del algoritmo: En esta etapa se programa el algoritmo que entrega un plan de M&R utilizando el lenguaje de programación Python.
- Aplicación del algoritmo: Utilizando las bases de datos realizadas con los datos del Aeródromo de La Florida y el algoritmo programado, se obtiene un plan de M&R.

4.1 Caso estudio

El aeródromo La Florida, con código OACI: SCSE, es un recinto aeroportuario ubicado a 6 kilómetros de la ciudad de La Serena, en la región de Coquimbo. Es administrado por DGAC y es un recinto de uso público. Tiene una pista física con dos pistas operacionales para aterrizaje y despegue. Las dimensiones de la pista principal son de 1938 metros de largo y 45 de ancho (DGAC, 2022).



Figura 6. Aeródromo La Florida. Fuente: Google Earth

Aparte de la pista principal, el aeropuerto cuenta con (FAIC, 2021):

- Calles de rodaje Bravo y Charlie, de carpeta asfáltica y perpendiculares a la pista, con dimensiones 96 x 23 metros.
- Calle de rodaje Alfa, perpendicular a la pista, de dimensiones 167 x 7 m, de pavimento flexible.
- Plataforma de aviación comercial, de 300 metros de largo y 100 de ancho aproximadamente, con sectores de asfalto y hormigón.
- Plataforma de aviación general, con forma rectangular de 100 x 36 metros aproximadamente, de pavimento asfáltico.

En la siguiente figura se pueden observar las secciones de pavimentos del aeropuerto:

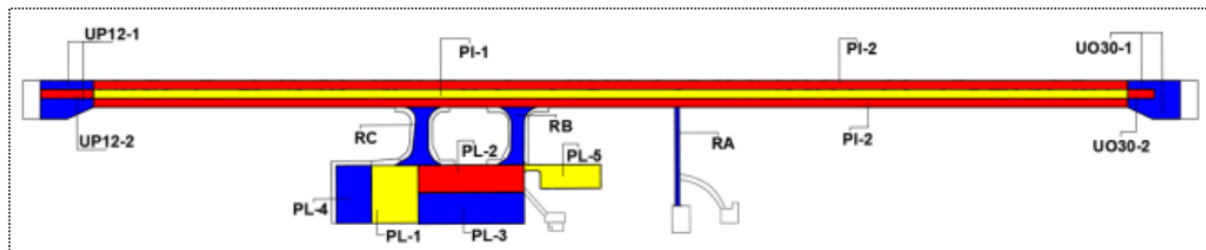


Figura 7. Secciones del aeropuerto.
Fuente: (FAIC, 2021)

En el contexto de este trabajo, solo se utiliza la sección PI-1, que corresponde a la parte central de la pista de aterrizaje, que corresponde a la sección que más tráfico aéreo recibe. En la auscultación del año 2021 se encontraron los siguientes deterioros:

Tabla 4. Deterioros encontrados en la sección PI-1.
Fuente: FAIC (2021)

Deterioros Pista Pi-1 La Florida		
Tipo De Deterioro	Cantidad	Unidad
Piel De Cocodrilo	15	M2
Grietas Longitudinales Y Transversales	1929	M

La curva de deterioro obtenida para la pista PI-1 es la siguiente:

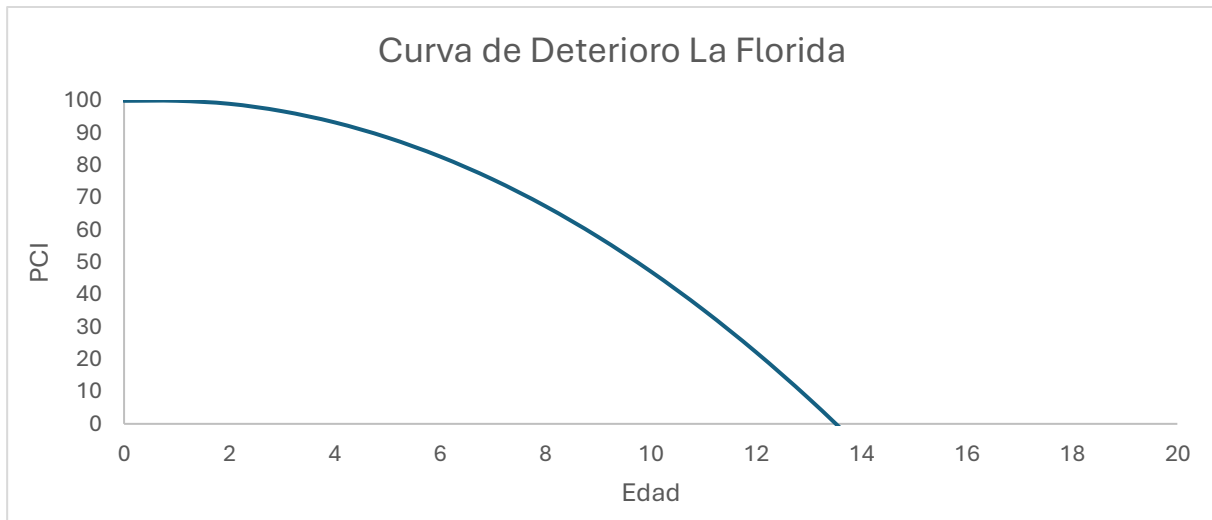


Figura 8. Curva de deterioro PI-1

El motivo de la elección de este aeródromo para el caso estudio es debido a que es el recinto aeroportuario de la red primaria del cual se tiene la mayor cantidad de información relacionada al estado de los pavimentos, por lo que se pueden realizar modelos de deterioro que tienen una mayor precisión para así implementar planes de M&R que sean más efectivos y poder así mantener un nivel de servicio óptimo.

4.2 Planes de mantenimiento

Los planes de mantenimiento son documentos técnicos que contiene las distintas acciones a realizar programadas durante un periodo determinado de tiempo para preservar los pavimentos. Estos planes contienen información relacionada al momento y la ubicación en donde un tratamiento específico debe ser aplicado, para así mantener el pavimento en un nivel de servicio aceptable, ajustado al presupuesto disponible (Hajek, Hall, & Hein, 2011).

Los momentos en los cuales se debe intervenir dependen de los niveles de servicio que se busquen alcanzar y mantener, y del PCI crítico establecido. El nivel de servicio es la condición promedio la cual se busca mantener en un aeropuerto, expresada en PCI, y entre más altos se buscan mantener, la necesidad de M&R es mayor, y esto incurre en mayores costos económicos. Dependiendo del pavimento, este valor puede cambiar. Por ejemplo, la pista de aterrizaje tiende a tener mayores estándares comparada con la calle de rodaje y la plataforma (Hajek, Hall, & Hein, 2011). El PCI crítico es el valor más bajo de PCI que puede alcanzar el pavimento para no realizar rehabilitaciones mayores. Los umbrales utilizados de PCI crítico se encuentran entre 75 y 50 para aeropuertos de la red primaria (Olea, 2021). En el caso de Chile, debido a que la implementación de un SGPA se encuentra en etapas tempranas, se recomienda que los umbrales de PCI a utilizar sean de 70 para rehabilitaciones y 55 para la reconstrucción (Salazar, 2021).

Los planes de mantenimiento se pueden realizar para corto y largo plazo. Los planes a corto plazo son de 5 años o menos, y por simplicidad se asume que los procesos analíticos utilizados para esta planificación no consideran la evaluación de tratamientos alternativos en los años futuros. Los planes a largo plazo son para horizontes de tiempo mayores a 5 años, y si pueden considerar la generación y evaluación de tratamientos alternativos en los años futuros (Hajek, Hall, & Hein, 2011).

4.2.1 Planificación a corto plazo

El procedimiento para elaborar un plan de M&R a corto plazo es el siguiente (Hajek, Hall, & Hein, 2011):

- **Actualización del inventario del pavimento:** Esta actualización incluye los resultados de todos los proyectos recientes relacionados al pavimento y modificaciones a la estructura de este.
- **Definir el alcance de los trabajos:** Tratamientos que pueden ser planeados con al menos un año de anticipación, ya sean preventivos o de rehabilitación.
- **Revisar las necesidades de cada sección de pavimento:** Se analiza cada sección del pavimento para determinar si requiere de alguna intervención en los próximos cinco años, o en el horizonte de tiempo definido. Las decisiones que se toman se basan en los niveles de servicio establecidos y los valores de PCI críticos. Además, se considera el deterioro futuro del pavimento.
- **Selección de tratamientos:** Los tratamientos de mantenimiento preventivo se determinan según el PCI de la sección.

4.2.1.1 Priorización a corto plazo

La prioridad muestra la razón por la cual se recomienda la aplicación de un tratamiento. Los niveles de prioridad están relacionados con los niveles de servicio utilizados para identificar la necesidad de intervenir en los pavimentos, y son los siguientes (Hajek, Hall, & Hein, 2011):

- **Priorización a nivel de seguridad:** La seguridad es lo más importante que debe priorizar un aeropuerto, y esto incluye los tratamientos de M&R que se necesitan para mantenerla. A nivel de pavimentos, esto puede incluir, por ejemplo, tratamientos para reparar desprendimiento en pavimentos flexibles.
- **Priorización a nivel crítica:** Este nivel incluye tratamientos necesarios para mantener un nivel mínimo de servicio aceptable
- **Priorización a nivel costo-efectivo:** Este nivel incluye proyectos en donde el momento de implementación de los tratamientos es importante para la costo-efectividad. Usualmente, incluye mantenimientos preventivos para evitar mayores deterioros.
- **Priorización a nivel de objetivo:** Este nivel incluye proyectos de M&R para alcanzar o mantener cierto nivel de servicio.

Los proyectos que pertenecen al nivel crítico para la pista de aterrizaje tienen una prioridad mayor que los proyectos desarrollados en el nivel costo-efectivo aplicados a una calle de rodaje, por ejemplo.

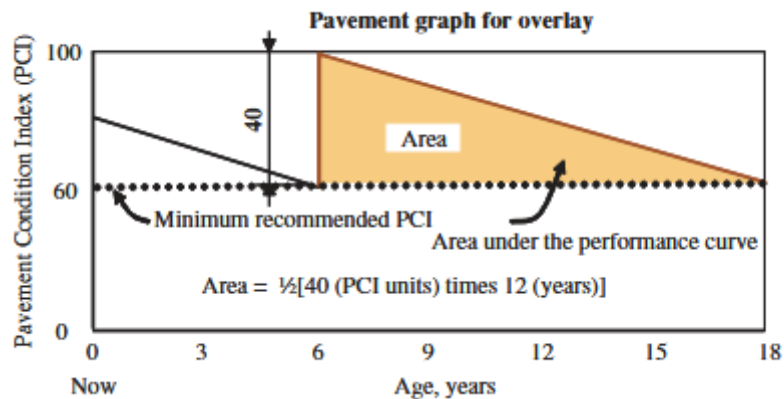
Es más fácil clasificar los proyectos que pertenecen a un mismo tipo de pista o mismo nivel de prioridad que cuando se cruzan los distintos niveles de prioridad o los distintos tipos de pista. Para combatir esto, se desarrollan categorías de priorización. En el contexto de esta memoria, no es parte del alcance el desarrollo de una categorización de los distintos niveles de prioridad.

4.2.2 Planificación a largo plazo

La planificación a largo plazo busca mejorar la toma de decisiones económicas e ingenieriles. Permite proyectar escenarios futuros, dependiendo de la confiabilidad de los modelos de deterioro y de la elaboración de alternativas factibles. La planificación a largo plazo puede considerar varias opciones para cada sección del pavimento, esto resulta en un gran número de combinaciones de tratamientos y distintos años en los cuales se puede intervenir (Hajek, Hall, & Hein, 2011).

4.2.2.1 Priorización a largo plazo

La priorización a largo plazo tiende a estar basada en la costo-efectividad, que es la relación entre la efectividad (beneficio) y los costos asociados a los tratamientos. La costo-efectividad se basa en los costos del ciclo de vida. La efectividad para una sección de un aeropuerto se puede calcular multiplicando el área bajo la curva de deterioro, el número de despegues de aeronaves y el área de la sección del pavimento (Tighe, Karim, Herring, Chee, & Moughabghab, 2004). En la siguiente figura se observa el cálculo de la efectividad del pavimento.



*Figura 9. Cálculo de la efectividad de un tratamiento.
Fuente: (Hajek, Hall, & Hein, 2011)*

El área bajo la curva de deterioro representa el efecto de la condición del pavimento que está sobre el PCI crítico. El número de despegues representa la cantidad de aeronaves que se benefician de un pavimento mejorado, y el área de la sección del pavimento se utiliza para contabilizar las diferencias en tamaño y espesor de las distintas secciones del pavimento.

No se consideran la priorización a nivel de seguridad ni la priorización a nivel crítico, porque mantener estos niveles es obligatorio. El nivel de priorización objetivo y el costo-efectivo se consideran simultáneamente porque ambos se priorizan de manera costo-efectiva. El utilizar un análisis costo-efectivo facilita la proyección de los impactos de los tratamientos de M&R durante la vida del proyecto (Hajek, Hall, & Hein, 2011).

En el contexto de esta memoria, se busca confeccionar planes de M&R que abarquen 20 años de vida útil del pavimento, buscando optimizar la efectividad de los tratamientos.

4.3 Metodologías de optimización

Actualmente, la DAP se basa en experiencias anteriores para seleccionar los tratamientos a realizar sobre un pavimento, sin analizar diferentes alternativas en base a distintos criterios definidos. La problemática de seleccionar el tratamiento óptimo para un pavimento es un aspecto que la DAP no ha desarrollado, por lo que es necesario generar una herramienta para llevar a cabo este proceso (Salazar, 2021).

Se desarrollan dos metodologías de optimización para ser comparadas, la optimización manual y la optimización multiobjetivo.

4.3.1 Optimización manual

La optimización manual consiste en desarrollar de manera manual un plan de mantenimiento observando el comportamiento de la curva de deterioro para determinar el momento en el cual intervenir. La elección del tratamiento depende de las observaciones en la auscultación realizada para determinar el PCI y su evolución visualizada en la curva de deterioro.

Este tipo de optimización tiende a ser más conservadora que una optimización genética, esto se debe a que el momento de intervención depende del PCI crítico que se defina, lo que provoca que esta metodología sea más rígida que una optimización realizada con un algoritmo.

4.3.2 Optimización genética

Idealmente, un plan de mantenimiento de pavimento aeroportuario busca mantener el pavimento con un buen nivel de servicio, utilizando un presupuesto bajo, una cantidad baja de recursos económicos, y evitando causar un impacto social y ambiental muy alto. Lamentablemente, estos requisitos tienden a ser contradictorios. Por ejemplo, el mantener los pavimentos en un nivel de servicio muy alto tiende a mantener los costos económicos altos, y un plan de mantenimiento con muchas intervenciones mantendría la pista cerrada, siendo un inconveniente para las comunidades que utilizan estos aeropuertos. Para facilitar la toma de decisiones en los planes de mantenimiento, se desarrollan metodologías basadas en algoritmos genéticos para poder generar e identificar mejores soluciones que puedan satisfacer todas las necesidades.

Un tipo de optimización heurística son los algoritmos genéticos. Los algoritmos genéticos se basan en los principios del darwinismo. Existen diferencias importantes entre las metodologías de optimización genéticas con las metodologías clásicas. Por ejemplo, los algoritmos genéticos funcionan utilizando una población de posibles soluciones en vez de una solución única cada vez. El utilizar una población de soluciones permite a los algoritmos genéticos identificar y examinar distintas soluciones. Además, estos algoritmos utilizan reglas de transición probabilística para generar nuevas soluciones desde la población inicial. Otra diferencia importante es que los algoritmos genéticos pueden comparando con la función objetivo las distintas soluciones. Este proceso no se basa en información de la gradiente, por lo que es directo y más versátil al no necesitar de diferenciabilidad, convexidad u otras funciones auxiliares (Fwa, Chan, & Hoque, 2000).

Un algoritmo genético comienza su búsqueda con una población de soluciones usualmente creada aleatoriamente, pero en este trabajo se utilizan las soluciones de la optimización manual como población inicial. Posteriormente, el algoritmo entra en un proceso iterativo de actualización de la población para crear una nueva población utilizando cuatro operadores principales: mutación, selección, recombinación y preservación elitista. El proceso acaba cuando se alcanza uno o más criterios de terminación (Deb, 2011).

Los miembros de la población son evaluados, los operadores de selección escogen las soluciones que tienen una probabilidad mayor de llenar un pool genético. Para este propósito, se utilizan distintos operadores que evalúan distintas soluciones. Se realiza una selección por torneos, en donde dos soluciones aleatorias son seleccionadas y la mejor de las dos es seleccionada para formar el pool genético.

Los operadores son utilizados para crear una población modificada. El propósito de la recombinación es escoger dos o más soluciones (padres) aleatoriamente del pool genético y crear una o más soluciones intercambiando información de los padres. El operador de recombinación es aplicado con una probabilidad ($p_c \in [0,1]$), indicando la proporción de los miembros de la población participando en la recombinación. El resto de la población ($1 - p_c$) es copiado a la población modificada (hijo).

Cada solución hijo creada por la recombinación, es alterada por un operador de mutación. Cada variable es mutada con una probabilidad de mutación p_m , normalmente siendo $1/n$ (n siendo la cantidad de variables), para que en promedio una variable sea mutada por solución. El operador elitista combina la población anterior con la nueva y escoge que soluciones mantener para la población combinada. Esta operación asegura que el algoritmo tenga un rendimiento monótonamente no degradante. Finalmente, se necesita un criterio de terminación. Usualmente, un número predeterminado de generaciones si utiliza como criterio de terminación. Cuando se busca alcanzar algún objetivo, el algoritmo se detiene cuando una solución alcanza lo buscado (Deb, 2011).

4.3.2.1 Datos de entrada

Como datos de entrada en el algoritmo, se considera la ecuación de deterioro para la pista PI-1 del Aeródromo de La Florida, los tratamientos a considerar, su aumento de PCI, y el costo que tiene su aplicación. El costo de aplicación proviene del cálculo entre el costo de cada tratamiento, especificado en 2.2.4, y los deterioros, los cuales se encuentran en la Tabla 4. Para el sellado de grietas, se utiliza la cantidad de grietas transversales y longitudinales, mientras que, para el resto de los tratamientos, al ser localizados globales, se utiliza el área total de la pista. La ecuación de la pista es la siguiente:

$$-0.0000001 * (2452.9 * x)^2 + 0.0003 * (2452.9 * x) + 100$$

En la siguiente tabla se pueden encontrar los datos de entrada:

Tabla 5. Datos de entrada

LISTADO TRATAMIENTOS					
TRATAMIENTO	AUMENTO PCI	COSTO/UNIDAD [UF]	METRADO	COSTO TOTAL [UF]	UNIDAD
HACER NADA	0	0	0	0	N/A
RIEGO NEBLINA	5	0.062	26400	1636	m2
SELLADO DE GRIETAS	14	0.197	1929	380	m
LECHADA ASFÁLTICA	22	0.13	26400	3432	m2
FRESADO	100	1.022	26400	26980	m2

4.3.2.2 Restricciones consideradas

Para poder aplicar el algoritmo genético, primero se deben definir ciertas restricciones para que este pueda entregar resultados acordes a lo que se busca obtener, que en este caso sería planes de M&R para un horizonte de 20 años. Las restricciones son las siguientes:

- Si el valor del PCI baja de 55, el plan de mantenimiento se descarta.
- Si el costo total supera el valor del presupuesto definido, que en este caso será el precio del fresado y recapado (26980), el plan se descarta.
- Si se aplican tratamientos en años consecutivos, exceptuando el riego de neblina si al año siguiente se aplica un tratamiento distinto, el plan se descarta.
- Si se aplica riego de neblina en años consecutivos, el plan se descarta.
- Si se repite la aplicación de un sellado de grietas con menos de tres años de diferencia, se descarta el plan.
- Si se repite la aplicación de lechada asfáltica con menos de cuatro años de diferencia, se descarta el plan.
- Si se repite la aplicación de un fresado y recapado con menos de 10 años de diferencia, se descarta el plan.
- Si se realiza un tratamiento cuando el PCI es mayor o igual a 85, se aplica una penalización económica, que equivale al costo del tratamiento multiplicado por 0,6. Se agrega al costo total.

5 Resultados

5.1 Planes de optimización manuales

Los planes de M&R se presentan a continuación. Los gráficos representan el efecto de los tratamientos en el pavimento, mostrando el deterioro y los aumentos de PCI de manera visual. Las flechas representan la aplicación de un tratamiento al pavimento. Las tablas representan el cálculo de la efectividad de la curva, utilizando la suma de las áreas bajo la curva de cada tramo, que representan la efectividad de cada tratamiento.

Plan 1: Aplicación de lechada asfáltica cada 6 años, comenzando en el año 3.

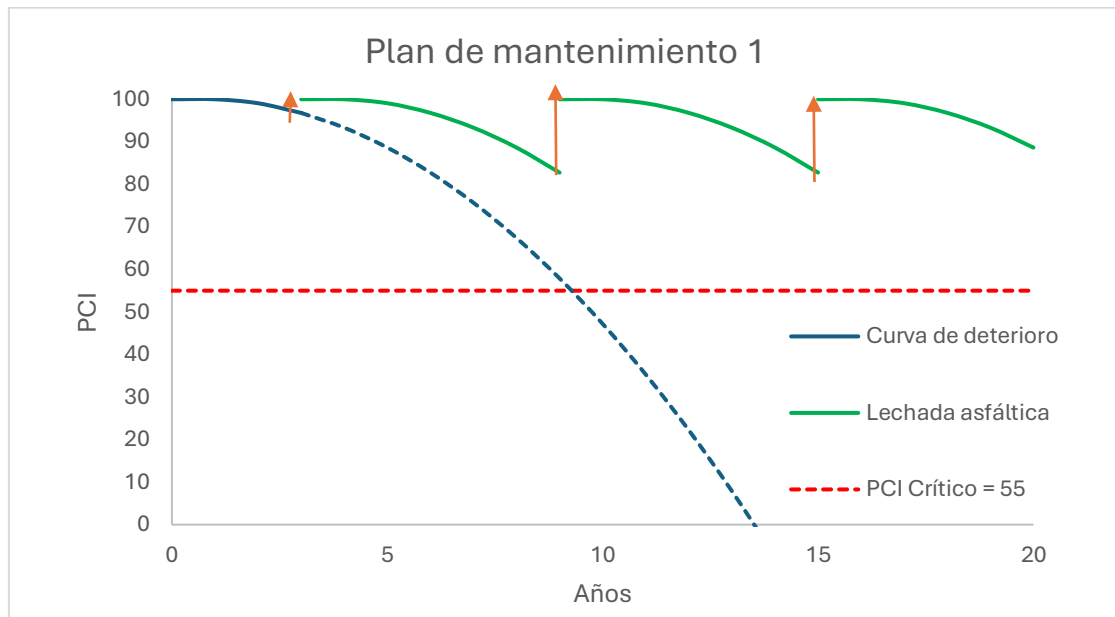


Figura 10. Gráfico del plan de mantenimiento 1

En donde el área bajo la curva se calcula de la siguiente manera:

Tabla 6. Área bajo la curva plan de mantenimiento 1

Tramo	Área bajo la curva
0-3	298
3-9	570
9-15	570
15-20	484
Total	1922

Plan 2: Sellado de grietas y fresado cuando alcance un PCI de 80, y después del año 10 solo sellos de grieta cuando alcanza un PCI de 75

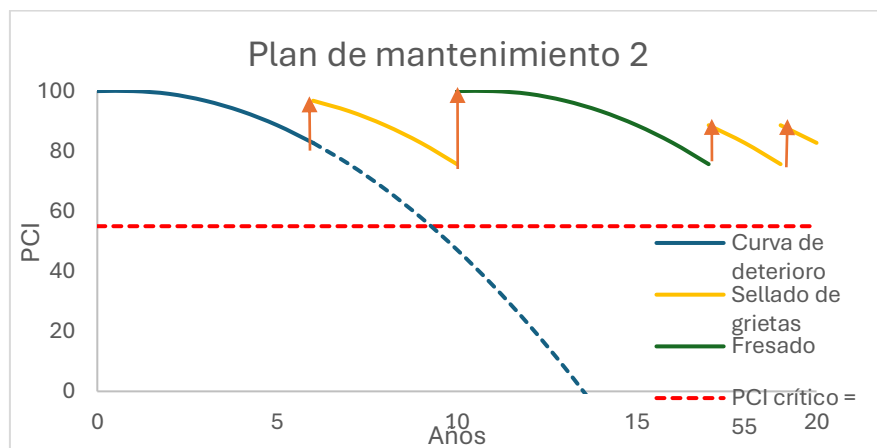


Figura 11. Gráfico del plan de mantenimiento 2

En donde el área bajo la curva se calcula de la siguiente manera:

Tabla 7. Área bajo la curva plan de mantenimiento 2

Tramo	Área bajo la curva
0-7	484
7-10	351
10-17	649
17-19	165
19-20	165
Total	1815

Plan 3: Alternar la aplicación de riego neblina y sellado de grietas cuando se alcanza un PCI de 75.

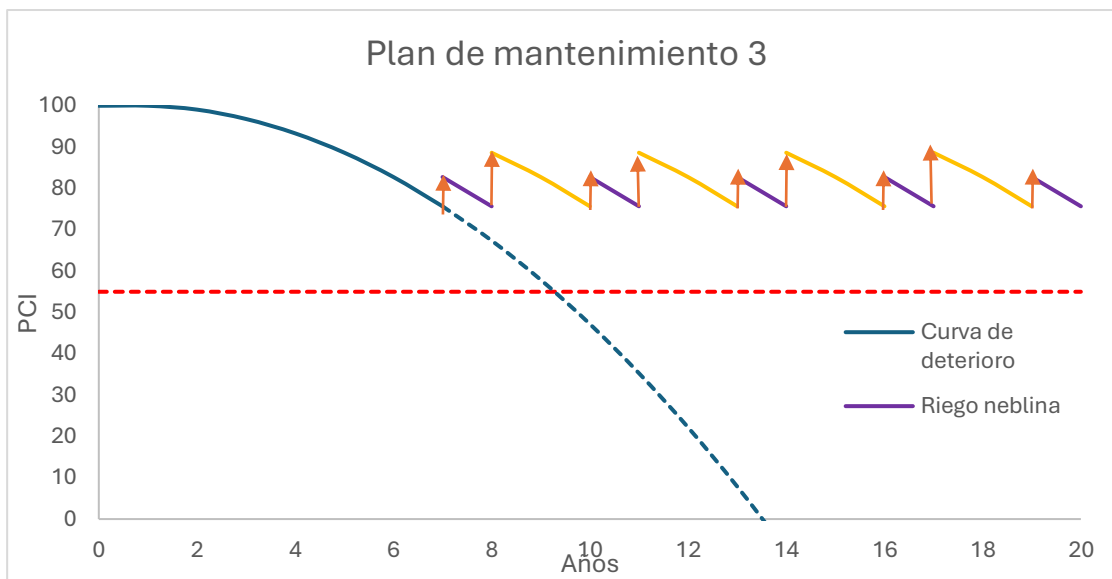


Figura 12. Gráfico del plan de mantenimiento 3

En donde el área bajo la curva se calcula de la siguiente manera:

Tabla 8. Área bajo la curva plan de mantenimiento 3

Tramo	Área bajo la curva
0-7	649
7-8	79
8-10	165
10-11	79
11-13	165
13-14	79
14-16	165
16-17	79
17-19	165
19-20	79
Total	1706

Plan 4: Aplicación de riego de neblina ya lechada asfáltica cada 6 años, comenzando en el año 6.

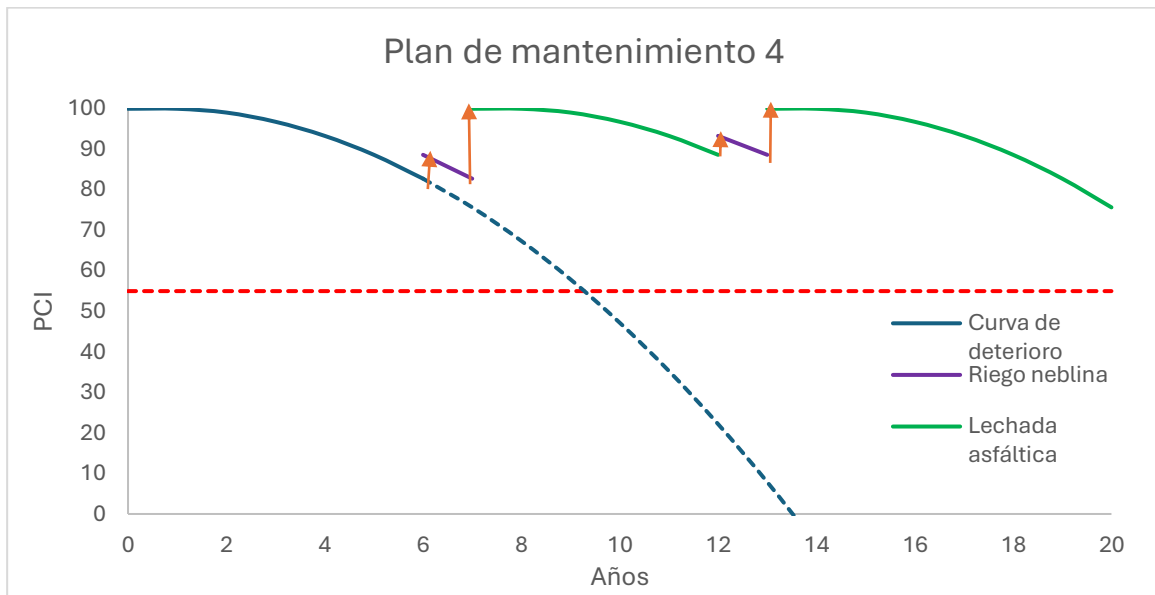


Figura 13. Gráfico de plan de mantenimiento 4.

En donde el área bajo la curva se calcula de la siguiente manera:

Tabla 9. Área bajo la curva plan de mantenimiento 4

Tramo	Área bajo la curva
0-6	570
6-7	86
7-12	484
12-13	91
13-20	649
Total	1880

Plan 5: Aplicar sellado de grietas cuando alcance un PCI de 75, y posteriormente aplicar sellado de grietas cada 6 años.

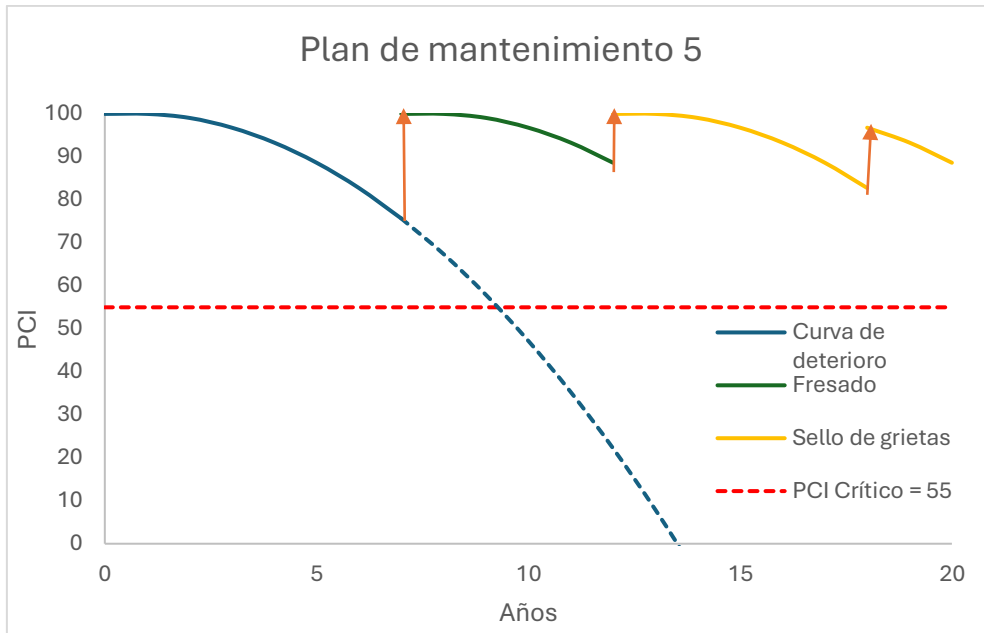


Figura 14. Gráfico plan de mantenimiento 5

En donde el área bajo la curva se calcula de la siguiente manera:

Tabla 10. Área bajo la curva plan de mantenimiento 5

Tramo	Área bajo la curva
0-7	649
7-12	484
12-17	570
17-20	186
Total	1890

Plan 6: Lechada asfáltica cuando alcanza un PCI de 83.

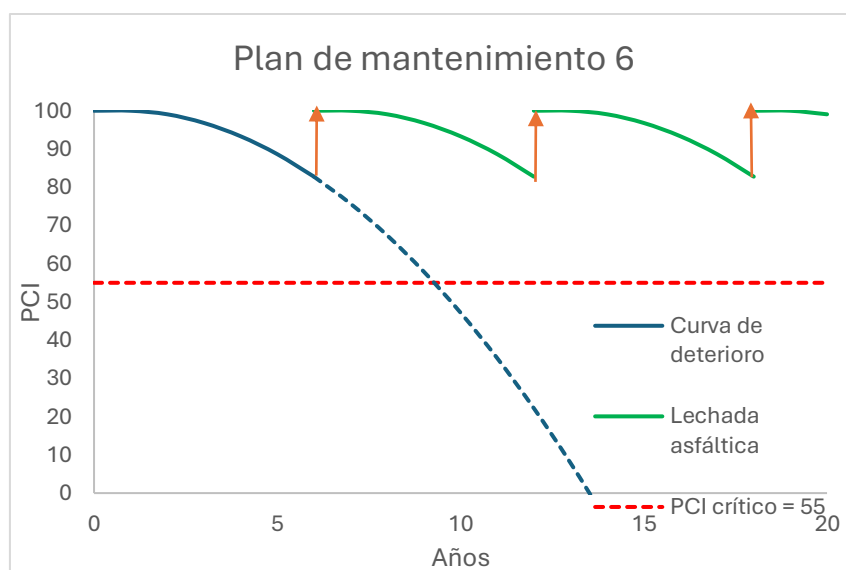


Figura 15. Gráfico plan de mantenimiento 6

En donde el área bajo la curva se calcula de la siguiente manera:

Tabla 11. Área bajo la curva plan de mantenimiento 6.

Tramo	Área bajo la curva
0-6	570
6-12	570
12-18	570
18-20	200
Total	1910

Plan 7: Aplicar lechada asfáltica en el año 3, y posteriormente riego de neblina y sellados de grieta cuando el PCI llegue a 83.

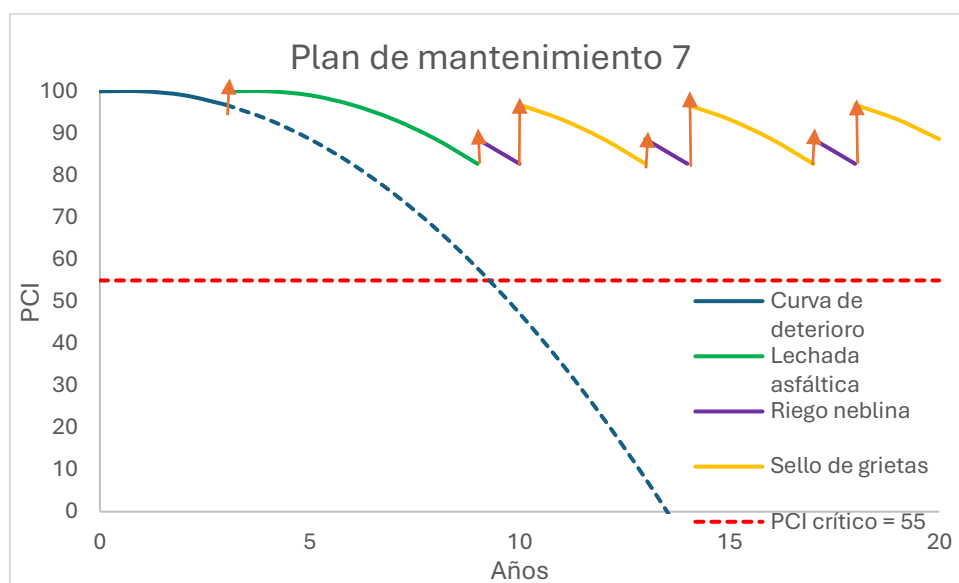


Figura 16. Gráfico plan de mantenimiento 7

En donde el área bajo la curva se calcula de la siguiente manera:

Tabla 12. Área bajo la curva plan de mantenimiento 7

Tramo	Área bajo la curva
0-3	298
3-9	570
9-10	86
10-13	272
13-14	86
14-17	272
17-18	86
18-20	186
Total	1856

Plan 8: Realizar fresados cuando se alcanza un PCI de 67.

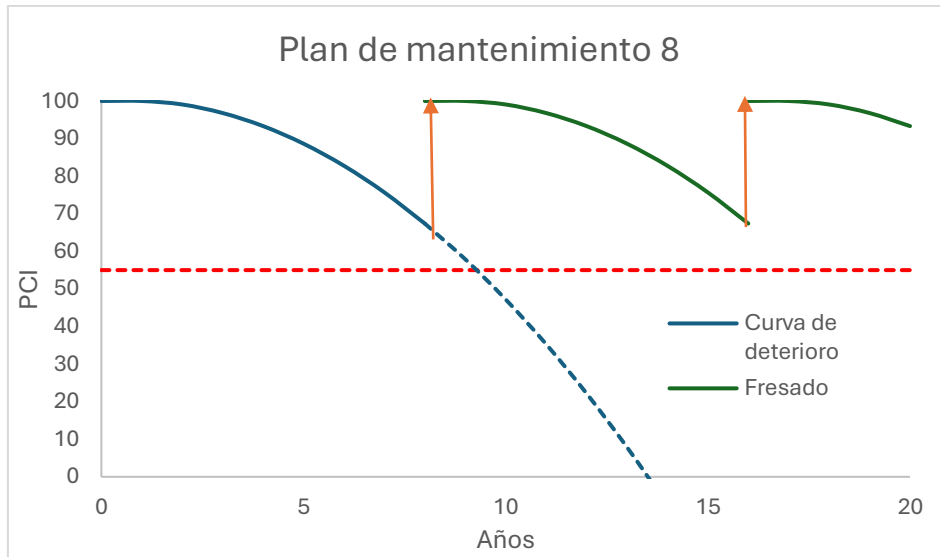


Figura 17. Gráfico plan de mantenimiento 8

En donde el área bajo la curva se calcula de la siguiente manera:

Tabla 13. Área bajo la curva plan de mantenimiento 8

Tramo	Área bajo la curva
0-8	721
8-16	721
16-20	393
Total	1835

Plan 9: Realizar un sellado de grietas cada cinco años.

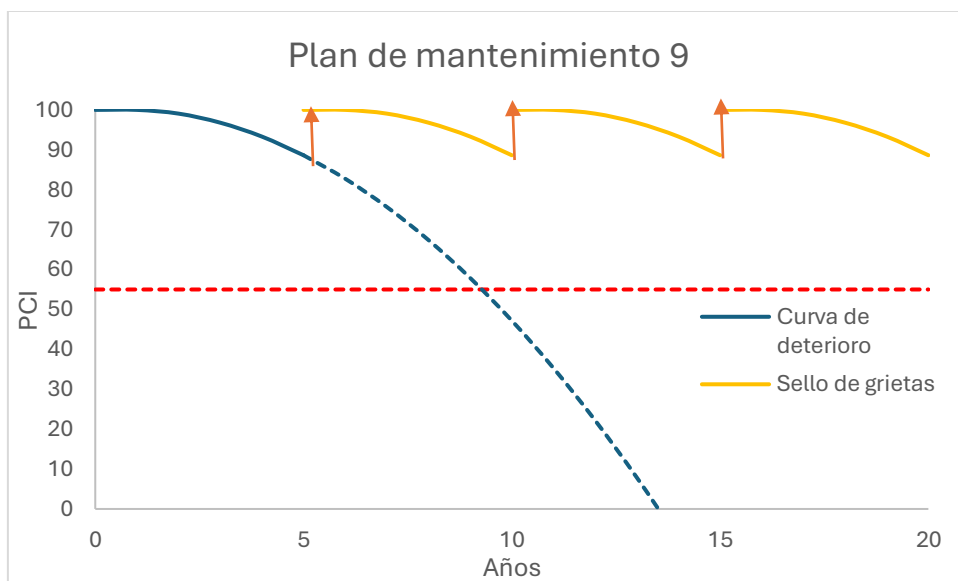


Figura 18. Gráfico plan de mantenimiento 9.

En donde el área bajo la curva se calcula de la siguiente manera:

Tabla 14. Área bajo la curva plan de mantenimiento 9.

Tramo	Área bajo la curva
0-5	484
5-10	484
10-15	484
15-20	484
Total	1937

Plan 10: Aplicar lechada asfáltica en el año 3, y luego alternar entre riego neblina y lechada asfáltica cuando alcance un PCI de 83.

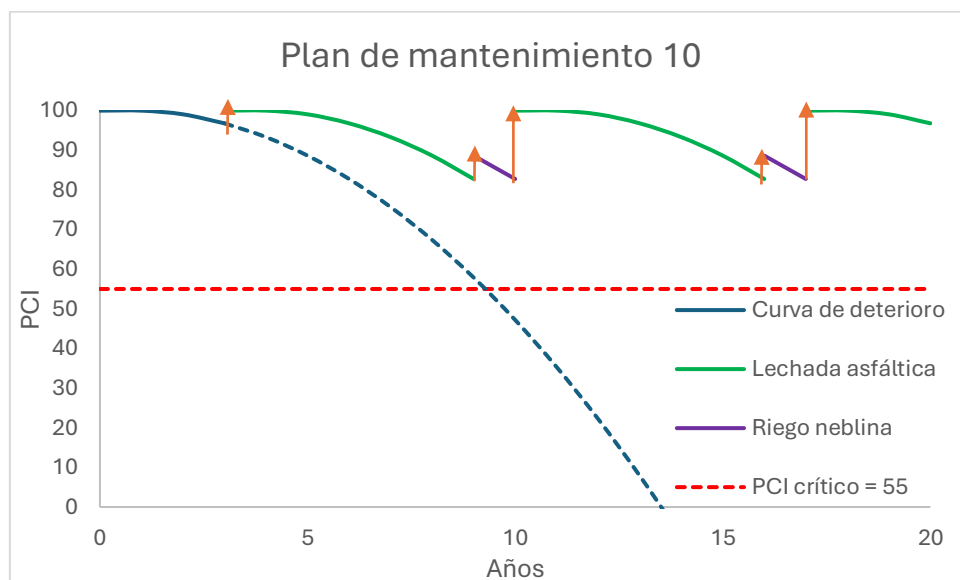


Figura 19. Gráfico plan de mantenimiento 10.

En donde el área bajo la curva se calcula de la siguiente manera:

Tabla 15. Área bajo la curva plan de mantenimiento 10.

Tramo	Área bajo la curva
0-3	298
3-9	484
9-10	86
10-16	484
16-17	86
17-20	298
Total	1736

A continuación, se presenta una tabla resumen de los planes de M&R, detallando las actividades para cada año y su área bajo la curva. Los planes se describen con números, donde cada número corresponde

a un tratamiento distinto. 1 corresponde a no hacer nada, 2 a riego neblina, 3 a sellado de grietas, 4 a lechada asfáltica, y 5 a fresado y recapado.

Tabla 16. Tabla resumen de los planes de mantenimiento manuales.

Número plan	Plan de mantenimiento	Área bajo la curva
1	[1 1 4 1 1 1 1 1 4 1 1 1 1 1 4 1 1 1 1 1]	1922
2	[1 1 1 1 1 1 3 1 1 5 1 1 1 1 1 1 3 1 3 1]	1815
3	[1 1 1 1 1 1 2 3 1 2 3 1 2 3 1 2 3 1 2 1]	1706
4	[1 1 1 1 1 2 4 1 1 1 1 2 4 1 1 1 1 1 1 1]	1880
5	[1 1 1 1 1 1 5 1 1 1 1 3 1 1 1 1 1 3 1 1]	1890
6	[1 1 1 1 1 4 1 1 1 1 1 4 1 1 1 1 1 4 1 1]	1910
7	[1 1 4 1 1 1 1 1 2 3 1 1 2 3 1 1 2 3 1 1]	1856
8	[1 1 1 1 1 1 1 5 1 1 1 1 1 1 1 1 5 1 1 1]	1835
9	[1 1 1 1 3 1 1 1 1 3 1 1 1 1 3 1 1 1 1 1]	1937
10	[1 1 4 1 1 1 1 1 2 4 1 1 1 1 2 4 1 1 1 1]	1736

5.2 Planes de optimización entregados por el algoritmo genético

Al ejecutar el algoritmo genético, se obtiene el siguiente gráfico, cada punto es un plan de mantenimiento distinto.

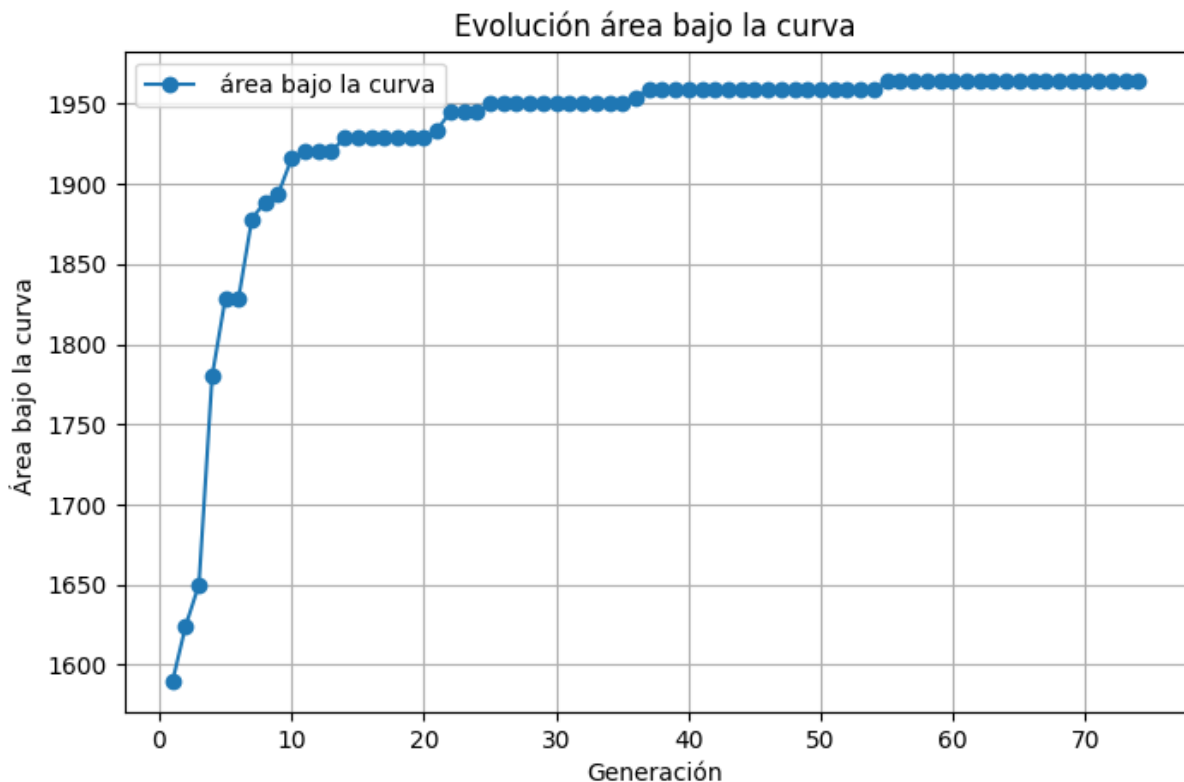


Figura 20. Evolución del área bajo la curva realizada por el algoritmo genético.

Algunos de los planes generados son los siguientes, se omiten los planes que alcanzan una efectividad menor al plan más efectivo manual:

Tabla 17. Planes generados por el algoritmo genético.

Número Plan	Plan de mantenimiento	Área bajo la curva
11	[1 1 1 1 3 1 2 1 1 2 1 2 4 1 2 3 1 2 1 1]	1943.16
12	[1 1 1 1 3 1 2 4 1 3 1 1 4 1 1 2 1 4 1 1]	1944.79
13	[1 1 1 1 3 1 2 4 1 2 3 1 4 1 1 2 1 4 1 1]	1949.87
14	[1 1 1 1 3 1 2 4 1 2 3 1 4 1 2 1 1 2 1 1]	1949.87
15	[1 1 1 1 3 1 2 1 1 2 3 1 4 1 1 3 1 2 1 1]	1950.24
16	[1 1 1 1 3 1 2 4 1 2 1 2 4 1 2 3 1 1 1 1]	1951.4
17	[1 1 1 1 3 1 2 4 1 2 1 2 4 1 2 3 1 1 1 1]	1951.4
18	[1 1 1 1 3 1 2 4 1 2 1 1 4 1 1 3 1 4 1 1]	1953.8
19	[1 1 1 1 3 1 2 4 1 1 3 1 4 1 1 3 1 2 1 1]	1953.8
20	[1 1 1 1 3 1 2 1 1 2 3 1 4 1 2 3 1 2 1 1]	1955.32
21	[1 1 1 1 3 1 2 4 1 2 3 1 4 1 1 3 1 4 1 1]	1958.88
22	[1 1 1 1 3 1 2 4 1 2 3 1 4 1 1 3 1 2 1 1]	1958.88
23	[1 1 1 1 3 1 2 4 1 2 1 1 4 1 2 3 1 2 1 1]	1958.88
24	[1 1 1 1 3 1 2 4 1 2 1 2 4 1 2 3 1 2 1 1]	1963.97
25	[1 1 1 1 3 1 2 4 1 2 1 2 4 1 2 3 1 4 1 1]	1963.97
26	[1 1 1 1 3 1 2 3 1 2 1 2 4 1 2 3 1 2 1 1]	1963.97
27	[1 1 1 1 3 1 2 4 1 2 1 2 3 1 2 3 1 2 1 1]	1963.97
28	[1 1 1 1 3 1 2 4 1 3 1 2 4 1 2 3 1 2 1 1]	1963.97

En donde algunos de sus gráficos son los siguientes, se grafica solo un plan si es que varios alcanzan una misma efectividad:

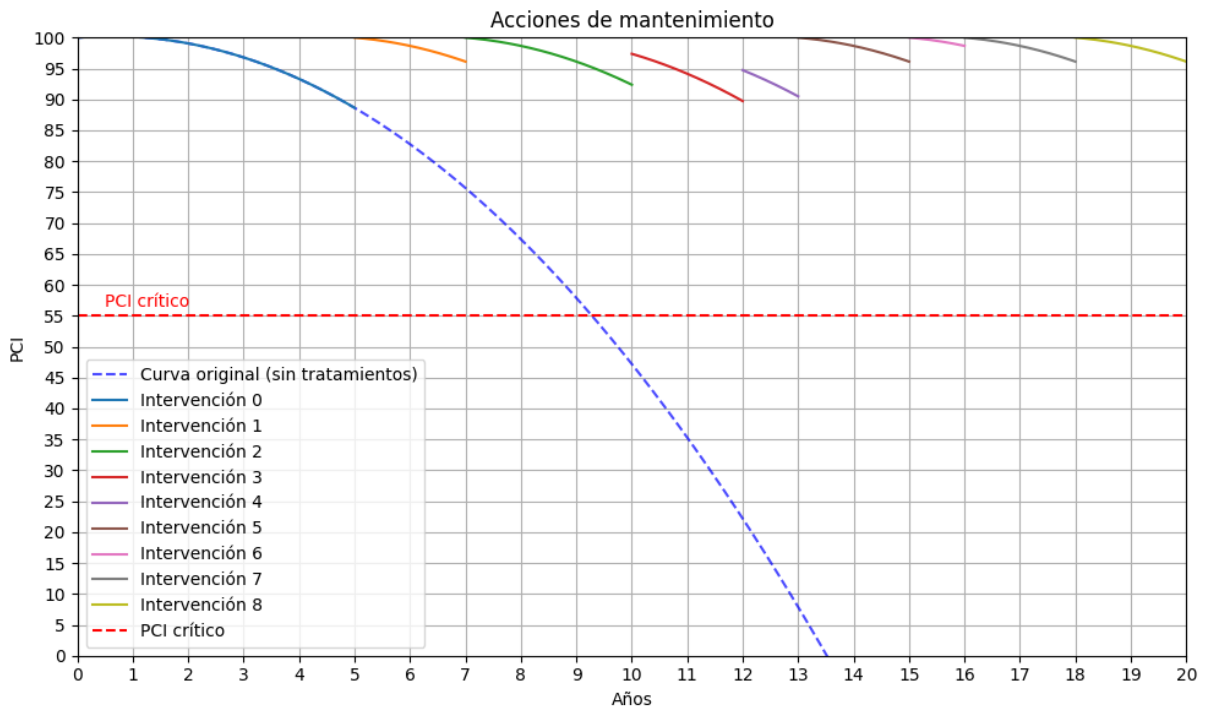


Figura 21. Gráfico del plan 11.

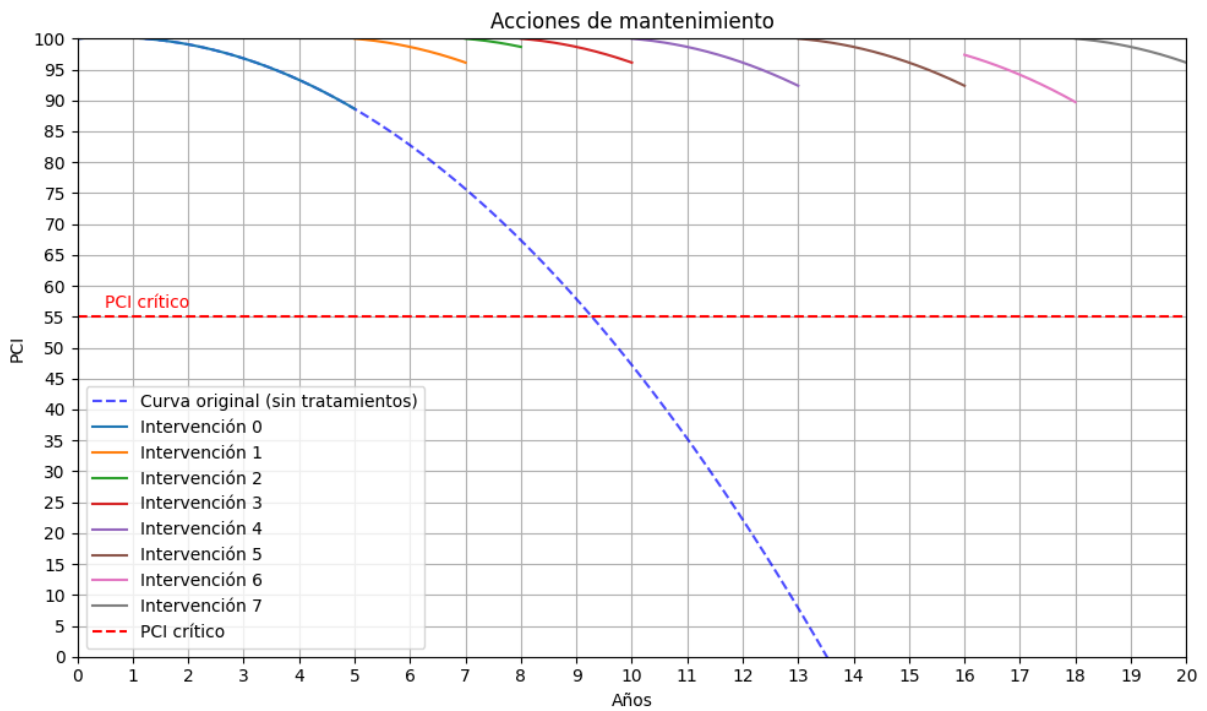


Figura 22. Gráfico del plan 12.

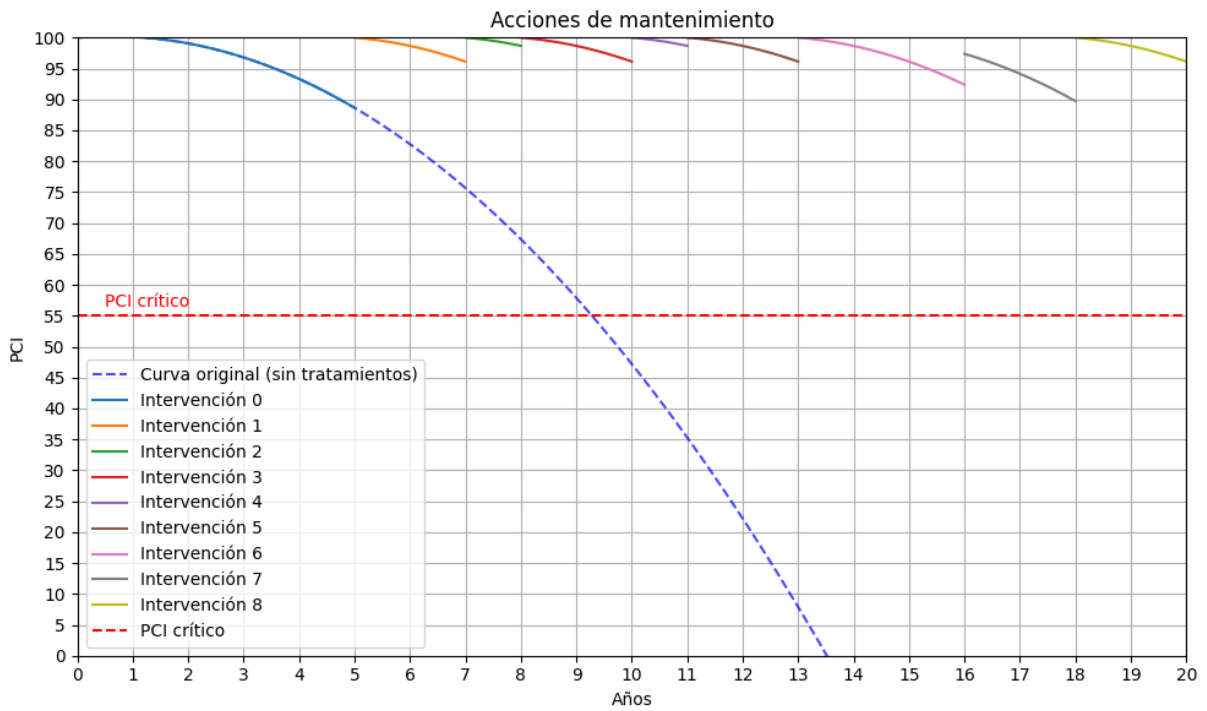


Figura 23. Gráfico del plan 13

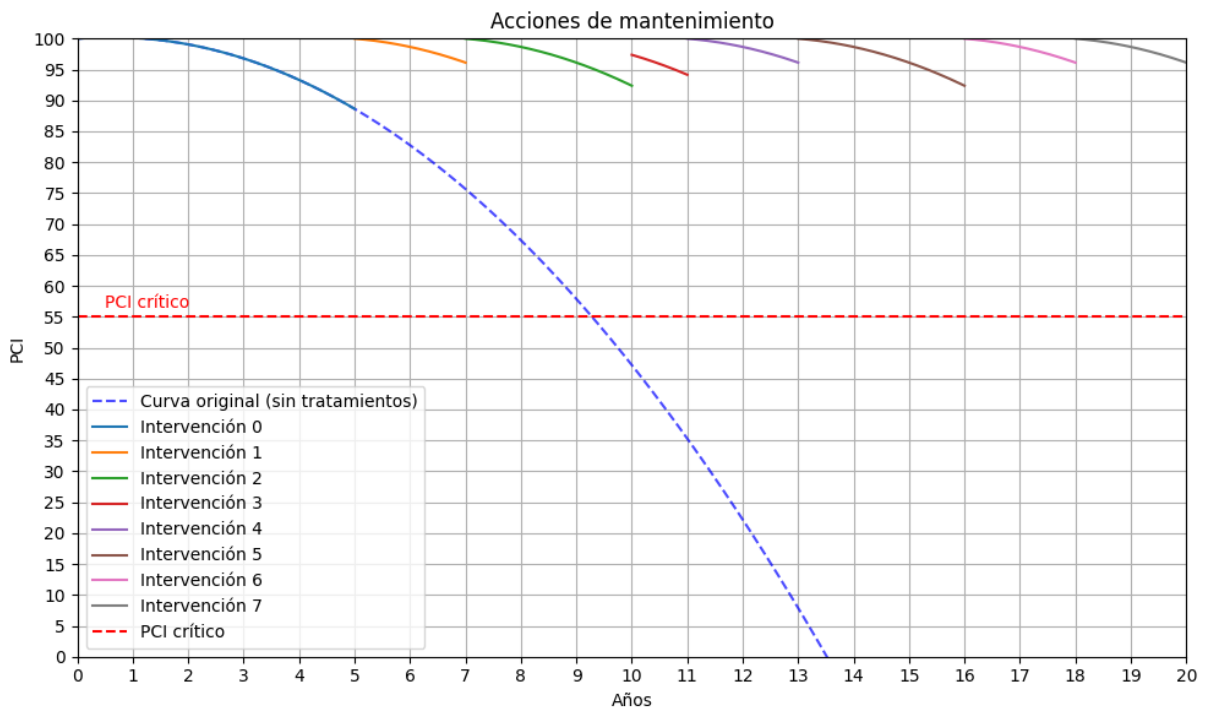


Figura 24. Gráfico del plan 15

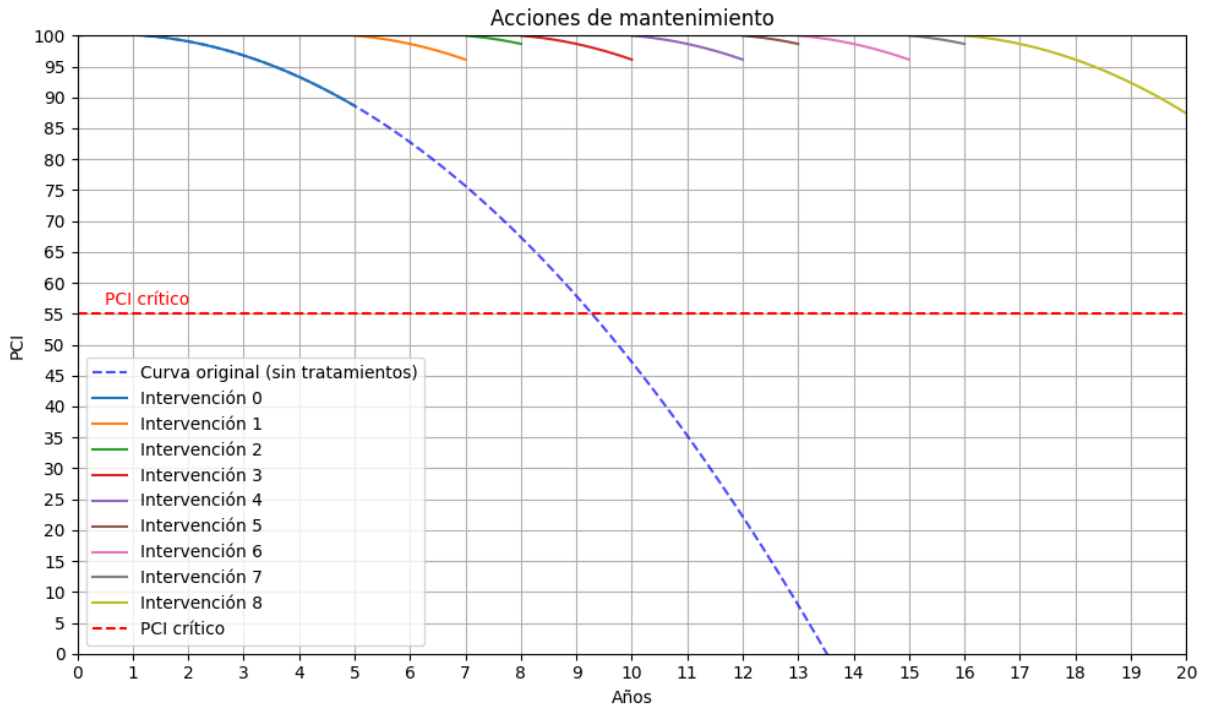


Figura 25. Gráfico del plan 16.

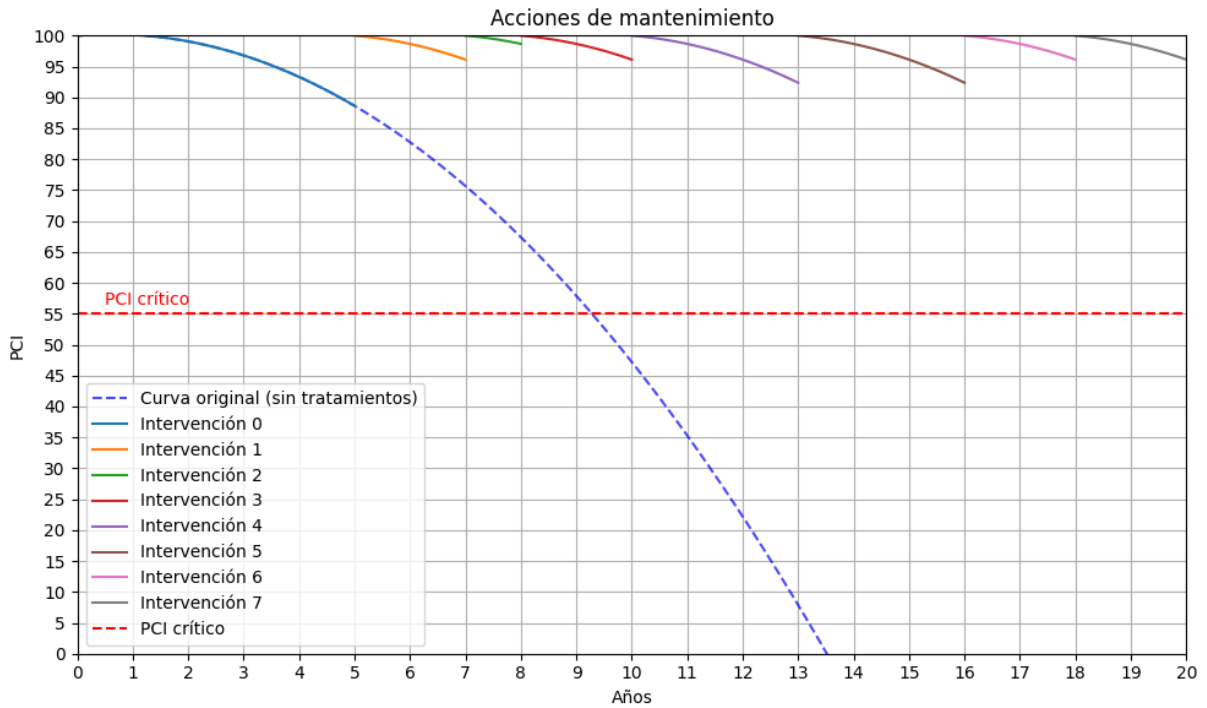


Figura 26. Gráfico del plan 18.

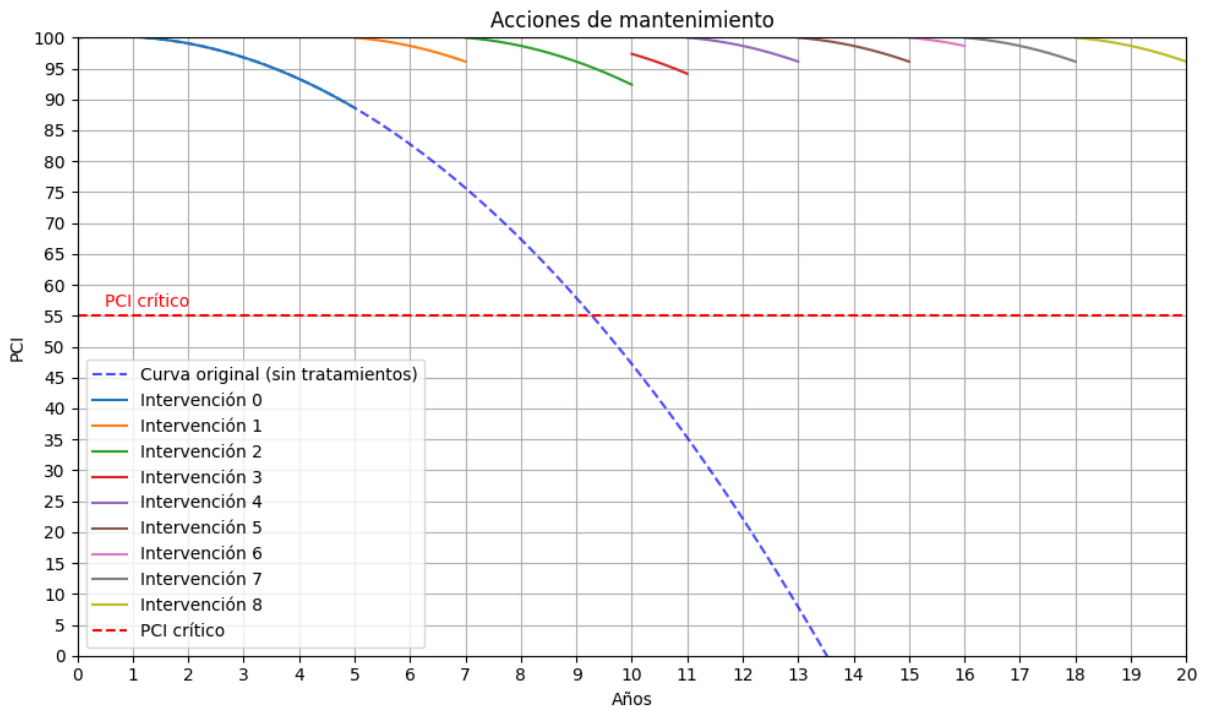


Figura 27. Gráfico del plan 20.

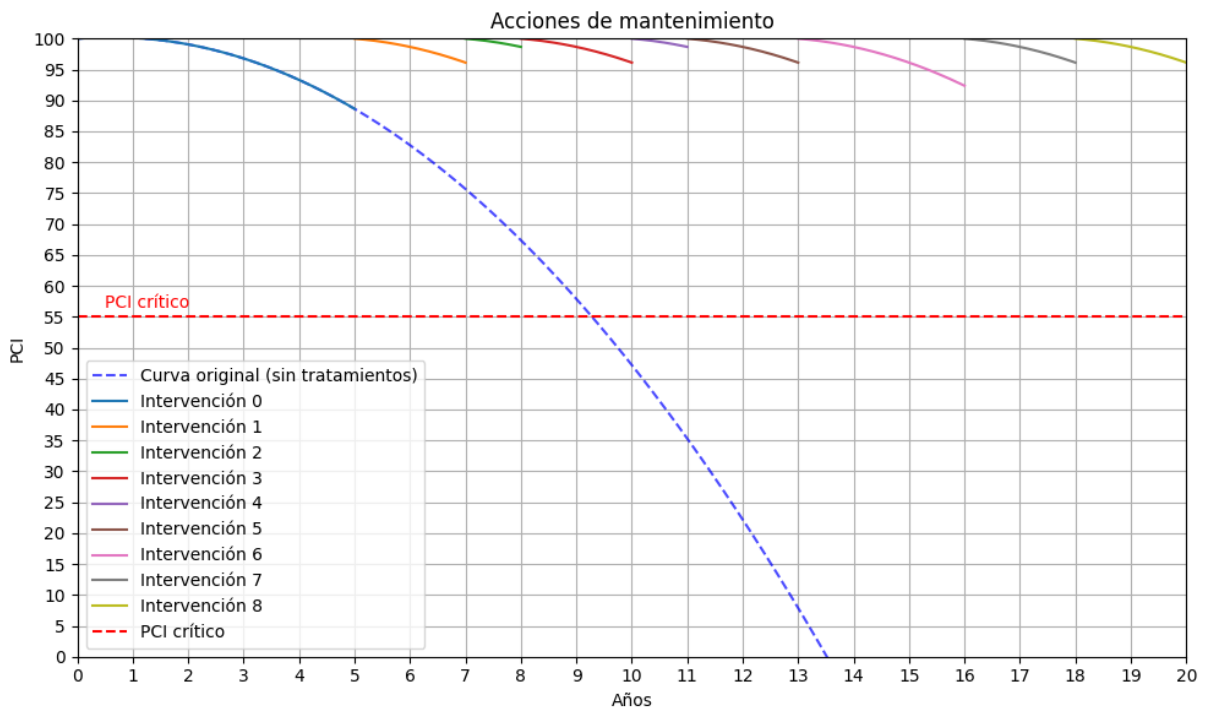


Figura 28. Gráfico del plan 21.

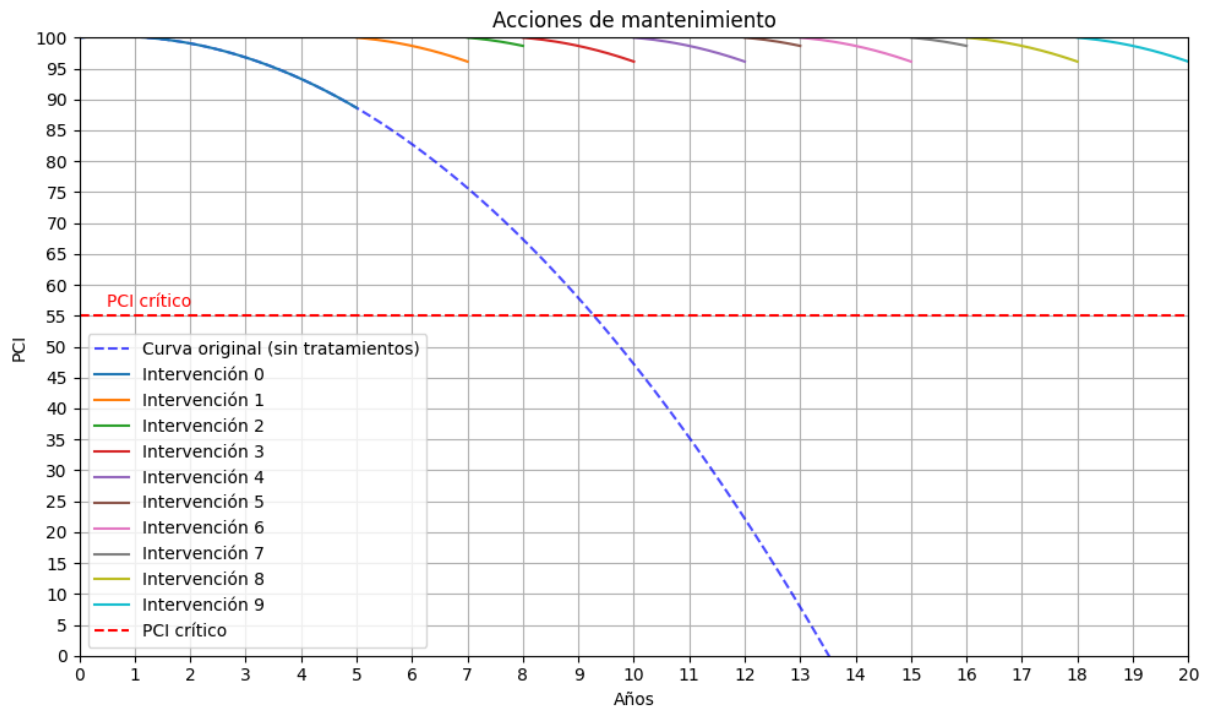


Figura 29. Gráfico del plan 24.

6 Discusión

Se tienen distintos planes de M&R elaborados para la pista PI-1 del Aeródromo de La Florida. Los planes manuales se basan en distintos enfoques y aplicación de tratamientos. El plan 1 solo considera la aplicación de un tratamiento global, que en este caso es la lechada asfáltica, y comenzando su aplicación en el año 3, debido a que la aplicación temprana de lechada asfáltica ayuda al pavimento a mejorar su resistencia al agrietamiento, fatiga y otros deterioros (Hajj, Loria, Sebaaly, Borroel, & Leiva, 2011).

El plan 2 combina la aplicación de tratamientos globales y locales, como lo son el fresado y el sellado de grietas. Primero, se realiza un sellado de grietas cuando se alcanza un PCI de 80, y los tratamientos posteriores se ejecutan cuando se alcanza un PCI de 75. El plan 3 sigue la misma tendencia que el plan 2, aplicando tratamientos globales y locales en el pavimento, que en este caso serían riegos neblina y sellados de grietas, con un umbral de PCI de 75. El riego neblina se aplica primero debido a que tiene mayor efectividad cuando el pavimento tiene un mayor PCI.

El plan 4 solo aplica tratamientos globales cada 6 años, comenzando en el año 6 del plan de mantenimiento, cuando el PCI alcanza un valor de 83. Para este caso, no se realizan más tratamientos después la última lechada asfáltica realizada ya que al observar el comportamiento de la curva, el PCI tiene un valor lo suficientemente alto para no necesitar una intervención. El plan 5 consiste primero en la aplicación de una rehabilitación mayor, la cual es el fresado y recapado, y posteriormente se aplica lechada asfáltica en el pavimento en un intervalo de 6 años.

El plan 6 consiste solo en la aplicación de lechada asfáltica cuando el PCI alcanza un valor de 83. Distinto es el plan 7, el cual mezcla distintos tipos de intervenciones en el horizonte de 20 años. Primero, comienza con la aplicación de lechada asfáltica en el año 3, y luego alterna entre la aplicación de riego neblina y sellado de grietas cuando el PCI alcanza un valor de 83. El plan 8 no interviene en el pavimento hasta que alcance un PCI de 67, en donde se realiza un fresado y recapado, volviendo a alcanzar un PCI de 100. En un horizonte de 20 años, este tratamiento se debe realizar dos veces.

El plan 9 realiza solo sellados de grietas cada 5 años, independiente del valor de PCI. El plan 10 es similar al plan 4 respecto a los tratamientos que se utilizan, con la diferencia de que primero se realiza

una lechada asfáltica en el año 3, y después se alterna la aplicación de riego neblina y lechada asfáltica cuando se alcanza un PCI de 83.

Al observar los valores de área bajo la curva de la Tabla 16, se puede visualizar la diferencia de efectividad entre los distintos planes. Los planes que tienen una mayor cantidad de intervenciones tienden a tener una menor efectividad, como es el caso del plan 3. Lo mismo ocurre para los casos con bajas intervenciones, o intervenciones cuando se encuentra muy deteriorado el pavimento, como es en el caso del plan 8 o 10. Los planes manuales que tienden a tener los valores de efectividad más altos son los que aplican los tratamientos cuando el PCI está en valores altos, como se observa en el plan 9.

El algoritmo genético logra elaborar planes que alcancen una efectividad mayor que los planes manuales, superando los valores obtenidos de manera manual. Como se puede apreciar en la Figura 20. Evolución del área bajo la curva realizada por el algoritmo genético., la efectividad de los planes va mejorando desde valores por debajo de 1600 de área bajo la curva, hasta alcanzar un máximo de 1963,67. En la Tabla 17 se puede encontrar el detalle de los distintos planes generados. Se encuentran solo los planes que superan en efectividad a los planes desarrollados de manera manual.

Muchos de los planes alcanzan un mismo valor de efectividad, como es el caso de los planes 12 y 13, por ejemplo. Esto se debe a que en el horizonte de tiempo en el cual se interviene es tan pequeño que no afecta si se aplica un tratamiento ya sea en el año 15 o 16, como ocurre en el ejemplo anterior. Algo similar ocurre con los planes 18 y 19, aunque aquí varía el año y el tratamiento a utilizar, pero se alcanza la misma efectividad. La diferencia que tienen es que el plan 18 aplica un riego neblina en el año 10 y una lechada asfáltica en el año 18, mientras que el plan 19 aplica un sellado de grietas en el año 11 y un riego neblina en el año 18. El motivo por el que alcanzan la misma efectividad siendo que utilizan tratamientos distintos es porque la curva de deterioro se encuentra con un PCI lo suficientemente alto para que el tipo de tratamiento utilizado no cause una mayor diferencia técnica.

Un motivo por el cual los planes creados por el algoritmo genético tengan una mayor efectividad que los planes creados de manera manual tiene que ver con el momento de aplicación de los distintos tratamientos. Los planes generados por el algoritmo tienden a intervenir cuando el PCI es muy alto, incluso cuando está por sobre 90. La aplicación de tratamientos cuando el PCI es alto asegura que este se mantenga en un nivel alto, pero el intervenir cuando se tiene un PCI mayor a 85 no presenta una justificación técnica ni económica, ya que el PCI por sobre ese valor es considerado como “excelente” según lo descrito en la Tabla 1, por lo que no es necesario intervenir.

La gran cantidad de planes generados que aplican tratamientos a un pavimento con un PCI alto muestra una limitación del algoritmo genético de un objetivo, ya que las restricciones que se aplican a los planes generados si no cumplen con los criterios determinados en 4.3.2.2, rechazan inmediatamente el plan generado, dejando afuera una gran cantidad de soluciones posibles.

6.1 Contribuciones del trabajo

Este trabajo busca presentar bases para poder mejorar la optimización de los pavimentos de los aeropuertos de la red primaria de Chile. Esto tiene gran importancia, ya que hoy en día, la conservación de pavimentos se realiza de manera reactiva y sin previa planificación, lo que conlleva a gastos innecesarios. Al tener un plan de M&R, se puede analizar el comportamiento del pavimento y así visualizar el momento ideal para intervenir. Además, se describen distintos tratamientos que se pueden aplicar ajustados a la realidad nacional. Se describen criterios de optimización que pueden ser aplicados en trabajos futuros.

7 Conclusiones

En este trabajo se realizó una propuesta preliminar de una metodología de optimización de M&R de los pavimentos aeroportuarios de la red primaria de Chile, utilizando la optimización genética. Primero, se realizó una búsqueda de información relacionada a investigaciones previas sobre el estado del SGPA en Chile, para contextualizar la realidad nacional.

Posteriormente, se realizó una búsqueda de información en internet relacionada a los distintos deterioros que se pueden encontrar en los pavimentos y los tratamientos que pueden ser aplicados en el contexto de los aeropuertos, siendo la mayoría de estos textos internacionales. Como la cantidad de tratamientos encontrados es vasta, considerando el contexto chileno, estos se redujeron a cuatro tratamientos, los cuales se pueden encontrar en documentación nacional, como lo son las distintas propuestas que se ofrecen en mercado público.

Una vez definidos los tratamientos a utilizar, se escoge el aeropuerto el cual será utilizado como caso estudio. Se opta por la pista central del Aeródromo de La Florida en la ciudad de La Serena debido a que tiene una mayor cantidad de datos disponibles. Primero se elaboraron planes de M&R utilizando una metodología manual de optimización. La optimización manual se basa en observar el comportamiento de la curva de deterioro para elegir el momento de intervención. Se crearon diez planes de M&R manuales, utilizando distintos criterios y tratamientos.

Para la optimización genética, se elaboró un algoritmo genético de un objetivo, el cual busca mejorar la efectividad del pavimento, la cual es representada por el área bajo la curva. Este está sujeto a distintas restricciones que buscan entregar planes cercanos a la realidad. Para poder iniciar la optimización, se utilizan los planes obtenidos de manera manual como población inicial, para que el algoritmo optimice como base estos planes. Como resultado final, se obtienen distintos planes, los cuales logran superar en efectividad a los planes elaborados manualmente.

Como recomendación para trabajos futuros, una alternativa a considerar puede ser la aplicación de un algoritmo multiobjetivo, el cual pueda considerar una mayor cantidad de criterios, como por ejemplo ambientales. La optimización en la realidad no tiende a ser de un solo objetivo, y estos objetivos pueden estar en conflicto unos con otros. Para contrarrestar este fenómeno, se emplea la optimización multiobjetivo para encontrar soluciones que puedan satisfacer en su mayoría a todos los criterios a evaluar. Un algoritmo que puede ser ideal para la optimización de pavimentos aeroportuarios es el Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm (NSGA-II).

8 Referencias

- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, A. (2020). *Standard Test Method for Airport Pavement Condition Index Surveys*. Annual Book of ASTM Standards.
- Camarena, K. (2018). *IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE GESTIÓN DE PAVIMENTOS PARA EL ÁREA DE MOVIMIENTO DE AEROPUERTOS*. Lima : UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA.
- Chapman, R., Ploeger, D., Peshkin, D., & Speidel, D. (2015). *Preventive Maintenance at General Aviation Airports*. Washington, D.C.: Transportation Research Board.
- DAP. (2025). <https://aeropuertos.mop.gob.cl/red-aeroportuaria-nacional/>.
- Deb, K. (2011). *Multi-Objective Optimization Using Evolutionary Algorithms: An Introduction*. Kanpur: Indian Institute of Technology Kanpur.
- DGAC. (2022). Obtenido de Ficha técnica aeródromo La Florida – La Serena.: <https://www.dgac.gob.cl/wp-content/uploads/2023/11/03-LA-SERENA-FICHA-TECNICA-AERODROMO-LA-FLORIDA-1-1.pdf>
- DGAC. (2025). <https://www.dgac.gob.cl/aeropuertos/red-aeroportuaria-nacional/red-aeroportuaria/>.
- Di Mascio, P., & Moretti, L. (2019). Implementation of a pavement management system for maintenance and rehabilitation of airport surfaces. *Science Direct*.
- FAA. (2014a). *AC 150/5380-7B - Airport Pavement Management Program (PMP)*. Obtenido de Federal Aviation Administration.
- FAA. (2014b). *AC 150/5380-6C - Guidelines and Procedures for Maintenance of Airport Pavements*.
- FAIC. (2021). *DIAGNÓSTICO AUSCULTACIÓN DE PAVIMENTOS AEROPORTUARIOS DE LA RED PRIMARIA ZONA NORTE: AEROPUERTO LA FLORIDA DE LA SERENA*.
- Fwa, Chan, & Hoque. (2000). MULTIOBJECTIVE OPTIMIZATION FOR PAVEMENT MAINTENANCE PROGRAMMING. *Journal of Transportation Engineering*.
- Hajek, J., Hall, J., & Hein, D. (2011). *COMMON AIRPORT PAVEMENT MAINTENANCE PRACTICES*. Airport Cooperative Research Program.
- Hajj, E. Y., Loria, L., Sebaaly, P. E., Borroel, C. E., & Leiva, P. (2011). *Optimum Time for Application of Slurry Seal to Asphalt Concrete Pavements*. Washington D.C.: Transportation Research Record:.
- IDOM. (2022). *“DIAGNÓSTICO AUSCULTACIÓN DE PAVIMENTOS AEROPORTUARIOS DE LA RED PRIMARIA ZONA SUR”*. Dirección de Aeropuertos.
- Moses, T. L., Hulsey, J. L., & Connor, B. (2009). *Airport Managers’ Guide for the Maintenance of Asphalt Pavements of General Aviation Airports*. Fairbanks: University of Alaska.

- Olea, S. (2021). DEFINICIÓN DE UMBRALES PARA ACTIVIDADES DE ANTENIMIENTO Y REHABILITACIÓN EN PAVIMENTOS AEROPORTUARIOS DE LA RED NACIONAL APLICANDO CRITERIOS INTERNACIONALES.
- Salazar, J. (2021). *ANÁLISIS Y COMPARACIÓN DE CRITERIOS UTILIZADOS EN LA TOMA DE DECISIONES PARA LA GESTIÓN DE PAVIMENTOS DE LA RED NACIONAL.*
- Tighe, S., Karim, M., Herring, A., Chee, K., & Moughabghab, M. (2004). *AN EVALUATION OF VARIOUS PRIORITIZATION METHODS FOR EFFECTIVE PAVEMENT MANAGEMENT: A CANADIAN AIRPORT CASE STUDY.* Atlantic City, New Jersey, USA: 2004 FAA WORLDWIDE AIRPORT TECHNOLOGY TRANSFER CONFERENCE.