



UNIVERSIDAD TECNICA
FEDERICO SANTA MARIA

Departamento de Obras Civiles

ESTUDIO DE LAS CARACTERÍSTICAS DE PAVEAIR Y SU APLICACIÓN EN AEROPUERTOS DE LA RED PRIMARIA DE CHILE

Memoria de Título presentada por

LUCAS ANDRÉS ROMÁN MUÑOZ

como requisito parcial para optar al título de la carrera de

Ingeniería Civil

Profesor Guía
Gabriel García Saá
Alelí Osorio Lird

Octubre de 2025



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: Estudio de las características de PAVEAir y su aplicación en aeropuertos de la red primaria de Chile

Nombre del candidato(a): Lucas Andrés Román Muñoz

Carrera / Grado: Ingeniería Civil

Campus: San Joaquín Departamento: Obras Civiles

2.- VALIDACIÓN DEL PROFESOR GUÍA/DIRECTOR DE TESIS

Yo, Alelí Osorio y Gabriel García, 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: 03/Nov/2025

Firma: 

Estudiante o Candidato(a):

Fecha: 03-11-2025

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.



UNIVERSIDAD TECNICA
FEDERICO SANTA MARIA

TITULO DE LA TESIS:

**ESTUDIO DE LAS CARACTERÍSTICAS DE PAVEAIR Y SU
APLICACIÓN EN AEROPUERTOS DE LA RED PRIMARIA DE CHILE**

AUTOR:

LUCAS ANDRÉS ROMÁN MUÑOZ

TRABAJO DE MEMORIA, presentado como requisito parcial para optar al título de la carrera de INGENIERIA CIVIL de la Universidad Técnica Federico Santa María.

Nombre

Firma

Prof. Guía

Miembro 1 Comisión

Miembro 2 Comisión

Santiago, Chile, Octubre de 2025



Índice

1	Introducción.....	6
2	Objetivos	7
2.1	Objetivo general.....	7
2.2	Objetivos específicos	7
2.2.1	Objetivo Especifico 1:	7
2.2.2	Objetivo Especifico 2:	7
2.3	Metodología	7
2.3.1	Objetivo Especifico 1:	7
2.3.2	Objetivo Especifico 2:	7
2.4	Organización del trabajo	8
3	Marco Teórico	8
3.1	Sistemas de Gestión de Pavimentos Aeroportuarios y contexto chileno	8
3.2	Índices utilizados en PAVEAir.....	9
3.3	Curvas de Familia	9
3.4	PAVEAir en otras investigaciones.....	10
3.5	Conclusión Marco Teórico	10
4	Metodología de modelación en PAVEAir.....	11
4.1	Creación de Base de Datos	11
4.1.1	Inventario.....	12
4.1.2	Mantenciones.....	14
4.1.3	Inspecciones.....	15
4.2	Modelado de Predicción	16
4.3	Análisis de Condición.....	19
4.4	Mantenimiento y Recuperación	22
4.5	Módulos y Funciones Extras.....	25
4.5.1	Módulo de Informes	25
4.5.2	Módulo de Mapas	25
4.5.3	Módulo de Herramientas	25
4.5.4	Pestaña Auxiliar.....	25
5	Modelación Complementaria en PAVEAir.....	26
5.1	Criterios de Selección de los Casos Complementarios.....	26
5.2	Aeropuerto Andrés Sabella.....	26
5.2.1	Curvas de Familia Generadas	26
5.2.2	Modelación por Consecuencia de la Reparación Local.....	28
5.3	Aeródromo Pichoy.....	29
5.3.1	Curvas de Familia Generadas	29



5.3.2	Modelación por PCI Crítico	29
6	Análisis de Resultados.....	30
6.1	Evaluación de los Resultados del Estudio.....	30
6.2	Contraste con Otras Líneas del Proyecto Fondef.....	30
7	Conclusiones y Recomendaciones	31
8	Referencias	33
A.	Apéndice 1.....	35
B.	Apéndice 2.....	36
C.	Apéndice 3.....	37
D.	Apéndice 3.....	39

“ESTUDIO DE LAS CARACTERÍSTICAS DE PAVEAIR Y SU APLICACIÓN EN AEROPUERTOS DE LA RED PRIMARIA DE CHILE”

Lucas Román Muñoz¹, Alelí Osorio², Gabriel García³

¹ Universidad Técnica Federico Santa María

Resumen

La presente investigación evalúa las capacidades del software PAVEAir como sistema de gestión de pavimentos aeroportuarios (SGPA) en el contexto chileno, contrastando su funcionamiento con las necesidades locales y con las herramientas desarrolladas en el proyecto Fondef ID23110113. Para ello, se analizaron los principales módulos del software, incluyendo inspecciones visuales, modelado de predicción, análisis de condición y mantenimiento y rehabilitación (M&R), aplicándolos a datos reales de tres aeródromos nacionales: La Florida, Andrés Sabella y Pichoy.

Se revisaron las normativas internacionales que sustentan el funcionamiento del software, así como sus metodologías de cálculo y los parámetros necesarios para su operación. PAVEAir demostró ser una herramienta sólida en el cálculo del índice PCI y en la estructuración de inventarios, aunque presentó limitaciones importantes. Entre ellas destacan su alta dependencia de bases de datos completas, su escasa adaptabilidad a condiciones climáticas y operativas distintas a las de Estados Unidos y la dificultad para generar curvas de familia confiables cuando los datos disponibles son escasos o discontinuos, situación frecuente en Chile.

Los planes de mantenimiento y rehabilitación generados resultaron útiles para propósitos demostrativos, pero dependieron fuertemente de la calidad de las curvas de entrada. En consecuencia, se concluye que PAVEAir puede ser una herramienta valiosa en etapas preliminares o académicas, siempre que sea utilizada con un conocimiento técnico adecuado y bases de datos limpias. Los resultados respaldan la necesidad de contar con un SGPA diseñado específicamente para la realidad nacional, propósito central del proyecto Fondef.

Palabras clave: PAVEAir, SGPA, PCI, mantenimiento, curvas de familia.

1 Introducción

En Chile, actualmente se invierten grandes cantidades de dinero en la mantención y recuperación de pavimentos aeroportuarios (Ministerio de Obras Públicas [MOP], 2024). Sin embargo, estas inversiones suelen ser reactivas, respondiendo a deterioros detectados en inspecciones periódicas o en situaciones de emergencia, lo que conlleva pérdidas significativas de recursos (Tolmo, 2020). Esta situación se ve agravada por la ausencia de un sistema de gestión adecuado que permita planificar de manera eficiente las intervenciones necesarias (Tolmo, 2020). Esto es especialmente crítico por dos razones fundamentales: en primer lugar, no anticipar ni controlar adecuadamente el deterioro de los pavimentos puede comprometer la seguridad operacional, generando riesgos potenciales para aeronaves y usuarios; en segundo lugar, las intervenciones reactivas suelen implicar interrupciones inesperadas en la operación de los aeropuertos, afectando la continuidad de los vuelos, alterando itinerarios y perjudicando directamente a los pasajeros y operadores.

En contraste, países como Italia, Estados Unidos, Japón y China han implementado Sistemas de Gestión de Pavimentos Aeroportuarios (SGPA, conocidos como APMS por sus siglas en inglés), también denominados Programas de Gestión de Pavimentos (PMP), que permiten anticipar las necesidades de mantenimiento mediante el uso de modelos predictivos, optimizando así los recursos disponibles (Miah et al., 2020). Un ejemplo destacado es el caso de Italia, donde el uso de un SGPA ha demostrado ser efectivo para proporcionar un manejo detallado y proactivo de la infraestructura aeroportuaria (ENAC, 2015). Diversas experiencias internacionales han demostrado los beneficios de implementar estos sistemas, no solo por su capacidad para sistematizar la información y anticipar el deterioro, sino también por su impacto positivo en la toma de decisiones. En Estados Unidos, la implementación de APMS permitió una mejora sostenida en las condiciones de los pavimentos gracias a bases de datos estructuradas y a la planificación basada en análisis de costos de ciclo de vida (LCCA, por sus siglas en inglés) (Miah et al., 2020). En Roma, el aeropuerto de Fiumicino combinó datos visuales, estructurales y funcionales para definir estrategias óptimas de mantenimiento bajo restricciones presupuestarias, mediante un enfoque empírico-mecanicista y análisis LCCA (Marradi y Tamarozzi, 2010). En Japón, el aeropuerto de Osaka-Itami utilizó el índice PRI (Pavement Rehabilitation Index), un indicador que combina la severidad y extensión de los deterioros para priorizar intervenciones de mantenimiento, para planificar intervenciones, con resultados positivos tras décadas de monitoreo sistemático (Hachiya et al., 2013). Por su parte, el sistema SHAPMS (Shanghai Airport Pavement Management System) en China incorporó tecnologías GPS y GIS para mejorar la precisión de los levantamientos de datos y reducir significativamente los tiempos de evaluación (Chen et al., 2012). Estas experiencias reflejan que, aunque los contextos varían, el uso de herramientas SGPA bien adaptadas permite transitar desde enfoques reactivos a estrategias preventivas y costo-eficientes.

En este contexto, y una vez establecido el convenio de colaboración entre el Departamento de Obras Civiles (DOOCC) de la Universidad Técnica Federico Santa María (UTFSM) y la Dirección de Aeropuertos del MOP (DAP-MOP), esta última solicitó desarrollar un Sistema de Gestión de Pavimentos DAP actualizado. La propuesta fue elaborada por Tolmo (2020), con el apoyo del equipo del DOOCC-UTFSM, desarrollando el marco teórico para la gestión de pavimentos aeroportuarios en Chile. Dicho trabajo constituye hoy la base del proyecto Fondef ID23I10113, titulado “Desarrollo y validación de sistema de gestión de pavimentos aeroportuarios para la red primaria de Chile” (ANID, 2023), cuyo objetivo es crear un SGPA que permita gestionar de manera eficiente los pavimentos de los aeropuertos nacionales.

El estudio de SGPA existente es fundamental para este proyecto, ya que permite identificar buenas prácticas, metodologías y tecnologías aplicables al caso chileno. Entre las herramientas destacadas se encuentra PAVEAir, software gratuito desarrollado por la Federal Aviation Administration (FAA), basado en MicroPAVER (Shahin et al., 1987). Este sistema permite gestionar pavimentos mediante la creación de bases de datos, el cálculo de indicadores como PCI (Pavement Condition Index), SCI (Structural Condition Index) y FOD (Foreign Object Debris), siguiendo normas como ASTM D5340 y D6433. Además, permite modelar predicciones utilizando la AC 150/5320-6G y planificar acciones de mantenimiento según la AC 150/5380-7B (Larkin et al., 2010).

El presente proyecto tiene como objetivo evaluar la aplicabilidad de PAVEAir en el contexto chileno, específicamente en el Aeródromo La Florida de La Serena. A través de esta investigación se busca analizar la capacidad del software para adaptarse a la realidad nacional, considerando factores climáticos, operativos y de tráfico. Además, se ampliará el análisis a otros dos aeropuertos de la Red Primaria de Chile, lo que permitirá comparar resultados en distintos contextos y generar un análisis más robusto que contribuya a evaluar los beneficios y desafíos que plantea esta herramienta para el desarrollo de un SGPA nacional.

2 Objetivos

2.1 Objetivo general

Estudiar el sistema PAVEAir para entender sus características y poder contrastarlo con las herramientas que se utilicen/developen en el proyecto Fondef ID23I10113 aplicándolo en el caso de estudio del Aeródromo La Florida y otros dos aeropuertos de la Red Primaria de Chile.

2.2 Objetivos específicos

2.2.1 Objetivo Especifico 1:

Investigar la normativa vigente que enmarca el funcionamiento de PAVEAir, la metodología que emplea el software, índices utilizados para la modelación y parámetros de entrada requeridos por el software para su correcto funcionamiento.

2.2.2 Objetivo Especifico 2:

Utilizar el software PAVEAir con los datos del Aeródromo La Florida y otros dos aeropuertos seleccionados. Posteriormente, contrastar los resultados obtenidos entre los aeropuertos y evaluar el desempeño de PAVEAir en conjunto con las demás herramientas empleadas o desarrolladas en el marco del proyecto Fondef ID23I10113.

2.3 Metodología

Para cumplir con los objetivos planteados, se contempla una serie de actividades organizadas en función de los objetivos específicos del proyecto, las cuales permiten abordar de manera progresiva tanto el estudio del software PAVEAir como su aplicación en casos concretos de la red aeroportuaria chilena.

2.3.1 Objetivo Especifico 1:

- Revisión de documentos normativos y técnicos que fundamentan el funcionamiento de PAVEAir, incluyendo la AC 150/5320-6G (FAA, 2021) y las normas ASTM D5340-20 y D6433-20 (ASTM International, 2020).
- Estudio del manual de usuario de PAVEAir y otras fuentes documentales disponibles.
- Análisis de investigaciones previas que han utilizado PAVEAir en contextos similares, para conocer enfoques metodológicos aplicados y resultados observados.
- Contacto con responsables del desarrollo del software, con el fin de aclarar dudas específicas sobre el uso, funcionalidades o interpretación de resultados.

2.3.2 Objetivo Especifico 2:

- Selección de los tres aeropuertos a modelar, considerando criterios de disponibilidad de información, distribución geográfica y representatividad dentro de la Red Primaria.
- Recopilación y organización de datos disponibles, incluyendo inventario, deterioros, historial de intervenciones y características generales de cada recinto.
- Ingreso y modelación de cada aeropuerto o aeródromo en el entorno del software PAVEAir.
- Análisis de resultados obtenidos mediante el software, considerando los módulos de predicción, análisis de condición y mantenimiento.
- Contraste de resultados con otras herramientas utilizadas en el proyecto Fondef ID23I10113, tales como MicroPAVER, modelos tradicionales y enfoques basados en inteligencia artificial, en caso de que dichas herramientas o sus resultados se encuentren disponibles.

2.4 Organización del trabajo

El desarrollo de esta memoria se estructura en distintas etapas que permiten abordar progresivamente el estudio del software PAVEAir y su aplicación al caso chileno. Estas etapas combinan fases teóricas y prácticas, algunas de las cuales se ejecutan de forma consecutiva y otras de manera complementaria, permitiendo avanzar de forma ordenada y flexible en función de los objetivos planteados. En una primera instancia, se realiza un estudio detallado de la documentación oficial y normativa que sustenta el funcionamiento del software. Esta revisión incluye tanto las guías técnicas de la Federal Aviation Administration (FAA), como el manual de usuario y los estándares ASTM utilizados para el cálculo de los índices de condición del pavimento. Este trabajo preliminar permite establecer los fundamentos operativos del sistema y comprender los requisitos para su uso correcto.

Paralelamente, se llevan a cabo ensayos prácticos exploratorios con el software, orientados a familiarizarse con su interfaz, verificar el funcionamiento de los distintos módulos y examinar el comportamiento de algunas funciones clave mediante bases de datos de prueba. Esta fase resulta fundamental para anticipar posibles dificultades en el proceso de modelación y para definir una estrategia clara de ingreso de datos reales.

Luego, se procede con la selección de tres aeropuertos de la Red Primaria de Chile, incluyendo el Aeródromo La Florida de La Serena como caso base. La elección de los otros dos recintos se realiza en función de la disponibilidad y calidad de los datos, su localización climática y su representatividad operativa. Una vez definidos los casos de estudio, se organiza la información disponible, que incluye inventario de pavimentos, historial de inspecciones visuales, registros de mantenciones y demás parámetros necesarios para la modelación.

En paralelo, se realiza una revisión de investigaciones previas que han utilizado PAVEAir en otros contextos, con el fin de complementar el análisis técnico mediante experiencias reales de uso. Esta revisión permite conocer enfoques metodológicos ya aplicados, así como identificar buenas prácticas y limitaciones reportadas. Como complemento a esta etapa, también se contempla el contacto directo con desarrolladores y usuarios del software a través de los canales disponibles en la plataforma, para resolver dudas puntuales relacionadas con su funcionamiento.

Con la información procesada y organizada, se lleva a cabo la modelación de cada aeropuerto en el entorno de PAVEAir, empleando los módulos correspondientes para la creación de la red, el ingreso de deterioros, el análisis de condición y la planificación de mantenimiento. Posteriormente, se realiza un análisis de los resultados obtenidos, evaluando su coherencia técnica y su aplicabilidad al contexto local. Finalmente, se contempla el contraste de estos resultados con aquellos generados por otras herramientas utilizadas en el proyecto Fondef ID23I10113, tales como MicroPAVER, modelos tradicionales y enfoques basados en inteligencia artificial, en caso de que dichas herramientas o sus resultados se encuentren disponibles. Esto permitirá evaluar el potencial de PAVEAir como componente complementario en un sistema de gestión de pavimentos aeroportuarios para Chile.

3 Marco Teórico

3.1 Sistemas de Gestión de Pavimentos Aeroportuarios y contexto chileno

Los Sistemas de Gestión de Pavimentos Aeroportuarios (SGPA) han sido diseñados para facilitar la toma de decisiones relacionadas con la planificación, evaluación y mantenimiento de pavimentos a largo plazo, mediante el uso de indicadores técnicos y herramientas predictivas. En el contexto chileno, Tolmo (2020) identificó la necesidad de implementar sistemas más robustos y adaptados a las condiciones locales. Su estudio propuso un marco teórico orientado a la red nacional de aeropuertos de Chile, señalando la existencia de herramientas como MicroPAVER y PAVEAir, las cuales requieren un análisis más profundo para evaluar su compatibilidad con variables clave como el clima, el tráfico aéreo y la operación de los recintos aeroportuarios nacionales.

En Chile han existido acercamientos al uso de un sistema de gestión, como la utilización exploratoria de MicroPAVER y la elaboración de una matriz de priorización de obras en aeropuertos. Sin embargo, estas herramientas no han sido aplicadas realmente en el proceso formal de toma de decisiones.

La experiencia internacional ha demostrado que el mantenimiento preventivo puede ser hasta cinco veces más rentable que la rehabilitación de pavimentos en estado crítico (FAA, 2014). No obstante, la gestión de pavimentos en Chile ha sido históricamente de carácter reactivo, lo que se traduce en mayores costos operativos y riesgos para la seguridad. En este contexto, un SGPA bien implementado permite identificar tempranamente fallas estructurales, optimizar la programación de intervenciones y extender la vida útil de la infraestructura (The Louis Berger Group, Inc., 2012).

Dado este panorama, resulta necesario evaluar herramientas existentes como el software PAVEAir para determinar su aplicabilidad y potencial de adaptación al contexto chileno. Esta evaluación no busca implementar el sistema directamente, sino utilizarlo como una referencia técnica que permita guiar el desarrollo de un SGPA que responda a las particularidades operativas, normativas y climáticas de la red aeroportuaria nacional.

3.2 Índices utilizados en PAVEAir

PAVEAir se basa en el uso del Pavement Condition Index (PCI) como herramienta principal para evaluar el estado funcional y superficial de los pavimentos. Este índice, desarrollado originalmente por el U.S. Army Corps of Engineers y adoptado ampliamente a nivel internacional, se calcula a partir de inspecciones visuales que identifican el tipo, severidad y extensión de los deterioros presentes en cada unidad muestral (Shahin et al., 1987). Su metodología está normada por los estándares ASTM D5340 para pavimentos aeroportuarios y ASTM D6433 para caminos y estacionamientos (ASTM International, 2023), y produce un valor entre 0 y 100, donde valores más altos indican mejor condición.

A partir de las mismas auscultaciones realizadas para calcular el PCI, PAVEAir genera automáticamente dos índices complementarios: el Structural Condition Index (SCI) y el Foreign Object Debris Index (FOD). El SCI es un subconjunto del PCI que filtra los deterioros considerados estructurales, excluyendo aquellos de naturaleza superficial, funcional o estética. Su objetivo es aproximar una evaluación estructural sin requerir ensayos mecánicos adicionales. Por su parte, el FOD busca estimar el riesgo de desprendimiento de material suelto desde el pavimento, basado en los deterioros observados, con el fin de identificar amenazas potenciales de objetos extraños en áreas críticas de operación aérea (FAA, 2014; FAA, 2015).

No obstante, en el marco de esta investigación, se optó por trabajar exclusivamente con el índice PCI. La decisión de no utilizar el SCI se fundamenta en consideraciones metodológicas, dado que resulta discutible que un índice estructural se derive únicamente de observaciones visuales, sin incorporar técnicas de evaluación complementarias, como la deflectometría de impacto, ampliamente utilizadas para validar la capacidad estructural real del pavimento. En cuanto al FOD, si bien su propósito es relevante, se reconoció que muchos de los objetos extraños en pista no provienen necesariamente del pavimento, sino de otras fuentes como cauchos desprendidos de aeronaves, partes metálicas, basura u otros residuos operacionales. En consecuencia, se estimó que este índice presenta una utilidad limitada para el análisis técnico requerido en este estudio.

Por tanto, y en coherencia con los objetivos de esta memoria, se decidió centrar el análisis en el PCI como indicador principal. Esto responde tanto a su amplia aceptación como a su respaldo normativo consolidado, así como a su adecuación metodológica con los datos disponibles y el tipo de análisis requerido en esta investigación.

3.3 Curvas de Familia

Las Curvas de Familia son una herramienta central en los SGPA ya que permiten modelar el deterioro del pavimento a lo largo del tiempo con el fin de anticipar futuras condiciones y planificar el mantenimiento de manera preventiva. En PAVEAir, estas curvas representan gráficamente la relación entre el PCI y la edad del pavimento, generando modelos de deterioro para diferentes grupos de secciones con características similares.

El concepto de “familia” dentro del software hace referencia a un conjunto de secciones de pavimento que, compartiendo parámetros comunes como el tipo de pavimento (flexible o rígido), el clima, el tráfico o el tipo de área (pista, rodaje, plataforma), pueden ser analizadas en conjunto para generar una curva promedio representativa. Esta agrupación permite superar las limitaciones de datos individuales, entregando una aproximación más robusta al comportamiento esperado del pavimento.

PAVEAir utiliza regresiones polinómicas, comúnmente de tercer grado, para ajustar estas curvas a los datos observados (Miah, 2022). Este enfoque permite identificar tendencias generales de deterioro, aunque también introduce limitaciones cuando los datos son escasos, inconsistentes o no cuentan con suficiente respaldo histórico.

En el contexto chileno, y particularmente en estudios exploratorios como el presente, se prevé que la definición de curvas de familia puede enfrentar importantes dificultades debido a la falta de datos históricos sistematizados, la escasa información sobre mantenciones pasadas y la baja correlación temporal entre los valores de PCI disponibles. Estas limitaciones podrían afectar directamente la capacidad del software para generar modelos predictivos confiables, lo cual será abordado en los capítulos posteriores del documento.

3.4 PAVEAir en otras investigaciones

Aunque PAVEAir es una herramienta desarrollada por la FAA y relativamente nueva en comparación con otros sistemas, ha comenzado a ser explorada en estudios técnicos internacionales que analizan su aplicabilidad en la gestión de pavimentos aeroportuarios, particularmente en Brasil y Australia.

En Brasil, Durán y Fernandes Júnior (2014) utilizaron PAVEAir como herramienta principal para gestionar el pavimento del Aeropuerto Estatal de Araraquara. En su estudio, calcularon el PCI mediante inspecciones visuales normadas por el estándar ASTM D5340-12 y generaron curvas familiares para proyectar el deterioro del pavimento, considerando variables como el clima y el tráfico aéreo. Concluyeron que PAVEAir es especialmente útil en aeropuertos de menor escala, ya que permite una gestión eficiente y personalizada, aunque destacaron la necesidad de complementar sus resultados con análisis adicionales para decisiones de inversión.

En una investigación posterior, Durán y Fernandes Júnior (2015) profundizaron en la evaluación del software, integrando el uso de árboles de decisión y criterios del Instituto del Asfalto para definir estrategias de mantenimiento como sellado de grietas o recapado. En este caso, también se incluyó un análisis costo-beneficio para priorizar acciones de mantenimiento. Los autores destacaron que, aunque el módulo de Mantenimiento y Rehabilitación (M&R) de PAVEAir ofrece un marco útil, requiere ajustes y validaciones para reflejar condiciones locales con mayor precisión.

Por otro lado, en Australia, Miah (2022) exploró el uso de PAVEAir para modelar el deterioro del pavimento en tres pistas de aeropuertos. Su estudio comparó la precisión de las curvas generadas por PAVEAir con las de PAVER, concluyendo que las curvas polinómicas de tercer grado del primero mostraban una mayor capacidad predictiva. No obstante, el autor también sugirió mejoras para el software, incluyendo el fortalecimiento del análisis costo-beneficio y la posible incorporación de modelos markovianos en contextos con datos limitados. A pesar de que el módulo de M&R no fue utilizado directamente en esta investigación, se reconoció su potencial teórico y se recomendó su evaluación futura con ajustes específicos.

Estos estudios resaltan que, si bien PAVEAir posee funcionalidades robustas para el cálculo del PCI y la predicción del deterioro, su uso aún requiere validación y adecuación en distintos entornos operacionales. Las experiencias en Brasil y Australia ofrecen antecedentes valiosos para comprender tanto sus capacidades como sus limitaciones, sirviendo como referencia metodológica para estudios exploratorios como el presente.

3.5 Conclusión Marco Teórico

A modo de conclusión, es relevante destacar que esta investigación busca responder a las siguientes preguntas clave:

- ¿Qué adaptaciones son necesarias para que PAVEAir funcione de manera eficiente en las condiciones locales de Chile? Esta pregunta se centra en identificar las modificaciones requeridas para que el software se ajuste a las particularidades del clima, la infraestructura y el tráfico aéreo de los aeropuertos chilenos.
- ¿Cómo se comparan los resultados obtenidos en el Aeródromo La Florida con otros aeropuertos de la Red Primaria en diferentes contextos climáticos y operativos? Se evaluará el desempeño de PAVEAir en distintos aeropuertos para comparar su capacidad de adaptación y funcionalidad en diversos entornos.
- ¿Qué limitaciones presenta la implementación de PAVEAir en Chile y cómo pueden superarse? La investigación abordará las barreras que podrían surgir durante la implementación de PAVEAir en Chile, desde la disponibilidad de datos hasta posibles incompatibilidades normativas. Además, se evaluarán las adaptaciones necesarias que podrían no ser viables.

Estas preguntas estructuran la investigación y proporcionan un marco claro para analizar la viabilidad y efectividad de PAVEAir en el contexto de los aeropuertos chilenos.

4 Metodología de modelación en PAVEAir

Este capítulo describe la metodología aplicada para la implementación del software PAVEAir como herramienta de gestión de pavimentos aeroportuarios en el contexto chileno. El enfoque adoptado contempla el uso ordenado de cada uno de los módulos disponibles en la plataforma, explicando su funcionamiento, los datos requeridos y el procedimiento seguido para su aplicación. Si bien la investigación incluye el análisis de tres aeropuertos de la Red Primaria de Chile, la descripción metodológica se realiza tomando como referencia el Aeródromo La Florida de La Serena, seleccionado como caso principal de estudio. Este enfoque permite ilustrar el uso del sistema en un entorno real, facilitando la comprensión del flujo de trabajo dentro del software y preparando el terreno para la comparación posterior con los demás aeródromos.

La metodología aplicada no pretende evaluar los resultados obtenidos en esta etapa, sino explicar el proceso de ingreso, configuración y operación de los módulos más relevantes de PAVEAir, en función de los requerimientos del proyecto Fondef ID23I10113. Cada sección subsiguiente detalla los componentes del sistema utilizados: desde la creación de la red de pavimentos, el ingreso de inspecciones visuales, el modelado de predicción del deterioro, hasta la planificación de mantenimiento y el uso de funciones complementarias incluidas en el sistema.

4.1 Creación de Base de Datos

Como parte del proyecto Fondef ID23I10113, la Dirección de Aeropuertos (DAP) proporcionó una serie de informes técnicos correspondientes a prácticamente toda la Red Primaria de Aeropuertos de Chile. Estos documentos no solo incluyen los resultados de inspecciones visuales basadas en el método PCI, sino que además incorporan un análisis integral del estado de los pavimentos, la utilización de la herramienta MicroPAVER para la generación de curvas de familia, y recomendaciones técnicas de mantenimiento y rehabilitación. En consecuencia, constituyen la fuente principal y oficial para sustentar el desarrollo de las distintas investigaciones asociadas al proyecto Fondef.

Dentro de este conjunto de antecedentes, destaca especialmente el caso del Aeródromo La Florida de La Serena, que fue seleccionado como caso principal de estudio para esta investigación. La razón de esta elección radica en la disponibilidad y continuidad de los datos: entre 2014 y 2024 se generaron al menos ocho informes consecutivos para este recinto, lo que lo convierte en uno de los aeródromos con mayor densidad y frecuencia de información técnica. Además, todos estos informes fueron elaborados por un mismo consultor —Ferrer y Asociados Ingenieros Consultores— lo cual, a diferencia de lo que ocurre con otros aeropuertos de la red, aporta una continuidad metodológica especialmente valiosa para fines comparativos y de trazabilidad técnica (Dirección de Aeropuertos [DAP], 2013–2024).

Adicionalmente, los informes entregados por la DAP han sido fundamentales en la organización de la red dentro del software PAVEAir, ya que mapean de manera clara y sistemática las distintas áreas funcionales del aeródromo, como pistas, calles de rodaje, plataformas y otras zonas pavimentadas. Esta

información permitió establecer una base sólida para la definición de las ramas en el entorno digital del software, facilitando así la estructura jerárquica requerida por PAVEAir para la creación del inventario de red.

En algunos casos, además, los informes contienen información estructural de los pavimentos, como la conformación de capas, tipo de materiales y espesores, así como antecedentes de mantenciones realizadas. Estos datos resultan especialmente valiosos para futuras calibraciones de modelos de deterioro o evaluaciones más avanzadas dentro del sistema.

4.1.1 Inventario

En el software PAVEAir, el módulo de Inventario permite estructurar y organizar la red aeroportuaria mediante una jerarquía de componentes que va desde el aeropuerto completo hasta las secciones específicas. Esta estructura se compone de tres niveles principales:

Red: Corresponde al aeropuerto o aeródromo en cuestión, e incluye información clave para su identificación, como el código OACI, ubicación georreferenciada (latitud y longitud), zona climática (Dry/Wet – Freeze/No Freeze), tipo de aeropuerto (Hub o Non-Hub) y observaciones generales. En este contexto, la distinción entre Hub y Non-Hub refiere principalmente a si el recinto tiene capacidad para vuelos internacionales, lo que a su vez establece la diferencia funcional entre aeropuertos y aeródromos.

Rama: Representa las áreas funcionales principales dentro del recinto, tales como pistas (Runways), calles de rodaje (Taxiways) y plataformas (Aprons) principalmente. Cada rama agrupa una zona operacional del aeródromo.

Sección: Son subdivisiones dentro de cada rama, definidas según características geométricas, estructurales y operativas similares. En cada sección es posible registrar atributos como el punto inicial y final respecto a los umbrales, el año de construcción o última mantención mayor, el rango asignado (por ejemplo, “Primario” o “Secundario”) para efectos de clasificación, el tipo de superficie (asfalto, hormigón, etc.), y las dimensiones geométricas correspondientes.

A modo de ejemplo, se presenta en la Figura 1 el ingreso de los datos del inventario para el Aeródromo La Florida. Para esta red, se utilizó como base la información contenida en los informes oficiales entregados por la DAP. En cada informe se registraban diversos datos relacionados con las Unidades Muestrales (UMs), incluyendo el área de cada UM, la cantidad de UMs, el área de cada sección o rama, y, en algunos casos, los planos de cada aeropuerto con el esquema de estas divisiones. Sin embargo, en todos los casos se observaron inconsistencias: la sumatoria de las áreas de las UMs de una sección difería tanto del área de la sección reportada como del área calculable a partir de los planos. Por este motivo, se decidió utilizar como referencia el mismo parámetro empleado en los informes oficiales, es decir, el área total de las UMs, con el fin de garantizar consistencia en los análisis posteriores del PCI.

FAA PAVEAIR : Inventory		Base de datos actual ProyectoFondef	
Seleccione la red:	<input type="text" value="Aeródromo La Florida"/>	Comentario:	Datos iniciales
Aeródromo Código:	SCSE	País:	Chile
Latitude:	-29.916436	Longitud:	-71.199714
Zona climática:	Dry - No Freeze	Tipo de aeropuerto:	Non-Hub
		Estado:	

Nombre	Uso de rama	Área verdadera	
Pistas	RUNWAY	79,200.00	Detalles
Plataformas	APRON	38,574.00	Detalles
Calles de Rodaje	TAXIWAY	9,182.00	Detalles

Nombre	Comienzo	Final	Last Major M&R	Rango	Superficie	Longitud	Anchura	
PI-1	UP12	UO30	1/1/2013	P - Primary	AAC	1760	15	Detalles
PI-2	UP12	UO30	1/1/1991	S - Secondary	AAC	1760	30	Detalles

Figura 1. Vista del módulo de inventario de PAVEAir – Aeródromo La Florida.

Entre los datos destacados en la Figura 1 se encuentran el uso funcional de cada rama y el rango asignado a las secciones, entendido este último como una etiqueta que diferencia su nivel de relevancia dentro del aeropuerto. Estos atributos son fundamentales, ya que serán utilizados posteriormente como filtros en el proceso de generación de curvas de familia. Las etiquetas empleadas para nombrar redes, ramas y secciones no tienen un efecto funcional dentro del software, pero permiten mantener coherencia en el análisis. Por ejemplo, en el caso de la pista principal, la cual estaba dividida en dos secciones: PI-1, a la que se le dio un rango primario y PI-2, que se definió con un rango secundario. Esta clasificación responde a diferencias sustantivas en su uso operativo: PI-1 corresponde al eje central de la pista, que recibe la mayor carga de tráfico, mientras que PI-2 representa los márgenes laterales, con tráfico prácticamente nulo. Esta lógica fue aplicada también a las demás ramas de la red.

La Figura 2 y Figura 3 ilustran los mapas de red del Aeródromo La Florida correspondientes a los años 2014 y 2024, respectivamente. Estos permiten visualizar los cambios morfológicos y de nomenclatura en la infraestructura pavimentada a lo largo de una década, donde las plataformas experimentan la mayor cantidad de transformaciones.

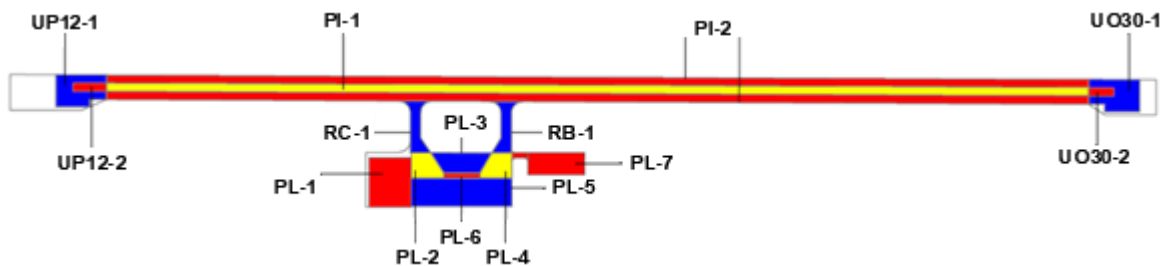


Figura 2. Red de pavimentos del Aeródromo La Florida (DAP, 2014).

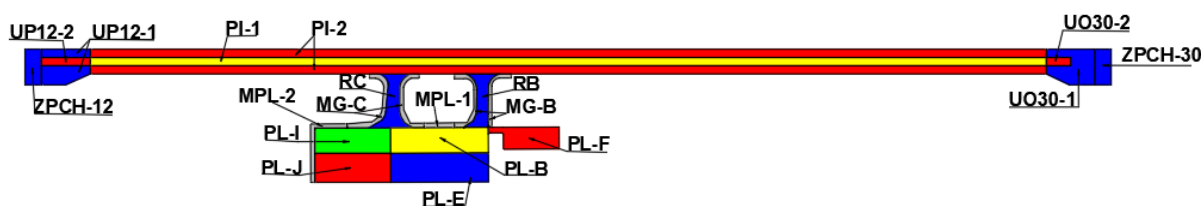


Figura 3. Red de pavimentos del Aeródromo La Florida (DAP, 2024).

Como se logra apreciar en las figuras, los cambios en las plataformas (zona inferior de las figuras 2 y 3) en esta década son sustanciales, estos cambios de nomenclatura en las plataformas a lo largo de los años se resumen en la siguiente tabla, la cual evidencia no solo las transformaciones en los nombres de las secciones, sino también qué áreas se mantuvieron, se fusionaron o se incorporaron como nuevas, contribuyendo a la normalización de la información para su ingreso al sistema. Cabe señalar que los colores utilizados en las figuras no representan ninguna clasificación específica, sino que corresponden al formato original de los informes técnicos.

Tabla 1. Evolución de la nomenclatura de plataformas en el Aeródromo La Florida (DAP, 2014–2024).

Plataformas						
2014	2016	2017	2019	2020	2021	2024
PL-1	PL-A	PL-A	PL-A	PL-A	PL-A	PL-I/PL-J
X	PL-H	PL-H	PL-H	PL-H	PL-H	
PL-2	PL-B	PL-B	PL-B	PL-B	PL-B	PL-B
PL-3	PL-C	PL-C	PL-C			
PL-4	PL-D	PL-D	PL-D			
PL-6	PL-G	PL-G	PL-G			
PL-5	PL-E	PL-E	PL-E	PL-E	PL-E	PL-E
PL-7	PL-F	PL-F	PL-F	PL-F	PL-F	PL-F

Como se aprecia en la Tabla 1, en el año 2014 las plataformas se clasificaban numéricamente del 1 al 7. En los años siguientes se incorporó una nueva plataforma y se reclasificaron utilizando letras, desde la A hasta la H, esquema que se mantuvo hasta 2020. En ese año, las plataformas B, C, D y G fueron unificadas en una única plataforma denominada B, mientras que para 2024 las plataformas A y H se redistribuyeron, dando origen a las nuevas plataformas I y J. Cabe destacar que estas distribuciones no son arbitrarias, sino que reflejan la realidad del pavimento, ya que las secciones buscan agrupar áreas con características superficiales aparentemente uniformes (DAP, 2014–2024). Por lo tanto, se presume que los cambios en la nomenclatura y distribución responden a procesos de mantenimiento o intervenciones constructivas realizadas en los distintos periodos.

Este esfuerzo de consolidación fue clave para asegurar la coherencia del inventario y garantizar la trazabilidad de las secciones a lo largo del tiempo, lo que se traduce en una mayor robustez para el análisis de deterioro y el modelado predictivo posterior.

4.1.2 Mantenciones

El módulo de mantenciones de PAVEAir permite registrar eventos relevantes de conservación o reconstrucción que hayan sido realizados sobre una determinada sección, ingresando tanto la fecha como

el tipo de intervención. Esta información se utiliza posteriormente como insumo para los análisis de predicción y planificación de mantenimiento.

Durante el desarrollo de esta investigación, se intentó recopilar datos históricos de mantenimiento mediante diversas fuentes. Si bien los informes técnicos entregados por la DAP proporcionan información estructural, de deterioros y recomendaciones de conservación, no contenían un registro sistemático de las intervenciones realizadas, ni detalles sobre su naturaleza específica.

Ante esta limitación, se exploraron documentos en plataformas como www.mercadopublico.cl y el sistema de licitaciones del MOP de Chile, filtrando por contratos de obras, estudios y asesorías relacionados con los aeropuertos de la Red Primaria. Sin embargo, la mayoría de estos documentos no contenían la precisión requerida para vincularlos directamente con tramos específicos ni con actividades técnicas detalladas, y la DAP no pudo entregar información adicional respecto a esta solicitud.

A pesar de estas restricciones, se logró levantar parcialmente el historial de mantenciones del Aeródromo La Florida, que corresponde al caso principal de estudio de esta memoria. La información disponible permitió identificar los siguientes hitos:

- 2014: Reconstrucción de la sección PI-1.
- 2015: Ampliación de plataforma y construcción de la sección PL-H.
- 2018: Conservación de rutina (sin detalles específicos sobre las secciones tratadas).
- 2019–2021: Proyecto de mantenimiento mayor, dividido en tres fases. Estas incluyeron intervenciones en prácticamente todo el aeródromo, exceptuando la sección PI-2.
- 2023: Nueva conservación de rutina (sin detalles específicos sobre las secciones tratadas).

No obstante, debido a que la información encontrada no incluye la naturaleza técnica ni el alcance detallado de cada intervención, no fue posible integrar estas mantenciones en el modelado predictivo de PAVEAir. Por lo tanto, para efectos de la simulación, se optó por utilizar únicamente los datos relacionados con la edad de construcción o de última intervención consignados en los informes técnicos, especialmente para establecer los años de construcción de las secciones en el módulo de inventario. Esta decisión se tomó con el fin de mantener la coherencia metodológica y evitar introducir supuestos que pudieran afectar la validez del análisis posterior.

4.1.3 Inspecciones

El módulo de Inspecciones en PAVEAir representa el núcleo operativo del software, ya que a través de él se ingresa la información de deterioro visual que permite calcular los índices de condición del pavimento. Este módulo sigue los lineamientos establecidos en las normas ASTM D5340-20 y ASTM D6433-20, mediante los cuales se evalúan el tipo, severidad y cantidad de deterioros presentes en cada Unidad Muestral (UM).

Para cada inspección, se debe registrar:

- Fecha de ejecución.
- Sección evaluada (definida en el módulo de Inventario, incluyendo su respectiva materialidad superficial).
- Número de Unidades Muestrales (UM) de la sección.
- Número de cada UM, con su respectiva área, indicando si siguen un orden definido o si se ingresan de manera aleatoria.
- Deterioros observados, codificados según el sistema de PAVEAir (por ejemplo, código 41 para grietas longitudinales/transversales, 48 para piel de cocodrilo, etc.), junto con su severidad (baja, media, alta) y su magnitud (en m² para pavimentos flexibles o en número de losas en el caso de pavimentos rígidos).

Como ya se mencionó, toda esta información fue extraída de los informes proporcionados por la Dirección de Aeropuertos. Sin embargo, una limitación clave fue la falta de estructura uniforme entre informes, lo que dificultó la automatización del ingreso de datos. Particularmente, no todos los documentos contenían el anexo detallado con la tabla de “Tipo y cantidad de deterioros por UM”, indispensable para alimentar este módulo. En el caso del informe 2015 del Aeródromo La Florida, dicho

anexo no se encontraba disponible, por lo que ese año fue excluido del análisis. Esta situación también se repitió parcialmente en otros aeropuertos de la Red Primaria, lo cual se abordará más adelante en este documento.

El ingreso de datos se realizó manualmente y, para mantener la consistencia temporal del análisis, se estableció por convención que todas las auscultaciones se consideraron realizadas a inicios del año indicado en cada informe, ya que no se cuenta con las fechas exactas de ejecución. Si bien esta suposición introduce una leve distorsión temporal, permite mantener una coherencia anual para la construcción de tendencias.

Los datos fueron estandarizados según el tipo de pavimento: metros cuadrados (m²) para pavimentos flexibles y número de losas para pavimentos rígidos. En las secciones donde no se registraron deterioros, pero existía constancia de inspección, se ingresó manualmente un estado "sin deterioro". Este paso es fundamental para el correcto funcionamiento del software, ya que, si no se explicita, el cálculo del PCI se realiza promediando solo las UMs ingresadas con deterioro, excluyendo las demás, lo cual puede disminuir artificialmente el valor promedio del índice.

Cabe destacar que la base de datos generada para este estudio es pública y se encuentra disponible en la plataforma oficial de PAVEAir (<https://faapaveair.faa.gov/>), bajo el nombre "LaFlorida". Esta base puede ser consultada directamente por otros investigadores, lo que elimina la necesidad de incorporar tablas extensas de deterioro dentro del presente documento.

En cuanto a la distribución de las UMs, se observó que tanto la sección PI-1 (59 UM de 450 m²) como PI-2 (118 UM de 450 m²) mantuvieron su configuración constante a lo largo del período 2014–2024. En contraste, los rodajes RB y RC (ver Figuras 1 y 2) conservaron una organización de 5 UM de 425 m² cada uno, mientras que las plataformas fueron las que presentaron mayores variaciones en su nomenclatura y subdivisión, ya sistematizadas en la Tabla 1. Estas diferencias fueron cuidadosamente consideradas para asegurar la consistencia del análisis.

Finalmente, es importante señalar que, una vez ingresados todos los deterioros de manera correcta, es necesario ejecutar manualmente el cálculo del PCI en cada inspección individual. Si este paso no se realiza, el software no procesa los datos ingresados, lo que puede provocar resultados incompletos o que las inspecciones no se reflejen en los reportes generados por el sistema.

4.2 Modelado de Predicción

El módulo de Modelado de Predicción en PAVEAir permite estimar la evolución futura del índice PCI de las distintas secciones del pavimento, a partir de los datos históricos de deterioro registrados en las inspecciones. Esta funcionalidad es clave para la planificación del mantenimiento, ya que entrega una base objetiva para programar intervenciones, maximizando la vida útil de los pavimentos y optimizando los recursos disponibles.

Por defecto, el software incluye seis curvas de deterioro predeterminadas, agrupadas por tipo de rama funcional y tipo de pavimento:

- Pistas: una curva para pavimento asfáltico y otra para pavimento de hormigón.
- Rodajes: una curva para asfalto y otra para hormigón.
- Plataformas: una curva para asfalto y otra para hormigón.

Estas curvas predeterminadas se asignan automáticamente a las secciones según los atributos definidos durante el ingreso del inventario. Si bien permiten realizar simulaciones básicas desde el inicio, su precisión puede ser limitada en contextos locales, especialmente cuando las condiciones de operación y deterioro difieren significativamente del comportamiento promedio sobre el cual se basan.

Por ello, el módulo también permite reemplazar estas curvas por modelos personalizados, generados a partir de los datos reales ingresados en el módulo de inspecciones, lo cual representa el uso más recomendado del software. Para construir estas curvas de familia personalizadas, el usuario puede filtrar las secciones en función de distintos atributos (tipo de uso, año de construcción, materialidad, zona climática, rango, entre otros), con el fin de agrupar tramos con condiciones similares. Posteriormente,

el software genera curvas ajustadas según el comportamiento observado, cuya forma y complejidad dependen directamente de la calidad y coherencia de los datos de entrada.

A modo ilustrativo, en la Figura 4 se presenta el módulo de modelado de predicción, donde se visualiza la curva predeterminada para pavimentos flexibles y se indica el espacio para agregar nuevas curvas de familia.

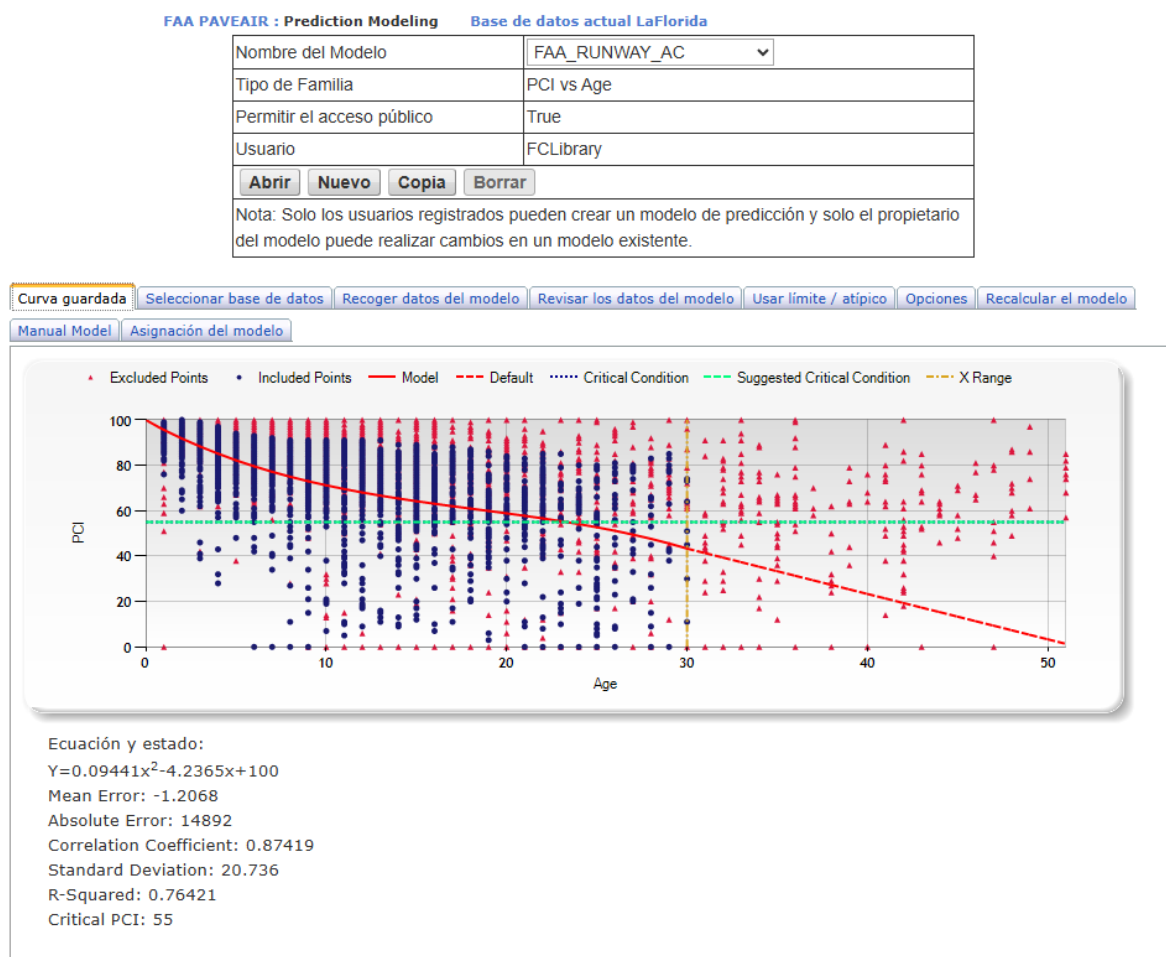


Figura 4. Curva de familia de PAVEAir para pavimentos flexibles.

En el caso del Aeródromo La Florida, se intentó aplicar esta metodología utilizando los datos históricos de deterioro disponibles para todas las ramas de la red. Las secciones fueron agrupadas del siguiente modo:

- Las pistas PI-1 y PI-2 se analizaron de forma separada.
- Los rodajes RC y RB se unificaron para aumentar la cantidad de datos disponibles.
- Las plataformas se agruparon en dos conjuntos según su tipo de superficie (flexible y rígida).

Desde un principio se preveían dificultades para esta tarea, debido a la ausencia de información clara sobre mantenciones en años clave, lo que afecta la consistencia temporal de los datos. A esto se suman otros factores, como la excesiva subdivisión de las plataformas y la escasa superficie en los rodajes, lo que complica la construcción de una tendencia representativa y robusta.

A pesar de estos desafíos, se logró generar dos curvas de familia: una correspondiente a la sección PI-2 (borde de pista) y otra para las plataformas de pavimento flexible, presentadas en las Figuras 5 y 6, respectivamente. El resto de los grupos de secciones no cumplía con los requerimientos mínimos que el software exige para construir curvas de predicción. Estos requisitos no están del todo detallados en el manual de usuario, pero en la práctica incluyen:

- Contar con al menos tres inspecciones válidas para cada sección.
- Mantener una progresión temporal coherente y decreciente del PCI.
- No presentar discontinuidades abruptas atribuibles a intervenciones no registradas.

En muchas ocasiones, el software filtra automáticamente los datos que considera inconsistentes o insuficientes, impidiendo así la generación de una curva. En consecuencia, a pesar de los esfuerzos realizados, no fue posible generar curvas para secciones clave como la pista PI-1, que constituye el eje principal de esta investigación.

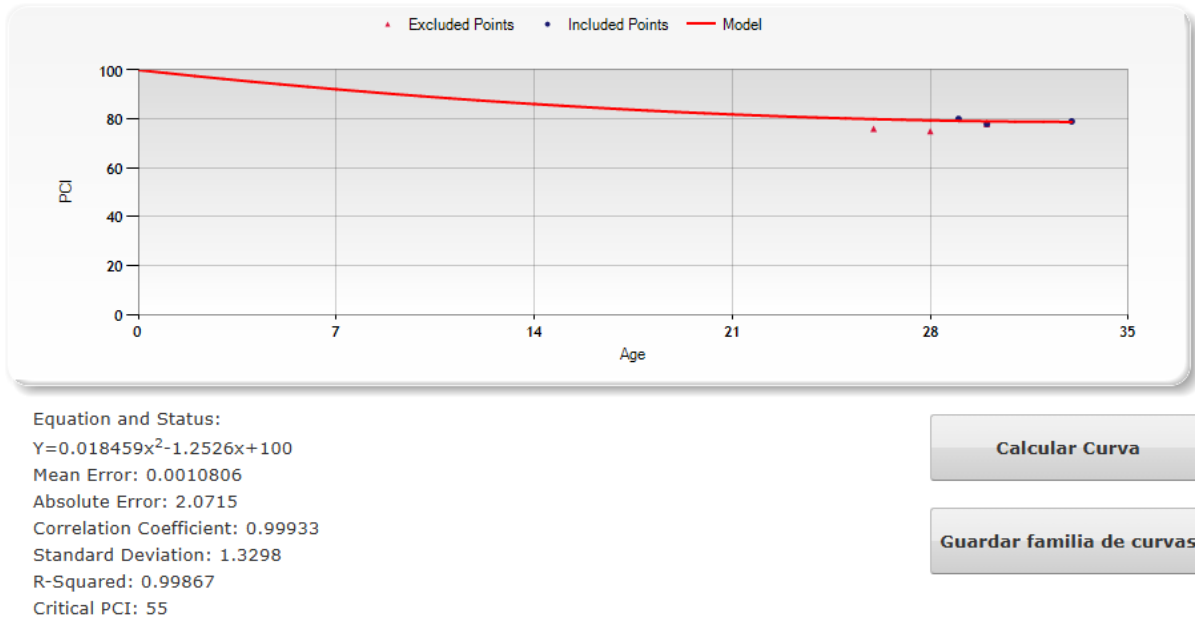


Figura 5. Curva de familia para la PI-2 del Aeródromo La Florida.

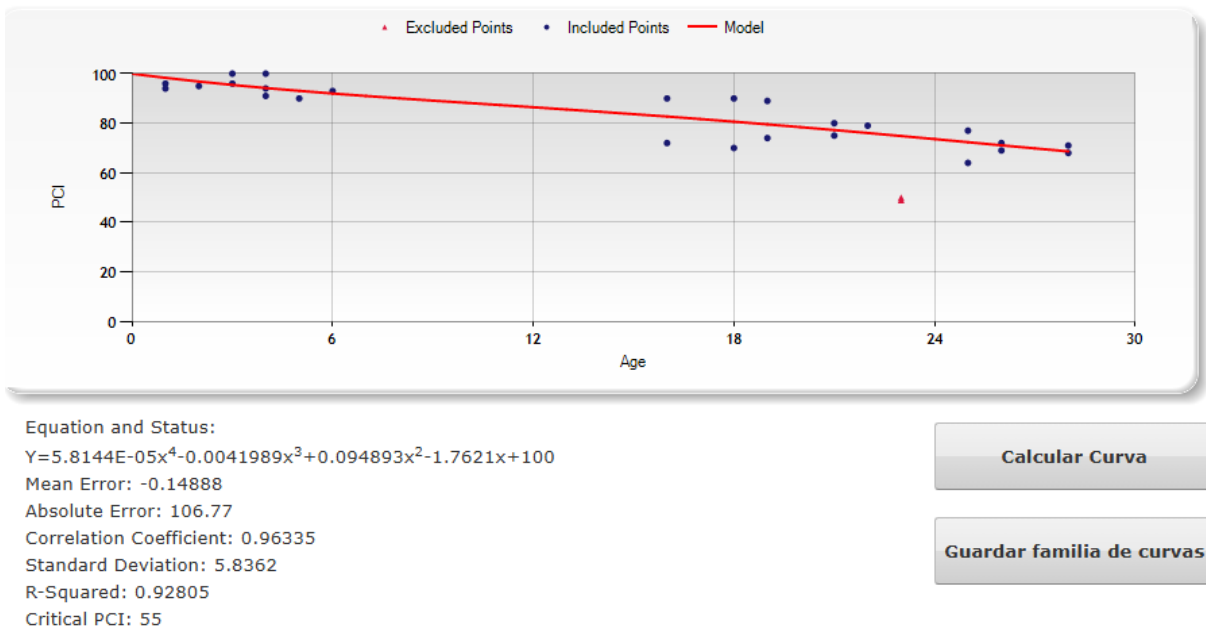


Figura 6. Curva de familia para plataformas asfálticas del Aeródromo La Florida.

Desde un análisis preliminar, cabe cuestionarse si las curvas obtenidas son efectivamente representativas de la realidad. En el caso de PI-2, por ejemplo, la curva se construyó a partir de un subconjunto limitado de los datos disponibles, ya que el software filtró más de la mitad de los registros. Además, los valores

considerados comienzan recién en el año 29 de edad del pavimento, lo que genera un vacío importante en los primeros años de deterioro. Si bien expertos de la Dirección de Aeropuertos han indicado que esta sección no ha recibido mantenencias mayores en las últimas décadas, se observaron aumentos puntuales en el PCI que podrían estar relacionados con mejoras indirectas, como intervenciones en los rodajes adyacentes que conectan con las PI-2.

En cuanto a la curva de las plataformas, las múltiples subdivisiones y el historial de mantenencias documentadas introducen un nivel alto de heterogeneidad que compromete la confiabilidad del modelo.

Finalmente, la imposibilidad de generar una curva para la PI-1 representa una limitación significativa para el cumplimiento de los objetivos de esta memoria, dejando un vacío importante en la capacidad de análisis predictivo del software para el caso de estudio principal.

4.3 Análisis de Condición

El módulo Análisis de Condición en PAVEAir permite visualizar y proyectar la evolución del PCI a partir de las curvas de familia asignadas o personalizadas. Este módulo ofrece herramientas gráficas que permiten realizar el seguimiento del deterioro de una sección o conjunto de secciones, estableciendo intervalos de proyección temporal y seleccionando distintos niveles de análisis: red, rama o sección específica. Cabe destacar que, si bien PAVEAir también calcula otros índices (SCI y FOD), esta sección solo permite la utilización explícita del PCI.

A modo ilustrativo, en la Figura 7 se presenta la interfaz del módulo, donde se aprecian los elementos clave del análisis: la selección de red, rama y sección; la elección del tipo de curva a utilizar (asignada o artificialmente degradada); el periodo de proyección; y un resumen de advertencias en caso de inconsistencias en los datos de deterioro.

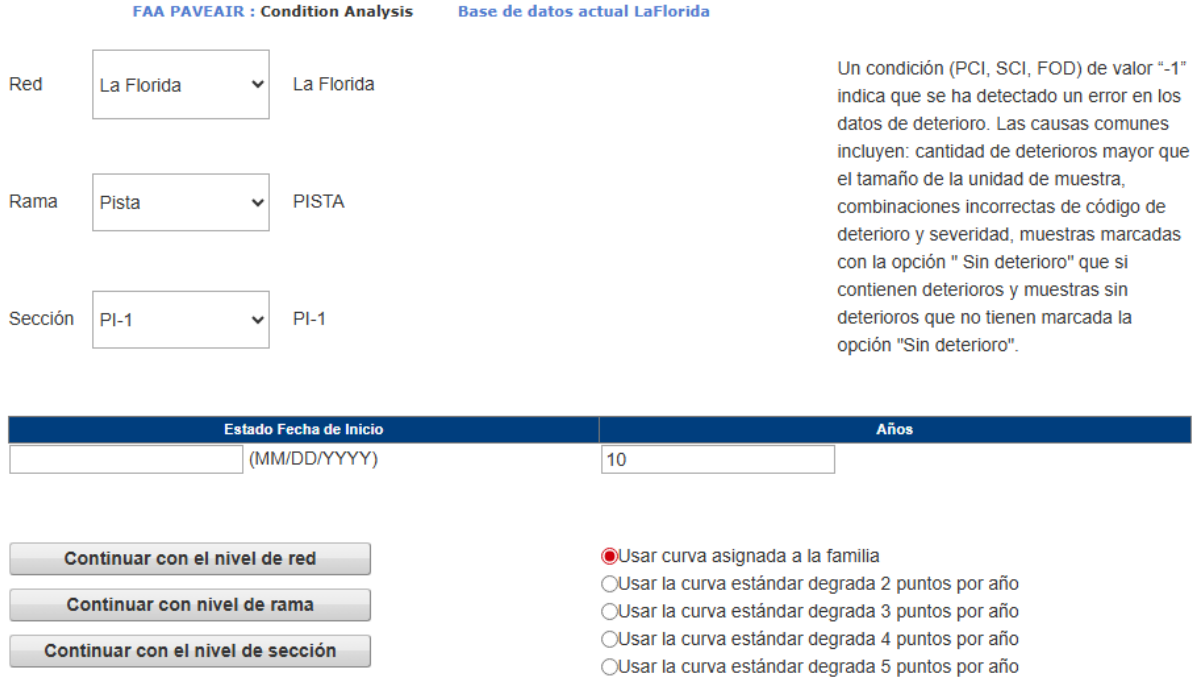


Figura 7. Vista general del módulo Análisis de Condición en la plataforma PAVEAir.

En el marco de esta investigación, se optó por realizar el análisis de condición para las siguientes estructuras:

- Nivel de sección, para las pistas PI-1 y PI-2, dado que representan los elementos centrales de operación del aeródromo y cuentan con información más completa y consistente.

- Nivel de rama, para los rodajes (RB y RC) y las plataformas. En el caso de los rodajes, por su tamaño reducido; en el caso de las plataformas, debido a su heterogeneidad, subdivisión variable y cambios de nomenclatura a lo largo del tiempo, lo cual dificulta un análisis detallado sección por sección.
- Nivel de red, únicamente como demostración de las capacidades de la herramienta, sin valor analítico específico para los objetivos de esta memoria.

Cabe señalar que, a pesar de haberse generado dos curvas de familia (ver Sección 4.2), estas no fueron utilizadas como base del análisis de condición, debido a su cuestionable representatividad. Como se discutió previamente, las curvas presentaban vacíos relevantes de datos, una aplicación de filtros excesiva por parte del sistema, y una baja coherencia temporal, lo que compromete su fiabilidad para la toma de decisiones. En su lugar, se optó por utilizar curvas estándar por defecto del software según el requerimiento.

Antes de presentar los resultados, es importante destacar cómo se generan las curvas de evolución del PCI dentro del módulo de Análisis de Condición. Estas curvas se construyen a partir de la interacción de tres componentes clave:

1. Los valores históricos de PCI obtenidos desde las inspecciones ingresadas.
2. Una interpolación lineal entre estos puntos, que permite trazar una curva continua a pesar de que los datos de PCI disponibles son puntuales (una vez por año o cada ciertos años).
3. La curva de familia asignada a cada sección, que se utiliza para proyectar los valores futuros del PCI más allá del último dato observado. En algunos casos, si las condiciones lo permiten, el software también puede modelar puntos intermedios en los que no se dispone de inspecciones, complementando así la representación del deterioro.

Esta lógica de funcionamiento permite que el sistema entregue curvas continuas y proyectadas, incluso cuando hay vacíos temporales en los datos de entrada. Sin embargo, también implica que cualquier inconsistencia o debilidad en estos tres elementos puede afectar la confiabilidad de los resultados proyectados.

Las siguientes figuras presentan los resultados obtenidos para la pista central, borde de pista, rodajes a nivel de rama, plataformas a nivel de rama y la red completa del aeródromo, respectivamente, considerando un análisis a 20 años, basado en 10 años de mediciones históricas y 10 años de proyección.



Figura 8. Evolución proyectada del PCI para la sección PI-1 (pista central) a 20 años.



Figura 9. Evolución proyectada del PCI para la sección PI-2 (borde de pista) a 20 años.



Figura 10. Análisis agregado de condición para los rodajes RC y RB (nivel de rama) a 20 años.



Figura 11. Análisis agregado de condición para las plataformas (nivel de rama) a 20 años.



Figura 12. Ejemplo de análisis de condición a nivel de red para el Aeródromo La Florida a 20 años.

El objetivo de esta sección es ejemplificar el uso del módulo en distintos niveles de análisis y resaltar sus funcionalidades. No obstante, el valor predictivo de las gráficas debe interpretarse con cautela (curvas de 2024 en adelante), dada la ausencia de curvas de familia suficientemente representativas que permitan sustentar decisiones técnicas de largo plazo. Por otro lado, dentro del periodo histórico analizado (2013–2024) se observan aumentos parciales en los valores de PCI, los cuales, asumiendo una correcta toma de datos, pueden atribuirse a intervenciones de mantenimientos locales o mayores realizadas en las zonas correspondientes.

Con respecto a los resultados, el análisis se aborda desde el nivel más general al más específico:

La Figura 12 muestra la condición global de la red, la cual se mantiene, en general, por sobre los 80 puntos de PCI, lo que resulta coherente con los requerimientos operacionales del aeródromo. Se identifican al menos tres periodos de alza en los valores de PCI previos al año 2024 (2015–2016, 2019–2020 y 2023–2024), lo que podría reflejar el efecto de mantenimientos ejecutados en esas fechas, en concordancia con las intervenciones registradas en la Sección 4.1.2. Las Figuras 10 y 11 revelan comportamientos diferenciados entre ramas. En el caso de los rodajes, estos parten desde un estado crítico y presentan alzas notorias en los mismos tres periodos señalados. En cambio, el comportamiento de la curva de las plataformas resulta más errático, con incrementos y descensos menos predecibles, lo cual es coherente con las múltiples intervenciones que han afectado esta rama a lo largo de los años. Esto también se refleja en los cambios de nomenclatura resumidos en la Tabla 1.

Finalmente, las Figuras 8 y 9 permiten un análisis más detallado a nivel de sección. En ambos casos son evidentes las intervenciones realizadas; sin embargo, la diferencia en la pendiente de las curvas evidencia que la pista central constituye el componente más crítico de la red, ya que presenta un deterioro más acelerado y pronunciado que el observado en otras ramas. Por otro lado, el borde de pista muestra un comportamiento más estable en el tiempo, lo cual tiene sentido si se considera que sus deterioros probablemente se deben más a factores climáticos o a cargas puntuales en zonas de transición hacia los rodajes.

Vale la pena destacar que estas tendencias coinciden razonablemente con la información de mantenencias recopilada en la sección 4.1.2, lo que valida parcialmente las proyecciones obtenidas. Sin embargo, este ejercicio también subraya la importancia de contar con mayor detalle sobre la naturaleza, magnitud y localización de dichas intervenciones, información que lamentablemente no estuvo disponible para esta investigación y que podría haber enriquecido significativamente el análisis.

4.4 Mantenimiento y Rehabilitación

El módulo de Mantenimiento y Rehabilitación (M&R) de PAVEAir representa una de las herramientas clave para esta investigación, ya que permite evaluar y proyectar escenarios de conservación de pavimentos bajo diversos criterios de condición, prioridad operativa y restricciones presupuestarias.

Este módulo cuenta con una amplia gama de parámetros configurables que permiten adaptar la modelación a distintos enfoques de gestión. Entre sus funcionalidades destacan:

- Política Localizada: Define la acción de mantenimiento a aplicar frente a cada tipo de deterioro específico, considerando también su severidad. No permite generar alternativas, lo que obliga a definir de forma explícita qué tratamiento se aplica a cada deterioro.
- Tipo / Costo de Trabajo Localizado: Asocia un costo unitario a cada tipo de intervención localizada, permitiendo estimaciones presupuestarias más realistas.
- Consecuencia del Trabajo Localizado: Establece cómo afecta cada acción de mantenimiento a la condición del deterioro. Por ejemplo, un sellado puede reducir una grieta severa a moderada, o un bache puede pasar a considerarse un parche.
- Política Global: Permite definir tratamientos de mantenimiento que afectan a toda una sección (global), indicando su frecuencia, efecto en años de vida útil y costo por unidad de superficie tratada.
- Familias M&R (MR Family): Agrupan todos los parámetros anteriores en una configuración guardable, que puede reutilizarse para distintas redes o escenarios.
- Condición Mínima: Permite definir un valor mínimo de PCI aceptable por rama o sección. Al alcanzarse dicho umbral, se activan estrategias de intervención.
- Prioridad de uso de rama / rango de sección / mantenimiento mayor: Estas opciones permiten jerarquizar las acciones dentro del modelo, priorizando sectores clave de la red.
- Costo por condición: Asigna valores económicos al aumento del PCI, diferenciando según si se está por debajo o por encima del umbral crítico, y considerando el tipo de pavimento (aeroportuario o vial).
- Presupuesto: Establece un límite anual de recursos financieros disponibles para realizar intervenciones, permitiendo simular escenarios de restricción presupuestaria.

La Figura 13 muestra la interfaz del módulo que permite editar todos estos parámetros:

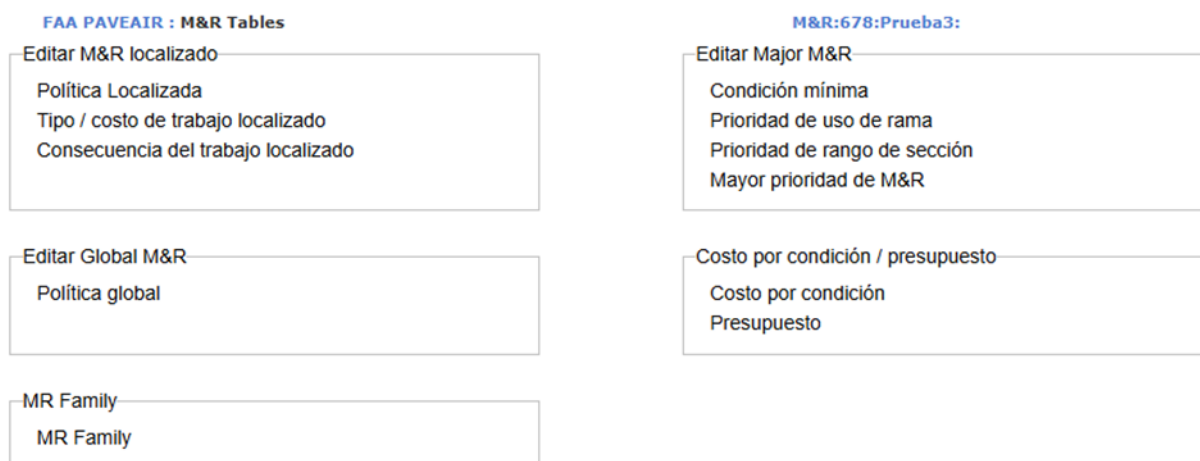


Figura 13. Interfaz del módulo M&R Tables de PAVEAir, con las distintas configuraciones disponibles.

Una vez configurados estos parámetros, el módulo permite aplicar tres estrategias de planificación distintas:

- PCI Crítico: Estrategia basada en mantener o recuperar el PCI por sobre un valor umbral predefinido. Se puede optar entre realizar mantenimiento localizado, global o mayor, según el nivel de criticidad. Permite configurar si se evaluará bajo presupuesto fijo o se calculará el requerimiento necesario para cumplir con el objetivo, ajustando políticas, precios y

planificaciones previas. El análisis puede abarcar entre 1 y 10 años, y sus resultados se visualizan a nivel global, de rama o de sección.

- Condición Mínima: Asegura que ninguna sección baje de un PCI mínimo predefinido, cuando esto sucede, se calcula el costo de un mantenimiento mayor en toda la sección que lleve al máximo el PCI de esta. Similar al método anterior, permite definir duración del plan (1 a 10 años), uso de políticas de condición mínima, inflación, uso de MR Family y presupuestos. Es útil para políticas conservadoras que buscan mantener un estándar de servicio uniforme en toda la red.
- Consecuencia de la Reparación Local: Evalúa el impacto inmediato de realizar acciones de mantenimiento localizado sobre deterioros específicos. Se diferencia según si el PCI actual es mayor o menor al umbral crítico (por ejemplo, PCI 55), lo que permite planificar mantenimientos preventivos o de emergencia. El resultado puede analizarse como mejora en puntos de PCI o mediante el impacto detallado de cada acción configurada previamente.

Cabe destacar que la personalización detallada de todos los parámetros de análisis disponibles en las distintas configuraciones del módulo M&R escapa al alcance de esta investigación. Parte del desarrollo del proyecto Fondef, en el cual se enmarca este trabajo, consiste justamente en evaluar y optimizar estas configuraciones, por lo que existen equipos de investigación específicos abocados a dichas tareas.

En consecuencia, esta memoria optó por utilizar los parámetros por defecto del software, modificando únicamente la configuración de Condición Mínima. Esta decisión se basó en que, por defecto, dicha opción utiliza el umbral de PCI Crítico (usualmente 55), lo que no resultaba coherente con los fundamentos teóricos desarrollados en el marco de esta investigación.

Por ello, se definió una condición mínima de PCI igual a 75, valor que representa la frontera entre pavimentos en buen estado y estado regular (Durán y Fernandes Júnior, 2014), y que además se encuentra próximo al umbral identificado por Miah (2022) en su investigación en Australia, donde se recomienda cambiar de tratamientos superficiales a intervenciones más profundas cuando el PCI cae por debajo de los 70 puntos. Esta evaluación se programó para realizarse en los años 2025 (inicio del periodo de análisis), 2029 (punto medio) y 2034 (final del horizonte de 10 años permitido por el software).

Además, con el objetivo de explorar las capacidades del módulo sin incrementar en exceso la complejidad del estudio, se optó por aplicar un enfoque distinto de modelación en cada aeródromo analizado. Para el caso del Aeródromo La Florida, se implementó el método de Condición Mínima.

El paso a paso de la modelación para el Aeródromo La Florida puede revisarse en el Apéndice 1, donde se detalla cada una de las configuraciones empleadas.

Finalmente, a modo de síntesis, los resultados presentados en la Tabla A-1 permiten observar que el modelo proyecta la necesidad de intervenir ambas pistas (PI-1 y PI-2) en los años 2029 y 2034, con el objetivo de mantener el PCI por sobre el umbral definido como condición mínima. En contraste, las plataformas no requieren intervenciones hasta 2034, mientras que los rodajes solo son intervenidos hacia el final del período proyectado.

Es especialmente relevante destacar que las pistas presentan intervenciones cuya magnitud produce aumentos progresivos del PCI: en 2029 el incremento es de 21 puntos (de 72 a 93), y en 2034 se proyecta una mejora de 10 puntos (de 78 a 98). Esto se explica porque en la primera instancia solo se interviene la PI-2, mientras que en la segunda únicamente se actúa sobre la PI-1. La diferencia en el aumento del PCI entre ambos años se relaciona directamente con el área de las secciones, ya que la PI-2 posee el doble de superficie que la PI-1, por lo tanto, su intervención tiene un impacto más significativo en el promedio general de la pista.

Por otro lado, las acciones proyectadas para plataformas y rodajes elevan el PCI hasta valores máximos, dado que para esas fechas el modelo considera necesario intervenir todas las secciones asociadas a dichas ramas.

Este comportamiento evidencia la capacidad del módulo de jerarquizar secciones y definir tipos de intervención de acuerdo con el deterioro proyectado y los umbrales establecidos, lo que permite construir estrategias de mantenimiento más focalizadas.

4.5 Módulos y Funciones Extras

Además de los módulos principales de modelación, PAVEAir incorpora una serie de herramientas complementarias que permiten ampliar el análisis, configurar el entorno de trabajo o explorar funcionalidades en desarrollo. A continuación, se describen brevemente los principales módulos adicionales disponibles:

4.5.1 Módulo de Informes

El módulo de informes permite generar representaciones gráficas o tabulares a partir de los datos ingresados en las demás secciones del sistema. Entre sus funcionalidades, se encuentran la posibilidad de visualizar el histórico de PCI de una sección o red, listar las mantenciones registradas o extraer resúmenes por año. Si bien conceptualmente es una herramienta valiosa, su funcionamiento ha demostrado ser lento e inestable, con largos tiempos de carga y ciertas dificultades para generar resultados completos. A pesar de ello, representa una propuesta interesante dentro del sistema, especialmente si se considera su potencial como complemento para la visualización de información clave.

4.5.2 Módulo de Mapas

El módulo de mapas tiene como objetivo permitir la visualización georreferenciada de la red aeroportuaria ingresada, utilizando archivos en formato Shapefile (SHP). Esta funcionalidad busca representar gráficamente la ubicación de ramas y secciones sobre un plano real del aeródromo, ofreciendo una perspectiva espacial del deterioro y facilitando la interpretación de los datos. En este estudio se logró cargar los archivos requeridos para activar esta función; sin embargo, el sistema no permitió operar correctamente sobre ellos. Si bien no se cuenta con una explicación oficial al respecto, se sospecha que esta limitación puede deberse a que la plataforma está principalmente orientada a aeropuertos estadounidenses, o bien que la herramienta aún presenta fallas para usos internacionales. A pesar de este inconveniente, el módulo plantea una idea atractiva para futuros desarrollos o adaptaciones del software.

4.5.3 Módulo de Herramientas

Dentro del menú de herramientas se encuentran diversas opciones de configuración que permiten adaptar el entorno de trabajo a las preferencias del usuario. Es posible seleccionar entre los idiomas inglés y español, aunque la traducción al español es incompleta y presenta varios errores, y cambiar entre sistemas de medición inglés y métrico. También se puede acceder a una visualización detallada de las curvas base utilizadas por PAVEAir para el cálculo del PCI según cada tipo de deterioro, lo que resulta útil para comprender la lógica interna del software y evaluar el impacto de distintos daños sobre la condición general del pavimento.

4.5.4 Pestaña Auxiliar

Finalmente, la pestaña auxiliar presenta una serie de funcionalidades experimentales que se encuentran en proceso de desarrollo. Según información obtenida a través del canal de contacto dispuesto por la propia plataforma de PAVEAir, se espera que en el futuro se incorporen herramientas relacionadas con parámetros climáticos, datos de tráfico aéreo e inspecciones estructurales por carga, lo que ampliaría significativamente las capacidades del sistema. Actualmente, estas opciones no poseen una funcionalidad activa clara, pero reflejan el interés continuo por parte del equipo desarrollador en expandir el alcance de la plataforma.

Cabe destacar que muchos de los elementos disponibles en la plataforma presentan un carácter experimental o en evolución, incluyendo algunas funcionalidades de clasificación, etiquetas y categorizaciones, que podrían adquirir mayor sentido y utilidad en futuras versiones. En este contexto, resulta evidente que PAVEAir es una herramienta viva, en constante actualización, cuyo desarrollo sigue en curso.

5 Modelación Complementaria en PAVEAir

5.1 Criterios de Selección de los Casos Complementarios

En las etapas iniciales de esta investigación, se evaluaron diversos criterios para seleccionar los aeródromos o aeropuertos adicionales a estudiar junto con el Aeródromo La Florida. Esta selección se realizó en coordinación con otros equipos del proyecto Fondef ID23110113 y consideró múltiples factores, tales como la zona climática, el volumen de tráfico aéreo, la cantidad de informes técnicos entregados por la Dirección de Aeropuertos (DAP), la estructura de los pavimentos y, desde el presente equipo de trabajo, la posible identificación de intervenciones de mantenimiento relevantes durante el período analizado.

El objetivo principal de esta evaluación era seleccionar recintos con características operativas y climáticas similares a La Florida, de modo que las curvas de deterioro generadas en ese caso pudieran validarse, extenderse o contrastarse en otros contextos. Sin embargo, esta estrategia debió ser desechada al constatar una limitación crítica en los datos disponibles: la ausencia generalizada de anexos con deterioros por Unidad Muestral (UM) en la mayoría de los informes proporcionados por la DAP. Esta información, fundamental para alimentar los módulos de inspección y modelado de predicción en PAVEAir, sólo se encontraba de forma estructurada y utilizable en un número muy reducido de aeropuertos.

Frente a esta situación, los únicos recintos que cumplían con este requisito mínimo fueron el Aeropuerto Andrés Sabella, ubicado en Antofagasta, y el Aeródromo Pichoy, en la Región de Los Ríos. En ambos casos, los informes técnicos fueron realizados por la empresa Ferrer y Asociados Ingenieros Consultores (FAIC) por encargo de la DAP, siguiendo la misma metodología aplicada en La Florida. Los documentos disponibles incluyen datos completos de deterioros por UM para los siguientes años:

- Aeropuerto Andrés Sabella: informes correspondientes a los años 2018, 2021 y 2024.
- Aeródromo Pichoy: informes disponibles para los años 2013, 2016 y 2021.

Esta disponibilidad de datos homogéneos y en formato compatible con el software permitió su inclusión como casos complementarios en el análisis, reconociendo desde el inicio que su rol sería más exploratorio que comparativo, centrando el análisis en las limitaciones de PAVEAir más que en los resultados entre modelaciones como tal.

5.2 Aeropuerto Andrés Sabella

El Aeropuerto Andrés Sabella presenta características singulares que lo diferencian notablemente de los otros casos analizados en esta investigación. Su configuración es más compleja, con múltiples calles de rodaje, una pista subdividida en varios tramos funcionales, y plataformas altamente fraccionadas, muchas de las cuales corresponden a sectores específicos intervenidos en distintos años. Estas subdivisiones incluyen tanto pavimentos flexibles como rígidos, lo que añade una capa adicional de complejidad al proceso de modelación.

Además, el recinto ha sido objeto de diversos trabajos de mantenimiento a gran escala en los últimos años, lo que genera discontinuidades en el comportamiento esperado de deterioro. En la práctica, cada sección opera como una unidad casi independiente en términos de edad del pavimento y comportamiento estructural, lo cual representa un reto metodológico importante y justifica el tratamiento específico que se describe en los siguientes apartados.

5.2.1 Curvas de Familia Generadas

Para el Aeropuerto Andrés Sabella, se intentó generar curvas de familia siguiendo una metodología uniforme aplicada a todos los aeródromos de este estudio. Los criterios utilizados para definir las familias fueron los siguientes:

- Pistas: Se generaron dos curvas, diferenciando el centro de la pista del borde, sin considerar los umbrales de tráfico. Ambas secciones fueron clasificadas como de uso primario (P), dado su rol central en la operación del aeropuerto.

- Rodajes: Se agruparon todos los rodajes principales, excluyendo márgenes o rodajes menores, y se clasificaron como de uso secundario (S).
- Plataformas: Se incluyeron las plataformas principales, omitiendo sectores de menor uso o márgenes, y se clasificaron como de uso terciario (T).
- Materialidad: En todos los casos, se realizó una separación adicional por tipo de superficie (flexible o rígida), con el fin de asegurar coherencia en los grupos de análisis.

A pesar de aplicar este criterio, las curvas generadas de forma exitosa fueron limitadas. El aeropuerto cuenta con datos de deterioro para los años 2018, 2021 y 2024; sin embargo, diversos factores como la fragmentación de las secciones, la alta frecuencia de intervenciones recientes y el filtrado automático del software impidieron obtener modelos válidos en todos los casos.

Se lograron generar dos curvas de familia válidas, las cuales se presentan en las Figuras 14 y 15:

- Una para el borde de pista con pavimento flexible (figura 14).
- Otra para las plataformas de hormigón, agrupando secciones relevantes con suficiente información temporal (figura 15).

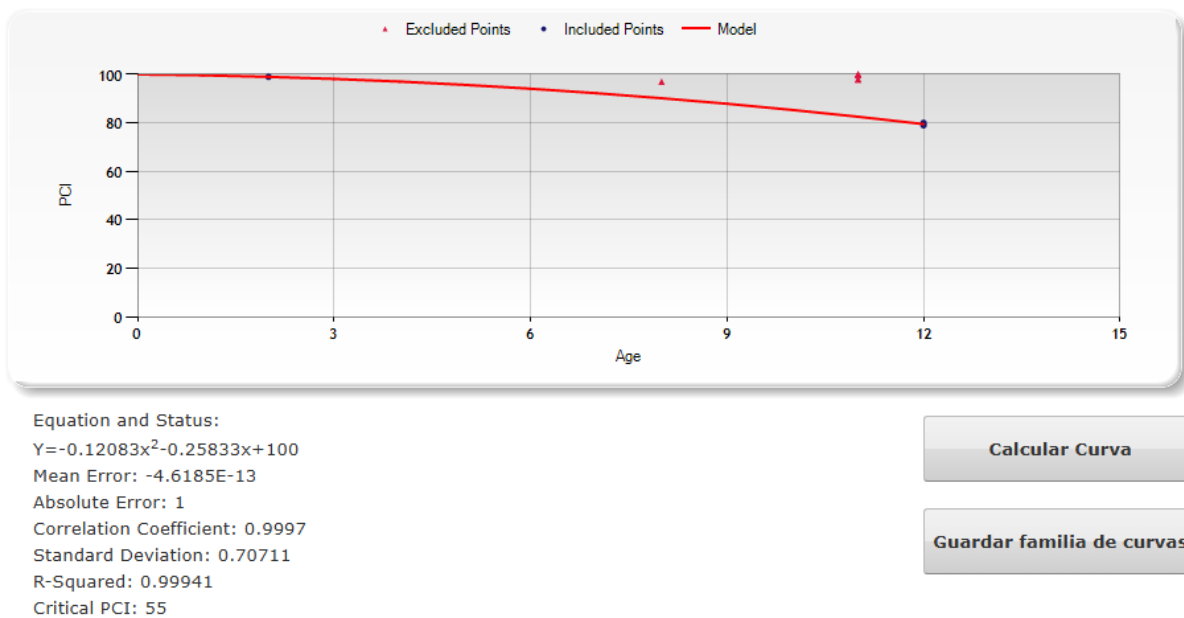


Figura 14. Curva de familia generada para el borde de pista – pavimento flexible.

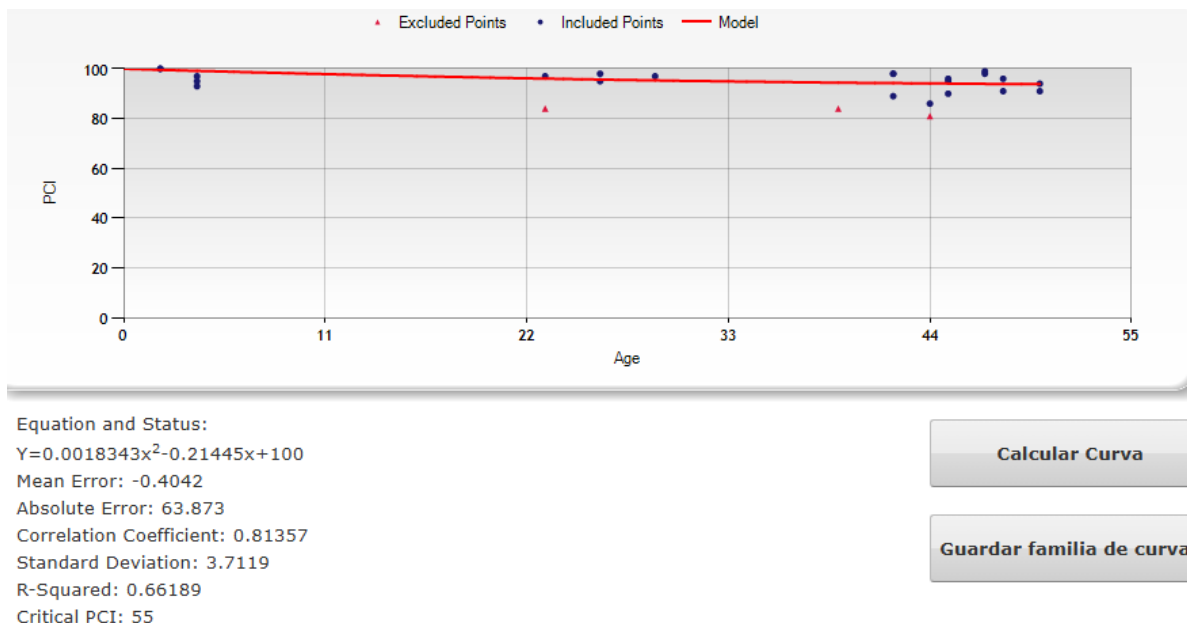


Figura 15. Curva de familia generada para plataformas de hormigón del aeropuerto Andrés Sabella.

En este caso, al igual que en el Aeródromo La Florida, las curvas obtenidas presentan un comportamiento cuestionable. La existencia de múltiples divisiones y periodos de mantenimiento provoca fluctuaciones notorias en los valores de PCI, lo que constituye un aspecto relevante a considerar y uno de los motivos por los cuales estas curvas no fueron finalmente utilizadas en la modelación del módulo de M&R. En la Figura 14, varios de los puntos de medición fueron descartados, resultando en una validación limitada a solo dos puntos con una diferencia temporal de diez años, lo que reduce significativamente su credibilidad. Por otro lado, en la Figura 15 se observa una situación similar a la del Aeródromo La Florida, con una pista cuya edad supera los cincuenta años y de la cual no se dispone de información detallada sobre las intervenciones o mantenimientos realizados.

5.2.2 Modelación por Consecuencia de la Reparación Local

Para el Aeropuerto Andrés Sabella se optó por aplicar el enfoque de Consecuencia de la Reparación Local, uno de los métodos disponibles en el módulo de M&R de PAVEAir. Este método permite calcular el costo estimado y la condición posterior de cada sección si se aplicaran de forma inmediata las reparaciones localizadas recomendadas según los deterioros registrados en la última inspección.

En este caso, las secciones modeladas correspondieron a las pistas, rodajes y plataformas principales en su configuración del año 2024 (ver Figura B-1 en el Apéndice B). Debido a que este análisis no considera proyecciones temporales sino un escenario de intervención inmediata no fue necesario definir un horizonte de evaluación.

Las configuraciones utilizadas se muestran en la Figura B-2 (Apéndice B), donde se aprecia que se aplicaron las políticas por defecto del software para secciones con PCI superior o inferior al umbral crítico (55). Estas políticas definen las acciones a aplicar ante cada tipo de deterioro, los costos asociados y las consecuencias esperadas sobre la severidad del daño.

Los resultados se resumen en la Tabla B-1 (Apéndice B), donde se detallan los deterioros identificados y las reparaciones sugeridas por el sistema. Es especialmente relevante destacar que la buena condición general de los pavimentos en este aeropuerto limitó significativamente la cantidad de intervenciones propuestas.

De hecho, los deterioros de severidad baja fueron omitidos automáticamente por el software, en concordancia con la configuración adoptada. Las únicas acciones sugeridas fueron:

- La corrección de un parche de severidad media en una de las pistas, mediante un parche de asfalto a profundidad.
- La reparación de una grieta en esquina en una losa de plataforma, mediante un parche de hormigón de media profundidad.

Estos resultados reflejan una infraestructura en estado funcionalmente aceptable, con necesidad únicamente de intervenciones puntuales. No se recomendaron acciones de mayor envergadura, lo que refuerza la baja criticidad actual del sistema de pavimentos del aeropuerto Andrés Sabella bajo los criterios definidos, de hecho, las intervenciones definidas no son lo suficientemente influyentes como para mejorar el PCI de las secciones.

5.3 Aeródromo Pichoy

El Aeródromo Pichoy presenta una configuración estructural bastante similar a la del Aeródromo La Florida, contando con una pista central y bordes de pista (PI-1 y PI-2, respectivamente). A diferencia de La Florida, en este caso los bordes están compuestos completamente por pavimento rígido, mientras que la plataforma operativa está constituida exclusivamente por pavimento asfáltico, lo cual lo convierte en un caso de estudio especialmente interesante para contrastar con los otros aeródromos.

Una particularidad relevante es la existencia de parches o sectores reconstruidos dentro de la pista central, que fueron tratados como secciones independientes debido a que poseen edades significativamente distintas respecto del resto de la estructura. Esta decisión se tomó para evitar distorsiones en los análisis temporales del deterioro.

Dado este grado de uniformidad estructural, se esperaba que Pichoy permitiera la generación de curvas de familia más representativas. Sin embargo, como se verá a continuación, la presencia de múltiples intervenciones afectó la calidad de los datos disponibles.

5.3.1 Curvas de Familia Generadas

Al igual que en el caso del Aeropuerto Andrés Sabella, se aplicaron los siguientes criterios para intentar generar curvas de familia:

- Pistas: Separación en pista central y bordes de pista, ignorando los umbrales.
- Rodajes: Inclusión de todos los tramos operativos excluyendo márgenes o accesos secundarios.
- Plataformas: Incorporación de toda la plataforma asfáltica excluyendo bordes.
- Materialidad: Clasificación y filtrado independiente entre pavimentos asfálticos y de hormigón.

A pesar de cumplir con estos criterios metodológicos, ninguna de las familias analizadas cumplió con los requisitos mínimos del software para la generación automática de curvas, debido principalmente a la falta de consistencia en los valores del PCI y a la presencia de cambios abruptos derivados de mantenimientos no especificados con claridad en los documentos disponibles. Por esta razón, el Aeródromo Pichoy no cuenta con curvas de familia generadas válidas para su análisis en el módulo de predicción.

5.3.2 Modelación por PCI Crítico

La modelación del Aeródromo Pichoy se realizó utilizando el enfoque de PCI Crítico, una estrategia que permite evaluar la evolución del pavimento en función de su Índice de Condición (PCI), bajo la premisa de mantenerlo por sobre un umbral mínimo predefinido. Para este análisis se consideraron todas las ramas y secciones principales del aeródromo, excluyendo aquellas de uso secundario, tal como se muestra en la Figura C-1.

Como se detalla en el Apéndice C, se configuró un horizonte de análisis de 10 años a partir de la fecha de la última auscultación (Figura C-2). No se establecieron restricciones presupuestarias; en su lugar, se aplicó la opción de requerimiento de presupuesto, con el objetivo de calcular la inversión necesaria para mantener los pavimentos en buenas condiciones. Aunque el umbral crítico por defecto en PAVEAir es PCI 55, en este caso se definió un PCI objetivo de 80, con el fin de forzar al sistema a proponer intervenciones más exigentes, acordes con la buena condición actual de la red (Figura C-3).

Las políticas adoptadas permitieron realizar intervenciones localizadas en el primer año, y aplicar tratamientos globales tipo recapado en años posteriores, en concordancia con las prácticas observadas en Chile según lo mencionado en reuniones con personal de la DAP (Figura C-4).

Respecto a los resultados obtenidos (ver Tabla C-1 del Apéndice C), se observa una estrategia claramente escalonada. El modelo comienza con una inversión importante en los primeros dos años, elevando el PCI de 74 a 92 en 2025, y de 89 a 93 en 2026. Posteriormente, durante el periodo intermedio (2027–2034), se aplican únicamente tratamientos preventivos, los cuales desaceleran la disminución del PCI, aunque sin detenerla, hasta alcanzar un valor de 73. Finalmente, en el año 2035, se proyecta una intervención global, que eleva el PCI desde 71 a 88.

Este comportamiento evidencia una lógica consistente: extender la vida útil de los pavimentos mediante acciones preventivas, aplicando rehabilitaciones mayores solo cuando se aproxima el umbral crítico. Cabe destacar que, conforme a las configuraciones por defecto del software, los tratamientos preventivos no aumentan el PCI, sino que reducen su tasa de deterioro.

6 Análisis de Resultados

6.1 Evaluación de los Resultados del Estudio

Los resultados obtenidos en esta investigación pueden agruparse en dos grandes líneas: la generación de curvas de familia, y la planificación de M&R a través del módulo correspondiente de PAVEAir.

En cuanto a las curvas de familia, se evidenció que las generadas por el software no logran satisfacer los requerimientos mínimos para ser utilizadas en un SGPA viable en el contexto chileno. Esta limitación no se atribuye exclusivamente al software, sino también a la naturaleza incompleta e inconsistente de los datos de entrada, tal como se discutió en cada caso de estudio. Por lo tanto, una base de datos más completa y homogénea permitiría evaluar de manera más precisa la capacidad real del software, aunque ello no garantiza que el sistema, en su forma actual, sea plenamente adecuado para el contexto chileno. En consecuencia, no es posible realizar un análisis detallado ni extraer conclusiones robustas a partir de las curvas obtenidas.

Respecto a los planes de M&R, si bien estos dependen en gran parte de las curvas de deterioro disponibles, su configuración fue útil para explorar las funcionalidades del software. Se destaca positivamente la amplitud de opciones paramétricas que ofrece PAVEAir, permitiendo adaptar los modelos a distintos criterios estratégicos (condición mínima, PCI crítico, consecuencia de reparación, etc.). Este abanico de posibilidades representa un valor añadido para su aplicación futura, siempre que se disponga de una base de datos más completa.

En este sentido, los resultados numéricos obtenidos en las simulaciones no deben interpretarse como valores absolutos ni transferibles directamente a la toma de decisiones. Más bien, el objetivo fue evaluar los alcances y limitaciones del software, lo que permite sentar las bases para futuras aplicaciones dentro del proyecto Fondef y adaptaciones que respondan mejor a las condiciones locales. Este punto será profundizado en las conclusiones del presente documento.

6.2 Contraste con Otras Líneas del Proyecto Fondef

En el marco del proyecto Fondef ID23I10113, se están desarrollando investigaciones paralelas que abordan problemáticas complementarias a las planteadas en este trabajo. Dos de ellas resultan especialmente relevantes para contrastar los resultados obtenidos con PAVEAir: la investigación de Córdova (2025), enfocada en la generación de curvas de deterioro mediante modelos markovianos aplicados a pistas aeroportuarias, y la de Muñoz (2025), centrada en la comparación de planes de mantenimiento y curvas de desempeño generadas con PAVER y un SGPA adaptado a las condiciones chilenas.

La comparación con el trabajo de Córdova presenta limitaciones importantes, ya que su metodología se basa únicamente en datos de PCI, lo que le permitió trabajar con una mayor cantidad de informes que los utilizados en esta memoria, al no requerir el anexo específico con deterioros por UM. Además, su

enfoque se restringió exclusivamente a pistas, sin considerar rodajes ni plataformas, y aplicó filtros de datos más estrictos para garantizar la validez estadística de sus curvas. Otro punto diferenciador es que sus curvas modelan el deterioro en función del tiempo proyectado (años hacia adelante), mientras que PAVEAir lo hace en función de la edad del pavimento, lo que introduce una diferencia conceptual fundamental que dificulta cualquier comparación directa.

En cuanto al trabajo de Muñoz, su enfoque es mucho más comparable al de esta investigación, ya que abordó el ingreso de datos en PAVER para los mismos aeródromos y con información equivalente. No obstante, una diferencia crítica es que, a pesar de la limitada cantidad de datos en algunos tramos, PAVER fue capaz de generar curvas de familia para todas las secciones estudiadas. Estos resultados reflejan que PAVER es ampliamente superior a PAVEAir en la generación de curvas de familia, a pesar de que el método principal en ambos casos corresponde a regresiones polinómicas. Esto sugiere dos diferencias clave: la mayor capacidad computacional de PAVER y la incorporación de modelos empíricos en su proceso de ajuste. Si bien este último aspecto puede introducir una mayor incertidumbre en los resultados, en contextos como el chileno, donde los registros de inspección son irregulares y existe una limitada trazabilidad de las mantenciones, dicha flexibilidad resulta especialmente valiosa para obtener representaciones más realistas del comportamiento del pavimento.

La discusión respecto de cuál de estos enfoques resulta más útil depende del horizonte de planificación y del grado de incertidumbre que se esté dispuesto a aceptar. Mientras que PAVEAir requiere datos limpios y extensos para producir curvas más representativas, PAVER ofrece una solución más pragmática frente a la escasez de información, permitiendo obtener resultados razonables para planificaciones de corto a mediano plazo. En este contexto, si bien PAVER se presenta como una herramienta más robusta dadas las condiciones actuales del país, la alternativa ideal sería el desarrollo de un SGPA adaptado a la realidad nacional, objetivo final del presente proyecto Fondef. Esto se fundamenta en que los modelos empíricos de PAVER fueron calibrados en aeropuertos de Estados Unidos, bajo condiciones operacionales, climáticas y constructivas distintas a las chilenas. Además, el nivel de incertidumbre asociado a la falta de registros históricos y de mantenimiento en el país limita la confiabilidad de los resultados generados por software foráneos. Un SGPA desarrollado localmente permitiría incorporar metodologías más modernas, como el uso de inteligencia artificial o redes neuronales, para compensar la escasez de datos y mejorar la capacidad predictiva. Finalmente, un sistema administrado directamente por la Dirección de Aeropuertos (DAP) posibilitaría estandarizar la toma de datos, asegurar la trazabilidad de los mantenimientos y garantizar un seguimiento continuo del estado de los pavimentos aeroportuarios, representando así una ventaja integral en términos técnicos y de gestión.

7 Conclusiones y Recomendaciones

A lo largo de esta investigación se logró explorar en profundidad el funcionamiento de la plataforma PAVEAir, comprendiendo sus alcances, limitaciones y condiciones de uso en el contexto de aeródromos chilenos. A partir del estudio de sus módulos principales, inspecciones, modelado de predicción, análisis de condición y mantenimiento, fue posible aplicar el software con datos reales del Aeródromo La Florida y, posteriormente, en dos casos adicionales (Pichoy y Andrés Sabella), abordando así el objetivo general de evaluar sus capacidades y contrastarlas con las herramientas desarrolladas dentro del proyecto Fondef ID23I10113.

En este proceso también se abordaron aspectos normativos y metodológicos, desde las directrices de la FAA y normas ASTM, hasta los criterios de deterioro, parámetros de entrada y algoritmos internos de cálculo. Esta revisión permitió evaluar en qué medida PAVEAir responde a las necesidades de gestión en el ámbito aeroportuario nacional. El software demostró ser robusto en aspectos como el cálculo del PCI conforme a norma y la capacidad para sistematizar inventarios complejos, pero también presentó limitaciones relevantes, particularmente su dependencia de bases de datos limpias, su escasa flexibilidad ante condiciones locales, y su incapacidad para generar curvas de deterioro cuando los datos son escasos o intermitentes, una realidad común en el contexto chileno.

En cuanto a los planes de mantenimiento y recuperación generados, se comprobó que PAVEAir ofrece un abanico amplio de configuraciones, lo que facilita su adaptación a distintas estrategias. Sin embargo, la utilidad real de estos planes depende en gran medida de la calidad de las curvas de deterioro utilizadas como base, las cuales, en la mayoría de los casos analizados, no cumplieron con los requisitos mínimos para una modelación confiable. Por tanto, más que por la precisión de los resultados, el valor del software radica en su potencial como plataforma estructurada de análisis, siempre que sea utilizada con criterio técnico y conocimiento profundo de sus limitaciones.

Entre sus principales ventajas destacan su diseño modular, acceso gratuito y alineación con normativas internacionales, lo que lo convierte en una herramienta útil para estudios exploratorios, docencia o incluso como base para desarrollos más sofisticados. También resulta eficaz como procesador del índice PCI cuando se cuenta con deterioros detallados por Unidad Muestral. No obstante, entre sus debilidades figuran su escasa tolerancia a datos incompletos, la falta de adaptación a realidades operativas distintas a la estadounidense, la baja transparencia en ciertos algoritmos internos (como el filtrado de datos en curvas de familia), y la posibilidad de inducir a errores si se utiliza sin supervisión técnica adecuada.

Esta experiencia demuestra que, si bien PAVEAir puede ser una herramienta de apoyo valiosa en ciertos contextos, actualmente no responde completamente a los desafíos operativos ni a la calidad de datos disponible en la gestión de pavimentos aeroportuarios en Chile. No obstante, considerando que la plataforma se encuentra en constante actualización, no se debe descartar su uso en el futuro, especialmente si se mejora su capacidad de adaptación a realidades diversas.

Al mismo tiempo, esta investigación refuerza la necesidad de contar con un Sistema de Gestión de Pavimentos Aeroportuarios (SGPA) diseñado específicamente para la realidad chilena. En el marco del proyecto Fondef al cual pertenece esta memoria, se están desarrollando alternativas en esa dirección, incluyendo mejoras en la generación de curvas de familia —tanto mediante modelos matemáticos como con el uso de inteligencia artificial—, una base de datos nacional estructurada con todos los aeródromos de la red primaria, y una aplicación móvil para facilitar la recolección de datos visuales y fotográficos en terreno. Además, se trabaja en un sistema de priorización automatizado que no solo considera el PCI, sino también el impacto ambiental de las decisiones de mantenimiento, una característica que supera ampliamente el enfoque actual de PAVEAir.

Por tanto, lejos de desestimar el aporte del software desarrollado por la FAA, esta investigación reafirma el valor de desarrollar herramientas adaptadas a las condiciones específicas de cada país, un enfoque ya adoptado por diversas naciones como se expuso en el marco teórico. En este sentido, PAVEAir representa un excelente punto de partida y referencia técnica, pero el desarrollo de un SGPA local se proyecta como el camino más eficiente, sostenible y coherente con los desafíos actuales y futuros de la gestión aeroportuaria nacional.

En caso de que se considere utilizar PAVEAir en investigaciones futuras, es fundamental tener presente que la calidad y completitud de los datos representan un factor crítico en el desempeño del software. Cualquier vacío, inconsistencia o falta de registros, especialmente en lo referido a deterioros por Unidad Muestral, puede impactar significativamente en la generación de curvas de familia, análisis de condición o planificación de mantenimiento. Por otro lado, su módulo de cálculo del PCI, aunque algo lento operativamente, demostró ser confiable y riguroso, por lo que puede ser útil como herramienta complementaria en estudios donde se requiera la sistematización de este índice conforme a normativa internacional. En síntesis, PAVEAir puede constituir un excelente punto de partida para investigaciones de esta naturaleza, siempre que se utilice con criterio técnico, conocimiento metodológico y una comprensión clara de sus limitaciones y alcances.

8 Referencias

- Agencia Nacional de Investigación y Desarrollo [ANID]. (2023). Resolución exenta 4689. <https://anid.cl/concursos/concurso-idea-id-2023/>
- ASTM International. (2020). ASTM D5340-23: Standard test method for airport pavement condition index surveys. ASTM International. <https://www.astm.org/Standards/D5340-20.htm>
- ASTM International. (2020). ASTM D6433-24: Standard practice for roads and parking lots pavement condition index surveys. ASTM International. <https://store.astm.org/d6433-20.html>
- Chen, W., Yuan, J., & Li, M. (2012). Application of GIS/GPS in Shanghai Airport pavement management system. *Procedia Engineering*.
- Córdova Campos, N. (2025). Generación de curvas de deterioro para pistas aeroportuarias mediante modelos de Markov
- Dirección de Aeropuertos (DAP). (2013–2024). Informes de inspección visual y evaluación de pavimentos de la Red Primaria de Aeropuertos de Chile: Aeródromo La Florida. Ferrer y Asociados Ingenieros Consultores. [Informes internos no publicados, entregados en el marco del proyecto Fondef ID23I10113].
- Duah, E. (2021). Investigating the role of climate on airfield pavement deterioration and distress occurrence using data from PAVEAir online database.
- Durán, J. B. C., & Fernandes Júnior, J. L. (2014). Uso do PAVEAIR para a Gerência de pavimentos aeroportuários: estudo de caso no aeroporto estadual de Araraquara. In *Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes—XXVII ANPET*, Curitiba, Paraná, Brasil.
- Durán, J. B. C., & Fernandes Júnior, J. L. (2015). Avaliação do método PCI e do programa PAVEAIR para a gerência de pavimentos aeroportuários. In *Anais. Foz do Iguaçu, PR: Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo*. https://repositorio.usp.br/directbitstream/b029e733-4c3f-499c-9f6b-0ce7bbffac5c/sysno3166362_%5BTrab%20ev%5D%20Duran_AVALIA%3%87%3%83O%20DO%20M%3%89TODO%20PCI%20E%20DO%20PROGRAMA%20PAVEAIR%20PARA%20A%20GER%3%8ANCIA%20DE%20PAVIMENTOS.pdf
- ENAC (Ente Nazionale Per l'Aviazione Civile). (2015, octubre). *Airport Pavement Management System: Linee guida sulla implementazione del sistema de gestione della manutenzione delle pavimentazioni* (Dynatest, Trad.).
- Federal Aviation Administration (FAA). (2014). AC 150/5380-7B: Airport pavement management program. U.S. Department of Transportation. https://www.faa.gov/airports/resources/advisory_circulars/index.cfm/go/document.current/documentNumber/150_5380-7
- Federal Aviation Administration (FAA). (2015). FAA PAVEAIR user guide (Version 2.2). Shoaib Sherwani, SRA International, Inc. <https://www.airporttech.tc.faa.gov/Products/Airport-Safety-Papers-Publications/Airport-Safety-Detail/FAA-PAVEAIR-374>
- Federal Aviation Administration (FAA). (2021, June 7). AC 150/5320-6G - Airport pavement design and evaluation. AAS-100, Office of Airport Safety & Standards - Airport Engineering Division. https://www.faa.gov/airports/resources/advisory_circulars/index.cfm/go/document.current/documentnumber/150_5320-6
- Hachiya, Y., Watanabe, T., & Kitaochi, K. (2013). Some Issues on Surface Distress of Airport Pavements in Japan. Service Center of Port Engineering (SCOPE), Tokyo, Japan.
- Larkin, A., Jia, Q., & Guo, E. (2010). PAVEAir: A new web-based pavement management software and a discussion of anomalies in calculating pavement condition index using the ASTM standard.

Presented at the 2010 FAA Worldwide Airport Technology Transfer Conference, Atlantic City, NJ, USA. FAA Airport Technology R&D Branch, AJP-6310.

- Marradi, A., & Tamarozzi, M. (2010). Pavement Management System Implementation At Rome Fiumicino International Airport. *International Airport Review*.
- Miah, M. T., Oh, E., Chai, G., & Bell, P. (2020). An overview of the airport pavement management systems (APMS). *International Journal of Pavement Research and Technology*. <https://doi.org/10.1007/s42947-020-6011-8>
- Miah, Md Tofail. (2022). Prediction Modelling of Pavement Deterioration and Pavement Condition Index Assessment in Airport PMS (Doctoral Thesis, Griffith University). <http://hdl.handle.net/10072/417693>
- Ministerio de Obras Públicas. (2024, 11 de marzo). Plan Aeropuertos para Chile 2030: MOP invertirá USD 1.500 millones e inaugurará o comenzará construcciones por más de USD 1.700 millones vía concesiones. Gobierno de Chile. <https://www.mop.gob.cl/plan-aeropuertos-para-chile-2030-mop-invertira-usd-1-500-millones-e-inaugurara-o-comenzara-construcciones-por-mas-de-usd-1-700-millones-via-concesiones/>
- Muñoz Mondaca, C. B. (2025). Comparación de planes de mantenimiento y curvas de desempeño generados por PAVER y componentes específicos de un SGPA adaptado a Chile
- OpenAI. (2025). ChatGPT (versión GPT-4o) [Modelo de lenguaje]. <https://chat.openai.com/>
- Shahin, M. Y. (2005). *Pavement management for airports, roads, and parking lots*. Springer.
- Shahin, M. Y., Cation, K. A., & Broten, M. R. (1987). Micro PAVER concept and development airport pavement management system. Construction Engineering Research Lab (Army), Champaign, IL. <https://apps.dtic.mil/sti/citations/ADA187360>
- Sherwani, S. (2021, September 17). FAA PAVEAir user guide. Federal Aviation Administration, SRA International, Inc. <https://www.airporttech.tc.faa.gov/Products/Airport-Safety-Papers-Publications/Airport-Safety-Detail/FAA-PAVEAIR-374>
- The Louis Berger Group, Inc. (2012). Airfield Pavement Management Plan. Presented at the ALACPA Conference.
- Tolmo Castro, M. B. (2020). Formulación de un marco teórico para la gestión de pavimentos aeroportuarios, aplicable a la red nacional de aeropuertos. Departamento de Obras Civiles, Universidad Técnica Federico Santa María, Valparaíso, Chile.

A. Apéndice 1

A continuación, se presentan las configuraciones aplicadas para la modelación del módulo de Mantenimiento y Rehabilitación (M&R) del Aeródromo La Florida, utilizando el enfoque de Condición Mínima.

En la Figura A-1 se observan las ramas seleccionadas para el análisis: ambas pistas (PI-1 y PI-2), los rodajes (RB y RC), y la configuración de plataformas correspondiente al último año de auscultación disponible (2024).

Family		Surface Type		Sections		
Network	Branch	Section	Branch Use	Surface		
La Florida	Pista	PI-1	RUNWAY	AAC		
La Florida	Pista	PI-2	RUNWAY	AAC		
La Florida	Platf	PL-7/F	APRON	AAC		
La Florida	Platf	PL-B/2020-	APRON	AAC		
La Florida	Platf	PL-E/2020-	APRON	PCC		
La Florida	Platf	PL-1	APRON	AAC		
La Florida	Platf	PL-3	APRON	PCC		
La Florida	Rodj	RB-1	TAXIWAY	AAC		
La Florida	Rodj	RC-1	TAXIWAY	AAC		

Figura A-1. Vista general de las secciones consideradas para la modelación.

En la Figura A-2 se muestra que la modelación fue programada desde la fecha mínima permitida hasta el máximo horizonte de proyección posible, es decir, 10 años.

Start Date: 7/9/2025
 Years: 10 (Valid range: 1-10)

Figura A-2. Periodo de análisis seleccionado para la modelación.

La Figura A-3 presenta las configuraciones utilizadas en el análisis, destacando el uso de la política de Condición Mínima personalizada (CM_LF) y la política de costos por defecto del sistema.

Options
 Minimum Condition: CM_LF (Edit)
 Apply Inflation Rate (%):
 Use Assigned M&R Families for Cost and Policies:
 M&R Cost By Condition (Year 1...n): Default Cost by PCI (Edit)
 Cost Factor: 1 (Factor must be between .01 and 100000000.00)

Figura A-3. Configuración de parámetros en la pestaña de opciones del módulo M&R bajo el criterio de Condición Mínima.

Dado que no se incorporaron trabajos pendientes en la evaluación, se presentan directamente los resultados obtenidos en la Tabla A-1, donde se observa que, aunque no se requirieron intervenciones en

el primer año de evaluación (2025), si se proyectan acciones de mantenimiento para los años 2029 y 2034 en todas las ramas modeladas. Estas intervenciones permiten un aumento del PCI en cada rama según lo configurado.

Cabe señalar que los montos asociados a las intervenciones corresponden a valores por defecto definidos por el software y no representan valores reales ni ajustados a costos locales. Su propósito es simplemente simular la relación entre inversión (área/costo) y mejora del PCI como parte de la lógica interna del programa.

Tabla A-1. Resumen de resultados generados por el módulo de Condición Mínima en PAVEAir para el Aeródromo La Florida.

Year	Network	Branch	Age	Cost	PCIBefore	PCIAfter
7/9/2025	La Florida	Pista	28	0.00	81	81
7/9/2026	La Florida	Pista	29	0.00	78	78
7/9/2027	La Florida	Pista	30	0.00	76	76
7/9/2028	La Florida	Pista	31	0.00	74	74
7/9/2029	La Florida	Pista	32	917833.60	72	93
7/9/2030	La Florida	Pista	7	0.00	89	89
7/9/2031	La Florida	Pista	8	0.00	88	88
7/9/2032	La Florida	Pista	9	0.00	83	83
7/9/2033	La Florida	Pista	10	0.00	80	80
7/9/2034	La Florida	Pista	11	458916.75	78	88
7/9/2025	La Florida	Platf	8	0.00	89	89
7/9/2026	La Florida	Platf	9	0.00	88	88
7/9/2027	La Florida	Platf	10	0.00	83	83
7/9/2028	La Florida	Platf	11	0.00	81	81
7/9/2029	La Florida	Platf	12	0.00	79	79
7/9/2030	La Florida	Platf	13	0.00	77	77
7/9/2031	La Florida	Platf	14	0.00	75	75
7/9/2032	La Florida	Platf	15	0.00	74	74
7/9/2033	La Florida	Platf	16	0.00	72	72
7/9/2034	La Florida	Platf	17	615853.35	71	100
7/9/2025	La Florida	Rodj	35	0.00	93	93
7/9/2026	La Florida	Rodj	36	0.00	89	89
7/9/2027	La Florida	Rodj	37	0.00	88	88
7/9/2028	La Florida	Rodj	38	0.00	83	83
7/9/2029	La Florida	Rodj	39	0.00	80	80
7/9/2030	La Florida	Rodj	40	0.00	78	78
7/9/2031	La Florida	Rodj	41	0.00	76	76
7/9/2032	La Florida	Rodj	42	0.00	74	74
7/9/2033	La Florida	Rodj	43	0.00	72	72
7/9/2034	La Florida	Rodj	44	77834.40	70	100

Para un análisis detallado de los resultados mostrados en esta tabla, ver sección 4.4.

B. Apéndice 2

A continuación se detalla el procedimiento adoptado para la obtención de resultados de la modelación bajo el enfoque de Consecuencia de la Reparación Local en el Aeropuerto Andrés Sabella.

En primera instancia, en la Figura B-1 se observa la selección de pistas, rodajes y plataformas principales, conforme a la configuración registrada en la inspección correspondiente al año 2024.

Network	Branch	Section	Branch Use	Surface
Andrés Sabella	PI	PI-11	RUNWAY	AC
Andrés Sabella	PI	PI-12	RUNWAY	AC
Andrés Sabella	PI	PI-13	RUNWAY	AC
Andrés Sabella	PI	PI-14	RUNWAY	AC
Andrés Sabella	PL	PL-10/24	APRON	PCC
Andrés Sabella	PL	PL-3/24	APRON	PCC
Andrés Sabella	PL	PL-5	APRON	PCC
Andrés Sabella	PL	PL-8	APRON	AC
Andrés Sabella	PL	PL-9/24	APRON	PCC
Andrés Sabella	RD	AN-1/24	TAXIWAY	PCC
Andrés Sabella	RD	AS-1/24	TAXIWAY	PCC
Andrés Sabella	RD	RA-1	TAXIWAY	AC
Andrés Sabella	RD	RA-2	TAXIWAY	AC
Andrés Sabella	RD	RA-3	TAXIWAY	PCC
Andrés Sabella	RD	RA-4	TAXIWAY	PCC

Figura B-1. Secciones seleccionadas para el análisis según la auscultación 2024.

Este tipo de análisis corresponde a una acción inmediata sobre el deterioro registrado en la última inspección, por lo tanto, no requiere configuración de un horizonte temporal específico. Simplemente se ejecuta sobre la fecha del último ingreso de datos.

En la Figura B-2 se presenta la configuración adoptada en términos de políticas de mantenimiento. En este caso, se utilizaron las configuraciones por defecto que entrega el software para condiciones con PCI superior o inferior al umbral crítico (55).

Figura B-2. Selección del método de modelación y políticas predeterminadas en PAVEAir.

En la Tabla B-1 se resumen los resultados del análisis, mostrando los tipos de deterioro detectados, su severidad, y las intervenciones recomendadas por el sistema.

Tabla B-1. Resumen de deterioros y acciones propuestas bajo el enfoque de Consecuencia de la Reparación Local.

Network	Branch	Section	Distress	Severity	Descriptions	Quantity	Quantity Unit	Policy	Work Code	Work Type	Work Unit	Material	WorkQuantity	UnitCost	TotalCost	New Distress	New Severity	New Descriptions
Andres Sabella	RD	AN-124	15	L	CORNER SPALL	17	C	LOCALIZED PREV. FOR AIRFIELDS (DEFAULT)										
Andres Sabella	RD	AN-124	6	L	SMALL PATCH	2	C	LOCALIZED PREV. FOR AIRFIELDS (DEFAULT)										
Andres Sabella	RD	AN-124	3	L	LINEAR CR	0.0000000000000000	C	LOCALIZED PREV. FOR AIRFIELDS (DEFAULT)										
Andres Sabella	RD	AN-124	14	L	JOINT SPALL	40	C	LOCALIZED PREV. FOR AIRFIELDS (DEFAULT)										
Andres Sabella	PI	PI-12	8	L	L & T CR	43.0595454111355	m	LOCALIZED PREV. FOR AIRFIELDS (DEFAULT)										
Andres Sabella	PL	PL-324	15	L	CORNER SPALL	7	C	LOCALIZED PREV. FOR AIRFIELDS (DEFAULT)										
Andres Sabella	PL	PL-324	6	L	SMALL PATCH	4	C	LOCALIZED PREV. FOR AIRFIELDS (DEFAULT)										
Andres Sabella	PL	PL-324	3	L	LINEAR CR	2	C	LOCALIZED PREV. FOR AIRFIELDS (DEFAULT)										
Andres Sabella	PL	PL-324	4	L	DURABIL CR	2	C	LOCALIZED PREV. FOR AIRFIELDS (DEFAULT)										
Andres Sabella	PL	PL-324	14	L	JOINT SPALL	5	C	LOCALIZED PREV. FOR AIRFIELDS (DEFAULT)										
Andres Sabella	PI	PI-11	12	L	RAVELING	25.028575504925	m ²	LOCALIZED PREV. FOR AIRFIELDS (DEFAULT)										
Andres Sabella	PI	PI-11	10	L	PATCHING	12.0127582942369	m ²	LOCALIZED PREV. FOR AIRFIELDS (DEFAULT)										
Andres Sabella	PI	PI-11	8	L	L & T CR	165.175398933257	m	LOCALIZED PREV. FOR AIRFIELDS (DEFAULT)										
Andres Sabella	PI	PI-14	10	L	PATCHING	200	m ²	LOCALIZED PREV. FOR AIRFIELDS (DEFAULT)										
Andres Sabella	PI	PI-14	1	L	ALLIGATOR CR	0.3	m ²	LOCALIZED PREV. FOR AIRFIELDS (DEFAULT)	PA-AD	Patching - AC Deep	m ²	0	3.82	149.8200	\$871.18	10	L	PATCHING
Andres Sabella	PI	PI-14	10	M	PATCHING	1.8	m ²	LOCALIZED PREV. FOR AIRFIELDS (DEFAULT)										
Andres Sabella	PI	PI-14	4	H	CORRUPTION	10	m ²	LOCALIZED PREV. FOR AIRFIELDS (DEFAULT)										
Andres Sabella	RD	RA-1	7	L	JT REF. CR	44.0087830039393	m	LOCALIZED PREV. FOR AIRFIELDS (DEFAULT)										
Andres Sabella	RD	RA-1	1	L	ALLIGATOR CR	14.0027947830716	m ²	LOCALIZED PREV. FOR AIRFIELDS (DEFAULT)										
Andres Sabella	RD	RA-1	13	L	RUTTING	8.00159701888805	m ²	LOCALIZED PREV. FOR AIRFIELDS (DEFAULT)										
Andres Sabella	RD	RA-1	8	L	L & T CR	23.0045914293319	m	LOCALIZED PREV. FOR AIRFIELDS (DEFAULT)										
Andres Sabella	PL	PL-5	15	L	CORNER SPALL	3	C	LOCALIZED PREV. FOR AIRFIELDS (DEFAULT)										
Andres Sabella	PL	PL-5	6	L	SMALL PATCH	3	C	LOCALIZED PREV. FOR AIRFIELDS (DEFAULT)										
Andres Sabella	PL	PL-5	7	L	LARGE PATCH	1	C	LOCALIZED PREV. FOR AIRFIELDS (DEFAULT)										
Andres Sabella	PL	PL-5	14	L	JOINT SPALL	2	C	LOCALIZED PREV. FOR AIRFIELDS (DEFAULT)										
Andres Sabella	RD	AS-124	6	L	SMALL PATCH	2	C	LOCALIZED PREV. FOR AIRFIELDS (DEFAULT)										
Andres Sabella	RD	AS-124	14	L	JOINT SPALL	8	C	LOCALIZED PREV. FOR AIRFIELDS (DEFAULT)										
Andres Sabella	RD	AS-124	11	L	FAULTING	3.000000000000001	C	LOCALIZED PREV. FOR AIRFIELDS (DEFAULT)										
Andres Sabella	PL	PL-924	15	M	CORNER SPALL	1	C	LOCALIZED PREV. FOR AIRFIELDS (DEFAULT)	PA-PP	Patching - PCC Partial Depth	m ²	0	.25	112.2700	\$28.07	6	L	SMALL PATCH
Andres Sabella	PL	PL-924	15	L	CORNER SPALL	30	C	LOCALIZED PREV. FOR AIRFIELDS (DEFAULT)										
Andres Sabella	PL	PL-924	3	L	LINEAR CR	1	C	LOCALIZED PREV. FOR AIRFIELDS (DEFAULT)										
Andres Sabella	PL	PL-924	4	L	DURABIL CR	3	C	LOCALIZED PREV. FOR AIRFIELDS (DEFAULT)										
Andres Sabella	PL	PL-924	14	L	JOINT SPALL	40	C	LOCALIZED PREV. FOR AIRFIELDS (DEFAULT)										
Andres Sabella	PL	PL-924	6	L	SMALL PATCH	15	C	LOCALIZED PREV. FOR AIRFIELDS (DEFAULT)										
Andres Sabella	RD	RA-4	3	L	LINEAR CR	3	C	LOCALIZED PREV. FOR AIRFIELDS (DEFAULT)										
Andres Sabella	RD	RA-4	4	L	DURABIL CR	5	C	LOCALIZED PREV. FOR AIRFIELDS (DEFAULT)										
Andres Sabella	RD	RA-4	14	L	JOINT SPALL	43	C	LOCALIZED PREV. FOR AIRFIELDS (DEFAULT)										
Andres Sabella	RD	RA-4	15	L	CORNER SPALL	13	C	LOCALIZED PREV. FOR AIRFIELDS (DEFAULT)										
Andres Sabella	RD	RA-4	13	N	SHRINKAGE CR	2	C	LOCALIZED PREV. FOR AIRFIELDS (DEFAULT)										
Andres Sabella	RD	RA-4	6	L	SMALL PATCH	1	C	LOCALIZED PREV. FOR AIRFIELDS (DEFAULT)										
Andres Sabella	PL	PL-1024	14	L	JOINT SPALL	22	C	LOCALIZED PREV. FOR AIRFIELDS (DEFAULT)										
Andres Sabella	PL	PL-1024	15	L	CORNER SPALL	8	C	LOCALIZED PREV. FOR AIRFIELDS (DEFAULT)										

Para un análisis detallado de los resultados mostrados en esta tabla, ver sección 5.2.2.

C. Apéndice 3

A continuación, se detalla la configuración utilizada para la modelación del Aeródromo Pichoy utilizando el criterio de PCI Crítico.

En la Figura C-1 se presentan las secciones seleccionadas para este análisis, las cuales comprenden la pista principal, los rodajes y la plataforma del aeródromo. Se excluyeron secciones pequeñas de uso secundario como bordes y umbrales.

All		Surface Type		Branch Use	
Family	Network	Branch	Section	Branch Use	Surface
<input checked="" type="checkbox"/> Pichoy	Pichoy	PI	PI-1	RUNWAY	AC
<input checked="" type="checkbox"/> Pichoy	Pichoy	PI	PI-2	RUNWAY	PCC
<input checked="" type="checkbox"/> PI:RUNWAY	Pichoy	PI	PI-3	RUNWAY	AC
<input type="checkbox"/> MU17:AC	Pichoy	PI	PI-4	RUNWAY	AC
<input type="checkbox"/> MU35:AC	Pichoy	PL	PL-1	APRON	AC
<input checked="" type="checkbox"/> PI-1:AC	Pichoy	RD	RA-1	TAXIWAY	AC
<input checked="" type="checkbox"/> PI-2:PCC	Pichoy	RD	RB-1	TAXIWAY	AC
<input checked="" type="checkbox"/> PI-3:AC	Pichoy	RD	RC-1	TAXIWAY	AC
<input checked="" type="checkbox"/> PI-4:AC					
<input type="checkbox"/> U-17:AC					
<input type="checkbox"/> U-35:AC					
<input checked="" type="checkbox"/> PL:APRON					
<input type="checkbox"/> MPL-1:AC					
<input checked="" type="checkbox"/> PL-1:AC					
<input checked="" type="checkbox"/> RD:TAXIWAY					
<input checked="" type="checkbox"/> RA-1:AC					
<input checked="" type="checkbox"/> RB-1:AC					
<input checked="" type="checkbox"/> RC-1:AC					

Figura C-1. Secciones seleccionadas para la modelación del Aeródromo Pichoy.

En la Figura C-2, se muestra el rango de análisis utilizado, correspondiente al máximo permitido por el software: 10 años a partir de la fecha de inicio definida.

Scope		Timing		Plan Mode		Policy and Costs		Planned Project		Result	
Start Date		7/10/2025									
Years		10		Valid range: 1-10							

Figura C-2. Rango de tiempo utilizado para la modelación (10 años desde el presente).

Dado que el análisis por PCI Crítico permite una mayor variedad de configuraciones, en la Figura C-3 se detallan las políticas adoptadas. Se configuraron acciones diferenciadas según si el PCI es mayor o menor al valor crítico (establecido en 55). En este caso, no se definió un presupuesto limitado, ya que no se contaba con antecedentes suficientes que justificaran ese enfoque. En su lugar, se optó por utilizar el enfoque de requerimiento presupuestario, con el objetivo de alcanzar y mantener una condición estable en el pavimento. El valor objetivo de PCI fue fijado en 80, debido a que el aeródromo se encuentra en buen estado general, y se quiso inducir al software a proponer intervenciones.

<input checked="" type="checkbox"/> Localizado < Crítico	<input checked="" type="checkbox"/> Localizado > Crítico
<input checked="" type="checkbox"/> Global	<input type="checkbox"/> Mayor M&R
<input type="checkbox"/> Determine la consecuencia del presupuesto	
<input checked="" type="checkbox"/> Determinar el requerimiento presupuestario	
<input type="checkbox"/> Eliminación de atrasos	
<input checked="" type="checkbox"/> Estabilización de condición	
<input type="checkbox"/> Mantener la PCI ponderada del área actual	
<input checked="" type="checkbox"/> Alcance PCI ponderado preferido	80
Tolerancia de condición (+/- 1)	1
Número máximo de iteraciones para intentar el objetivo	30
	Las iteraciones deben estar entre 5 y 30

Figura C-3. Configuración general del modelo bajo el criterio de PCI Crítico.

Respecto de las políticas de mantenimiento aplicadas, en la Figura C-4 se aprecia que se habilitó el uso de trabajos localizados desde el primer año. Para las acciones globales, se seleccionó la opción Overlay – AC Thin, opción coherente con las prácticas adoptadas por la Dirección de Aeropuertos (DAP), según ha sido mencionado en las reuniones sostenidas durante el desarrollo de esta investigación.

Aplicar tasa de inflación (%) 1
 Aplicar política en el primer año
 Usar familias de M&R asignadas para costos y pólizas
 Costo de M & R por condición (año 1 ... n) Default Cost by PCI Factor 1.00

Localizado
 Política < Crítico LOCALIZED PREV. FOR AIRFIELDS (DEFAULT) Factor 1.00 El factor debe estar entre .01 y 10000000.00
 Costo por WorkType Default Cost by Work Type

Política > Crítico LOCALIZED PREV. FOR AIRFIELDS (DEFAULT) Factor 1.00 El factor debe estar entre .01 y 10000000.00
 Costo por WorkType Default Cost by Work Type

Consecuencia de política Localized Policy Consequence (Default)

Global

Default Global Cost Factor 1.00

Intervalo	Aumento de la vida	Costo
10	8	\$4.31 m ³
10	8	\$4.31 m ³
10	8	\$4.31 m ³

1) Mínimo o sin deterioro: Overlay - AC Thin (Global)
 2) Relacionado con el clima: Overlay - AC Thin (Global)
 3) Resbalón Causando: Overlay - AC Thin (Global)

Mayor M&R

Año de Inicio 7/10/2025

Figura C-4. Políticas de mantenimiento seleccionadas para la modelación global y localizada.

Al igual que en los Apéndices A y B, no se añadieron proyectos planificados manualmente, por lo que se procede directamente a la presentación de los resultados obtenidos por el software en la Tabla C-1.

Tabla C-1. Resultados generados por el módulo de PCI Crítico para el Aeródromo Pichoy.

Project	Año	Unidad de Área	Suma de Stop Gap financiado	Suma de Stop Gap financiado Área	Suma de Los fondos preventivos	Suma de Los fondos preventivos Área	Suma de Fondos Globales	Suma de Fondos Globales Área	Suma de los principales financiados	Suma de los principales financiados Área	Suma del total financiado	Suma del total financiado Área	Weighted PCI Before	Weighted PCI After
PC_P	7/10/2025	m ²	0	0	10980.91	3007.90	431241	90702.97	82206.08	18434.17	530427.99	118945	74	82
PC_P	7/10/2026	m ²	0	0	8320.83	4680.85	0	0	203119.8	114264.15	211440.83	118945	89	93
PC_P	7/10/2027	m ²	0	0	11097.58	118945	0	0	0	0	11097.58	118945	90	90
PC_P	7/10/2028	m ²	0	0	13494.71	118945	0	0	0	0	13494.71	118945	88	88
PC_P	7/10/2029	m ²	0	0	13908.81	118945	0	0	0	0	13908.81	118945	84	84
PC_P	7/10/2030	m ²	0	0	14515.54	118945	0	0	0	0	14515.54	118945	81	81
PC_P	7/10/2031	m ²	0	0	15502.09	118945	0	0	0	0	15502.09	118945	79	79
PC_P	7/10/2032	m ²	0	0	17080.87	118945	0	0	0	0	17080.87	118945	76	76
PC_P	7/10/2033	m ²	0	0	20639.43	118945	0	0	0	0	20639.43	118945	75	75
PC_P	7/10/2034	m ²	0	0	23057.83	118945	0	0	0	0	23057.83	118945	73	73
PC_P	7/10/2035	m ²	0	0	25559.59	6090.31	473952.19	112858.00	0	0	496511.79	118945	71	88

Para un análisis detallado de los resultados mostrados en esta tabla, ver sección 5.3.2.

D. Apéndice 3

Durante el desarrollo de esta memoria, se utilizó ChatGPT (versión GPT-4o, desarrollado por OpenAI) como herramienta de apoyo para la redacción técnica y estructuración de contenido. El uso de esta plataforma se limitó a tareas de:

- Revisión ortográfica y gramatical del texto.
- Reestructuración de párrafos para mejorar la coherencia y claridad.
- Apoyo en la redacción de secciones descriptivas o metodológicas, bajo supervisión directa del autor.
- Recomendaciones de estilo y formato según las convenciones académicas utilizadas.

Es importante destacar que el contenido técnico, la interpretación de resultados, la metodología aplicada y todas las decisiones de análisis e investigación fueron elaboradas exclusivamente por el autor, siendo esta herramienta un complemento para facilitar la expresión escrita, no una fuente de generación de conocimiento autónoma.