



UNIVERSIDAD TÉCNICA
FEDERICO SANTA MARÍA

Departamento de Obras Civiles

DESARROLLO DE MODELOS DEL DESEMPEÑO DE PAVIMENTOS AEROPORTUARIOS DE LA RED PRIMARIA DE CHILE EN CONTEXTOS DE DATOS HISTÓRICOS LIMITADOS

Memoria de Título presentada por

Sebastián Ignacio Rosas Vargas

como requisito parcial para optar al título de la carrera de

Ingeniería Civil

y el grado de

Magíster en Ciencias de la Ingeniería Civil

Profesores Guía
Alelí Osorio / Gabriel García

Marzo de 2026



CONSTANCIA DE VALIDACIÓN Y CONFIDENCIALIDAD DE MONOGRAFÍA A REPOSITORIO ACADÉMICO

1.- IDENTIFICACIÓN DEL TRABAJO ACADÉMICO

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

Título del trabajo: Desarrollo de modelos del desempeño de pavimentos aeroportuarios de la red primaria de Chile en contextos de datos históricos limitados

Nombre del candidato(a): Sebastián Ignacio Rosas Vargas

Carrera / Grado: Ingeniería Civil / Magister en Ciencias de la Ingeniería Civil

Campus: San Joaquín

Departamento: Obras Civiles

2.- VALIDACIÓN DEL PROFESOR GUÍA/DIRECTOR DE TESIS

Yo, Gabriel García S., 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: 16 de marzo de 2026

Firma: 

Estudiante o Candidato(a):

Fecha: 16/03/26

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:

**DESARROLLO DE MODELOS DEL DESEMPEÑO DE PAVIMENTOS
AEROPORTUARIOS DE LA RED PRIMARIA DE CHILE EN
CONTEXTOS DE DATOS HISTÓRICOS LIMITADOS**

AUTOR:

SEBASTIÁN IGNACIO ROSAS VARGAS

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

	<u>Nombre</u>	<u>Firma</u>
Prof. Guía	Gabriel García Saa.
Prof. Guía	Alelí Osorio Lird.
Miembro 1 Comisión	Héctor Allende Cid.

Santiago, Chile, marzo de 2026



índice

1	Introducción y Contextualización	6
1.1	Oportunidades de Investigación.....	7
1.2	Definición del Problema	8
1.3	Hipótesis de la Investigación	9
1.4	Objetivos.....	9
1.4.1	General	9
1.4.2	Específicos.....	9
2	Marco Conceptual de la Investigación	10
2.1	Red Aeroportuaria nacional	10
2.2	Sistema de gestión de Pavimentos Aeroportuarios	11
2.3	Modelos de desempeño de Pavimentos	12
2.3.1	Modelo basado en opinión de los expertos.....	13
2.3.2	Modelo de extrapolación de tendencias.....	13
2.3.3	Modelo de análisis de regresión	14
2.3.4	Modelos de Márkov.....	16
2.3.5	Machine Learning.....	18
2.4	Factores de Deterioro del Pavimento.....	20
2.5	Pass-to-coverage ratio.....	23
3	Caracterización de la red primaria.....	26
3.1	Variables climáticas	26
3.2	Tráfico aéreo	28
3.3	Índice de condición del pavimento (PCI)	35
3.3.1	Análisis Índice de Condición del Pavimento.....	35
3.4	Estructura del pavimento	38
3.5	Seccionamiento Pistas de Aeropuertos Red Primaria	40
4	Metodología	41
4.1	Revisión y sistematización de información	42
4.2	Caracterización de la red primaria	43
4.3	Análisis de variable influyentes	44
4.4	Desarrollo del modelo de desempeño.....	46
5	Modelos regresivos utilizando tráfico aéreo	50
5.1	Correlaciones entre PCI y Tráfico Aéreo.....	50
5.2	Corrección de tráfico aéreo utilizando Pass-to-coverage ratio	56



5.3	Modelos desarrollados	63
5.3.1	Modelos regresivos por Unidad Muestral	63
5.3.2	Modelos regresivos por Sección de Pista	86
5.4	Extrapolación de modelos a aeropuertos con escasos datos PCI	86
5.4.1	Pavimentos asfálticos	86
5.4.2	Pavimentos Mixtos	91
5.4.3	Pavimentos hormigón	93
5.5	Validación extrapolación de modelos a aeropuertos con escasos datos PCI	95
5.5.1	Pavimentos asfálticos	95
5.5.2	Pavimentos mixtos	96
5.5.3	Pavimentos hormigón	96
6	Análisis de resultados	97
6.1	Correlaciones entre PCI y Tráfico Aéreo con y sin P/C ratio	97
6.2	Modelos regresivos representativos	98
6.2.1	Modelos regresivos representativos por UM	99
6.2.2	Modelos regresivos representativos por sección de pista	101
6.3	Análisis Estadístico sobre extrapolación de modelos a aeropuertos con escasos datos PCI 102	
6.3.1	Análisis de resultados – Pavimentos asfálticos	102
6.3.2	Validación estadística de las curvas propuestas – Pavimentos asfálticos	103
6.3.3	Análisis de resultados – Pavimentos mixtos	104
6.3.4	Validación estadística de las curvas propuestas – Pavimentos mixtos	106
6.3.5	Análisis de resultados – Pavimentos de hormigón	106
6.3.6	Validación estadística de las curvas propuestas – Pavimentos de hormigón	107
7	Conclusiones	108
7.1	Sobre P/C ratio	108
7.2	Sobre el modelo regresivo utilizado	108
7.3	Sobre la extrapolación de modelos a aeropuertos con escasos datos PCI	109
8	Recomendaciones	111
8.1	Recomendaciones para los organismos responsables de la gestión de infraestructura aeroportuaria	111
8.2	Recomendaciones para futuras investigaciones	111
9	Referencias bibliográficas	112
A.	Anexo 1	114
B.	Anexo 2	124



UNIVERSIDAD TECNICA
FEDERICO SANTA MARIA

C. Anexo 3 130
D. Anexo 4 141



“DESARROLLO DE MODELOS DEL DESEMPEÑO DE PAVIMENTOS AEROPORTUARIOS DE LA RED PRIMARIA DE CHILE EN CONTEXTOS DE DATOS HISTÓRICOS LIMITADOS”

Sebastian Rosas Vargas¹, Alelí Osorio Lird¹, Gabriel García Saá¹

¹ Universidad Técnica Federico Santa María

1 Introducción y Contextualización

La red primaria de aeropuertos de Chile constituye un activo estratégico para la conectividad territorial y el desarrollo socioeconómico del país. Conformada por 17 aeropuertos y aeródromos distribuidos desde Arica hasta Punta Arenas, esta infraestructura permite garantizar la movilidad de personas, bienes y servicios en un territorio caracterizado por su gran extensión y una diversidad climática. Además de favorecer el turismo y la conectividad interregional, la red cumple un rol fundamental en la atención de emergencias y en la consolidación de la soberanía nacional (MOP, 2025a).

En este contexto, los pavimentos aeroportuarios se posicionan como uno de los componentes más críticos para asegurar la operatividad de las aeronaves, ya que sobre ellos se desarrollan las maniobras de despegue, rodaje y aterrizaje. A diferencia de los pavimentos viales, los aeroportuarios deben responder a cargas de mayor magnitud y cumplir con estándares más exigentes en materia de seguridad operacional, fricción superficial y capacidad estructural. Su desempeño, por tanto, está condicionado por múltiples factores, entre los que destacan la frecuencia y tipo de aeronaves, los ciclos térmicos, la humedad, la contaminación superficial y las características estructurales de la pista (Valdivia, 2017).

El deterioro de estos pavimentos y la predicción de su comportamiento en el tiempo han sido ampliamente estudiados a nivel internacional, mediante enfoques como modelos probabilísticos, métodos empírico-mecanicistas y, más recientemente, algoritmos de aprendizaje automático (Montecinos, 2021). Estas herramientas constituyen un pilar fundamental para los Sistemas de Gestión de Pavimentos Aeroportuarios (SGPA), que buscan optimizar la planificación de intervenciones de conservación a partir de información objetiva y modelos de desempeño que permitan anticipar el deterioro futuro (Di Mascio & Moretti, 2019).

En Chile, la Dirección de Aeropuertos (DAP) ha promovido iniciativas para fortalecer la gestión de pavimentos, aunque con importantes limitaciones en la consolidación de bases de datos y en el desarrollo de modelos de deterioro. Estudios previos han evidenciado que, si bien el país cuenta con registros del Índice de Condición del Pavimento (PCI), estos son fragmentados y de baja frecuencia temporal, lo que dificulta la calibración de curvas de deterioro representativas a nivel nacional (Tolmo, 2020). En este contexto, se han realizado esfuerzos iniciales: por ejemplo, se aplicaron cadenas de Márkov a los datos históricos de PCI para generar curvas de desempeño de la red primaria, demostrando el potencial de estas metodologías, aunque también sus limitaciones frente a la escasez de información (Cordova, 2025). De manera complementaria se han incorporado herramientas de Machine Learning, orientadas a mejorar la predicción del deterioro a partir de los datos disponibles. No obstante, la baja disponibilidad y resolución temporal de los registros históricos sigue siendo una limitante para el entrenamiento y calibración robusta de este tipo de modelos.



La presente tesis se inscribe dentro del proyecto FONDEF ID23I10113 “*Desarrollo y Validación de Sistema de Gestión de Pavimentos Aeroportuarios para la Red Primaria de Chile*”, cuyo objetivo consiste en desarrollar un sistema de gestión de pavimentos aeroportuarios, que será validado en el aeropuerto de La Florida. En particular, esta investigación busca complementar los avances anteriores, incorporando variables con mayor disponibilidad de datos como lo son el tránsito aéreo considerando la alta variabilidad en la frecuencia de operaciones y la heterogeneidad de aeronaves que operan en la red primaria, además de variables estructurales como lo es la estructura del pavimento y la zonificación climática. Esta aproximación permitirá construir modelos de desempeño en contextos con baja disponibilidad de datos PCI, ajustados a la realidad nacional, favoreciendo la eficiencia en la asignación de recursos, la prolongación de la vida útil de los pavimentos y la seguridad operacional en el largo plazo.

De este modo, el desarrollo de modelos de desempeño adaptados al contexto chileno no solo responde a una necesidad técnica para mejorar la gestión de la red primaria de aeropuertos, sino que también contribuye al alineamiento con las tendencias internacionales de modernización de la infraestructura aeroportuaria y sus metodologías de diseño y gestión.

1.1 Oportunidades de Investigación

El estado actual de la gestión de pavimentos aeroportuarios en Chile revela la necesidad de avanzar hacia metodologías capaces de representar la evolución del PCI en el tiempo. La principal dificultad radica en la limitada disponibilidad de registros históricos, los cuales en muchos casos son fragmentados, irregulares o inexistentes (Montecinos, 2021). Este escenario limita el uso de modelos tradicionales que requieren series extensas de PCI, pero al mismo tiempo abre la oportunidad de explorar enfoques alternativos que utilicen variables con mayor disponibilidad de datos donde la recolección de aquellos se realice de manera sistemática.

En este contexto, el tránsito aéreo se presenta como una fuente de información particularmente valiosa. A diferencia del PCI, los registros de operaciones aéreas son continuos y estas disponibles de manera homogénea en toda la red primaria, lo que permite disponer de un insumo confiable para modelar el deterioro del pavimento. Factores como la frecuencia de despegues y aterrizajes, la distribución de tipos de aeronaves y los Maximum Take-Off Weight (MTOW), correspondiente al peso máximo al despegue, ejercen una influencia directa en el nivel de solicitaciones que enfrentan los pavimentos. Por tanto, la integración explícita de estas variables en los modelos de desempeño representa una alternativa realista para demostrar las diferencias en la evolución del PCI observadas entre aeropuertos con condiciones estructurales y climáticas similares.

Además del tránsito aéreo, también se vislumbra la oportunidad de complementar los modelos con factores estructurales, como los espesores de las capas del pavimento, su materialidad y las propiedades de la subrasante. La incorporación de estos elementos no busca sustituir al tránsito aéreo como variable central, sino agregar un nuevo input para los modelos al capturar la interacción entre carga, estructura y condiciones ambientales. Este enfoque integrado permitiría representar de mejor manera el PCI de los pavimentos en donde se tiene baja disponibilidad de datos históricos.

Finalmente, proponer un modelo de desempeño ajustado al contexto chileno, basado principalmente en variables de tránsito aéreo y reforzado con factores estructurales y climáticos, constituye una oportunidad estratégica para el desarrollo de un SGPA robusto y sostenible. Esta aproximación no solo facilitaría la planificación de conservación de la red primaria (incluso en aquellos aeropuertos sin datos de PCI disponibles) sino que también establecería un marco metodológico con potencial de replicarse en otros sistemas aeroportuarios de la región que enfrentan restricciones similares de información histórica.



1.2 Definición del Problema

La “American Association of State Highway and Transportation Officials” (AASHTO, 1993) define un Sistema de Gestión de Pavimentos (SGP) como una serie de herramientas o métodos que asisten a quienes toman decisiones a encontrar estrategias óptimas para proporcionar, evaluar, y mantener los pavimentos en condiciones de serviciabilidad durante un período de tiempo. Estas herramientas han demostrado ser fundamentales para la gestión de activos viales y aeroportuarios, ya que integran actividades como la planificación de inversiones, el diseño, la construcción, el mantenimiento y la evaluación periódica, aportando a una asignación eficiente de recursos y al aseguramiento de condiciones de servicio en el tiempo.

De manera análoga al ámbito vial, la conservación y planificación del mantenimiento de pavimentos aeroportuarios requiere contar con modelos de desempeño que permitan anticipar su evolución de manera confiable. Para ello, los modelos de desempeño constituyen una herramienta esencial, pues permiten representar el comportamiento de los pavimentos frente a factores como el tránsito aéreo, la estructura del pavimento y las condiciones climáticas (Di Mascio & Moretti, 2019). Sin embargo, en el contexto chileno no existen aún modelos calibrados a las condiciones específicas de la red primaria de aeropuertos, lo que genera una brecha relevante en la gestión técnica y financiera de estas infraestructuras críticas.

En la literatura internacional se observa un importante avance en el desarrollo de modelos de deterioros aplicados a pavimentos aeroportuarios. Países como Australia (Miah et al., 2020), Perú (Camarena, 2018), Italia (Di Mascio & Moretti, 2019), entre otros, han implementado metodologías que buscan predecir con mayor precisión el comportamiento de los pavimentos y optimizar los programas de conservación. Estos trabajos han incorporado tanto enfoques probabilísticos como herramientas de inteligencia artificial, con el fin de integrar múltiples variables que influyen en el desempeño, tales como las condiciones climáticas, las características del tránsito y la estructura del pavimento. La tendencia más reciente en este campo consiste en combinar los datos obtenidos a partir de auscultaciones (principalmente PCI y el International Roughness Index (IRI), correspondiente al Índice de Rugosidad Internacional) con modelos de predicción avanzados. Esta integración ha demostrado ser altamente útil ya que permite proyectar con mayor certeza el deterioro y ajustar oportunamente las estrategias de mantenimiento (Roh et al., 2023). Sin embargo, la aplicabilidad de estas metodologías depende en gran medida de la cantidad y calidad de la información disponible.

En el caso chileno, la realidad dista de estos escenarios. La red primaria de aeropuertos cuenta con registros de PCI fragmentados, discontinuos o inexistentes para diferentes aeropuertos de la red primaria, lo que dificulta la implementación de modelos complejos que requieren grandes volúmenes de datos históricos. Además, esta situación se complejiza aún más por la heterogeneidad estructural y climática que caracteriza el territorio nacional, lo cual limita la utilización directa de las metodologías internacionales.

El problema central de esta investigación se origina, entonces, en la carencia de datos históricos suficientes del PCI para generar modelos de desempeño confiables en la red primaria de aeropuertos de Chile. Ante esta limitación, se plantea como oportunidad de investigación, el desarrollo de un modelo que utilice como variable principal el tránsito aéreo (una fuente de información disponible de manera continua y estandarizada en todos los aeropuertos), complementado con factores estructurales y climáticos. Este enfoque permitiría suplir la falta de registros históricos de PCI y proyectar la evolución del deterioro en contextos donde no existen series históricas de auscultación, contribuyendo así a fortalecer la gestión de pavimentos aeroportuarios y a la construcción de un SGPA ajustado a la realidad en Chile.



1.3 Hipótesis de la Investigación

En la anterior sección denominada “definición del problema” se presentó la necesidad de contar con modelos de desempeño que permitan predecir la evolución de los pavimentos aeroportuarios en Chile, considerando la alta variabilidad del tráfico aéreo y la limitada disponibilidad de registros históricos del PCI en la red primaria nacional. A partir de ello, la hipótesis central de esta investigación es:

La evolución del PCI en los pavimentos aeroportuarios de la red primaria de Chile puede ser estimada mediante modelos de desempeño basados en las características del tráfico aéreo, para aeropuertos con limitada disponibilidad de datos históricos de PCI.

1.4 Objetivos

1.4.1 General

Con el fin de comprobar la hipótesis de la investigación, se enuncia a continuación el objetivo general:

Desarrollar modelos de desempeño para pavimentos aeroportuarios de la red primaria de Chile, a partir del análisis de las características del tráfico aéreo, con el fin de estimar la evolución del PCI en contextos con baja disponibilidad de datos históricos

1.4.2 Específicos

1. Analizar la influencia de las variables de diseño estructural en el desempeño de los pavimentos aeroportuarios caracterizados por el PCI, mediante el análisis conjunto de la estructura del pavimento y los registros históricos del PCI.
2. Analizar la relación entre las características del tráfico aéreo (frecuencia, tipo de aeronave, peso) y el deterioro del pavimento en aeropuertos con registros históricos del PCI.
3. Desarrollar modelos regresivos que permitan estimar la evolución del PCI en función del tráfico aéreo, aplicable en contextos con datos limitados del índice PCI.



2 Marco Conceptual de la Investigación

2.1 Red Aeroportuaria nacional

La Red Aeroportuaria Nacional constituye la infraestructura que permite garantizar la conectividad aérea en Chile, país caracterizado por su geografía extensa, con grandes distancias, zonas aisladas y territorios insulares. Esta red está compuesta por 319 aeródromos, 124 helipuertos y 7 aeropuertos, distribuidos desde Arica hasta la Antártica, incluyendo Isla de Pascua y el archipiélago de Juan Fernández (DGAC, 2025).

La Dirección General de Aeronáutica Civil (DGAC), administra directamente 102 aeródromos de propiedad fiscal y en 42 opera con personal propio, que entrega servicios aeroportuarios y de navegación aérea. Asimismo, ejerce labores de fiscalización y control en toda la red nacional. De los 319 aeródromos, 17 pertenecen a la red primaria, 12 a la red secundaria, 279 a la red de pequeños aeródromos y 11 a la red de aeródromos militares (DGAC, 2025).

La Red Primaria está conformada por 17 recintos aeroportuarios (7 aeropuertos y 10 aeródromos), ubicados en 13 regiones del país como se muestra en la Figura 1. Estos concentran aproximadamente el 99.5% del tráfico de pasajeros oficialmente registrado y son la columna vertebral del sistema de transporte aéreo, al estar diseñados para recibir vuelos nacionales e internacionales de grandes aeronaves comerciales de pasajeros y cargas (MOP, 2025b). En este contexto, la DAP interviene de manera periódica con obras de conservación, mejoramiento y ampliación de pistas, plataformas de estacionamientos de aeronaves, calles de rodaje y terminales de pasajeros.

La clasificación de recintos aeroportuarios dentro de la Red Aeroportuaria Nacional responde a criterios técnicos definidos por la DGAC en conjunto con la DAP. En particular, se consideran nueve parámetros de análisis, entre los cuales destacan: la capacidad de recibir vuelos internacionales, el promedio de operaciones y pasajeros en los últimos cinco años, y la capacidad de resistencia estructural de la pista, entre otros (MOP, 2025a).



Figura 1 Aeropuertos y aeródromos que contemplan la red primaria de Chile.

Fuente: (MOP, 2025b)

En complemento, la Red Secundaria está integrada por 12 aeródromos que cumplen un rol de conectividad interregional. Estos permiten operaciones de pasajeros y carga de menor envergadura que los aeropuertos primarios, funcionando además como enlaces con pequeños aeródromos locales. Por su parte, la Red de Pequeños Aeródromos agrupa 279 recintos, de los cuales 101 son de uso público. Estas instalaciones cuentan con pistas de menor extensión y sirven principalmente a aeronaves ligeras, con un rol social fundamental en la conexión de localidades aisladas, el apoyo en emergencias, catástrofes y el control de incendios forestales (MOP, 2025a).

2.2 Sistema de gestión de Pavimentos Aeroportuarios

El SGPA se basa en la recopilación y análisis de información sobre el estado y desempeño de los pavimentos, utilizando técnicas de inspección, evaluación y monitoreo. Esta información se utiliza para identificar los pavimentos que requieren atención prioritaria y para desarrollar estrategias de mantenimiento y rehabilitación adaptadas a las condiciones específicas de cada aeropuerto y tipo de pavimento (Valdivia, 2017). Además, el SGPA incluye la implementación de prácticas de gestión de activos que buscan maximizar el valor y la vida útil de los pavimentos a través de la optimización de los recursos disponibles y la toma de decisiones basada en datos. Esto implica la adopción de políticas y procedimientos para la planificación a largo plazo, la evaluación de riesgos y la asignación de presupuestos para mantenimiento y rehabilitación (Tolmo, 2020).

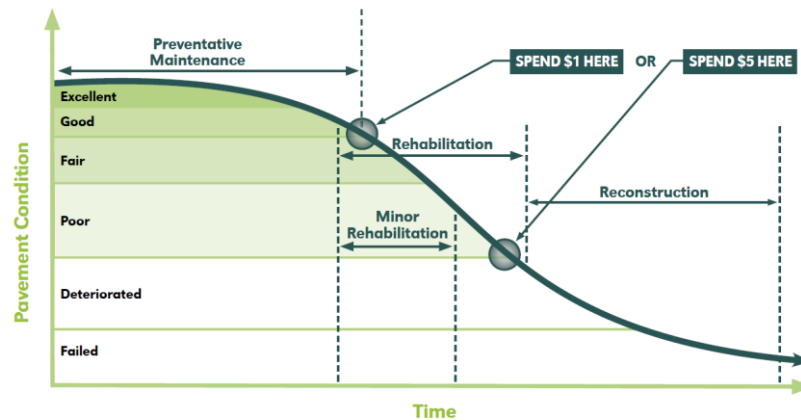
En general, existen dos niveles de gestión de pavimentos aeroportuarios, que presentan objetivos distintos según su alcance (Di Mascio & Moretti, 2019). El Nivel de Red implica un enfoque amplio que considera toda la red de pavimentos en su conjunto. En este proceso, se llevan a cabo inspecciones visuales en todas las secciones de la red para evaluar su estado y determinar las prioridades de conservación, adoptando una perspectiva global para identificar áreas prioritarias en términos de mantenimiento. Por otro lado, el Nivel de Proyecto se caracteriza por un enfoque más específico y

detallado. Aquí, las decisiones se basan en un análisis económico y en la identificación de secciones prioritarias para la conservación obtenidas del nivel anterior. Además, es común realizar evaluaciones adicionales, como pruebas de deflexión, fricción y rugosidad, para obtener una comprensión más completa de las necesidades de mantenimiento de cada proyecto específico.

2.3 Modelos de desempeño de Pavimentos

Según Solminihac et al., 2018 los modelos de desempeño de pavimentos son herramientas esenciales para los SGP. Su función principal es prever la condición o indicadores del estado de los pavimentos en cualquier momento de su vida útil. Esto permite planificar actividades de mantenimiento y rehabilitación a lo largo del tiempo, lo que a su vez ayuda a mantener la red de pavimentos en un estándar deseado, reducir costos y evitar la pérdida de valor de los activos de infraestructura. Estos modelos suelen expresarse mediante funciones que incorporan diversos factores como el clima, las cargas, la calidad de los materiales, entre otros, que están relacionados con las causas del deterioro de los pavimentos (Basnet et al., 2023). Para ilustrar mejor el deterioro de los pavimentos con el tiempo se tiene la Figura 2.

Se observa que en los primeros años de vida el pavimento se deteriora lentamente y cualquier costo de mantención para reestablecer a su etapa inicial es reducido. A medida que pasa el tiempo, la condición del pavimento se reduce bruscamente y el tipo de tratamiento a aplicar es mucho más costoso incluso teniendo que reestablecer todo el pavimento. El costo de mantener un pavimento en buen estado es 4 a 5 veces más barata que rehabilitar un pavimento en mal estado.



Pavement Management System chart showing pavement condition vs time (Snyder & Associates, Jerod Gross, P.E., LEED AP)

Figura 2: Ciclos de vida de un pavimento (Solminihac Tampier et al., 2018).

Los modelos de desempeño de pavimentos se pueden clasificar desde el punto de vista del análisis de información utilizada para su elaboración en tres categorías principales: empíricos, mecanicistas y una combinación de ambos. Los modelos empíricos se basan en datos recogidos de pavimentos existentes, mientras que los mecanicistas se fundamentan en el conocimiento de las propiedades físicas y mecánicas de los materiales que componen los pavimentos (Basnet et al., 2023). Esta distinción es crucial, ya que la elección de un modelo u otro depende de la disponibilidad de datos y del contexto específico en el que se aplique.

Actualmente, existen múltiples técnicas para desarrollar modelos de desempeño de pavimentos, cuya elección depende de la cantidad de datos disponibles, la experiencia local en el uso de herramientas de modelación, las políticas y las preferencias de cada país (Solminihac et al., 2018).



2.3.1 Modelo basado en opinión de los expertos

El modelo basado en la opinión de expertos constituye una técnica utilizada cuando se dispone de poca información recolectada o los registros históricos de desempeño del pavimento son insuficientes. En estos casos, se recurre a la experiencia y juicio de especialistas con trayectoria en diseño, construcción y gestión de pavimentos, quienes aportan criterios técnicos para completar la información faltante y elaborar curvas de desempeño (Montecinos, 2021).

El valor de este modelo radica en que permite suplir la ausencia de datos empíricos mediante la sistematización del conocimiento experto, el cual puede obtenerse mediante entrevistas, encuestas, o la aplicación de metodologías estructuradas como el método Delphi (Herrera et al., 2022). Este último busca recopilar las opiniones de un grupo de expertos de manera iterativa y anónima, con el fin de alcanzar un consenso libre de sesgos.

Según Herrera et al. 2022, el método de consulta a expertos debe ser aplicado con rigor metodológico, considerando al menos tres niveles de validación:

1. Competencia de los expertos: Se evalúa la experiencia, conocimientos y capacidad de argumentación de cada participante.
2. Fiabilidad del instrumento utilizado: Se analiza la consistencia y validez de las herramientas aplicadas para recoger la información (por ejemplo, cuestionarios).
3. Nivel de consenso alcanzado: Se miden los acuerdos entre expertos mediante índices estadísticos como el coeficiente de Kendall (W) o el coeficiente de Kappa.

La principal ventaja de este enfoque es su utilidad en contextos con información limitada, permitiendo generar escenarios preliminares de deterioro o apoyar la definición de parámetros en sistemas de gestión de pavimentos. Asimismo, posibilita la incorporación de la visión práctica de profesionales con amplia experiencia en el tema.

No obstante, presenta grandes limitaciones: su precisión depende en gran medida de la subjetividad y heterogeneidad de criterios de los expertos, así como del rigor metodológico en la selección y validación de sus juicios. Por ello, este modelo debe ser entendido como un complemento a la evidencia empírica, y no como un sustituto de los modelos basados en datos objetivos.

2.3.2 Modelo de extrapolación de tendencias

El modelo de extrapolación de tendencias constituye uno de los métodos más sencillos para proyectar el desempeño de un pavimento, ya que se basa en prolongar la tendencia observada en los datos históricos. Generalmente, se utilizan los dos últimos puntos conocidos del PCI para estimar una pendiente o tasa de deterioro, la cual se prolonga de manera lineal hacia el futuro (Valdivia, 2017). De este modo, se asume que las condiciones de carga, clima, tránsito y mantenimiento se mantienen invariables en el tiempo.

La Figura 3 ilustra gráficamente este enfoque, mostrando cómo a partir de la pendiente definida por los últimos valores del PCI se extiende una línea recta que representa el deterioro proyectado. Asimismo, las líneas discontinuas reflejan incertidumbre inherente al método, ya que cualquier variación en las condiciones de uso o en los factores externos puede modificar la tasa de deterioro, generando escenarios divergentes en el comportamiento del pavimento.

Este método tiene como principal ventaja su simplicidad, pues no requiere de modelos complejos ni de grandes volúmenes de información, siendo útil para generar una estimación preliminar del

comportamiento a corto plazo. Sin embargo, presenta limitaciones importantes, ya que no incorpora la influencia de variables como:

- Incrementos o disminuciones en el volumen del tráfico aéreo
- Cambios en las condiciones climáticas
- Efectos de las actividades de conservación o rehabilitación
- Variabilidad en los materiales o en las características estructurales

Es así, como este modelo suele introducir un alto grado de incertidumbre en las predicciones a mediano y largo plazo, lo que lo convierte en una herramienta de uso restringido. En la práctica, se recomienda su aplicación únicamente como aproximación inicial, complementándola posteriormente con modelos más robustos (probabilísticos o de regresión), que permiten capturar de mejor forma la influencia de múltiples factores en el desempeño de los pavimentos.

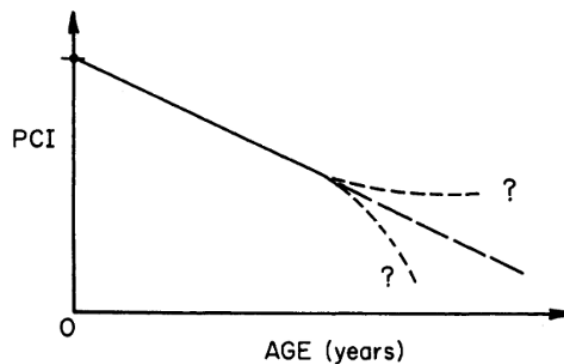


Figura 3: Modelo de Extrapolación lineal (Valdivia Avila, 2017).

2.3.3 Modelo de análisis de regresión

El análisis de regresión es otra técnica utilizada para desarrollar modelos de desempeño. Este método permite establecer relaciones entre dos o más variables mediante alguna función de ajuste, ya sea lineal, polinomial, etc. Es especialmente efectivo para modelar secciones específicas de pavimentos que compartan características similares en términos de uso, carga, frecuencia y clima (Solminihac et al., 2018). No obstante, su aplicación a nivel de redes de pavimento puede ser compleja debido a la gran cantidad de datos necesarios para realizar un análisis adecuado.

La Figura 4, ilustra el concepto de regresión lineal, mostrando la relación lineal entre dos variables representadas en los ejes X e Y. La línea de regresión es la línea recta que mejor se ajusta a los datos, minimizando las diferencias entre los valores observados y los valores predichos. Cada punto de datos tiene una coordenada en X e Y, y la línea de regresión predice un valor de Y para cada valor de X. La diferencia entre el valor observado de Y y el valor predicho se llama residuo. El gráfico muestra cómo se determinan estos residuos y cómo la línea de regresión trata de ajustarse a los datos de manera que estos residuos sean lo más pequeños posible, logrando así la mejor representación lineal de la relación entre las dos variables.

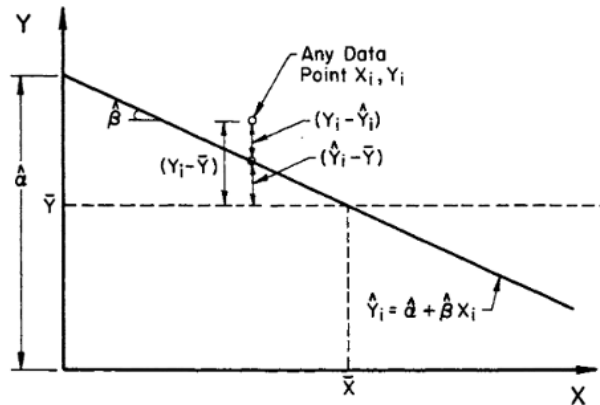


Figura 4: Modelo de Regresión Lineal (Solminihac et al., 2018).

El análisis de regresión no se limita únicamente al caso de regresión lineal simple, sino que engloba un conjunto de métodos que permiten estudiar la relación entre una variable dependiente y una o varias variables explicativas, utilizando diferentes formas funcionales según la naturaleza del fenómeno a modelar (Sánchez, 2014). Esta versatilidad lo convierte en una herramienta estadística ampliamente utilizada en la construcción de modelos de desempeño de pavimentos.

En primer lugar, la regresión lineal simple analiza la relación entre dos variables, una dependiente (Y) y una independiente (X). Su forma básica es:

$$Y_i = \beta_0 + \beta_1 * X_i + \varepsilon_i \quad (1)$$

Donde β_0 corresponde al intercepto, β_1 representa la pendiente de la recta y ε_i es el término de error. El ajuste de los parámetros se realiza mediante el método de mínimos cuadrados, que busca minimizar la suma de los residuos al cuadrado. La bondad del ajuste se evalúa del coeficiente de determinación (R^2), el cual indica la proporción de variabilidad de la variable dependiente explicada por el modelo. En estudios de pavimentos, este tipo de regresión puede ser útil para explicar, por ejemplo, la variación del PCI en función del tráfico acumulado.

No obstante, en la mayoría de los casos resulta necesario considerar más de una variable explicativa. En tales situaciones se emplea la regresión múltiple, cuyo modelo general se expresa como en la Ecuación 2:

$$Y_i = \beta_0 + \beta_1 * X_{1i} + \beta_{2i} * X_{2i} + \dots + \beta_k * X_{ki} + \varepsilon_i \quad (2)$$

Este enfoque permite capturar el efecto simultaneo de diferentes factores y aislar el efecto particular de cada variable independiente, controlando la influencia de las demás. En el ámbito de los pavimentos, la regresión múltiple resulta especialmente útil cuando se desea integrar variables como en tráfico aéreo, la edad del pavimento, las condiciones climáticas o las propiedades estructurales de las capas (Sánchez, 2014). La significancia del modelo y de cada variable se evalúan mediante contraste estadísticos (prueba F global y pruebas t individuales).



Por otra parte, existen fenómenos que no presentan una relación estrictamente lineal, lo que exige recurrir a modelos de regresión no lineal o curvilínea. Entre los más utilizados se encuentran:

- Regresión polinómica: Incorporan términos cuadráticos, cúbicos u órdenes superiores, capturando de mejor manera curvaturas presentes en los datos. Este tipo de modelo ha demostrado ser efectivo para presentar la evolución del PCI, especialmente en los tramos donde el deterioro se acelera.
- Regresión exponencial o logarítmica: Son aplicadas cuando la relación entre variables sigue patrones de crecimiento o deterioro acelerado o desacelerado.

Por último, la elección del método de regresión depende tanto de la disponibilidad y calidad de los datos como de la naturaleza del proceso de deterioro que se busca representar. Así, mientras los modelos lineales simples permiten obtener relaciones preliminares claras y transparentes, los modelos múltiples y no lineales proporcionan un nivel de ajuste más realista y cercano al comportamiento observado en los pavimentos en servicio.

2.3.4 Modelos de Márkov

Los modelos de cadenas de Márkov son un tipo de modelos probabilísticos e incrementales que explican el deterioro del pavimento a lo largo del tiempo. Se basan en la transición de un estado a otro en las condiciones del pavimento, utilizando una matriz de transición de probabilidades. Una de las principales ventajas de esta metodología es que no requiere una gran cantidad de datos.

Existen dos enfoques dentro de esta metodología: las cadenas de Márkov y los métodos de Montecarlo con cadenas de Márkov (MCMM). El primero es ampliamente utilizado para desarrollar modelos probabilísticos de deterioro del pavimento, mientras que los MCMM se emplean para aproximar formulaciones bayesianas, especialmente en la estimación de parámetros en modelos deterministas (Solorio et al., 2014).

Cadenas de Márkov

El modelo de cadenas de Márkov se refiere a un proceso estocástico con las siguientes propiedades:

1. Es discreto en el tiempo
2. Se define en un estado finito de estados posibles.
3. El cambio entre estados está determinado por un conjunto de probabilidades p_{ij}
4. La probabilidad de que el proceso pase del estado i al j depende únicamente del estado actual y no de los estados anteriores.

Esta última propiedad es la que otorga una gran ventaja a las Cadenas de Márkov por sobre los otros métodos, ya que es una herramienta que puede ser utilizable con escasa cantidad de datos.

Para utilizar las cadenas de Márkov en el modelado del deterioro de los pavimentos, se debe comenzar con los siguientes supuestos (Solorio et al., 2014):

- Los estados del proceso corresponden a los distintos niveles de deterioro del pavimento, definidos en términos de indicadores del daño como la irregularidad o el agrietamiento.
- El nivel de deterioro se expresa a través de estados o bandas de condición definidos en términos de algún indicador de interés (PCI, PSI, IRI).
- Los estados del proceso ocurren en ciclos de servicio con una duración fija, normalmente de un año.
- Se asume que el deterioro de pavimentos cumple con la propiedad de Márkov, es decir, que el estado futuro depende únicamente del estado actual.



Cuando se utilizan cadenas de Márkov, el estado del pavimento en un ciclo de servicio t se representa a través de un vector de estados, que representan la condición de un tramo de vía como una colección de las fracciones que se encuentran en cada uno de los estados o bandas de la condición que se definan.

$$a_t = (a_{t,1}, a_{t,2}, \dots, a_{t,3}) \quad (3)$$

Para obtener el vector de estado que corresponde al ciclo de servicio $t+1$ dado de vector de estado del ciclo t , se utiliza la matriz de probabilidades de transición (MTP). Esta matriz agrupa las probabilidades p_{ij} de que la condición del pavimento pase del estado i al estado j entre dos ciclos de servicio consecutivos, y está dada por:

$$P = \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & \dots & p_{1n} \\ p_{21} & p_{22} & \dots & p_{2n} \\ \vdots & & & \vdots \\ p_{n1} & p_{n2} & \dots & p_{nn} \end{bmatrix}$$

Figura 5. Matriz de probabilidades de transición (Solorio et al., 2014).

Esta matriz está compuesta por una serie de probabilidades que se calculan mediante el cociente entre un número de tramos que pasan del estado “ i ” al “ j ” en un ciclo de servicio sobre el total de tramos que se encuentran en la condición “ i ” o, sencillamente, adoptan un valor que propone un panel de expertos.

Cuando se asume que las matrices de probabilidades de transición no cambian en el tiempo, se denomina a las cadenas de Márkov resultantes “cadenas homogéneas”. En este caso, el vector de estado asociado a un ciclo de servicio i se calcula sencillamente como el vector de estado del ciclo anterior multiplicado por la MTP.

$$a_t = a_{t-1} * [MTP] \quad (4)$$

Sin embargo, las variables explicativas del deterioro están continuamente cambiando en el tiempo, lo que implica necesariamente que la MTP no será constante en todo el periodo de análisis, por lo que se debiesen usar MTP “no homogéneas” (que varíen en cada ciclo de servicio) para poder predecir el deterioro en el tiempo. Sin embargo, el problema puede ser simplificado generando zonas homogéneas según lo explicado por (Butt et al., 1994), en donde se pueden definir MTP homogéneas para ventanas de tiempo de 5 años como se aprecia en la Figura 6.

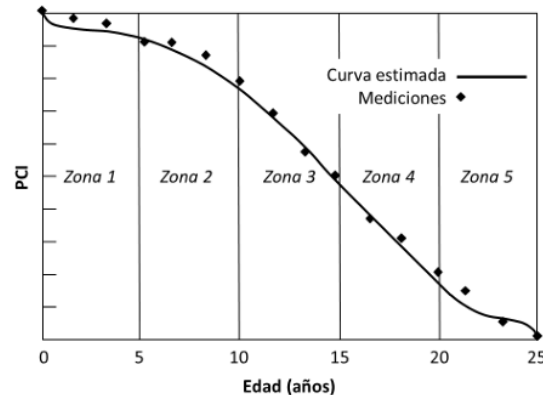


Figura 6: División del periodo de análisis en zonas para MTP (Butt et al., 1994)

Aunque la "adecuación" del problema puede mejorar la precisión de los modelos, Solorio destaca que las cadenas homogéneas pueden perder precisión predictiva a medida que el período de análisis se extiende. Esto se debe, principalmente, a la falta de consideración de la evolución de variables explicativas clave, como el volumen de tráfico o la capacidad estructural del pavimento. Por lo tanto, se sugiere que este tipo de modelos se utilicen preferentemente para análisis a corto plazo, y en caso de requerir predicciones con mayor precisión, es recomendable emplear los métodos MCMC.

Métodos de Montecarlo con Cadenas de Márkov

(Solorio et al., 2014), señala que este método es muy distinto al anteriormente descrito. En términos generales estos métodos comprenden un conjunto de algoritmos para la aproximación numérica de una distribución de probabilidades mediante la construcción de una cadena de Márkov cuya distribución de equilibrio coincide con la distribución buscada.

Como se mencionó anteriormente, el método se utiliza para aproximar formulaciones bayesianas, en las cuales los parámetros de una distribución de probabilidad se consideran variables aleatorias. Estos parámetros se estiman a partir de una distribución a posteriori, combinando las creencias del analista con los datos muestrales de la población de interés, respecto a cómo se distribuyen los parámetros.

Para aplicar esta metodología, se deben seguir los siguientes pasos:

1. Considerar los parámetros del modelo como variables aleatorias (enfoque bayesiano).
2. Seleccionar una distribución de probabilidad a priori para cada parámetro.
3. Definir la función de verosimilitud basándose en la evidencia experimental disponible y la distribución a priori.
4. Aplicar el teorema de Bayes para obtener la distribución a posteriori de los parámetros.
5. Aproximar la solución utilizando métodos MCMC.

2.3.5 Machine Learning

Otra técnica emergente es el uso de algoritmos de Machine Learning, un subcampo de la inteligencia artificial que se centra en el desarrollo de algoritmos y modelos que permiten a las computadoras aprender a partir de datos y experiencias previas sin necesidad de ser programadas explícitamente para cada tarea. En lugar de seguir instrucciones específicas, los algoritmos de Machine Learning utilizan técnicas estadísticas para identificar patrones en los datos y generar predicciones o tomar decisiones (Montecinos, 2021).

El Machine Learning es una técnica que aborda diversos problemas en distintos campos y aplicaciones.

Como se puede apreciar en la Figura 7, entre los principales tipos de problemas que puede resolver se incluyen (Brownlee, 2020).

- Aprendizaje supervisado
- Aprendizaje no supervisado
- Aprendizaje por refuerzo

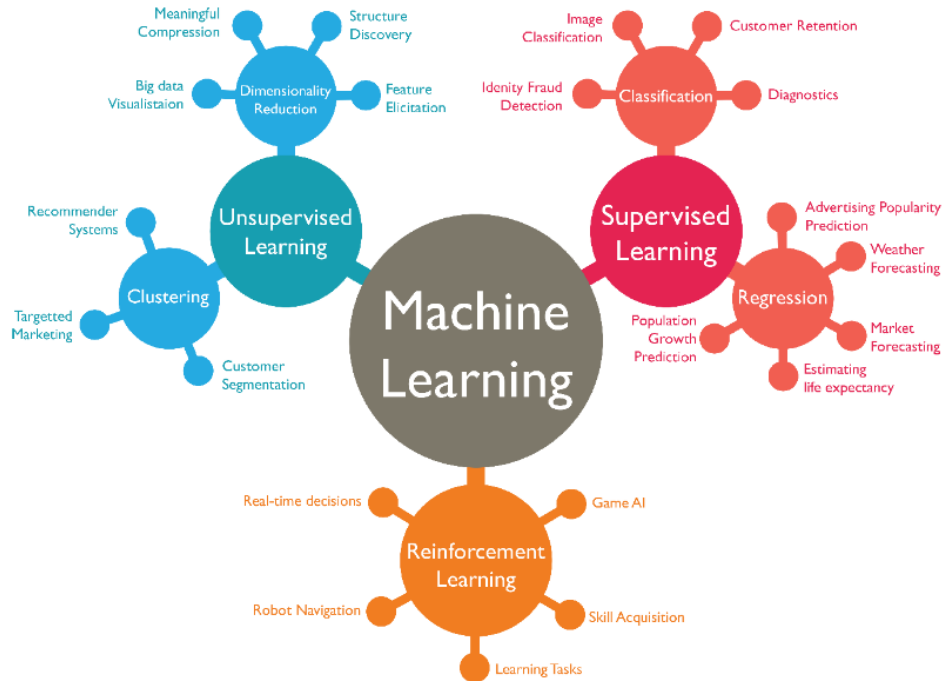


Figura 7: Campos y aplicaciones del Machine Learning (Brownlee, 2020).

Aprendizaje Supervisado

Es un enfoque en el que el sistema aprende a partir de datos etiquetados, es decir, datos en los que se conoce la respuesta correcta. El algoritmo analiza estos datos y genera una función que relaciona las entradas (características) con las salidas esperadas (Valores). Dentro de las aplicaciones están: Reconocimiento de voz, predicción de precios, diagnóstico médicos, entre otros.

Aprendizaje No Supervisado

Se trabaja con datos que no han sido etiquetados previamente. El sistema debe identificar patrones, agrupaciones o estructuras ocultas dentro de los datos sin una respuesta específica proporcionada durante el entrenamiento. Dentro de las aplicaciones de este tipo de problemas se tiene: Análisis de segmentación de clientes, reducción de dimensionalidad, detección de anomalías.



Aprendizaje por refuerzo

Es un enfoque inspirado en la psicología conductista. Un agente aprende a tomar decisiones en un entorno para maximizar una “recompensa” acumulada. Se basa en la prueba y error, donde el agente recibe recompensas o castigos según las acciones que tome, lo que le permite mejorar su comportamiento a lo largo del tiempo. Dentro de sus aplicaciones se tiene: Conducción autónoma, robótica, sistemas de recomendación, optimización de procesos.

Por otro lado, los algoritmos más comunes en Machine Learning incluyen (McCrea, 2014):

1. **Regresión Lineal:** Método estadístico que modela la relación entre una variable dependiente y una o más variables independientes utilizando una línea recta. Es útil para predecir valores continuos.
2. **Regresión Logística:** Modelo utilizado para problemas de clasificación binaria (sí/no, verdadero/falso). Utiliza una función logística para predecir la probabilidad de que una entrada pertenezca a una de las dos clases.
3. **Árboles de Decisión:** Estructura de datos que dividen iterativamente el conjunto de datos en subconjuntos basados en características específicas. Son útiles para problemas de clasificación y regresión, proporcionando interpretaciones claras de las decisiones.
4. **Random Forest:** Conjunto de árboles de decisión entrenados con diferentes subconjuntos del conjunto de datos. Combina las predicciones de múltiples árboles para mejorar la precisión y reducir el riesgo de sobreajuste.
5. **SVM (Maquinas de Vectores de Soporte):** Algoritmo de clasificación que busca encontrar el hiperplano que mejor separa las clases de datos. Es efectivo en espacios de alta dimensionalidad y cuando la separación entre clases no es lineal.
6. **KNN (K-Vecinos más Cercanos):** Algoritmos de clasificación que asigna una nueva instancia a la clase más común entre sus “K” vecinos más cercanos en el espacio de características. Es sencillo y útil para tareas de clasificación y regresión.
7. **K-means:** Algoritmo de agrupamiento (clustering) que divide un conjunto de datos en “K” grupos basando en sus características. Asigna cada punto de datos al grupo con el centroide más cercano, minimizando la variación interna de los grupos.

2.4 Factores de Deterioro del Pavimento

La infraestructura de pavimentos ya sea en carreteras o aeropuertos, es vital para garantizar la conectividad y la movilidad eficiente de personas y mercancías. Sin embargo, estos pavimentos están constantemente expuestos a diversos factores que pueden causar su deterioro con el tiempo. La comprensión de estos factores de deterioro es fundamental para su gestión efectiva y sostenible (Camarena, 2018), permitiendo el desarrollo de estrategias de mantenimiento y rehabilitación adecuadas para prolongar la vida útil de los pavimentos y asegurar su desempeño óptimo:

1. Tráfico de Aeronaves

El tráfico de aeronaves constituye el principal factor de carga que afecta la vida útil de los pavimentos aeroportuarios. La intensidad, frecuencia y características específicas de las operaciones aéreas imponen demandas muy superiores a las que experimentan los pavimentos en carreteras, lo que obliga a considerar este aspecto como determinante en su diseño, conservación y modelación del desempeño (Valdivia, 2017).

En cuanto a la magnitud de las cargas, los aviones comerciales y de carga ejercen presiones en el pavimento significativamente mayores que los vehículos en carreteras, debido a su MTOW, la distribución de cargas en el tren de aterrizaje y especialmente, debido al efecto de la dispersión lateral



que es mucho mayor que en las carreteras. Un mismo pavimento, puede experimentar niveles de esfuerzo muy distintos dependiendo de la configuración del tren de aterrizaje.

El número de repeticiones de carga, también denominado pasadas efectivas, es otro aspecto clave en la modelación del deterioro. El daño acumulado en un pavimento se suele expresar mediante el “pass-to-coverage ratio” (P/C ratio), que representa la cantidad de pasadas necesarias para que una carga cubra la totalidad del área de pavimento de manera uniforme. Este indicador depende directamente del fenómeno de la dispersión lateral en las trayectorias de las aeronaves sobre la pista (FAA, 2009).

Por otro lado, el P/C ratio depende de la dispersión lateral del tránsito, así como de la estructura del pavimento, es decir, de los espesores de sus capas. Adicionalmente, puede variar según la zona del aeropuerto que se analice, ya sea pista, calle de rodaje o plataforma.

Los efectos acumulados del tráfico aéreo no solo generan daños estructurales, sino que también inciden en el deterioro funcional, reflejado en el incremento de IRI y en la pérdida de fricción y el detrimento del índice PCI. La interacción entre el tráfico y los materiales puede derivar en diferentes modos de falla: falla por fatiga en mezclas asfálticas, ahuellamiento en capas superficiales y en hormigón como la fisuración de losas, escalonamiento, entre otros.

2. Condiciones Climáticas

Las condiciones climáticas representan un factor determinante en el deterioro de los pavimentos aeroportuarios, al influir tanto en su comportamiento estructural como funcional. La exposición a precipitaciones y humedad facilita la infiltración de agua a través de juntas y grietas, debilitando las capas granulares y reduciendo la capacidad portante de la estructura (FAA, 2016).

En regiones sujetas a ciclos de congelamiento y deshielo, el agua infiltrada se expande al congelarse, generando presiones internas que provocan agrietamiento y desprendimiento del material. Durante el deshielo, el suelo base pierde rigidez y soporte, lo que incrementa la probabilidad de deformaciones y asentamiento (Odem et al., 1977). Estos procesos, conocidos como Frost heave y thaw weakening, son especialmente críticos en aeropuertos ubicados en zonas con climas fríos.

Por otra parte, en climas cálidos, la radiación solar y las altas temperaturas aceleran la oxidación y el endurecimiento de los ligantes asfálticos, reduciendo su flexibilidad y favoreciendo la aparición de fisuras longitudinales y transversales, así como el ahuellamiento bajo cargas repetitivas de aeronaves (FAA, 2016).

Asimismo, las variaciones estacionales intensifican estos mecanismos: en invierno, la aplicación de agentes químicos anticongelantes puede alterar la superficie del pavimento, mientras que en verano los ciclos de dilatación y contracción térmica inducen fisuración por fatiga en materiales rígidos y flexibles.

En este sentido, el clima actúa como un factor que contribuye al deterioro de los pavimentos, incluso en condiciones de baja sollicitación por tránsito. Por ejemplo, en pavimentos con escaso uso pueden presentarse agrietamientos en bloques, asociados principalmente a los cambios volumétricos generados por variaciones térmicas y ambientales. En consecuencia, los sistemas de gestión y los modelos de desempeño deben incorporar variables climáticas relevantes como temperatura, humedad, precipitación y radiación solar tanto en el diseño como en la planificación de la conservación de pavimentos aeroportuarios.



3. Estructuración del pavimento

El espesor de un pavimento constituye un factor determinante en la capacidad estructural de un aeródromo, ya que define el grado de resistencia frente a las cargas aplicadas y la durabilidad del sistema en su conjunto. En los pavimentos aeroportuarios, donde las cargas por eje de las aeronaves son muy superiores a las del tráfico vehicular convencional, el diseño del espesor adecuado lo convierte en una condición indispensable para evitar fallas prematuras.

La estructura típica de un pavimento aeroportuario incluye varias capas: una subrasante que puede ser natural o mejorada, una subbase granular, una base (granular estabilizada o tratada con asfalto/cemento) y una capa de rodadura de asfalto u hormigón. El espesor de cada una de estas capas se determina en función de la clasificación del tráfico aéreo esperado (MTOW, número de operaciones anuales y tipo de tren de aterrizaje) y de la capacidad de soporte del suelo de fundación (ICAO, 2022).

Un espesor insuficiente conduce a un incremento de esfuerzos en las capas inferiores, acelerando el desarrollo de fallas por fatiga, ahuellamiento, desprendimiento superficial o bombeo de finos en pavimentos rígidos. Por el contrario, espesores excesivos implican un sobre costo de construcción y mantenimiento que no siempre se justifica en función de las proyecciones de tráfico. Por esta razón, el diseño busca alcanzar un equilibrio costo-beneficio, garantizando seguridad operacional y optimización de recursos (FAA, 2016).

En pavimentos flexibles (asfálticos), el espesor total se diseña para que los esfuerzos críticos en la subrasante no excedan la capacidad portante del suelo, mientras que en pavimentos rígidos (hormigón) el criterio principal es limitar los esfuerzos en las losas. En ambos casos, el espesor actúa como un disipador de esfuerzos, distribuyendo las cargas hacia áreas mayores y reduciendo el impacto de las repeticiones de carga (Huang, 2012).

4. Edades del Pavimento

La edad del pavimento, entendida como el tiempo transcurrido desde su construcción o desde la última intervención mayor (rehabilitación o reconstrucción), constituye un factor crítico en el análisis de su desempeño. A medida que los años avanzan, los pavimentos aeroportuarios sufren desgaste natural progresivo debido a la acción combinada del tráfico aéreo, las condiciones ambientales y los procesos de envejecimiento de los materiales (Montecinos, 2021).

La edad del pavimento se utiliza como una variable clave en los modelos de desempeño y en los sistemas de gestión, pues permiten estimar el momento en que un pavimento alcanzará niveles críticos de condición. De este modo, facilita la definición del momento óptimo de intervención, evitando tanto un deterioro excesivo que incremente los costos de rehabilitación, como una intervención demasiado temprana que implique un uso ineficiente de recursos (Shahin, 2007).

Asimismo, el análisis de la edad permite pronosticar la vida útil remanente del pavimento, estableciendo curvas de deterioro que reflejan cómo la condición (medida a través de indicadores como el PCI o el IRI) disminuye con el paso de los años. Estas curvas son esenciales para la planificación estratégica, ya que permiten evaluar distintos escenarios de conservación y determinar estrategias de mantenimiento preventivo o correctivo (ICAO, 2022).

5. Tipo de Pavimento

El tipo de pavimento seleccionado en un aeropuerto constituye un factor decisivo para su desempeño estructural y funcional, ya que condiciona la resistencia, durabilidad y los costos asociados a su ciclo



de vida. En términos generales, los aeropuertos utilizan dos tipos de tipología principales: pavimentos rígidos y pavimentos flexibles.

Los pavimentos de hormigón destacan por su mayor vida útil y resistencia frente a cargas pesadas y concentradas, lo que hace especialmente adecuados para pistas sometidas a operaciones frecuentes de aeronaves de grandes tonelajes. Estas estructuras presentan menor susceptibilidad al ahuellamiento y a la deformación plástica, aunque pueden ser más propensas a fallas localizadas como escalonamiento y bombeo en presencia de humedad (FAA, 2016; Huang, 2012). Su principal desventaja es el elevado costo inicial de construcción.

Por otro lado, los pavimentos asfálticos se caracterizan por su flexibilidad y menor costo de construcción inicial, además de permitir obras de conservación más rápidas y económicas, lo que reduce el tiempo de cierre de pistas. Sin embargo, esta flexibilidad los hace más vulnerables al agrietamiento por fatiga, fisuración térmica y ahuellamiento cuando están sometidos a altas temperaturas o cargas repetitivas intensas (ICAO, 2022; Shahin, 2007).

En la práctica, lo que hace decidir finalmente que alternativa usar, es el análisis de costo-efectividad en el ciclo de vida del pavimento. Por ejemplo, los pavimentos rígidos suelen emplearse en plataformas donde las aeronaves permanecen por largos periodos y deben soportarse cargas estáticas concentradas que podrían inducir deformaciones permanentes en pavimentos flexibles, además que también se utilizan este tipo de pavimentos debido al potencial derrame de combustible. En contraste, en pistas de aterrizaje y calles de rodaje, donde las cargas se aplican de manera dinámica y se requieren superficies más flexibles y de rápida rehabilitación, se prefiere el uso de pavimentos asfálticos (Cárdenas, 2024).

2.5 Pass-to-coverage ratio

En el análisis del deterioro estructural de pavimentos aeroportuarios resulta fundamental distinguir entre el número de pasadas de aeronaves y el número de coberturas efectivas que experimenta un punto específico del pavimento. Esta diferencia se aborda mediante el concepto de “Pass-to-Coverage Ratio” (P/C ratio), ampliamente utilizado en el diseño y evaluación estructural de pavimentos aeroportuarios y adoptado de forma explícita en los procedimientos de la Federal Aviation Administration (FAA), particularmente a través del software FAARFIELD (FAA, 2012).

Las aeronaves no circulan de forma perfectamente rectilínea ni siguen exactamente la misma trayectoria en cada operación. Este desplazamiento lateral respecto al eje central de la pista o calle de rodaje, conocido como dispersión lateral, se modela estadísticamente mediante una distribución normal con el fin de representar la variabilidad transversal de las trayectorias de las ruedas principales (FAA, 2016). Como consecuencia de este comportamiento, un punto específico del pavimento no recibe necesariamente la sollicitación estructural máxima en cada pasada de una aeronave. En muchos casos, una pasada genera una respuesta estructural inferior a la crítica, siendo necesarias varias pasadas para que dicho punto experimente una sollicitación equivalente a una aplicación completa de carga.

Para representar esta condición se introduce el concepto de cobertura (coverage). De acuerdo con los criterios de diseño estructural de pavimentos aeroportuarios establecidos por la FAA, una cobertura ocurre cuando un área unitaria del pavimento experimenta la respuesta estructural máxima inducida por una aeronave específica (FAA, 2012). La naturaleza de esta respuesta depende del tipo de pavimento analizado. En pavimentos flexibles, el parámetro crítico se asocia a la deformación vertical máxima en la parte superior de la subrasante, mientras que en pavimentos rígidos se relaciona con el esfuerzo horizontal máximo en la parte inferior de la losa de hormigón.



El P/C ratio se define, entonces, como la razón entre el número de pasadas de aeronaves y el número de coberturas necesarias para aplicar una cobertura completa sobre un área unitaria del pavimento. Este parámetro expresa cuántas pasadas son requeridas, en promedio, para que un punto del pavimento experimente una sollicitación estructural equivalente a una cobertura. Mientras que el número de pasadas puede ser observado o contabilizado directamente a partir de registros operacionales, el número de coberturas no es directamente observable y debe ser determinado mediante procedimientos analíticos y estadísticos que incorporan la distribución lateral del tránsito y la respuesta estructural del pavimento, tal como se implementa en FAARFIELD (FAA, 2012).

El valor del P/C ratio depende de diversos factores asociados tanto a la aeronave como a la geometría del pavimento. Entre los más relevantes se encuentran el número total de pasadas, la configuración del tren de aterrizaje principal, el número y espaciamiento de las ruedas, el ancho del área de contacto neumático-pavimento y la distribución lateral de las huellas respecto al eje de la pista o calle de rodaje. Estos elementos influyen directamente en la probabilidad de que una pasada genere la respuesta estructural máxima en un punto determinado del pavimento y, por consiguiente, en el número de pasadas requeridas para producir una cobertura (FAA, 2012).

Para el cálculo del P/C ratio, FAARFIELD incorpora el concepto de ancho efectivo del neumático, el cual representa la zona de influencia estructural de una rueda sobre el pavimento, considerando la profundidad de la capa crítica y la posible superposición de zonas de influencia entre ruedas adyacentes (FAA, 2012). En pavimentos flexibles, este ancho efectivo se define en la parte superior de la subrasante y se determina trazando líneas de respuesta desde los bordes del área de contacto del neumático hasta dicha profundidad, considerando una pendiente de 1:2 como se observa en la Figura 8. Cuando las zonas de influencia de ruedas adyacentes se superponen, el ancho efectivo se ajusta para reflejar esta interacción. En el caso de pavimentos rígidos, el ancho efectivo del neumático se asume igual al ancho nominal del área de contacto en la superficie del pavimento, dado que la respuesta estructural crítica se localiza en la losa de hormigón (FAA, 2012) como se aprecia en la Figura 9.

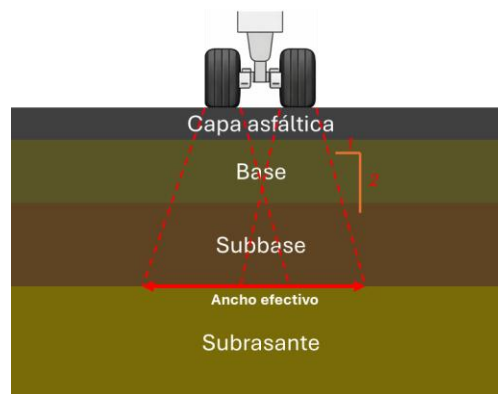


Figura 8. Proyecciones pasadas efectivas en pavimentos asfálticos.



Figura 9. Proyecciones pasadas efectivas en pavimentos de hormigón.

Adicionalmente, FAARFIELD implementa el cálculo del daño acumulado mediante un enfoque transversal por franjas a lo ancho del pavimento. En particular, el software divide el ancho de análisis en franjas de 10 pulgadas (254 mm) a lo largo de un ancho total de 820 pulgadas (20,8 m), calculando para cada franja un valor de Factor de Daño Acumulado (Cumulative Damage Factor, CDF) y una razón (P/C) asociada. Para representar la dispersión lateral de las trayectorias de las aeronaves, FAARFIELD asume un patrón estadístico con distribución normal, cuyos parámetros dependen del tipo de superficie aeroportuaria analizada. En el caso de pistas, el modelo considera que el 75% de las pasadas ocurre dentro de un ancho de dispersión lateral de 70 pulgadas (1.778 mm), lo que corresponde a una desviación estándar de 30,435 pulgadas (773 mm). Finalmente, el CDF de diseño se define como el máximo CDF obtenido entre todas las franjas evaluadas, representando así la condición más desfavorable de solicitud transversal sobre el pavimento (FAA, 2012).

FAARFIELD realiza internamente los cálculos asociados al ancho efectivo del neumático, la distribución lateral de las pasadas y la razón pasadas/cobertura (P/C), integrando además la configuración del tren de aterrizaje y las características estructurales del pavimento. A partir de este enfoque, el número de pasadas de aeronaves se transforma en un número equivalente de coberturas, permitiendo evaluar el daño estructural acumulado mediante el Factor de Daño Acumulado calculado por franja, adoptándose el CDF máximo como criterio para la verificación de la vida estructural de diseño en pavimentos flexibles y rígidos, de acuerdo con los modelos de deterioro establecidos por la FAA (FAA, 2012).

En consecuencia, el P/C ratio constituye un parámetro clave para vincular de manera coherente la operación aérea con la respuesta estructural del pavimento, permitiendo pasar de una interpretación basada únicamente en el volumen de tránsito a una evaluación fundamentada en solicitudes estructurales equivalentes, coherente con los procedimientos de diseño y evaluación estructural de pavimentos aeroportuarios establecidos por la FAA (FAA, 2016).



3 Caracterización de la red primaria

Para desarrollar modelos de desempeño de pavimentos aeroportuarios es indispensable contar con una caracterización integral de la red primaria de aeropuertos. Este proceso permite identificar las condiciones operacionales, funcionales y estructurales de los pavimentos, generando una base de datos consolidada que sirva como insumo para los análisis posteriores.

En primer lugar, resulta esencial conocer la distribución temporal y espacial de los datos disponibles, lo que incluye tanto registros de auscultación del PCI como antecedentes de tráfico aéreo y características estructurales de los pavimentos. En Chile, la disponibilidad de PCI es limitada y fragmentada, mientras que los registros de operaciones aéreas presentan una cobertura continua y sistemática en toda la red primaria. Según (Tolmo, 2020), la consolidación y organización de las bases de datos constituye un requisito fundamental para asegurar el correcto funcionamiento de un sistema de gestión de pavimentos.

3.1 Variables climáticas

La variable climática se incorporó a partir de un trabajo sistemático de recopilación y procesamiento de información meteorológica histórica de los aeropuertos de la Red Primaria de Chile realizado por (Herrera, 2025; Nazer, 2025). El propósito de integrar este componente fue disponer de un marco de referencia ambiental que permita contextualizar los resultados de fricción y, en general, del desempeño de los pavimentos aeroportuarios.

Para ello, se recopiló datos diarios de temperatura mínima, temperatura máxima y precipitación en el período comprendido entre los años 2000 y 2022, utilizando como fuente principal el CR2 Explorador, que a su vez obtiene información de la Dirección Meteorológica de Chile y de la Dirección General de Aguas (DGA). Posteriormente, los registros fueron procesados para calcular indicadores agregados como la precipitación acumulada promedio mensual y los promedios anuales de temperaturas máximas y mínimas mensuales, generando así un insumo coherente y comparable entre aeropuertos.

Con esta base de datos climática se elaboraron tablas para cada recinto aeroportuario, que presentan de manera ordenada los valores procesados de temperatura y precipitación. Un ejemplo de esta información se muestra en el caso del aeropuerto de Chacalluta.

Tabla 1. Datos procesados del aeropuerto de Chacalluta (Herrera, 2025; Nazer, 2025)

Chacalluta	En	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ag	Sep	Oct	Nov	Dic
T° min [°C]	19.9	20.3	19.2	17.3	16.0	15.2	14.5	14.7	15.2	16.0	17.2	18.5
T° max [°C]	25.6	26.1	25.3	23.3	21.0	19.1	18.0	17.9	18.6	20.0	21.9	23.9
T° prom [°C]	22.7	23.2	22.3	20.3	18.5	17.1	16.2	16.3	16.9	18.0	19.6	21.2
Precipitación [mm]	0.36	0.40	0.23	0.00	0.01	0.12	0.66	0.06	0.35	0.00	0.00	0.07

Para clasificar climáticamente a los aeropuertos, se recurrió al sistema de Köppen-Geiger, ampliamente utilizado a nivel internacional para la categorización de climas según parámetros de temperatura y precipitaciones. Se aplicaron dos enfoques distintos basados en esta metodología, uno propuesto por Arnfield (2024) y otro por Kottek et al. (2006), que permitieron asignar una clasificación climática inicial a cada aeropuerto, la que se muestra en Tabla 2.



Tabla 2. Resultados clasificación climática según Köppen-Geiger. (Herrera, 2025; Nazer, 2025)

	Aeropuerto / Aeródromo	Ciudad	Clima 1	Clima 2
1	Chacalluta	Arica	BWh	BWh
2	Diego Aracena	Iquique	BWh	BWh
3	El Loa	Calama	AW	BWh
4	Andrés Sabella	Antofagasta	BWk	BWk
5	Desierto de Atacama	Caldera	BWk	BWk
6	La Florida	La Serena	BWk	BWk
7	Mataverí	Isla de Pascua	Af	Cfa
8	Arturo Merino Benítez	Santiago de Chile	Csb	BSk
9	Carriel Sur	Concepción	Csb	Csb
10	La Araucanía	Freire	Cfb	Csa
11	Pichoy	Valdivia	Cfb	Cfa
12	Cañal Bajo	Osorno	Cfb	Csa
13	El Tepual	Puerto Montt	Cfb	Cfb
14	Mocopulli	Dalcahue	Cfb	Csb
15	Balmaceda	Balmaceda	Cfb	Cfb
16	Teniente Julio Gallardo	Puerto Natales	-	-
17	Presidente Carlos Ibáñez del Campo	Punta Arenas	Cfb	Cfb

Si bien ambos enfoques arrojaron resultados similares, se observaron ciertas discrepancias en la asignación final de categorías. Para resolver estas diferencias, se realizaron reuniones con expertos en gestión aeroportuaria, lo que permitió integrar las conclusiones obtenidas desde la metodología con la experiencia práctica de la Dirección de Aeropuertos. Como resultado de esta integración se definió una clasificación final en siete zonas climáticas para la red primaria, considerada más representativa y coherente con las condiciones reales de operación de los aeropuertos chilenos.

A continuación, se incluye la Tabla 3 con la clasificación final en siete zonas, junto con un esquema como se aprecia en la Figura 10 que resume la distribución de estas zonas en la red nacional.

Tabla 3. Clasificación final en 7 zonas climáticas (Herrera, 2025; Nazer, 2025)

Zona 1	Zona 2	Zona 3	Zona 4	Zona 5	Zona 6	Zona 7
Chacalluta Diego Aracena Andrés Sabella Desierto de Atacama La Florida	El Loa	Mataverí	Arturo Merino Benítez	Carriel Sur La Araucanía Pichoy Cañal Bajo	El Tepual Mocopulli	Balmaceda Presidente Carlos Ibáñez del Campo Tte. Julio Gallardo



Figura 10. Esquema de la clasificación climática (Nazer, 2025).

3.2 Tráfico aéreo

Para el desarrollo del análisis del desempeño y deterioro de pavimentos en la red primaria de aeropuertos de Chile, se construyó una base de datos detallada del tráfico aéreo, cuyo objetivo principal fue disponer de información precisa y consistente sobre las operaciones aéreas, permitiendo relacionar la incidencia del tránsito de aeronaves con el estado de las superficies de rodadura.

La base de datos utilizada para este estudio fue proporcionada por la Dirección General de Aeronáutica Civil y comprende información correspondiente al período 2000–2022. Este conjunto de datos incluye registros anuales de operaciones para cada aeropuerto perteneciente a la red primaria, detallando la tipología de aeronaves, modelos específicos, cantidad de operaciones, aeropuertos de operación y características técnicas relevantes.

La construcción de la base de datos se realizó en varias etapas:

- Recolección de datos originales: Se obtuvo información directamente desde la DGAC, recopilando registros históricos de operaciones aéreas para los 17 aeropuertos de la red primaria.
- Clasificación de aeronaves: Se investigaron manuales técnicos y especificaciones de fabricantes (Airbus, Boeing, Cessna) para clasificar aeronaves según su efecto sobre el pavimento, utilizando herramientas como FAARFIELD en el análisis estructural.



UNIVERSIDAD TECNICA FEDERICO SANTA MARIA

- Filtrado de datos: Se excluyeron aeronaves de bajo impacto (helicópteros, aeronaves ligeras), manteniendo únicamente aquellas que contribuyen significativamente al deterioro del pavimento a partir de su peso máximo al despegue.
- Selección representativa: Entre los distintos tipos y modelos de aeronaves analizados, se identificó una aeronave representativa para cada categoría, priorizando aquellas con mayor incidencia operativa en la red aeroportuaria nacional. Para esta selección se consideraron, entre otros aspectos, la configuración del tren de aterrizaje, el MTOW y la frecuencia de operación observada.
A modo de ejemplo, en el caso del Airbus A321, existen múltiples subcategorías asociadas a este modelo, tales como A321-100 (std y opt), A321-200 (std y opt) y A321neo. En este contexto, se seleccionó el A321neo como aeronave representativa de la categoría, dado que corresponde al modelo con mayor incidencia operativa actual, siendo un avión de transporte de pasajeros que opera de manera regular en el país.
- Organización y normalización: Los datos recopilados fueron consolidados en planillas, normalizando formatos y unidades para garantizar consistencia en el análisis.

A modo de ejemplificación del ordenamiento de los datos, se señala la Tabla 4, donde se visualizan las aeronaves más representativas, el MTOW y sus despegues anuales para el aeródromo La Florida.



Tabla 4. Tabla resumen de las características consideradas para analizar la red primaria nacional.

Tipo	MTOW	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	Total
A225	640000							2		13					15
A124	405000		1	1						2					4
B744	396890		2	22	73	4									101
B742	377842		1	27	32										60
B747	377000				11										11
MD11	273274	40	41	61	29	11									182
DC10	267620	36	13	43	13	66	21								192
C17	265350			1											1
B789	250836							1							1
B772	247210	1	9	11	13	7		1							42
B767	204120	1													1
IL76	190000				1	1									2
B763	186880	85	53	104	77	43	26	49	32	59	37	56	43	57	721
B703	152407	30	4	3	7					3					47
K35E	146283			6	25	17	97	98	79	50	16		4	52	444
B707	116573		1	1											2
B752	115670	1	1		2										4
B721	95255	2	1												3
B722	95075	2												2	4
A321	89000					18	418	1115	1346	1329	1903	1294	1293	2299	11015
C30J	79000											1		2	3
B738	78890								1						1
A320	78000	1148	3016	3653	4554	4672	3407	2273	1471	1883	1950	2041	1981	2819	34868
A319	75296	746	81	420	1061	1310	1350	1201	1282	1247	1084	173			9955
C130	70307	41	74	44	67	56	54	72	75	78	72	43	31	54	761
B732	66000	1620	1778	767	309	9	35	7	58	63	13				4659



Luego de confeccionar la base de datos del tráfico aéreo, se procedió a realizar un análisis de la red primaria de aeropuertos de Chile. El análisis comenzó considerando toda la flota de aeronaves, y posteriormente se filtró enfocándose en las aeronaves más utilizadas en cada aeropuerto.

Se seleccionaron como casos de estudio aquellas aeronaves con un MTOW superior a 5.700 kg, ya que corresponden a las aeronaves que generan las mayores solicitudes sobre el pavimento aeroportuario y concentran el daño acumulado asociado a la operación aérea, siendo, por tanto, las que controlan su comportamiento estructural (FAA, 2012). Para estas, se analizaron las curvas de comportamiento de frecuencias operativas a lo largo de los años, obteniendo los resultados que se muestran en la Figura 11, para el caso de La Florida. Se puede apreciar que, existen aeronaves con un número significativo de operaciones aéreas entre los años 2010 y 2022, sin embargo, algunas de estas aeronaves tienden a desaparecer por lo que el análisis se enfoca en observar el comportamiento en los últimos años, obteniendo que los aviones más utilizados en este aeropuerto son el Airbus A321, A320 y A319.

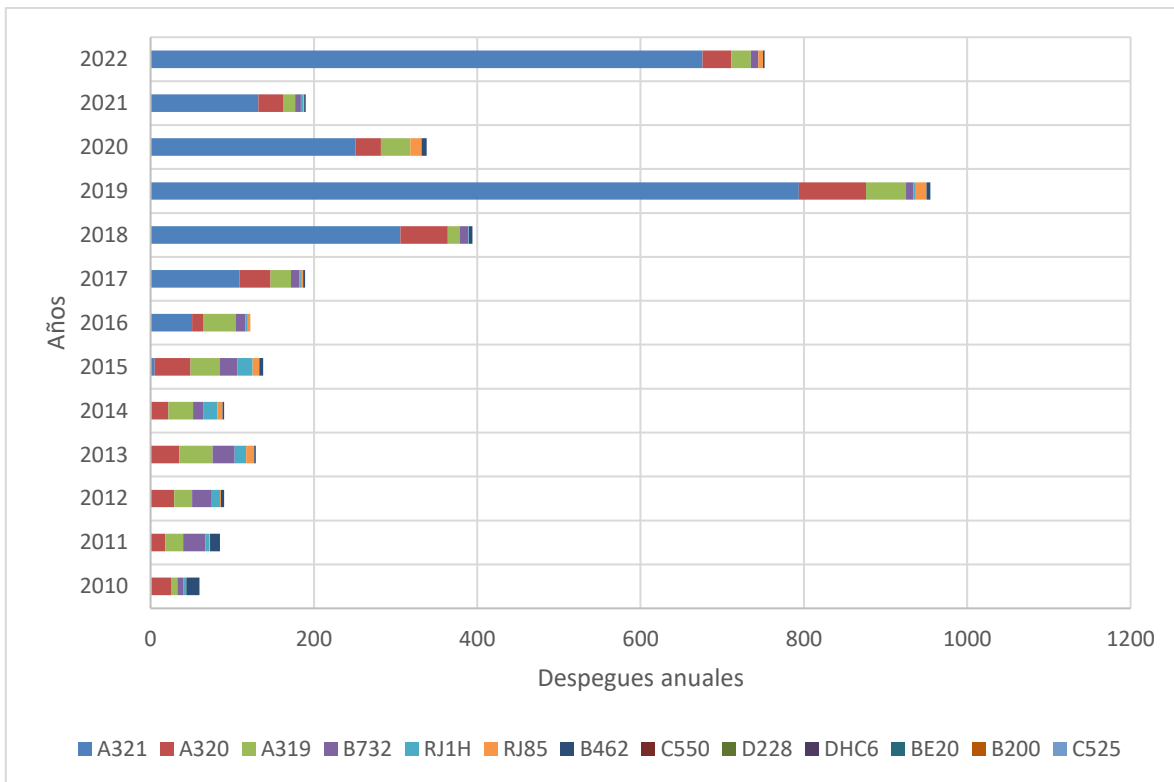


Figura 11. Despegues anuales para el aeródromo La Florida

De igual manera, en toda la Red Primaria se observa un patrón consistente respecto a la operación aérea: las aeronaves predominantes corresponden a la familia Airbus A319, A320 y A321. Este comportamiento se repite de manera sistemática en prácticamente todos los aeropuertos analizados, lo cual se encuentra documentado en el Anexo 1.

La única excepción es el Aeropuerto Arturo Merino Benítez (AMB), cuya operación difiere significativamente debido a su condición de aeropuerto de mayor envergadura, con vuelos nacionales e internacionales y una flota mucho más diversa. Al concentrar operaciones de largo alcance, conexiones internacionales y un volumen considerable de pasajeros, la variedad de aeronaves que



despegan y aterrizan en AMB es sustancialmente mayor respecto a los aeropuertos regionales de la red, donde predominan los vuelos locales y aeronaves de similar categoría.

Por último, a modo de resumen del análisis sobre las aeronaves que mayormente circulan por la red primaria nacional y para una mejor visualización, se construyó la Tabla 5 que contiene los siguientes elementos claves:

- Tipo y modelo de aeronave: Identificación de cada modelo operativo, considerando fabricantes como Airbus, Boeing, Cessna, entre otros. Se clasificaron según su importancia en el impacto sobre el pavimento, descartando helicópteros y aeronaves ligeras por su bajo efecto en el deterioro.
- Frecuencia de operaciones: Cantidad de despegues registrados para cada tipo de aeronave, discriminados por año y aeropuerto.
- Identificación del aeropuerto: Nombre del aeropuerto al cual se asocian los despegues anuales de los cuales 2 aeropuertos poseen más de una pista como lo son Arturo Merino Benítez y Presidente Carlos Ibáñez del Campo.



Tabla 5. Operaciones aéreas según tipo de aeronave y aeropuerto.

	Aeropuerto/Aeródromo	A321	A320	B789	B788	B462	B763	B738	B748	B744	B735	B77L	B772	A330	A332	A359
1	Chacalluta	4240	14305	0	0	1	0	0	0	0	39	0	0	0	1	0
2	Diego Aracena	11086	37713	1	0	295	988	1	0	128	277	2	104	0	0	0
3	El Loa	14680	35287	0	0	24	0	6	0	0	27	0	0	0	0	0
4	Andrés Sabella	10187	56949	26	35	0	0	3	0	1	235	0	1	0	3	1
5	Desierto de Atacama	3264	11906	0	128	116	0	0	0	0	144	0	0	0	0	0
6	La Florida	2326	25016	0	0	218	0	1	0	0	58	0	0	0	0	0
7	Mataverí	0	0	1926	668	0	2718	5	0	7	3	0	190	0	3	0
8.1	Arturo Merino Benítez (17R-35L)	48885	166708	8700	9414	455	3	9819	266	2378	662	414	4063	607	1587	718
8.2	Arturo Merino Benítez (17L-35R)	36364	137050	13532	12056	247	29676	19197	1422	3612	1107	1716	4838	1377	974	466
9	Carriel Sur	7879	28764	3	3	24	74	2	0	0	148	0	1	2	0	0
10	La Araucanía	4891	10468	0	0	1	93	1	0	0	48	0	0	0	0	0
11	Pichoy	2	4913	0	0	0	0	0	0	0	26	0	0	0	0	0
12	Cañal Bajo	0	2282	0	0	0	0	0	0	0	11	0	0	0	0	0
13	El Tepual	14567	41593	1	3	44	427	1	0	0	190	0	3	0	0	0
14	Mocopulli	2	2526	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0
15	Balmaceda	1885	13769	0	0	229	25	0	0	0	26	0	0	0	0	0
16	Teniente Julio Gallardo	0	763	0	0	69	0	0	0	0	9	0	0	0	0	0
17.1	Presidente Carlos Ibáñez del Campo (07-25)	6897	15556	392	602	1234	295	3	0	2	98	0	2	0	2	0
17.2	Presidente Carlos Ibáñez del Campo (12-30)	1231	2915	2	7	304	37	1	0	0	4	0	0	0	0	0
17.3	Presidente Carlos Ibáñez del Campo (01-19)	1172	2801	2	7	258	37	1	0	0	4	0	0	0	0	0



Tabla 5. Operaciones aéreas según tipo de aeronave y aeropuerto (continuación).

	Aeropuerto/Aeródromo	C130	B737	RJ1H	F16	F5	C550	D228	B200	GLF4	RJ85	G150	C560	BE20	C525
1	Chacalluta	30	8	0	0	0	611	12	183	142	4	161	44	549	162
2	Diego Aracena	768	0	262	18972	1040	910	17	360	451	883	223	12	1383	683
3	El Loa	12	13	0	0	0	409	14	145	75	24	131	10	391	68
4	Andrés Sabella	692	26	1	23510	1848	664	56	393	256	36	238	13	760	13
5	Desierto de Atacama	72	2	9	0	0	281	59	206	187	60	157	3	232	160
6	La Florida	24	9	156	0	0	527	2459	363	72	232	56	15	458	527
7	Mataverí	22	11	0	0	0	1	0	0	69	0	252	0	0	0
8.1	Arturo Merino Benítez (17R-35L)	1002	3385	245	175	27	1490	1855	3062	925	714	1255	223	2075	1739
8.2	Arturo Merino Benítez (17L-35R)	1743	2792	154	1007	169	4706	7691	3019	1227	469	1546	94	3306	1929
9	Carriel Sur	301	222	0	2	0	551	71	525	229	15	84	4	411	248
10	La Araucanía	69	2	0	2	0	265	35	563	107	0	54	7	439	150
11	Pichoy	10	1	0	3	0	221	15	152	41	0	74	6	99	109
12	Cañal Bajo	8	1	0	0	0	211	12	199	23	0	34	2	177	2139
13	El Tepual	509	99	15	245	70	1027	37	684	285	0	169	12	625	12740
14	Mocopulli	0	0	0	5	0	190	3	64	4	0	27	1	90	381
15	Balmaceda	103	2	173	0	2	279	8	102	30	48	52	6	100	286
16	Teniente Julio Gallardo	7	1	26	0	23	38	0	31	20	2	67	32	14	61
17.1	Presidente Carlos Ibáñez del Campo (07-25)	1448	6	590	23	7002	308	8	103	152	153	136	9	45	202
17.2	Presidente Carlos Ibáñez del Campo (12-30)	310	1	233	0	1454	68	2	16	16	9	33	0	15	55
17.3	Presidente Carlos Ibáñez del Campo (01-19)	273	1	202	0	1383	65	2	16	15	8	32	0	12	54



3.3 Índice de Condición del Pavimento (PCI)

El PCI es el indicador más ampliamente utilizado a nivel mundial para la evaluación de pavimentos aeroportuarios. Este índice proporciona una medida numérica entre 0 y 100 que representa el estado actual del pavimento, donde valores altos indican una superficie en buen estado y valores bajos reflejan un deterioro significativo. De acuerdo con la norma ASTM D5340, el PCI proporciona una medida de la condición actual del pavimento basada en los daños observados en su superficie, indicando la integridad estructural y la condición operativa del pavimento, además de servir como base objetiva para determinar las necesidades de mantenimiento y reparación.

La metodología aplicada se fundamenta en la inspección visual de unidades de muestreo representativas, en las cuales se identifican los tipos, severidades y extensiones de los deterioros. Estos se asocian a valores de deducción que, combinados, permiten calcular el PCI final mediante una escala estandarizada. El procedimiento considera distintos tipos de fallas según el tipo de pavimento (flexible o rígido), incluyendo fisuras, desprendimientos, ahuellamientos y exudaciones, entre otros (Shahin, 2005).

En el caso de la red primaria de aeropuertos de Chile, la información del PCI fue recopilada a partir de los registros históricos de la Dirección de Aeropuertos del Ministerio de Obras Públicas (DAP-MOP), complementados con levantamientos visuales recientes. Los datos fueron consolidados y organizados según el tipo de pavimento, la sección (pista, rodaje o plataforma) y el año de medición, asegurando su trazabilidad temporal. Posteriormente, se llevó a cabo un proceso de depuración para eliminar valores inconsistentes o variaciones abruptas no asociadas a intervenciones registradas, garantizando la coherencia analítica del conjunto de datos.

Asimismo, los valores de PCI fueron categorizados en rangos de desempeño cualitativo basados en la clasificación ASTM y adaptados a la realidad operativa de la DAP, abarcando desde “Excelente” (86–100) hasta “Falla” (0–10). Esta clasificación permitió homogenizar la interpretación de resultados en toda la red y establecer umbrales para priorizar intervenciones.

Tabla 6. Clasificación rangos PCI según normas ASTM y DAP

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

3.3.1 Análisis Índice de Condición del Pavimento

El PCI es un indicador clave utilizado en la evaluación del estado de los pavimentos. Incorporar el PCI como variable en los modelos de desempeño permite monitorear la evolución de las condiciones del pavimento a lo largo del tiempo y predecir su deterioro futuro.

En primer lugar, fue necesario recopilar toda la información disponible hasta la fecha. En la Tabla 7 se muestra un resumen de los años en que se dispone de información del PCI del aeropuerto.

Tabla 7. Años con datos del índice de condición del pavimento PCI (Córdoba, 2025).

		Informes PCI												
	Aeropuerto / Aeródromo	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024
1	Chacalluta			X		X					X			
2	Diego Aracena			X							X			
3	El Loa			X							X			
4	Andrés Sabella	X	X	X	X	X	X	X	X		X			
5	Desierto de Atacama			X				X	X		X			
6	La Florida			X	X	X	X		X	X	X			X
7	Mataverí			X					X				X	
8	Arturo Merino Benítez			X								X		
9	Carriel Sur			X				X				X		
10	La Araucanía										X			
11	Pichoy		X			X					X			
12	Cañal Bajo		X					X			X			
13	El Tepual		X	X	X		X				X			
14	Mocopulli							X	X		X			
15	Balmaceda			X		X					X			
16	Teniente Julio Gallardo													
17	Presidente Carlos Ibáñez del Campo			X			X				X			

Nota: X indica auscultación a nivel de Unidad Muestral (completa) del aeropuerto; X indica auscultación a nivel de Sección (incompleta) del aeropuerto.

A partir de los respectivos informes de PCI, se construyeron dos bases de datos diferenciadas. La primera corresponde a los valores de PCI agregados por sección del aeropuerto ya sean pistas, calles de rodaje o plataformas, representando un valor promedio asociado a una sección macro de la infraestructura aeroportuaria. La segunda base de datos se elaboró a nivel de unidad muestral (UM) para las distintas secciones, las cuales corresponden a áreas de aproximadamente $450 \text{ m}^2 \pm 180 \text{ m}^2$ en pavimentos asfálticos, o bien a 20 ± 8 losas en el caso de pavimentos de hormigón. La descripción y caracterización de ambas bases de datos se presentan en la Tabla 8 y Tabla 9, respectivamente.



Tabla 8. Base de datos del índice de condición del pavimento por secciones del aeropuerto para La Florida (Año muestreo 2014). (Córdova, 2025)

Sección	Tipo de Pavimento	Área m ²	Año construcción	PCI	SCI	UMT
PI-1	Asfalto	26,396	2013	100	100	59
PI-2	Asfalto	52,791	1991	79	100	118
U12-1	Asfalto	4,492	1991	82	100	8
U12-2	Asfalto	900	2013	98	100	3
U30-1	Asfalto	4,700	1991	87	100	13
U30-2	Asfalto	675	2013	96	100	2
ZPCH-12	Asfalto	1,950	1991	90	100	4
ZPCH-30	Asfalto	1,950	1991	85	100	4
RB-1	Asfalto	2,195	1991	62	68	5
MRB-1	Asfalto	2,051	1991	56	84	6
RC-1	Asfalto	2,363	1991	83	87	5
MRC-1	Asfalto	1,960	1991	51	84	5
PL-1	Asfalto	7,755	1998	90	94	18
PL-2	Asfalto	2,177	1991	49	58	6
PL-3	Asfalto	3,233	1998	72	76	8
PL-4	Asfalto	2,015	1991	51	54	5
PL-5	Asfalto	9,486	1962	84	99	24
PL-6	Asfalto	960	2013	95	96	2
PL-7	Asfalto	4,355	1998	80	86	11



Tabla 9. Base de datos del índice de condición del pavimento por unidad muestral del aeropuerto La Florida (Año muestreo 2014). (Córdoba, 2025)

Sección	UM	PCI
PI-1	1	97
PI-1	2	100
PI-1	3	100
PI-1	4	100
PI-1	5	100
PI-1	6	100
PI-1	7	97
PI-1	8	100
PI-1	9	100
PI-1	10	100
PI-1	11	100
PI-1	12	100
PI-1	13	100
PI-1	14	100
PI-1	15	100
PI-1	16	97
PI-1	17	100
PI-1	18	100
PI-1	19	97
PI-1	20	100
PI-1	21	100
PI-1	22	100

3.4 Estructura del pavimento

La composición y diseño del pavimento son determinantes en su desempeño a lo largo del tiempo. Variables como el tipo y espesor de las capas, la calidad de los materiales utilizados y la compactación influyen en la resistencia del pavimento a las cargas del tráfico y a los efectos del medio ambiente. Considerar la estructura del pavimento en los modelos de desempeño permite evaluar su capacidad para soportar cargas y deformaciones, así como identificar áreas susceptibles a deterioros prematuros.

Para analizar la estructura del pavimento, primero se recopilaron informes sobre los espesores y capas que lo componen. En la tabla a continuación se presenta un resumen de los años en los que se dispone de datos estructurales de 16 de los 17 aeropuertos, abarcando el período de 2013 a 2024.



Tabla 10. Años con datos de estructura del pavimento (Córdoba, 2025).

		Datos Estructura							
Aeropuerto / Aeródromo		2013	2014	2016	2019	2021	2022	2023	2024
1	Chacalluta		X			X			
2	Diego Aracena		X			X			
3	El Loa		X			X			
4	Andrés Sabella					X			
5	Desierto de Atacama		X			X			
6	La Florida		X		X	X			X
7	Mataverí		X		X			X	
8	Arturo Merino Benítez		X						
9	Carriel Sur		X				X		
10	La Araucanía					X			
11	Pichoy	X				X			
12	Cañal Bajo	X				X			
13	El Tepual					X			
14	Mocopulli					X			
15	Balmaceda		X	X		X			
16	Teniente Julio Gallardo								
17	Presidente Carlos Ibáñez del Campo		X			X			

Luego, se construyó una base de datos que consolida la información estructural recopilada. A modo de ejemplo, se presenta la construcción de esta base de datos para el aeródromo La Florida, la cual contiene información relativa a las capas del pavimento y sus respectivos espesores, expresados en centímetros. La Tabla 11 se lee de izquierda a derecha, representando la distribución de las capas desde la superficie hacia la subrasante, donde A: Asfalto, H: Hormigón, B: base granular y SB: Subbase granular.



Tabla 11. Base de datos con la estructura del pavimento y sus respectivos espesores para el Aeródromo La Florida (Año 2014) (Córdova, 2025).

Sección	Tipo	A1	B1	H1	A2	B2	H2	B3	SB	Año Construcción
PI-1	Asfalto	10	>20		10			18-25	14-25	2013
PI-2	Asfalto	5	>20		10			18-25	14-25	1991
U12-1	Asfalto	7.5	>20		10			18-25	14-25	1991
U12-2	Asfalto	10	>20		10			18-25	14-25	2013
U30-1	Asfalto	5	>20				28		20	1991
U30-2	Asfalto	10	>20				28		20	2013
ZPCH-12	Asfalto	5	15							1991
ZPCH-30	Asfalto	5	15							1991
RB-1	Asfalto	10	30							1991
MRB-1	Asfalto	5	15							1991
RC-1	Asfalto	10	30							1991
MRC-1	Asfalto	5	15							1991
PL-1	Asfalto	10	26							1998
PL-2	Asfalto	10	26						18	1991
PL-3	Asfalto	10	26						18	1998
PL-4	Asfalto	10	26						18	1991
PL-5	Hormigón						28		20	1962
PL-6	Asfalto	10	26						18	2013
PL-7	Asfalto	5	20							1998

3.5 Sectorización de las pistas aeroportuarias de la red primaria

Con el fin de identificar la sección específica de pista analizada en cada aeropuerto, se utilizó el seccionamiento existente definido en los informes técnicos proporcionados por IDOM y FAIC para los 17 aeropuertos de la Red Primaria (FAIC, 2024; IDOM, 2022). Dichos informes contienen la delimitación de las secciones características de pista empleadas en las evaluaciones técnicas de cada recinto, lo que permite contar con una referencia homogénea para el análisis.

A modo de ejemplo, se presenta el seccionamiento correspondiente al aeródromo La Florida, el cual dispone de información desagregada a nivel de unidad muestral, permitiendo considerar distintos sectores de la pista en el análisis. En particular, se evalúa la franja central correspondiente a la sección PI-1, los bordes de pista asociados a la sección PI-2, y los umbrales de pista, identificados como UP12-1 y UP12-2 en el lado izquierdo, y UO12-1 y UO12-2 en el lado derecho, según se ilustra en la Figura 12.

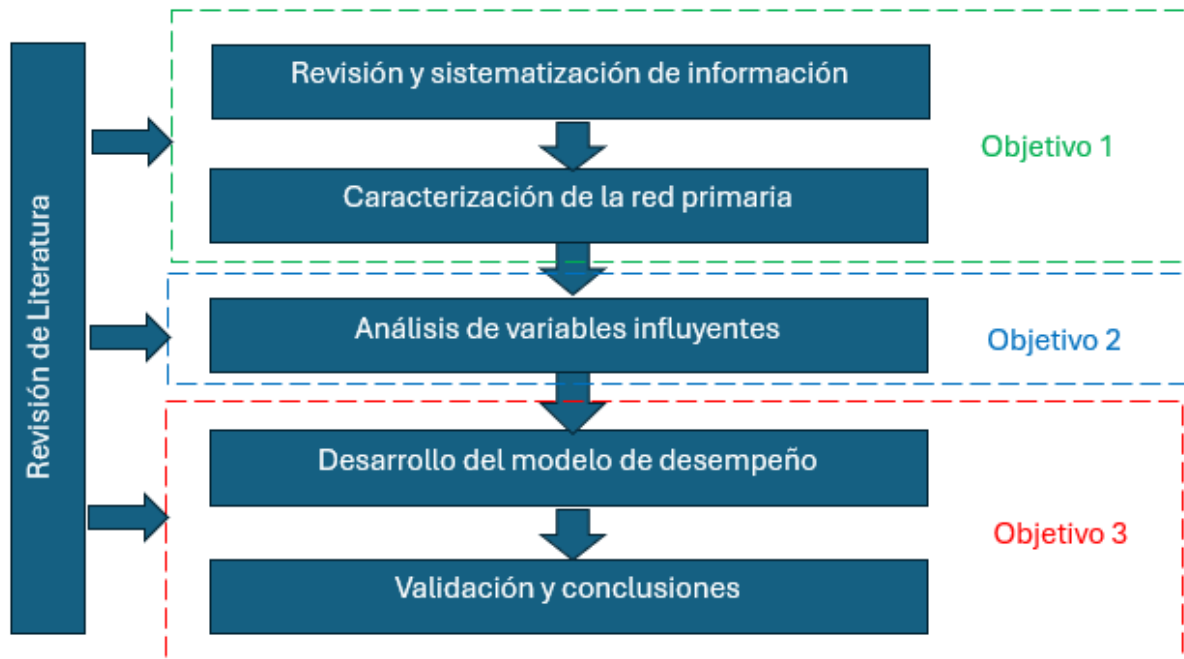


Figura 13. Muestra la vinculación entre las distintas fases metodológicas

Una vez presentada la secuencia de fases, corresponde detallar en que consiste cada una de ellas, indicando como contribuyen al cumplimiento de los objetivos específicos. Asimismo, se deben precisar las actividades a desarrollar en cada fase, junto con las herramientas que se utilizarán para su ejecución.

4.1 Revisión y sistematización de información

Esta primera fase de la investigación corresponde a la revisión y sistematización de la información disponible, tanto a nivel nacional como internacional, relacionada con el desempeño de pavimentos aeroportuarios y la evolución del PCI. Su carácter es exploratorio y de fundamentación, ya que busca establecer el marco conceptual y metodológico sobre el cual se sostendrán las fases posteriores.

El propósito de esta fase es identificar las principales variables que influyen en el comportamiento de los pavimentos aeroportuarios, considerando aspectos estructurales, operacionales y de condición. En este contexto, se incluye la recopilación de información asociada al tráfico aéreo de la red primaria nacional, la sistematización de los registros históricos de PCI disponibles para los distintos aeropuertos, así como la identificación y levantamiento de variables estructurales relevantes de los pavimentos. Entre estas últimas destacan la materialidad de las capas que los conforman, los espesores de cada una de ellas y la capacidad de soporte del suelo de fundación, parámetros que resultan fundamentales para analizar el desempeño y la evolución del deterioro en los pavimentos aeroportuarios.

1. Revisión bibliográfica

En esta primera actividad se realizó un levantamiento de literatura científica, manuales técnicos y normativas relevantes, tales como las publicaciones por la Federal Aviation Administration (FAA) y la Organización de Aviación Civil Internacional (ICAO). El propósito es identificar los enfoques metodológicos aplicados en diferentes contextos para evaluar el desempeño de pavimentos aeroportuarios y recopilar experiencias internacionales que sirvan como referencia para el caso chileno.

2. Recolección de información disponible

Esta actividad contempla la reunión de antecedentes provenientes de fuentes oficiales y reportes técnicos, tales como los registros históricos de PCI proporcionados por la DAP y las bases de datos de



tráfico aéreo entregadas por la DGAC. Dicha información incluye variables como la frecuencia de operaciones, los tipos de aeronaves y los pesos de operación, antecedentes fundamentales para el análisis del deterioro de los pavimentos en función del tráfico aéreo.

3. Levantamiento de variables estructurales relevantes

En esta etapa se identifican y organizan antecedentes asociados a la estructura de los pavimentos aeroportuarios, a partir de informes técnicos elaborados por la DAP. Entre las variables consideradas se incluyen la materialidad de las capas, los espesores estructurales y la capacidad de soporte de la subrasante, expresada mediante parámetros como el CBR u otros equivalentes.

4. Sistematización y organización de la información

La información recopilada se clasifica en tres ejes principales:

- (i) Condición, representada por el PCI;
- (ii) Operación, asociada al tráfico aéreo; y
- (iii) Estructura, correspondiente a la materialidad, espesores y soporte de la subrasante.

Para este proceso se elaboran planillas de trabajo, que permiten ordenar y estructurar de manera homogénea los datos disponibles de la red primaria nacional.

5. Definición del marco de referencia metodológico

Finalmente, se establecen los conceptos operativos clave que guiarán el desarrollo de la investigación, tales como deterioro, tráfico aéreo y variables estructurales. Asimismo, se definen los criterios metodológicos que permiten relacionar la información recopilada a nivel nacional con las metodologías y experiencias documentadas a nivel internacional, otorgando coherencia y continuidad a las fases posteriores del estudio.

4.2 Caracterización de la red primaria

La segunda fase de la investigación se enfoca en la caracterización integral de la red primaria de aeropuertos de Chile, a partir de la información recopilada y sistematizada en la fase anterior. El propósito de esta etapa es describir en detalle las condiciones estructurales y de desempeño funcional de los pavimentos aeroportuarios, de manera que constituyan la base para los análisis posteriores de influencia de variables y el desarrollo de modelos de desempeño.

Esta fase se vincula directamente con el cumplimiento del Objetivo Específico N.º1, ya que permite relacionar las características propias de cada aeropuerto, asociadas a la condición superficial del pavimento y a su diseño estructural, con el desempeño observado en términos del Índice de Condición del Pavimento (PCI).

1. Identificación de la red primaria y recopilación de antecedentes generales

En esta actividad se define el conjunto de aeropuertos que conforman la red primaria nacional, recopilando sus principales antecedentes generales. Esta información permite establecer un marco descriptivo inicial de los aeropuertos que serán objeto de análisis, sirviendo como base para la posterior caracterización de sus pavimentos.

2. Caracterización de la condición mediante el PCI

Los registros históricos del PCI serán sistematizados y organizados en planillas de trabajo, identificando los aeropuertos que cuentan con información disponible por sección de pista o por unidad muestral.



Este proceso resulta fundamental, ya que permite identificar aquellos aeropuertos con mayor nivel de confiabilidad de datos, los cuales serán utilizados como referencia para los análisis posteriores y para el desarrollo de ajustes y modelos de desempeño.

3. Caracterización estructural de los pavimentos

La caracterización estructural de los pavimentos constituye un elemento central de esta fase. Para ello, se analizan los antecedentes asociados a la composición estructural de los pavimentos, considerando particularmente las secciones más representativas de las pistas, tales como la zona central y los sectores de borde en conexión con calles de rodaje.

Se recopila información relativa a la materialidad de las capas, los espesores estructurales y la capacidad de soporte del suelo de fundación, expresada mediante parámetros como el CBR u otros equivalentes. Estos antecedentes permiten establecer la relación entre el diseño estructural del pavimento y el deterioro observado, evaluado a través del PCI, cumpliendo con el alcance definido para el Objetivo Específico N.º1.

4.3 Análisis de variable influyentes

La tercera fase de la investigación se orienta al cumplimiento del Objetivo Específico N.º2, el cual consiste en analizar la relación entre el tráfico aéreo y el deterioro de los pavimentos aeroportuarios, considerando aquellos aeropuertos que cuentan con registros históricos de PCI en sus pistas.

Para ello, se trabajará con los despegues anuales acumulados desde el año 2010 en adelante, considerando exclusivamente aeronaves con MTOW superior a 5.700 kg, ya que corresponden a las aeronaves que generan las mayores solicitaciones sobre el pavimento aeroportuario y concentran el daño acumulado asociado a la operación aérea de acuerdo con la clasificación establecida por la FAA respecto de su incidencia en el deterioro de pavimentos.

El propósito de esta fase no es jerarquizar ni ponderar variables, sino establecer empíricamente el grado de asociación existente entre el PCI observado y el nivel de tránsito aéreo acumulado, de manera que en la fase siguiente puedan formularse modelos de desempeño coherentes con las relaciones identificadas.

1. Selección de aeropuertos con datos disponibles

Se identificaron los aeropuertos de la red primaria nacional que cuenten simultáneamente con información histórica de PCI y registros de tráfico aéreo en pistas, lo que permitirá construir series temporales comparables.

Se priorizarán aquellos casos que cumplan con dos condiciones fundamentales:

- (i) disponer de una cantidad mínima de registros consecutivos de PCI, definida como al menos tres campañas de auscultación consecutivas sin intervenciones, lo que permite identificar una tendencia de deterioro representativa en el tiempo.
- (ii) presentar una tendencia global decreciente del PCI en el tiempo.

En los casos en que el PCI muestre incrementos entre campañas consecutivas, dichos datos serán descartados del análisis, al considerarse representativos de intervenciones de conservación que alteran la tendencia natural de deterioro. Dado que las pistas se subdividen en distintas secciones, se seleccionarán preferentemente las secciones centrales de pista, así como aquellas coincidentes con la unión con calles de rodaje, por ser consideradas zonas más representativas y con mayor nivel de deterioro observado.

2. Construcción de la variable de tránsito aéreo acumulado



A partir de la información proporcionada por la DGAC, se contabilizarán los despegues anuales de aeronaves con MTOW superior a 5.700 kg, generando la variable de despegues acumulados para el período de análisis.

Esta aproximación permite representar de mejor manera la carga operativa total soportada por los pavimentos aeroportuarios, optándose por considerar únicamente los despegues, dado que estos corresponden a la fase más crítica de la operación aérea, al realizarse a plena capacidad de peso y generar las mayores solicitaciones estructurales sobre el pavimento.

Adicionalmente, este criterio es consistente con el enfoque tradicionalmente adoptado en el diseño estructural de pavimentos aeroportuarios, en el cual las solicitaciones generadas durante el despegue gobiernan el dimensionamiento del paquete estructural, al asociarse a las condiciones de carga más desfavorables consideradas por la FAA y otros organismos internacionales.

3. Vinculación temporal PCI – Despegues acumulados

Los valores de PCI serán vinculados con los despegues acumulados correspondientes al año de cada campaña de auscultación. El análisis se centrará en las secciones de pista previamente seleccionadas, definiendo como año base (año 0) aquel que registre el valor máximo de PCI.

Este supuesto se basa en la hipótesis de que dicho valor representa la condición posterior a una intervención de conservación mayor o a la puesta en servicio de una pista recientemente construida o reconstruida, desde la cual el pavimento inicia su deterioro observable. A partir de este punto inicial, se relacionarán los valores decrecientes de PCI con el incremento del tránsito aéreo acumulado.

En los casos en que el valor máximo de PCI sea inferior a 100, se realizará una extrapolación lineal hasta dicho valor únicamente cuando la diferencia respecto de 100 sea acotada, y siempre que existan antecedentes que indiquen la ausencia de intervenciones de conservación previas al primer registro disponible. En este estudio, dicha extrapolación se limitó a valores iniciales de PCI superiores a 85, estimándose de esta forma el año base y el volumen de tránsito correspondiente.

4. Corrección a pasadas efectivas

El tránsito aéreo acumulado se corrige mediante la conversión de los despegues acumulados en pasadas efectivas acumuladas (PE_a), con el objetivo de representar de manera más realista la carga estructural efectivamente soportada por el pavimento aeroportuario. Esta corrección se fundamenta en el concepto de P/C ratio, ampliamente utilizado en el análisis y diseño estructural de pavimentos aeroportuarios para considerar la distribución espacial de las solicitaciones inducidas por el tránsito aéreo.

Desde el punto de vista metodológico, la corrección a pasadas efectivas reconoce que el daño estructural no depende únicamente del número total de operaciones, sino también de factores operacionales y estructurales que condicionan la forma en que las cargas se transmiten y distribuyen por la superficie del pavimento. Entre estos factores se consideran:

- Número de pasadas de aeronaves.
- Dispersión lateral de trayectorias durante el despegue.
- Configuración del tren de aterrizaje (número y posición de ruedas).
- Tipo de pavimento (flexible o rígido).

La metodología para integrar estos factores y estimar el P/C ratio se encuentra formalmente definida en los procedimientos de diseño estructural de pavimentos aeroportuarios. En el presente estudio, dicha metodología será implementada mediante el software FAARFIELD, el cual incorpora explícitamente estos criterios y permite estimar, de manera consistente, las pasadas efectivas equivalentes a partir de la caracterización del tránsito aéreo y de la estructura del pavimento.

En términos operacionales, la conversión del tránsito aéreo se realiza a nivel anual de acuerdo con la siguiente relación:



$$\text{Despegues efectivos anuales} = \frac{\text{Despegues anuales}}{P/C \text{ ratio}} \quad (5)$$

Esta expresión permite transformar el número de despegues registrados en un número equivalente de pasadas o despegues efectivas anuales, considerando los efectos combinados de la dispersión lateral y la configuración estructural del pavimento. Posteriormente, las pasadas efectivas anuales son acumuladas en el tiempo, dando origen a la variable pasadas efectivas acumuladas (PEa).

5. Correlación entre PCI y tráfico efectivo acumulado:

Con el tránsito aéreo corregido, se procede a determinar las correlaciones entre el PCI y las pasadas efectivas acumuladas, utilizando los coeficientes estadísticos de Pearson, Spearman y Kendall Tau, con el fin de cuantificar el grado de asociación entre ambas variables. Este análisis se realizó exclusivamente en los aeropuertos que cuenten con datos históricos de PCI por sección de pista, garantizando la consistencia y comparabilidad de los resultados.

6. Reproducibilidad a todos los aeropuertos de la red primaria

Una vez obtenidas las correlaciones entre PCI y tráfico efectivo acumulado, se procederá a determinar las pendientes de crecimiento de los despegues efectivos acumulados para los aeropuertos de la red primaria nacional.

Para efectos del análisis, la evolución temporal de las pasadas efectivas acumuladas se aproxima mediante una relación lineal, de acuerdo con la siguiente expresión:

$$PE_a = m * t \quad (6)$$

Donde:

m = Pendiente anual de crecimiento de pasadas efectivas.

t = Tiempo transcurrido desde el año base definido para el análisis.

Este procedimiento permitirá representar de manera gráfica y homogénea la tasa de crecimiento del tránsito efectivo en cada aeropuerto, facilitando su posterior utilización en la formulación de los modelos de desempeño.

4.4 Desarrollo del modelo de desempeño

La cuarta fase de la investigación se orienta al cumplimiento del Objetivo Específico N.º3, consistente en desarrollar modelos de desempeño que permitan estimar la evolución del PCI en función del tránsito aéreo, con énfasis en su aplicabilidad en contextos con disponibilidad limitada de datos históricos.

Esta fase se concibe como un conjunto de actividades secuenciales, que abarcan desde la normalización de la información disponible hasta la formulación, evaluación y extrapolación de curvas de desempeño hacia aeropuertos que no cuentan con registros históricos de PCI.

1. División entre área de estudio

El estudio considera dos tipos de aeropuertos, en función del nivel de desagregación de la información de PCI disponible:

- Aeropuertos que cuentan con información de PCI a nivel de UM, lo que representa el mayor nivel de desagregación y detalle, permitiendo un análisis más preciso de la relación entre el PCI y las pasadas efectivas acumuladas.



- Aeropuertos que disponen de información de PCI agregada por sección de pista, los cuales presentan un menor nivel de resolución, pero permiten complementar el análisis a escala de red cuando la información detallada no se encuentra disponible.

Esta clasificación permite ajustar el nivel de análisis y modelación de acuerdo con la calidad, resolución y continuidad de los datos disponibles, asegurando coherencia metodológica en el desarrollo de los modelos de desempeño.

2. Ajustes regresivos utilizados

Los modelos de deterioro se desarrollan utilizando como variable independiente las pasadas efectivas acumuladas (PE_a), derivadas de la conversión de los despegues anuales a pasadas efectivas mediante el P/C ratio y su posterior acumulación en el tiempo, según la metodología descrita en la sección 4.

A partir de esta variable, se evalúan distintos tipos de ajustes regresivos para representar la evolución del PCI, considerando tres alternativas de modelación:

- Ajuste lineal.
- Ajuste polinómico.
- Modelo logarítmico.

Ajuste lineal

Para el ajuste lineal, la variable x de la ecuación, representaba el valor de pasadas efectivas acumuladas (PE_a), como se aprecia en la Ecuación 7:

$$PCI = -a * (PE_a) + 100 \quad (7)$$

Donde:

a = Tasa de deterioro por unidad de pasadas efectivas.

PE_a = Despegues o pasadas efectivas acumuladas.

Ajuste polinómico

En el caso del ajuste polinómico, la variable independiente vuelve a ser (PE_a), incorporando términos de mayor orden para captar curvaturas en la tendencia del deterioro. El modelo adoptado se expresa como:

$$PCI = -a * (PE_a)^2 + b * (PE_a) + 100 \quad (8)$$

Donde:

a = Coeficiente responsable de la curvatura del modelo y de la aceleración del deterioro.

b = Coeficiente representativo de la tasa inicial de deterioro.

PE_a = Despegues o pasadas efectivas acumuladas.

En este modelo, los parámetros a y b se calibran por medio de un proceso iterativo diseñado para maximizar el coeficiente de determinación (R^2) y minimizar los errores de ajuste (RMSE y MAE).

Modelo logarítmico

Finalmente, se evaluó un modelo logarítmico utilizado en la literatura para representar deterioro progresivo en pavimento. Este modelo se basa en tres parámetros α , β y R , y se expresa mediante la ecuación 9:



$$PCI = 100 - \frac{R}{(\ln(\alpha) - \ln(PE_a))^{1/\beta}} \quad (9)$$

Donde:

α = Parámetro de escala que define el umbral teórico a partir del cual el deterioro se intensifica.

β = Parámetro que controla la curvatura del modelo y la velocidad del deterioro.

R = Parámetro de ajuste.

PE_a = Despegues o pasadas efectivas acumuladas.

En este modelo, los parámetros α , β y R se calibran por medio de un proceso iterativo diseñado para maximizar el coeficiente de determinación (R^2) y minimizar los errores de ajuste (RMSE y MAE).

3. Selección del mejor modelo

En todos los ajustes, tanto lineal, como polinómico y modelo logarítmico, se empleó el mismo criterio de evaluación:

- Maximizar el coeficiente de determinación R^2 .
- Minimizar los valores de RMSE y MAE.

Este enfoque permite identificar, para cada aeropuerto, el modelo que mejor representa la evolución observada del PCI en función de las pasadas efectivas acumuladas, garantizando consistencia metodológica en la comparación de resultados.

Adicionalmente, en aquellos aeropuertos que presentan múltiples secciones centrales de pista o bordes de pista en conexión con calles de rodaje, se aplicaron pruebas estadísticas no paramétricas con el objetivo de evaluar la similitud del comportamiento del deterioro entre secciones.

Este análisis resulta necesario debido a que distintas secciones de una misma pista pueden estar sometidas a niveles de sollicitación estructural significativamente diferentes, asociados a factores como la dispersión lateral durante el despegue, la proximidad a calles de rodaje y la distribución espacial del tránsito aéreo. En estos casos, la utilización de un único modelo promedio podría ocultar diferencias relevantes en la evolución del deterioro.

En función de los resultados de las pruebas estadísticas, se determinó si resulta metodológicamente adecuado representar el comportamiento del pavimento mediante un modelo único representativo, o bien definir modelos independientes para cada sección, asegurando así una caracterización más fiel del desempeño observado.

4. Extrapolación de modelos a aeropuertos con escasos datos PCI

La extrapolación de los modelos de desempeño se realiza en función de la materialidad de la capa superficial del pavimento, distinguiéndose entre pavimentos asfálticos, de hormigón y mixtos. Para cada una de estas categorías se selecciona un aeropuerto representativo, definido como aquel que presenta la mayor disponibilidad y continuidad de información histórica de PCI, particularmente a nivel de unidad muestral.

Si bien en la etapa anterior se evaluaron distintos tipos de modelos (lineal, polinómico y logarítmico), la extrapolación hacia aeropuertos con escasos o nulos registros históricos de PCI se realiza exclusivamente utilizando el modelo logarítmico. Esta decisión metodológica se fundamenta en que dicho modelo presenta una forma funcional coherente con el comportamiento progresivo del deterioro de pavimentos y permite representar adecuadamente las etapas iniciales de deterioro lento y la posterior aceleración del daño.

Adicionalmente, la adopción de este modelo permite evitar inconsistencias teóricas observadas en algunos ajustes lineales y polinómicos, en los cuales el PCI podía alcanzar o superar el valor de 100, condición que resulta conceptualmente imposible de acuerdo con la definición del PCI.



En los casos de aeropuertos que no disponen de registros históricos de PCI, se adopta el siguiente criterio: se mantienen fijos los parámetros α , β y R correspondientes a la curva patrón definida para cada tipo de materialidad del pavimento, y se ajusta únicamente la pendiente de crecimiento de las pasadas efectivas acumuladas, en función del nivel de tránsito aéreo efectivo estimado para cada aeropuerto. De esta forma, se preserva la forma del deterioro característica de cada tipología de pavimento, incorporando simultáneamente las diferencias asociadas a la intensidad de uso operacional.

De esta manera, se extrapolan las curvas de desempeño del PCI, permitiendo proponer curvas representativas en aeropuertos donde no existe información histórica, manteniendo coherencia estructural, operacional y metodológica con los modelos calibrados previamente.

4.5 Validación y conclusiones

La quinta fase de la investigación corresponde a la validación y análisis final del modelo de desempeño desarrollado en la Fase 4, con el objetivo de evaluar su consistencia, robustez y aplicabilidad en el contexto de la red primaria de aeropuertos de Chile.

Esta etapa responde directamente al Objetivo Específico N.º3, ya que permite verificar que el modelo formulado para estimar la evolución del PCI en función del tráfico aéreo puede ser aplicado en aeropuertos con disponibilidad limitada de datos históricos de PCI, manteniendo coherencia con el comportamiento observado en aquellos recintos con información suficiente.

1. Validación de los modelos

Con el fin de evaluar la similitud entre las curvas de deterioro propuestas mediante extrapolación y las curvas reales de PCI disponibles en aeropuertos con información histórica suficiente, se aplicaron pruebas estadísticas no paramétricas, apropiadas para series de datos que no necesariamente cumplen supuestos de normalidad.

Entre las pruebas utilizadas se consideraron principalmente el test de Wilcoxon y el test F*, las cuales permitieron comparar las curvas originales, obtenidas a partir de datos reales de PCI en el tiempo, con las curvas propuestas derivadas de las curvas patrón definidas según la materialidad del pavimento.

Los resultados de estas pruebas permitieron evaluar el grado de concordancia estadística entre ambas series, aportando evidencia cuantitativa respecto de la capacidad del modelo para reproducir tendencias de deterioro observadas.

2. Discusión y alcances del modelo

A partir de los resultados de la validación, se establecen lineamientos sobre la aplicabilidad del modelo de desempeño propuesto, reconociendo explícitamente sus posibilidades de uso en escenarios con información limitada, así como sus principales restricciones

En particular, se delimitan las condiciones bajo las cuales los resultados obtenidos pueden ser interpretados con mayor confiabilidad, considerando aspectos como la disponibilidad de datos históricos, el nivel de desagregación del PCI y la representatividad del aeropuerto patrón utilizado para la extrapolación.

Estas conclusiones se incorporan como parte final de la metodología, dejando definido un procedimiento replicable y consistente para futuras aplicaciones del modelo en el contexto de la gestión de pavimentos aeroportuarios, especialmente en redes donde la información histórica es incompleta o heterogénea.



5 Modelos regresivos utilizando tráfico aéreo

La incorporación del tráfico aéreo en los modelos de desempeño responde a la necesidad de vincular directamente la evolución del índice PCI con la magnitud de las solicitaciones estructurales que experimenta el pavimento. A diferencia de enfoques basados exclusivamente en series históricas de PCI, este análisis integra explícitamente la carga operacional como variable explicativa, en consonancia con lo establecido por la literatura internacional, donde se reconoce que “la acumulación de operaciones equivalentes es uno de los factores determinantes en el deterioro de pavimentos aeroportuarios” (FAA, AC 150/5320-6). Sobre esta base conceptual, el desarrollo metodológico consideró evaluar la relación funcional entre el PCI observado y las pasadas efectivas asociadas a la flota aérea que opera en cada aeropuerto de la red primaria.

5.1 Correlaciones entre PCI y tráfico aéreo

El primer paso consistió en analizar la existencia de una vinculación estadística entre el PCI y los despegues anuales en el tiempo. Este análisis preliminar permitió determinar si la utilización del tráfico aéreo como variable explicativa era metodológicamente justificada. Para ello se generaron series históricas por aeropuerto, combinando el PCI promedio por sección de pista con la evolución anual del tráfico, de acuerdo con el procedimiento descrito en la sección 4.3 de la metodología.

Dado que no todos los aeropuertos cuentan con una serie suficientemente extensa de mediciones PCI, las correlaciones PCI-tráfico se desarrollaron para los siguientes aeropuertos / aeródromos:

- Aeropuerto Andrés Sabella
- Aeródromo Desierto de Atacama
- Aeródromo La Florida
- Aeródromo Carriel Sur
- Aeródromo La Araucanía
- Aeródromo Mocopulli
- Aeródromo Cañal Bajo
- Aeropuerto El Tepual
- Aeródromo Balmaceda
- Aeropuerto Presidente Carlos Ibáñez del Campo

Para efectos de esta tesis, se presentan los resultados gráficos entre PCI-tráfico anual correspondientes a Andrés Sabella, La Florida y El Tepual, por tratarse de los tres aeropuertos seleccionados para representar cada una de las materialidades de pavimentos consideradas en el estudio. En particular, Andrés Sabella representa la materialidad de pavimentos mixtos, La Florida corresponde a la pista construida con pavimento asfáltico, y, finalmente, El Tepual corresponde a la pista conformada por pavimentos de hormigón.

En el caso del aeropuerto Andrés Sabella, el análisis se centra en la pista central, la cual se encuentra subdividida en las secciones PI-1, PI-3, PI-5, PI-7 y PI-9 como se muestra en la Figura 14. Para cada una de estas secciones se dispone de registros históricos de PCI en el periodo comprendido entre los años 2012 y 2019, razón por la cual el análisis gráfico se limita a dicho intervalo temporal.

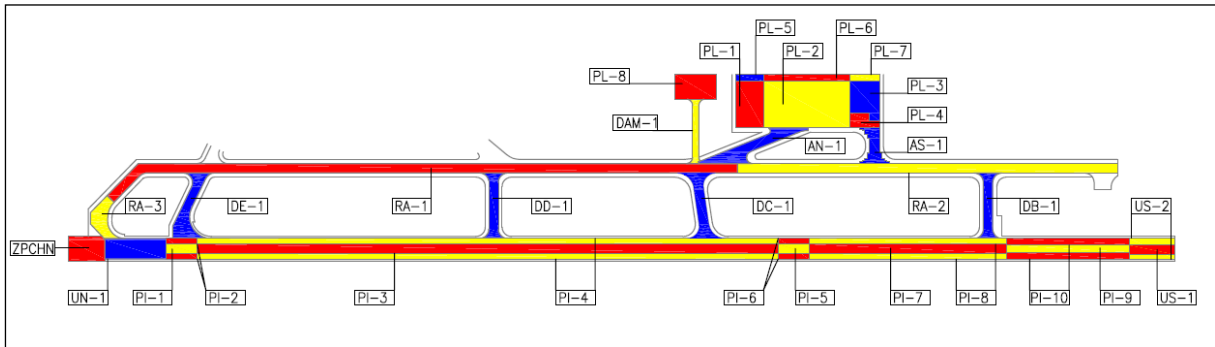


Figura 14. Plano esquemático secciones del aeropuerto Andrés Sabella.

Si bien el aeropuerto cuenta con información de tránsito aéreo para un período más extenso (2010–2022), la comparación se realiza exclusivamente en los años para los cuales existen mediciones de PCI, con el fin de garantizar la consistencia temporal del análisis. En consecuencia, los resultados presentados en la Figura 15 corresponden a una comparación conjunta del PCI por sección y del número de despegues anuales en función del tiempo.

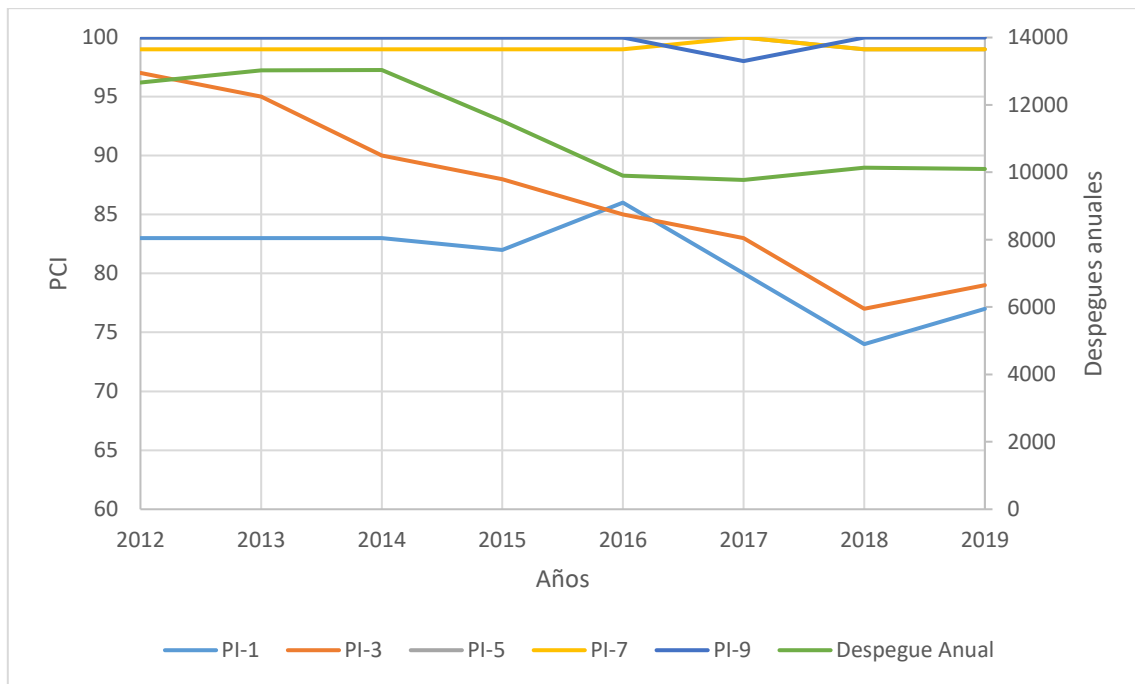


Figura 15. PCI y despegues anuales vs tiempo en pista central Andrés Sabella

Para el caso del aeródromo La Florida, la pista central se encuentra conformada por la sección PI-1, mientras que la sección PI-2 corresponde a los bordes de la pista, tal como se aprecia en la Figura 12.

El análisis se desarrolla nuevamente para el período comprendido entre los años 2014 y 2021, debido a que este intervalo corresponde a los años en los cuales se dispone de información histórica de PCI de manera continua. Si bien el aeródromo cuenta con registros de tránsito aéreo para un período más extenso (2010–2022), la comparación se limita a los años con datos de PCI disponibles, con el fin de asegurar la coherencia temporal del análisis. En consecuencia, se presenta la evolución conjunta del PCI por sección de pista y de los despegues anuales en función del tiempo, como se muestra en la Figura 16.

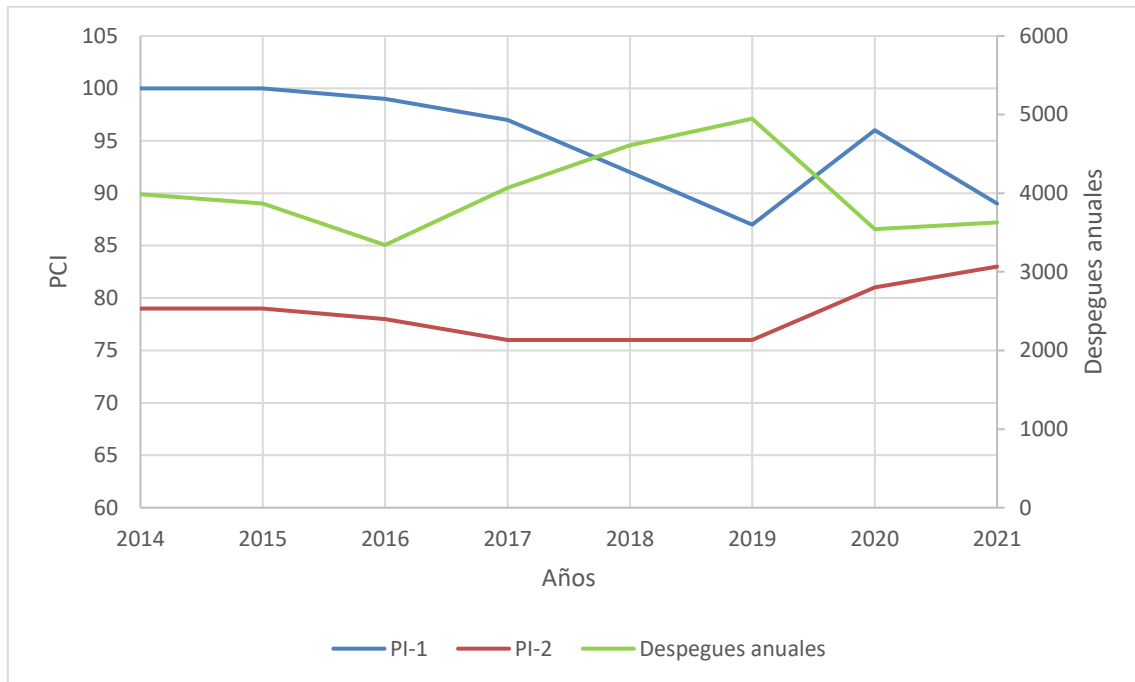


Figura 16. PCI y despegues anuales vs tiempo en La Florida

Finalmente, para el aeropuerto El Tepual, el análisis se centró en la pista central, la cual se encuentra compuesta por las secciones PI-1 y PI-3, tal como se aprecia en la Figura 17.

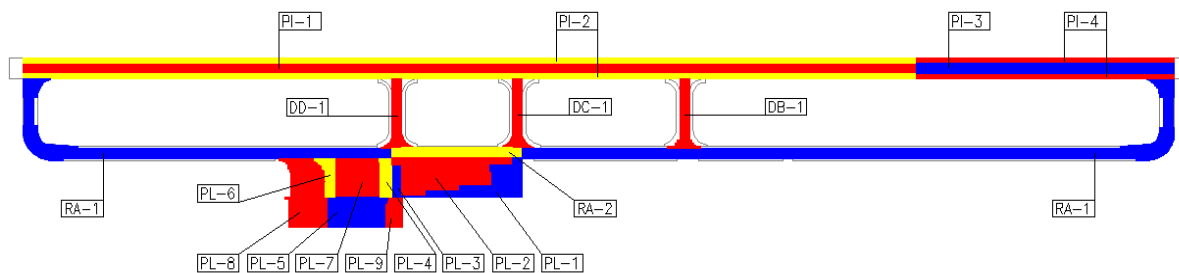


Figura 17. Plano esquemático secciones del aeropuerto El Tepual.

El análisis se desarrolló para el período comprendido entre los años 2013 y 2021, correspondiente a los años en los cuales se dispone de información histórica de PCI de manera continua. Si bien el aeropuerto cuenta con registros de tránsito aéreo para un intervalo temporal más extenso (2010–2022), la comparación se restringe a los años con datos de PCI disponibles, con el fin de asegurar la coherencia temporal del análisis. El grafico se aprecia en la Figura 18.

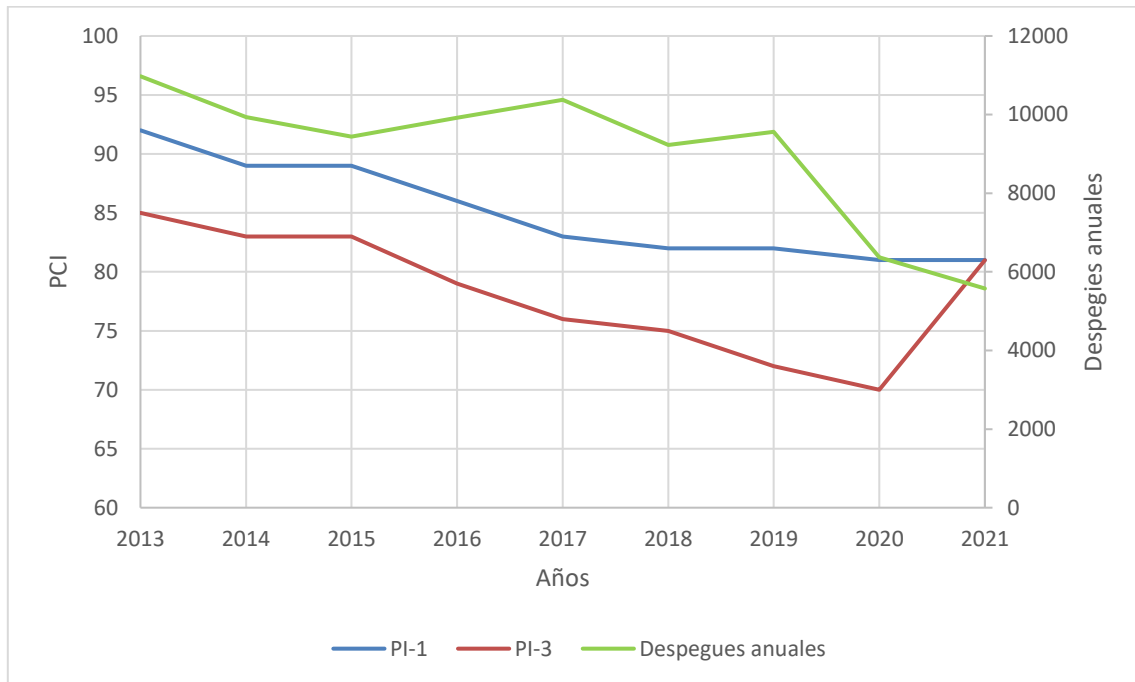


Figura 18. PCI y despegues anuales vs tiempo en pista central aeropuerto El Tepual.

Posteriormente, dado que la visualización temporal no permitía identificar con claridad la relación entre ambas variables, se aplicaron índices de correlación entre el PCI y los despegues acumulados. Para ello se utilizaron los coeficientes de Spearman, Pearson y Kendall Tau, donde valores cercanos a 1 o -1 indican una correlación fuerte entre las variables. Estos indicadores permitieron cuantificar la magnitud y direccionalidad del vínculo estadístico entre el PCI y el tráfico aéreo acumulado. Se analizaron todos los aeropuertos con datos PCI listados anteriormente. Cabe destacar que las correlaciones se realizaron por secciones de pista.

Tabla 12. Correlaciones PCI-Despegues Acumulados, Andrés Sabella

Sección	PI-1		PI-3		PI-5		PI-7		PI-9	
	Correlación	P-value	Correlación	P-value	Correlación	P-value	Correlación	P-value	Correlación	P-value
Spearman	-0.71	0.05	-0.98	0.00	-0.76	0.03	-0.58	0.13	-0.25	0.56
Pearson	-0.67	0.07	-0.98	0.00	-0.73	0.04	-0.41	0.31	-0.25	0.55
Kendall Tau	-0.57	0.06	-0.93	0.00	-0.66	0.05	-0.50	0.13	-0.21	0.51

Tabla 13. Correlaciones secciones críticas PCI – Despegues Acumulados, Andrés Sabella.

Sección	PI-2 (Echo)		PI-4 (Delta)		PI-4 (Charlie)	
	Correlación	P-value	Correlación	P-value	Correlación	P-value
Spearman	-0.88	0.02	-0.90	0.00	-0.89	0.00
Pearson	-0.82	0.01	-0.88	0.00	-0.86	0.01
Kendall Tau	-0.78	0.00	-0.87	0.00	-0.85	0.00



Tabla 14. Correlación PCI-Despegues Acumulados, Desierto de Atacama

Sección	PI-1	
	Correlación	P-value
Spearman	-0.83	0.04
Pearson	-0.84	0.04
Kendall Tau	-0.73	0.06

Tabla 15. Correlación PCI-Despegues Acumulados, La Florida

Sección	PI-1		PI-2 (Charlie)		PI-2 (Bravo)	
	Correlación	P-value	Correlación	P-value	Correlación	P-value
Spearman	-0.99	0.00	-0.81	0.02	-0.82	0.04
Pearson	-0.95	0.00	-0.87	0.00	-0.85	0.00
Kendall Tau	-0.97	0.01	-0.76	0.01	-0.72	0.00

Tabla 16. Correlación PCI-Despegues Acumulados, Carriel Sur

Sección	PI-1	
	Correlación	P-value
Spearman	-1.00	0.00
Pearson	-0.99	0.00
Kendall Tau	-1.00	0.00

Tabla 17. Correlaciones PCI-Despegues Acumulados, La Araucanía

Sección	PI-1	
	Correlación	P-value
Spearman	-0.93	0.00
Pearson	-0.99	0.00
Kendall Tau	-0.96	0.00

Tabla 18. Correlaciones PCI-Despegues Acumulados, Mocopulli

Sección	PI-1	
	Correlación	P-value
Spearman	-0.88	0.12
Pearson	-1.00	0.00
Kendall Tau	-1.00	0.08

Tabla 19. Correlaciones PCI-Despegues Acumulados, Cañal Bajo

Sección	PI-1		PI-3		PI-5	
	Correlación	P-value	Correlación	P-value	Correlación	P-value
Spearman	-0.99	0.00	-1.00	0.00	-1.00	0.00
Pearson	-0.97	0.00	-0.99	0.00	-0.99	0.00
Kendall Tau	-0.98	0.00	-1.00	0.00	-1.00	0.00

Tabla 20. Correlaciones PCI-Despegues Acumulados, El Tepual

Sección	PI-1		PI-3		PI-2 (Delta)		PI-2 (Charlie)		PI-2 (Bravo)	
	Correlación	P-value	Correlación	P-value	Correlación	P-value	Correlación	P-value	Correlación	P-value
Spearman	-0.98	0.00	-0.99	0.00	-0.83	0.00	-0.85	0.00	-0.82	0.00
Pearson	-0.97	0.00	-0.98	0.00	-0.88	0.00	-0.90	0.00	-0.85	0.00
Kendall Tau	-0.95	0.00	-0.98	0.00	-0.79	0.00	-0.81	0.00	-0.80	0.00

Tabla 21. Correlaciones PCI-Despegues Acumulados, Balmaceda

Sección	PI-1		PI-3	
	Correlación	P-value	Correlación	P-value
Spearman	-1.00	0.00	-1.00	0.00
Pearson	-1.00	0.00	-1.00	0.00
Kendall Tau	-1.00	0.00	-1.00	0.00

Tabla 22. Correlaciones PCI-Despegues Acumulados, Presidente Carlos Ibáñez del Campo. Pista 07-25.

Sección	PI-1		PI-3		PI-5		PI-7		PI-9	
	Correlación	P-value	Correlación	P-value	Correlación	P-value	Correlación	P-value	Correlación	P-value
Spearman	-1.00	0.00	-1.00	0.00	-1.00	0.00	-1.00	0.00	-1.00	0.00
Pearson	-1.00	0.00	-1.00	0.00	-1.00	0.00	-1.00	0.00	-0.98	0.00
Kendall Tau	-1.00	0.00	-1.00	0.00	-1.00	0.00	-1.00	0.00	-1.00	0.00

Tabla 23. Correlaciones PCI-Despegues Acumulados, Presidente Carlos Ibáñez del Campo. Pista 12-30.

Sección	PIC-1		PIC-3	
	Correlación	P-value	Correlación	P-value
Spearman	-1.00	0.00	-0.99	0.00
Pearson	-0.99	0.00	-0.95	0.00
Kendall Tau	-1.00	0.00	-0.98	0.00



Tabla 24. Correlaciones PCI-Despegues Acumulados, Presidente Carlos Ibáñez del Campo. Pista 01-19

Sección	PID-1		PID-3	
	Correlación	P-value	Correlación	P-value
Spearman	-1.00	0.00	-1.00	0.00
Pearson	-0.99	0.00	-0.99	0.00
Kendall Tau	-1.00	0.00	-0.98	0.00

5.2 Corrección de tráfico aéreo utilizando P/C ratio

El tráfico aéreo que opera sobre los pavimentos aeroportuarios es altamente heterogéneo en términos de peso, configuración del tren de aterrizaje y distribución de carga, lo que implica que cada aeronave produce niveles de solicitaciones distintos en los pavimentos y, consecuentemente, diferentes niveles de deterioro. Para efectos de la modelación del PCI, esta heterogeneidad dificulta la modelación en función del tráfico aéreo, por lo que se requiere expresar dichas operaciones como un número equivalente de pasadas efectivas sobre el pavimento.

Con este propósito, se aplicó el P/C ratio, el cual permite normalizar la flota aérea al convertir cada operación en una pasada equivalente desde el punto de vista de la cobertura de carga sobre la superficie.

El cálculo del P/C ratio se realizó mediante el software FAARFIELD para los 17 aeropuertos de la red primaria, con excepción del Aeropuerto Arturo Merino Benítez, cuya categoría operacional y composición de flota difieren significativamente del resto de los recintos. Este proceso permitió obtener, para cada aeropuerto, un conjunto de pasadas efectivas anuales, expresadas en unidades comparables incluso entre aeropuertos con flotas muy distintas.

Esta corrección del tráfico constituye un paso esencial para representar adecuadamente la carga operativa que actúa sobre el pavimento y, posteriormente, para el desarrollo de los modelos de deterioro.

Ejemplo de aquello se puede observar en la Tabla 25, donde para las aeronaves más representativas de La Florida, se le aplica el P/C ratio normalizando así la flota aérea.



Tabla 25. Ejemplificación sobre normalización a través de la razón P/C para el tráfico aéreo de las aeronaves.

		A320	A321	B735	RJ1H	RJ85	B462	C550	D228	BE20	B200	C525	A319	DHC6
2014	Sin P/C ratio	1958	1	4	0	0	2	21	181	21	30	13	1491	176
	Con P/C ratio	1305	1	3	0	0	1	7	78	9	13	4	994	56
2015	Sin P/C ratio	1871	5	6	0	0	2	23	170	44	36	21	1144	395
	Con P/C ratio	1247	3	4	0	0	1	7	74	19	16	7	763	126
2016	Sin P/C ratio	1808	51	2	0	0	0	17	101	13	40	12	998	219
	Con P/C ratio	1205	35	1	0	0	0	5	44	6	17	4	665	70
2017	Sin P/C ratio	1793	109	3	0	2	0	33	165	38	25	10	1136	483
	Con P/C ratio	1195	75	2	0	1	0	11	71	16	11	3	757	154
2018	Sin P/C ratio	2311	306	1	0	0	0	15	209	58	15	10	1221	384
	Con P/C ratio	1541	210	1	0	0	0	5	90	25	6	3	814	123
2019	Sin P/C ratio	2452	794	4	0	22	4	20	254	82	49	9	1121	25
	Con P/C ratio	1635	544	3	0	14	3	6	110	35	21	3	747	123
2020	Sin P/C ratio	2440	251	2	68	60	41	33	295	31	36	0	185	9
	Con P/C ratio	1627	172	1	43	38	26	11	128	13	16	0	123	3
2021	Sin P/C ratio	3014	132	3	61	41	93	48	147	30	15	7	0	3
	Con P/C ratio	2009	90	2	39	26	59	15	64	13	6	2	0	1
2022	Sin P/C ratio	2317	676	3	27	107	75	42	197	35	24	9	0	14
	Con P/C ratio	2042	463	2	17	68	48	13	85	15	10	3	0	4

Por otro lado, el tráfico aéreo anual corregido con P/C ratio para cada uno de los aeropuertos de la red primaria se encuentra en el Anexo 3 del presente informe.

Con el tráfico ya corregido, se procedió a determinar la correlación entre el PCI y las pasadas efectivas acumuladas. Para ello se utilizaron nuevamente los coeficientes de Pearson, Spearman y Kendall Tau, con el fin de cuantificar el vínculo estadístico entre ambas variables. Este análisis se realizó exclusivamente en los aeropuertos que cuentan con datos históricos de PCI por sección de pista, considerando únicamente las secciones centrales de las pistas.

Las correlaciones entre el PCI y el tráfico efectivo acumulado se presentan a continuación para los nueve aeropuertos previamente señalados, correspondientes a aquellos que disponen de información PCI suficiente para este tipo de evaluación.

Tabla 26. Correlación PCI-Despues efectivos, Andrés Sabella

Sección	PI-1		PI-3		PI-5		PI-7		PI-9	
	Correlación	P-value	Correlación	P-value	Correlación	P-value	Correlación	P-value	Correlación	P-value
Spearman	-0.71	0.05	-0.98	0.00	-0.76	0.03	-0.25	0.56	-0.25	0.56
Pearson	-0.67	0.07	-0.98	0.00	-0.73	0.04	-0.25	0.56	-0.25	0.56
Kendall Tau	-0.57	0.06	-0.93	0.00	-0.66	0.05	-0.21	0.51	-0.21	0.51



Tabla 27. Correlaciones PCI-Despegues efectivos, Andrés Sabella.

Sección	PI-2 (Echo)		PI-4 (Delta)		PI-2 (Charlie)	
	Correlación	P-value	Correlación	P-value	Correlación	P-value
Spearman	-0.89	0.01	-0.92	0.00	-0.90	0.01
Pearson	-0.81	0.00	-0.88	0.00	-0.86	0.00
Kendall Tau	-0.80	0.00	-0.88	0.00	-0.87	0.00

Tabla 28. Correlación PCI-Despegues efectivos, Desierto de Atacama

Sección	PI-1	
	Correlación	P-value
Spearman	-0.88	0.35
Pearson	-0.83	0.29
Kendall Tau	-0.96	0.12

Tabla 29. Correlación PCI-Despegues efectivos, La Florida

Sección	PI-1		PI-2 (Charlie)		PI-2 (Bravo)	
	Correlación	P-value	Correlación	P-value	Correlación	P-value
Spearman	-0.99	0.00	-0.82	0.02	0.83	0.00
Pearson	-0.95	0.00	-0.86	0.00	-0.85	0.00
Kendall Tau	-0.97	0.01	-0.79	0.01	0.73	0.00

Tabla 30. Correlación PCI-Despegues efectivos, Carriel Sur

Sección	PI-1	
	Correlación	P-value
Spearman	-1.00	0.00
Pearson	-1.00	0.00
Kendall Tau	-1.00	0.00

Tabla 31. Correlación PCI-Despegues efectivos, La Araucanía.

Sección	PI-1	
	Correlación	P-value
Spearman	-0.99	0.00
Pearson	-0.90	0.00
Kendall Tau	-0.97	0.00



Tabla 32. Correlación PCI-Despegues efectivos, Mocopullí.

Sección	PI-1	
	Correlación	P-value
Spearman	-1.00	0.00
Pearson	-0.92	0.00
Kendall Tau	-1.00	0.08

Tabla 33. Correlación PCI-Despegues efectivos, Cañal Bajo.

Sección	PI-1		PI-3		PI-5	
	Correlación	P-value	Correlación	P-value	Correlación	P-value
Spearman	-0.99	0.00	-1.00	0.00	-1.00	0.00
Pearson	-0.98	0.00	-1.00	0.00	-1.00	0.00
Kendall Tau	-0.98	0.00	-1.00	0.00	-1.00	0.00

Tabla 34. Correlación PCI-Despegues efectivos, El Tepual.

Sección	PI-1		PI-3		PI-2 (Delta)		PI-2 (Charlie)		PI-2 (Bravo)	
	Correlación	P-value	Correlación	P-value	Correlación	P-value	Correlación	P-value	Correlación	P-value
Spearman	-0.99	0.00	-0.99	0.00	-0.85	0.00	-0.86	0.00	-0.82	0.00
Pearson	-0.97	0.00	-0.99	0.00	-0.88	0.00	-0.90	0.00	-0.86	0.00
Kendall Tau	-0.96	0.00	-0.98	0.00	-0.80	0.00	-0.83	0.00	-0.80	0.00

Tabla 35. Correlación PCI-Despegues efectivos, Balmaceda

Sección	PI-1		PI-3	
	Correlación	P-value	Correlación	P-value
Spearman	-1.00	0.00	-1.00	0.00
Pearson	-1.00	0.00	-1.00	0.00
Kendall Tau	-1.00	0.00	-1.00	0.00

Tabla 36. Correlación PCI-Despegues efectivos, Presidente Carlos Ibáñez del Campo, Pista 07-25

Sección	PI-1		PI-3		PI-5		PI-7		PI-9	
	Correlación	P-value	Correlación	P-value	Correlación	P-value	Correlación	P-value	Correlación	P-value
Spearman	-1.00	0.00	-1.00	0.00	-1.00	0.00	-1.00	0.00	-1.00	0.00
Pearson	-1.00	0.00	-1.00	0.00	-1.00	0.00	-1.00	0.00	-0.99	0.00
Kendall Tau	-1.00	0.00	-1.00	0.00	-1.00	0.00	-1.00	0.00	-1.00	0.00



Tabla 37. Correlación PCI-Despegues efectivos, Presidente Carlos Ibáñez del Campo, Pista 12-30

Sección	PIC-1		PIC-3	
	Correlación	P-value	Correlación	P-value
Spearman	-1.00	0.00	-0.99	0.00
Pearson	-1.00	0.00	-0.98	0.00
Kendall Tau	-1.00	0.00	-1.00	0.00

Tabla 38. Correlación PCI-Despegues efectivos, Presidente Carlos Ibáñez del Campo, Pista 01-19

Sección	PID-1		PID-3	
	Correlación	P-value	Correlación	P-value
Spearman	-1.00	0.00	-1.00	0.00
Pearson	-0.99	0.00	-0.99	0.00
Kendall Tau	-1.00	0.00	-1.00	0.00

Con las pasadas efectivas se procedió a analizar su evolución temporal a nivel anual para cada aeropuerto de la red primaria. Este análisis tuvo por objetivo caracterizar la tendencia de crecimiento del tráfico efectivo, para lo cual se generaron series de pasadas efectivas acumuladas y se ajustó un modelo lineal. La pendiente de dicho ajuste, m , representa la tasa anual de crecimiento de las pasadas efectivas acumuladas y constituye un parámetro fundamental del modelo, ya que resume el comportamiento operativo del aeropuerto a lo largo del tiempo. Tal como señala la FAA (2016), “*las tasas de crecimiento del tráfico son uno de los insumos fundamentales para la proyección de vida útil y la programación de mantenimiento*”. La relación lineal utilizada se expresa en la Ecuación 7.

En la Tabla 39 se presentan los valores de m obtenidos para cada aeropuerto de la red primaria, mientras que la Tabla 40 muestra las proyecciones de pasadas efectivas acumuladas a partir de estos valores. La Figura 19 ilustra gráficamente la evolución proyectada de las pasadas efectivas en el tiempo para todos los aeropuertos considerados.



Tabla 39. Pendiente de crecimiento de los despegues acumulados para toda la red primaria de Chile.

Aeropuerto	<i>m</i>
Chacalluta	1784.5
Diego Aracena	4714.8
El Loa	4227.7
Andrés Sabella	2645.4
Desierto de Atacama	1179.3
La Florida	2452.9
Mataverí	315.84
Carriel Sur	3839.7
La Araucanía	1373.6
Mocopulli	236.29
Pichoy	718.03
Cañal Bajo	514.66
El Tepual	2132.2
Balmaceda	494.49
Tte. Julio Gallardo	215.19
C.I. del Campo 07-25	2957.4
C.I. del Campo 12-30	217.16
C.I. del Campo 01-19	4

El tiempo 0 asignado a cada aeropuerto de la red primaria de Chile con excepción de Arturo Merino Benítez, corresponde al año en que su pavimento registró la condición máxima (PCI = 100). Este año se utiliza como punto de referencia y se relaciona con la evolución anual propia de cada aeropuerto. Por ejemplo, en el aeródromo La Florida, el tiempo 0 se fija en 2014, mientras que en el aeropuerto Carriel Sur corresponde a 2013.



Tabla 40. Pasadas efectivas para los aeropuertos de la red primaria de Chile en el tiempo.

Pasadas efectivas																		
Tiempo	Chacalluta	Diego Aracena	El Loa	Andrés Sabella	Desierto de Atacama	La Florida	Mataverí	Carriel Sur	La Araucanía	Mocopulli	Pichoy	Cañal Bajo	El Tepual	Balmaceda	Tte. Julio Gallardo	C.I. del Campo 07-25	C.I. del Campo 12-30	C.I. del Campo 01-19
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	1785	4715	4228	2645	1179	2453	316	3840	1374	236	718	515	2132	494	215	2932	217	4
2	3569	9430	8455	5291	2359	4906	632	7679	2747	473	1436	1029	4264	989	430	5865	434	8
3	5354	14144	12683	7936	3538	7359	948	11519	4121	709	2154	1544	6397	1483	646	8797	651	12
4	7138	18859	16911	10582	4717	9812	1263	15359	5494	945	2872	2059	8529	1978	861	11729	869	16
5	8923	23574	21139	13227	5897	12265	1579	19199	6868	1181	3590	2573	10661	2472	1076	14662	1086	21
6	10707	28289	25366	15872	7076	14717	1895	23038	8242	1418	4308	3088	12793	2967	1291	17594	1303	25
7	12492	33004	29594	18518	8255	17170	2211	26878	9615	1654	5026	3603	14925	3461	1506	20526	1520	29
8	14276	37718	33822	21163	9434	19623	2527	30718	10989	1890	5744	4117	17058	3956	1722	23458	1737	33
9	16061	42433	38049	23809	10614	22076	2843	34557	12362	2127	6462	4632	19190	4450	1937	26391	1954	37
10	17845	47148	42277	26454	11793	24529	3158	38397	13736	2363	7180	5147	21322	4945	2152	29323	2172	41
11	19630	51863	46505	29099	12972	26982	3474	42237	15110	2599	7898	5661	23454	5439	2367	32255	2389	45
12	21414	56578	50732	31745	14152	29435	3790	46076	16483	2835	8616	6176	25586	5934	2582	35188	2606	49
13	23199	61292	54960	34390	15331	31888	4106	49916	17857	3072	9334	6691	27719	6428	2797	38120	2823	54
14	24983	66007	59188	37036	16510	34341	4422	53756	19230	3308	10052	7205	29851	6923	3013	41052	3040	58
15	26768	70722	63416	39681	17690	36794	4738	57596	20604	3544	10770	7720	31983	7417	3228	43985	3257	62
16	28552	75437	67643	42326	18869	39246	5053	61435	21978	3781	11488	8235	34115	7912	3443	46917	3475	66
17	30337	80152	71871	44972	20048	41699	5369	65275	23351	4017	12207	8749	36247	8406	3658	49849	3692	70
18	32121	84866	76099	47617	21227	44152	5685	69115	24725	4253	12925	9264	38380	8901	3873	52781	3909	74
19	33906	89581	80326	50263	22407	46605	6001	72954	26098	4490	13643	9779	40512	9395	4089	55714	4126	78
20	35690	94296	84554	52908	23586	49058	6317	76794	27472	4726	14361	10293	42644	9890	4304	58646	4343	82

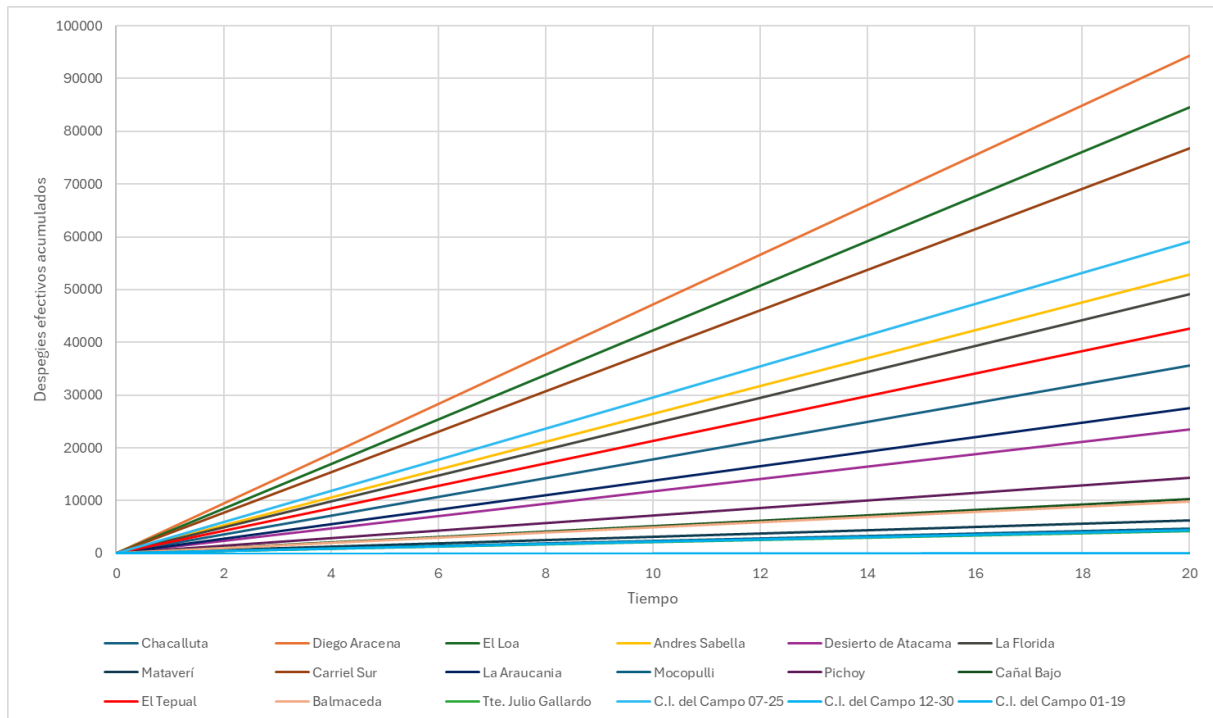


Figura 19. Proyección de pasadas efectivas en el tiempo a partir de su pendiente de crecimiento (m).

5.3 Modelos desarrollados

5.3.1 Modelos regresivos por unidad muestral

En primer lugar, cabe señalar que se disponía de información de PCI a nivel de Unidad Muestral (UM), lo que permitió desarrollar modelos con un mayor nivel de detalle. Este enfoque hizo posible analizar el comportamiento del pavimento en secciones específicas de las pistas, tales como zonas de conexión con calles de rodaje, bordes de pista en zonas críticas y umbrales, donde el avión ejecuta maniobras de giro de 180°, entre otros.

La modelación a nivel de UM resulta particularmente relevante, ya que permite capturar la heterogeneidad del deterioro dentro de una misma pista, evitando la pérdida de información que se produce al trabajar exclusivamente con valores promedio. En este sentido, la desagregación espacial contribuyó a identificar patrones de deterioro diferenciados y a generar modelos más representativos del comportamiento real del pavimento bajo distintas condiciones operacionales y como resultado, este enfoque otorgó una mayor variedad de modelos.

Asimismo, los siguientes tres aeropuertos fueron considerados como aeropuertos patrón, con el propósito de generar, a partir de sus parámetros, curvas de desempeño transferibles a otros recintos de la red primaria que no disponen de información histórica de PCI. Cada uno de ellos representa una distinta materialidad de pavimento:

- Aeródromo La Florida: Pavimento asfáltico
- Aeropuerto Andrés Sabella: Pavimento mixto
- Aeropuerto El Tepual: Pavimento de hormigón

A continuación, se presentan las curvas de deterioro generadas para cada uno de estos aeropuertos a nivel de UM:

5.3.1.1 Aeropuerto Andrés Sabella

En primer lugar, se generaron las curvas de deterioro para la franja central de la pista, comenzando por la sección PI-1. En la Figura 20 se presentan los ajustes lineales, polinómico y del modelo logarítmico, junto con los valores observados de PCI para esta sección. Las métricas de ajuste asociadas a cada modelo se muestran en la Tabla 41.

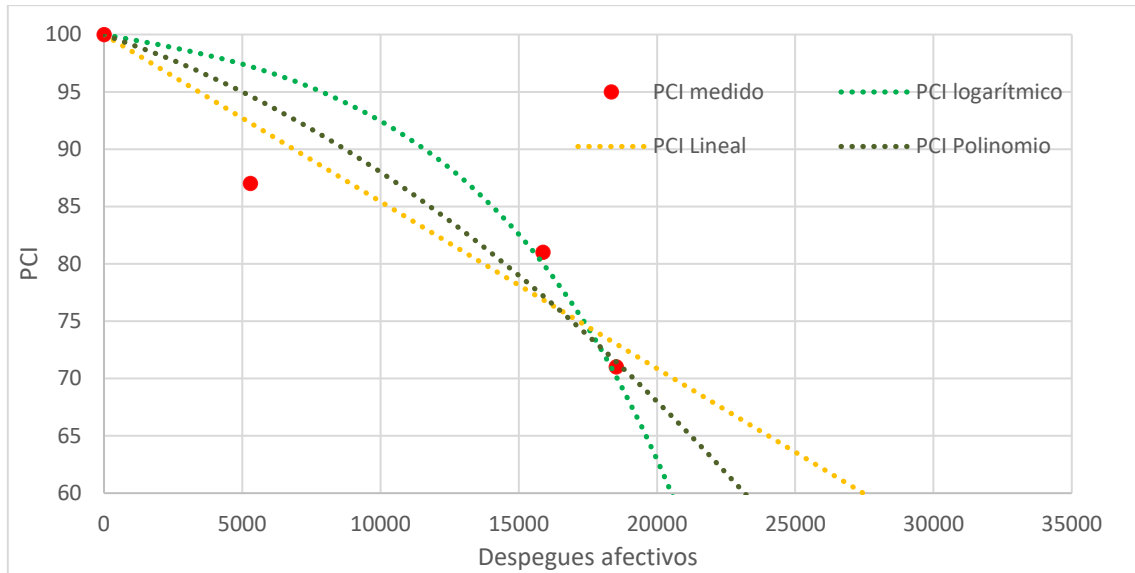


Figura 20. Curva del deterioro para el aeropuerto Andrés Sabella (PI-1), Ajuste lineal, Polinómico y logarítmico.

Tabla 41. Métricas de ajuste para cada modelo de regresión en el aeropuerto Andrés Sabella PI-1.

Métricas PI-1			
	Lineal	Polinomio	Logarítmico
R2	0.89	0.83	0.76
RMSE	3.50	4.27	5.15
MAE	2.86	2.97	3.00

Posteriormente, se evaluó la sección PI-3, correspondiente a otra franja central de la misma pista. La Figura 21 muestra las curvas de deterioro generadas para esta sección, utilizando los mismos tipos de ajuste, mientras que las métricas obtenidas se presentan en la Tabla 42.

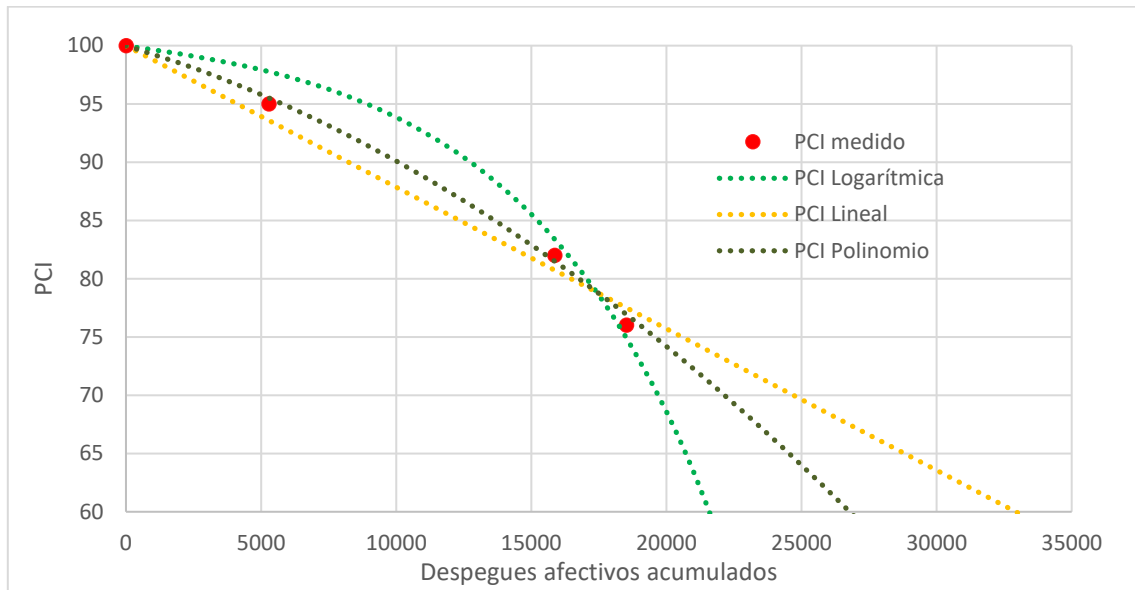


Figura 21. Curva del deterioro para el aeropuerto Andrés Sabella (PI-3), Ajuste lineal, Polinómico y logarítmico.

Tabla 42. Métricas de ajuste para cada modelo de regresión en el aeropuerto Andrés Sabella PI-3.

Métricas PI-3			
	Lineal	Polinomio	Logarítmico
R2	0.98	1.00	0.97
RMSE	1.22	0.59	1.63
MAE	1.05	0.49	1.30

Con el objetivo de determinar si ambas secciones podían analizarse de manera conjunta o requieran modelos diferenciados, se aplicaron las pruebas no paramétricas Mann-Whitney U y F*. Los resultados se presentan en la Tabla 43. En ambos casos, los valores de p fueron superiores a 0.05, por lo que no se rechaza la hipótesis nula que establece que no existen diferencias significativas entre los pares comparados. En consecuencia, se concluye que las secciones PI-1 y PI-3 presentan comportamientos estadísticamente equivalentes.

Tabla 43. Test no-paramétricos para comprobar similitud entre PI-1 y PI-3.

Mann-Whitney U			F* test		
	U	p		F*	p
PI-1 vs PI-3	56	0.792698	PI-1 vs PI-3	1.3181	0.335324

Dado que estadísticamente, no se identificaron diferencias significativas, se consolidaron las observaciones de ambas secciones en una única nube de puntos para generar una curva representativa del comportamiento de la franja central de la pista. La Figura 22 muestra la curva final obtenida mediante el modelo logarítmico, la cual se empleará como referencia para el desarrollo posterior de los modelos de desempeño del aeropuerto Andrés Sabella. Además, las métricas de ajuste se presentan la Tabla 44.

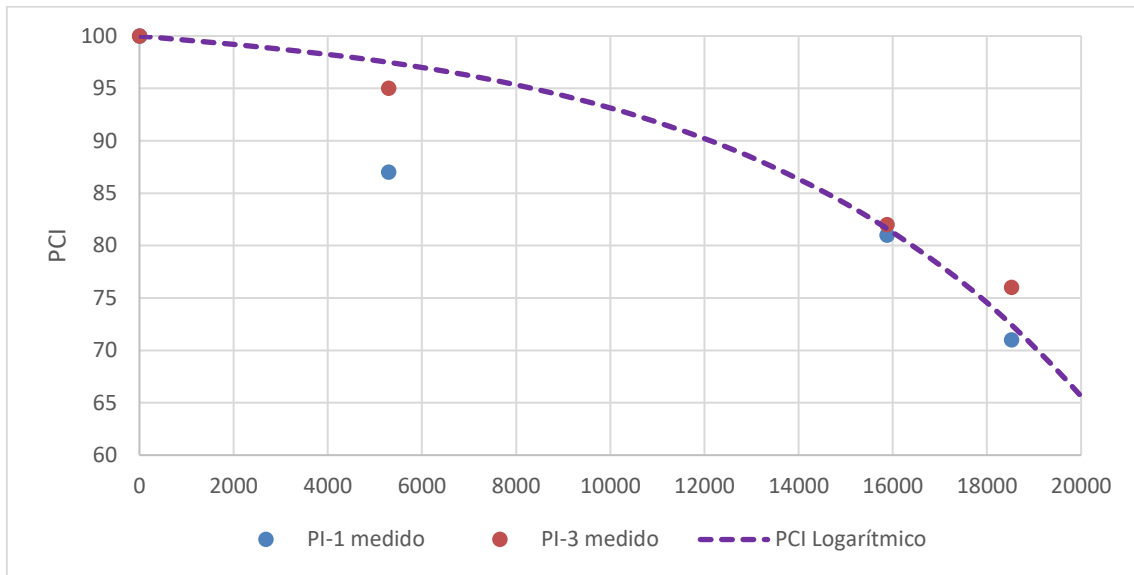


Figura 22. Curva de desempeño representativa de la franja central de la pista del aeropuerto Andrés Sabella.

Tabla 44. Métricas de ajuste para modelo logarítmico en el aeropuerto Andrés Sabella, franja central de pista.

Métricas PI-Representativa		
	PI-1	PI-3
R2	0.74	0.95
RMSE	5.30	2.18
MAE	3.14	1.60

Para las zonas críticas de este aeropuerto correspondientes a la pista en conexión con calles de rodaje también se desarrollaron modelos de desempeño específicos para las secciones ubicadas en las intersecciones con las calles Echo, Delta y Charlie.

A continuación, en la Figura 23, se presenta la curva PCI para la sección crítica asociada a la calle de rodaje Echo, junto con sus correspondientes métricas de ajuste en la Tabla 45.

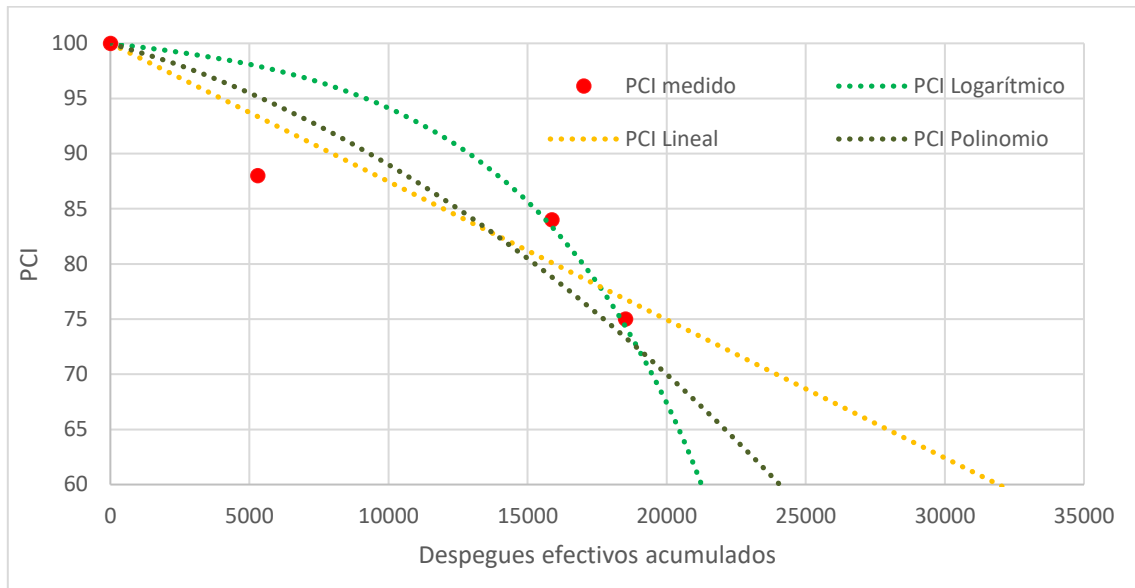


Figura 23. Curva del deterioro para el aeropuerto Andrés Sabella (PI UM Crítica Echo), Ajuste lineal, Polinómico y Logarítmico.

Tabla 45. Métricas de ajuste para cada modelo de regresión en el aeropuerto Andrés Sabella (PI UM Crítica Echo)

Métricas PI UM Crítica Echo			
	Lineal	Polinomio	Logarítmico
R2	0.85	0.75	0.69
RMSE	3.43	4.51	4.99
MAE	2.76	3.51	2.81

Para la sección PI UM Crítica Delta, las curvas generadas se muestran en la Figura 24, y sus métricas de ajuste se presentan en la Tabla 46.

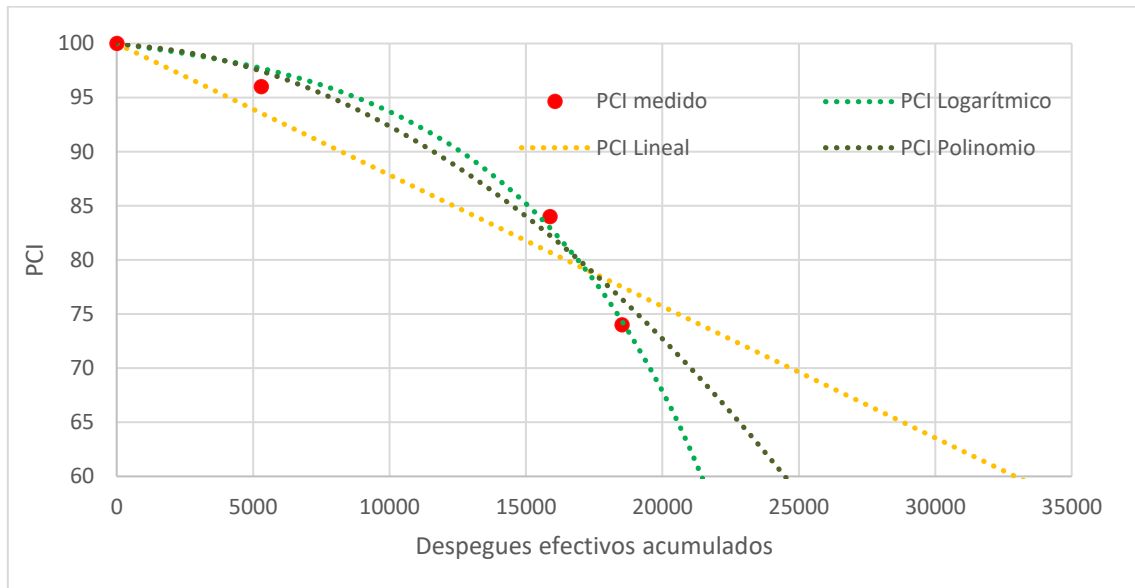


Figura 24. Curva del deterioro para el aeropuerto Andrés Sabella (PI UM Crítica Delta), Ajuste lineal, Polinómico y Logarítmico.

Tabla 46. Métricas de ajuste para cada modelo de regresión en el aeropuerto Andrés Sabella (PI UM Crítica Delta)

Métricas PI UM crítica Delta			
	Lineal	Polinomio	Logarítmico
R2	0.93	0.97	0.99
RMSE	2.69	1.64	1.01
MAE	2.30	1.39	0.77

Finalmente, la sección PI UM Crítica Charlie y sus respectivos ajustes se presentan en la Figura 25, mientras que las métricas asociadas se encuentran en la Tabla 47.

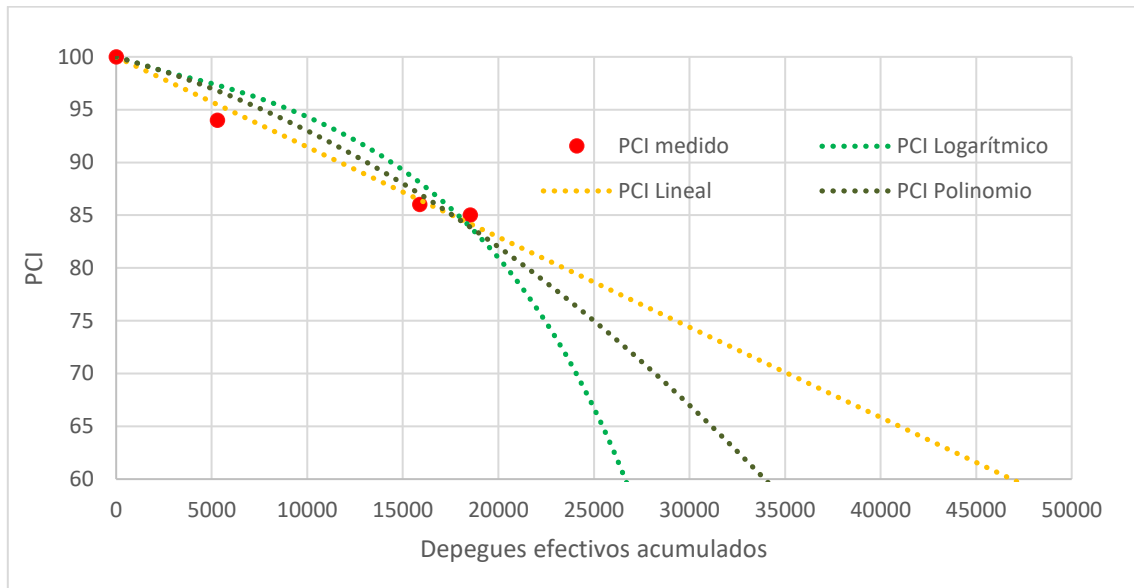


Figura 25. Curva del deterioro para el aeropuerto Andrés Sabella (PI UM Crítica Charlie), Ajuste lineal, Polinómico y Logarítmico.

Tabla 47. Métricas de ajuste para cada modelo de regresión en el aeropuerto Andrés Sabella (PI UM Crítica Charlie).

Métricas PI UM Crítica Charlie			
	Lineal	Polinomio	Logarítmico
R2	0.98	0.93	0.89
RMSE	0.87	1.59	2.05
MAE	0.69	1.23	1.64

Con el fin de evaluar si las secciones críticas debían ser modeladas de manera independiente o podían ser consolidadas en una única curva representativa, se aplicaron pruebas no paramétricas. En primer lugar, se utilizó el test de Kruskal–Wallis, cuyos resultados se muestran en la Tabla 48.

Tabla 48. Test no-paramétricos para comprobar similitud entre PI Echo, Delta y Charlie.

Kruskal-Wallis	
H	P
3.1954	0.202365

Dado que el valor de p fue superior a 0.05, no se rechaza la hipótesis nula, lo que indica que no existen diferencias significativas entre las distribuciones de PCI para las tres secciones evaluadas.

Posteriormente, se aplicaron comparaciones por pares mediante las pruebas Mann–Whitney U y F*, cuyos resultados se presentan en la Tabla 49.

Tabla 49. Test no-paramétricos para comprobar similitud por pares.

Mann-Whitney por pares			F* test		
	U	p		F*	p
ECHO vs DELTA	173	0.838035	ECHO vs DELTA	1.0552	0.455272
ECHO vs CHARLIE	126	0.114788	ECHO vs CHARLIE	2.1558	0.056117
DELTA vs CHARLIE	130	0.144274	DELTA vs CHARLIE	2.0431	0.069504

En todos los casos, los valores de p obtenidos fueron mayores que 0.05, confirmando que no se detectan diferencias estadísticamente significativas entre las secciones críticas Echo, Delta y Charlie.

Dado que las pruebas estadísticas indican que no existen diferencias significativas entre las tres secciones, se consolidaron las observaciones en una única nube de puntos para generar una curva representativa del comportamiento de las zonas críticas de la pista. La Figura 26 muestra el modelo logarítmico obtenido, mientras que la Tabla 50 presenta las métricas de ajuste correspondientes.

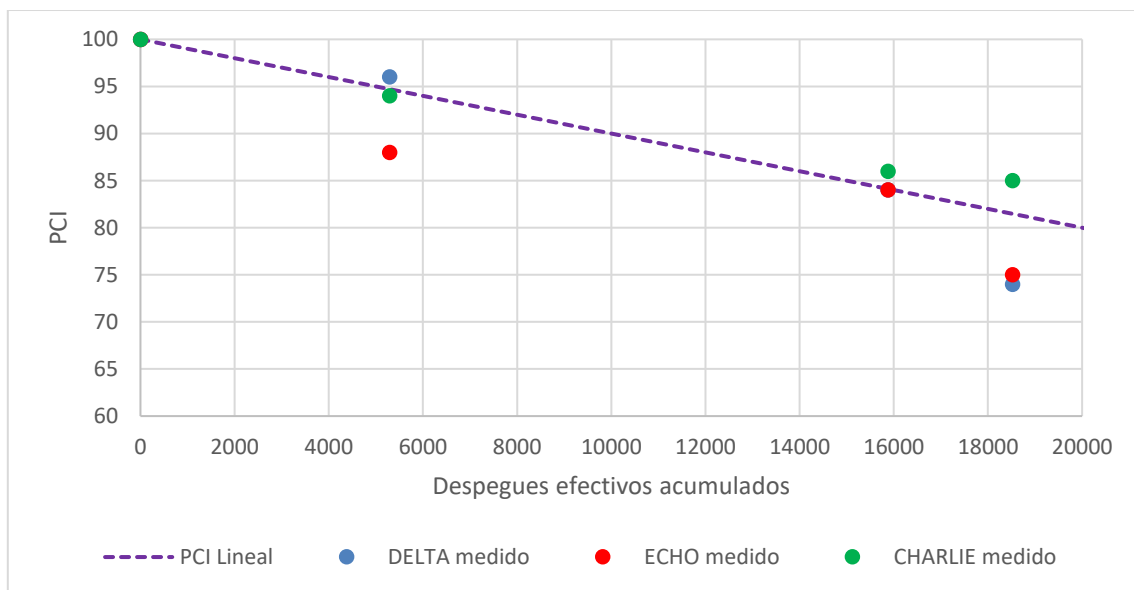


Figura 26. Curva de desempeño representativa de las secciones críticas de la pista del aeropuerto Andrés Sabella.

Tabla 50. Métricas de ajuste para modelo empírico en el aeropuerto Andrés Sabella, secciones críticas de la pista.

Métricas PI Críticas			
	ECHO	DELTA	CHARLIE
R2	0.99	1.00	1.00
RMSE	3.81	3.10	1.65
MAE	2.22	1.48	1.02

5.3.1.2 Aeródromo La Florida

Se generaron las curvas de deterioro para el aeródromo La Florida. El análisis comenzó con la sección central de la pista (PI-1), la cual comprende 59 Unidades Muestrales. En la Figura 27 se presentan los ajustes lineal, polinómico y logarítmico desarrollados para esta sección, junto con los valores observados de PCI. Las métricas de ajuste correspondientes a cada modelo se muestran en la Tabla 51.

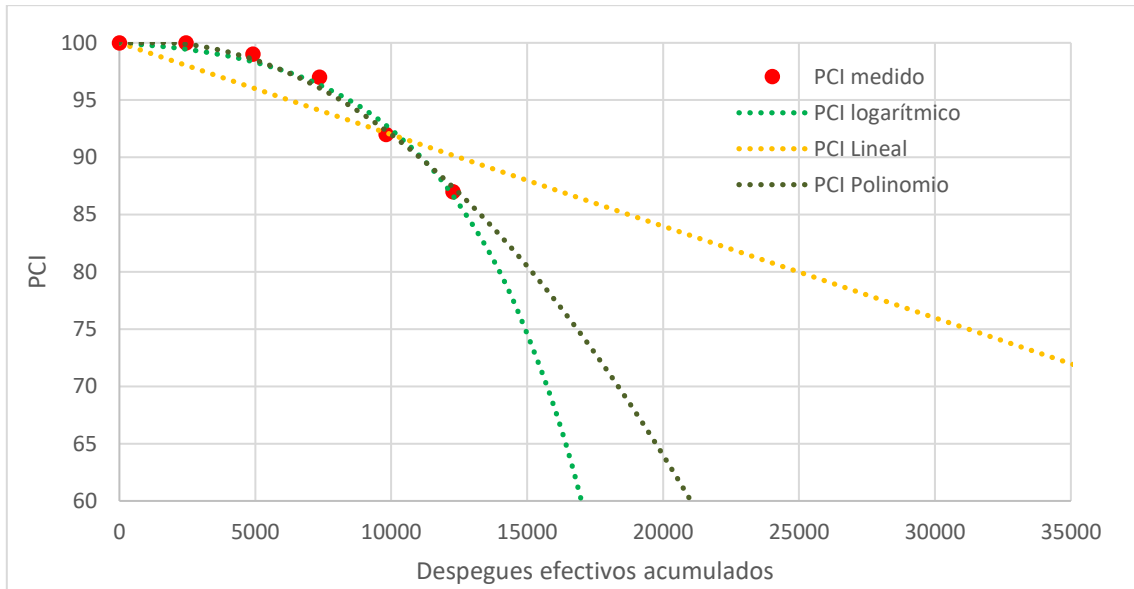


Figura 27. Curva de deterioro para el aeródromo La Florida (PI-1), Ajuste lineal, Polinómico y Logarítmico.

Tabla 51. Métricas de ajuste para cada modelo de regresión en el aeródromo La Florida PI-1.

Métricas PI-1			
	Lineal	Polinomio	Logarítmico
R2	0.78	0.99	0.99
RMSE	2.27	0.48	0.56
MAE	1.85	0.37	0.50

Además, se elaboró un modelo específico para la sección PI-1 en conexión con la calle de rodaje Charlie. La Figura 28 muestra las curvas de deterioro generadas para esta sección crítica utilizando los mismos tipos de ajuste, mientras que la Tabla 52 presenta las métricas asociadas.

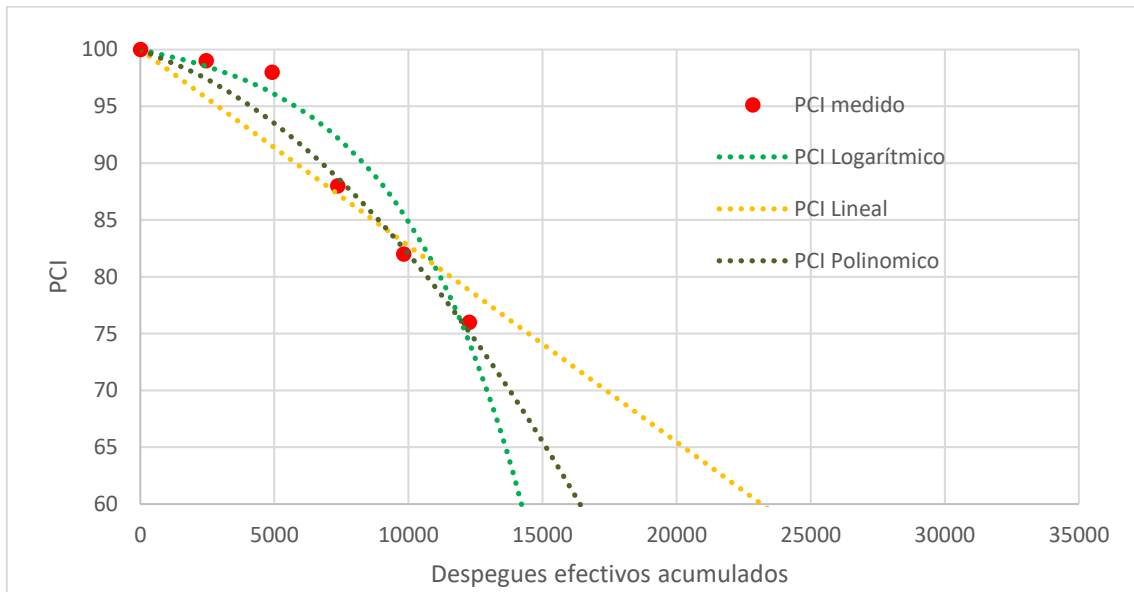


Figura 28. Curva de deterioro para el aeródromo La Florida (PI-1 Rodaje Charlie), Ajuste lineal, Polinómico y Logarítmico.

Tabla 52. Métricas de ajuste para cada modelo de regresión en el aeródromo La Florida PI-1 Rodaje Charlie.

Métricas PI-1 RC			
	Lineal	Polinomio	Logarítmico
R2	0.88	0.96	0.93
RMSE	3.21	1.94	2.48
MAE	2.38	1.33	1.96

Del mismo modo, se generó un modelo para la sección PI-1 en conexión con la calle de rodaje Bravo. La Figura 29 muestra los ajustes obtenidos y sus respectivas métricas se incluyen en la Tabla 53.

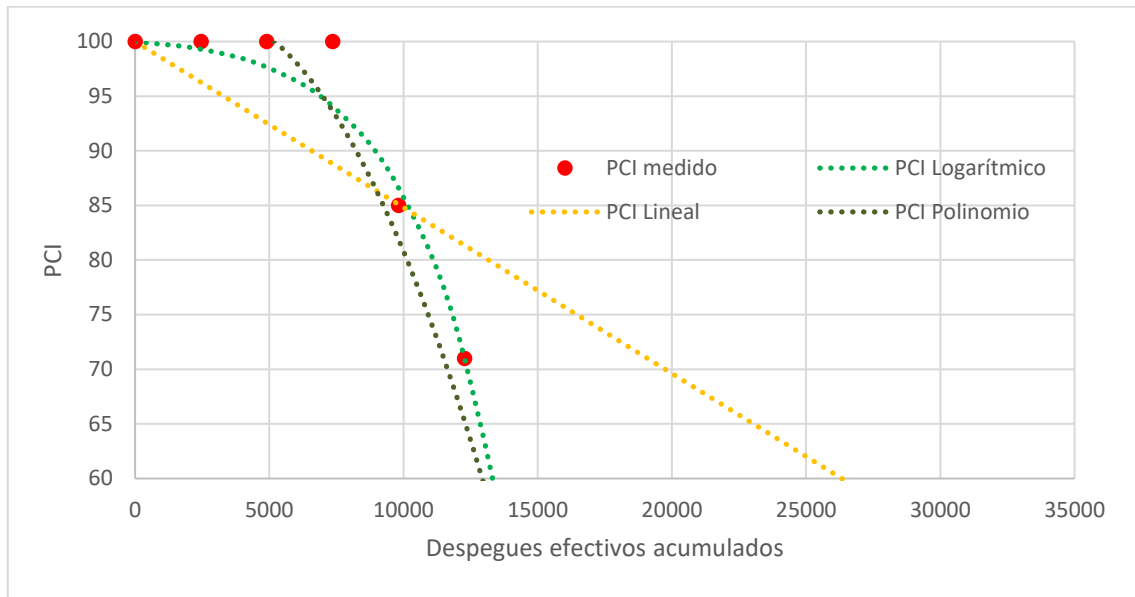


Figura 29. Curva de deterioro para el aeródromo La Florida (PI-1 Rodaje Bravo), Ajuste lineal, Polinómico y Logarítmico.

Tabla 53. Métricas de ajuste para cada modelo de regresión en el aeródromo La Florida PI-1 Rodaje Bravo.

Métricas PI-1 RB			
	Lineal	Polinomio	Logarítmico
R2	0.59	0.88	0.94
RMSE	7.09	3.86	2.70
MAE	5.47	3.06	1.77

Con el propósito de determinar si las secciones PI-1, PI-1 RC y PI-1 RB debían modelarse de manera independiente o podían consolidarse en una única curva representativa, se aplicaron pruebas no paramétricas.

En primer lugar, se utilizó el test de Kruskal–Wallis, cuyos resultados se presentan en la Tabla 54.

Tabla 54. Test no-paramétricos para comprobar similitud entre PI-1, PI-1 RC y PI-1 RB.

Kruskal-Wallis	
H	P
0.5651	0.753845

Dado que el valor de p fue mayor que 0.05, no se rechaza la hipótesis nula, lo que indica que no existen diferencias significativas entre las distribuciones de PCI de las tres secciones.

Posteriormente, se realizaron comparaciones por pares mediante las pruebas Mann–Whitney U y F* test. Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 55.

Tabla 55. Test no-paramétricos para comprobar similitud por pares.

Mann-Whitney por pares			F* test	
	U	p	F*	p
PI-1 vs PI-1 (UM Critica RC)	59.5	0.49516	1.3853	0.317575
PI-1 vs PI-1 (UM Critica RB)	57	0.59476	1.6467	0.234495
PI-1 (UM Critica RC) vs PI-1 (UM Critica RB)	51	0.9696	1.1887	0.400491

En todos los casos, los valores de p fueron superiores a 0.05, por lo que no se identificaron diferencias significativas entre los pares comparados.

Dado que las pruebas estadísticas indicaron ausencia de diferencias significativas entre las secciones PI-1, PI-1 RC y PI-1 RB, se procedió a consolidar las observaciones en una única nube de puntos para generar una curva representativa del comportamiento PCI de la sección PI-1 del aeródromo La Florida. La Figura 30 muestra la curva representativa mediante el modelo empírico, mientras que sus métricas de ajuste se presentan en la Tabla 56.

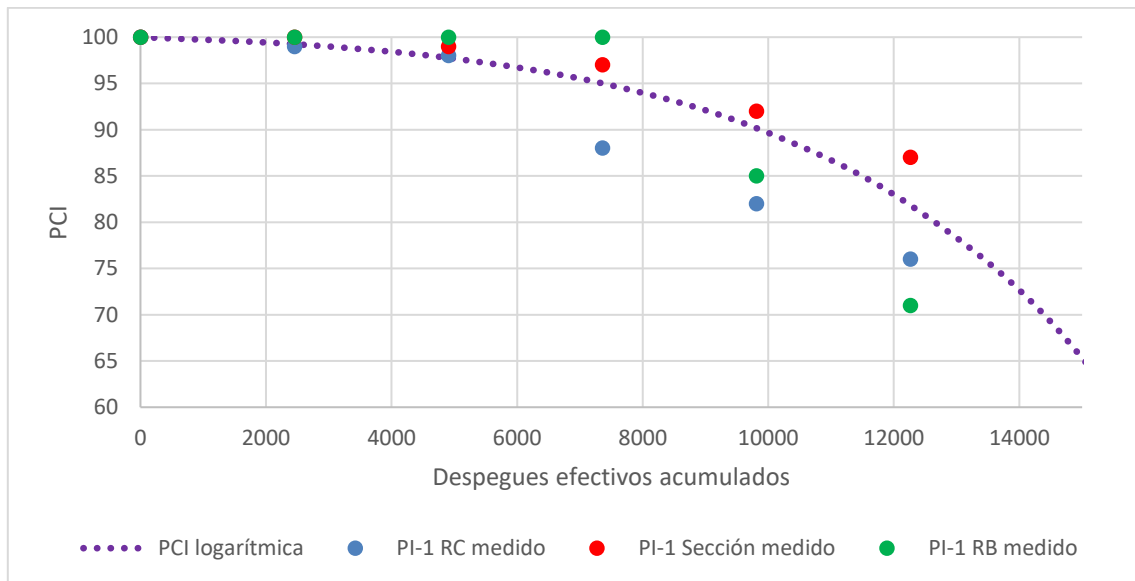


Figura 30. Curva de desempeño representativa de la sección PI-1 para el aeródromo La Florida.

Tabla 56. Métricas de ajuste para modelo logarítmico en el aeródromo La Florida, sección PI-1.

Métricas PI-1 Unificada			
	PI-1 Sección	PI-1 RC	PI-1 RB
R2	0.74	0.70	0.77
RMSE	2.46	5.00	5.39
MAE	1.83	3.58	4.00

Para la franja lateral PI-2, se evaluaron dos tipos de ajuste: un modelo lineal y un modelo logarítmico. Cabe señalar que estos modelos se desarrollan exclusivamente para aquellos sectores de la franja PI-2 que presentan conexión directa con calles de rodaje, dado que por dichos sectores circularan aeronaves.

En el caso del aeródromo La Florida, el análisis se aplicó a los tramos de la sección PI-2 en conexión con las calles de rodaje Charlie y Bravo, respectivamente.

En primer lugar, se generó un modelo PCI en función del tráfico efectivo acumulado para la sección PI-2 RC, correspondiente a la conexión con la calle de rodaje Charlie. La Figura 31 presenta los ajustes obtenidos mediante los modelos lineal y empírico, junto con los valores observados de PCI. Las métricas de ajuste asociadas se reportan en la Tabla 57.

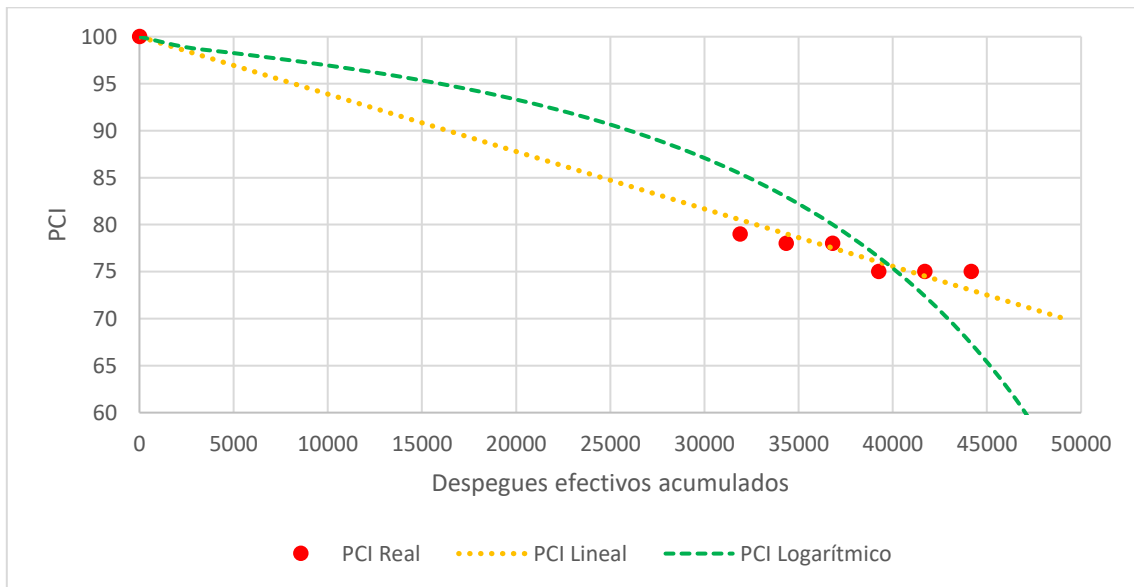


Figura 31. Curva de desempeño representativa de la sección PI-2 Rodaje Charlie para el aeródromo La Florida.

Tabla 57. Métricas de ajuste para cada modelo de regresión en el aeródromo La Florida PI-2 Rodaje Charlie.

Métricas PI-2 RC		
	Logarítmico	Lineal
R2	0.72	0.98
RMSE	4.43	1.12
MAE	3.60	0.93

De igual forma, se generó una curva de deterioro para la sección PI-2 RB, asociada a la calle de rodaje Bravo. La Figura 32 presenta los resultados obtenidos y las métricas se resumen en la Tabla 58.

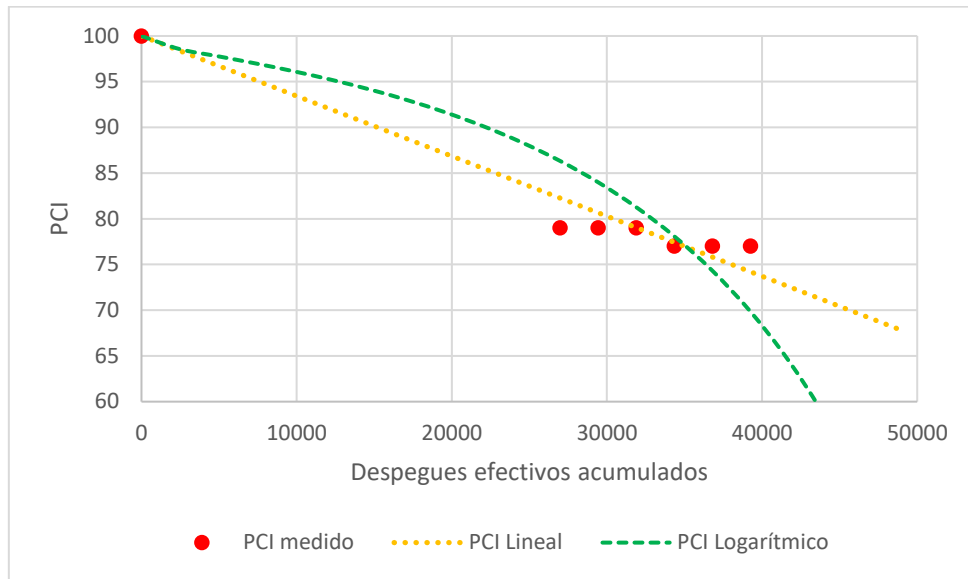


Figura 32. Curva de desempeño representativa de la sección PI-2 Rodaje Bravo para el aeródromo La Florida.

Tabla 58. Métricas de ajuste para cada modelo de regresión en el aeródromo La Florida PI-2 Rodaje Bravo.

Métricas PI-2 RB		
	Logarítmico	Lineal
R2	0.66	0.95
RMSE	4.52	1.80
MAE	3.64	1.34

Con el fin de determinar si ambas secciones debían modelarse de manera independiente o podían consolidarse en una única curva representativa, se aplicaron pruebas no paramétricas. En la Tabla 59 se presentan los resultados del test Mann–Whitney U y del test F* para comparar la similitud entre las dos secciones.

Tabla 59. Test no-paramétricos para comprobar similitud por pares.

	Mann-Whitney U		F* test	
	U	p	F*	p
PI-2 RC vs PI-2 RB	202.5	0.529871	1.3298	0.245155

En ambos casos, los valores de p obtenidos fueron mayores a 0.05, por lo que no se rechaza la hipótesis nula, indicando que no existen diferencias estadísticamente significativas entre las distribuciones de PCI de PI-2 RC y PI-2 RB.

Dado que no se encontraron diferencias significativas entre ambas secciones, se procedió a consolidar sus observaciones en una única nube de puntos para generar un modelo representativo del comportamiento PCI de PI-2. La Figura 33 muestra la curva final obtenida mediante el ajuste lineal. Las métricas de ajuste correspondientes se presentan en la Tabla 60.

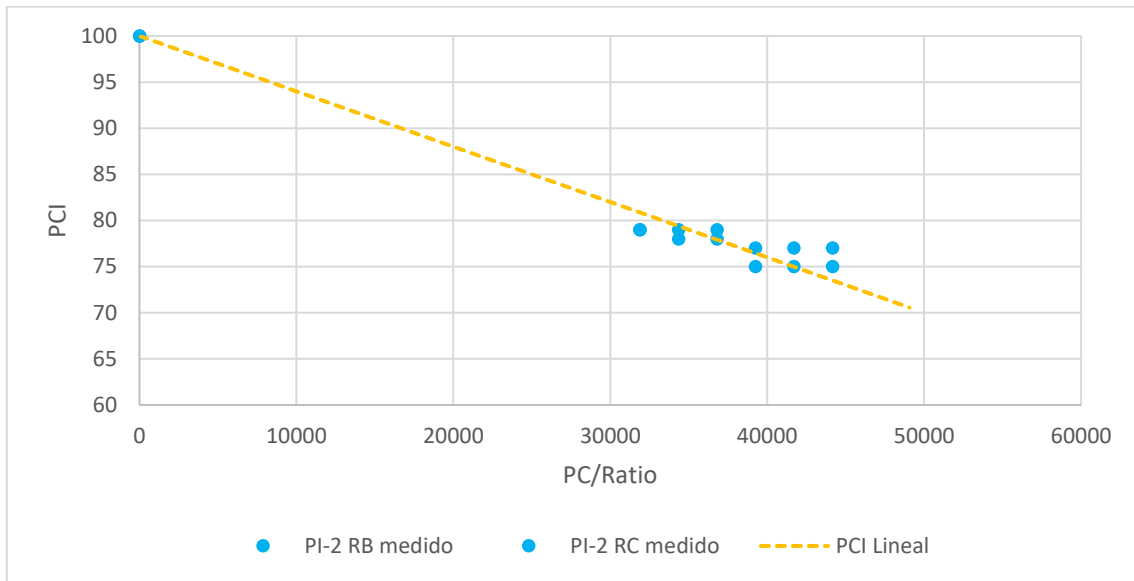


Figura 33. Curva de desempeño representativa de la sección PI-2 para el aeródromo La Florida.

Tabla 60. Métricas de ajuste para modelo Logarítmico en el aeródromo La Florida, sección PI-2.

Métricas PI-2 Unificada		
	PI-2 RB	PI-2 RC
R2	0.87	0.60
RMSE	1.78	1.08
MAE	1.50	0.83

Adicionalmente, se generaron curvas de desempeño para los umbrales de la pista, específicamente para las franjas centrales correspondientes a las secciones UO30-2 y UP12-2, que representan las zonas donde existe mayor certeza de tránsito directo de las ruedas del avión. Cabe señalar que en estos sectores las aeronaves pueden ejecutar maniobras de giro de hasta 180°, dado que los despegues se realizan en una u otra dirección dependiendo de la orientación del viento y de las condiciones meteorológicas presentes al momento de la operación.

El modelo obtenido para la sección UO30-2 se presenta en la Figura 34, junto con sus correspondientes métricas de ajuste resumidas en la Tabla 61.

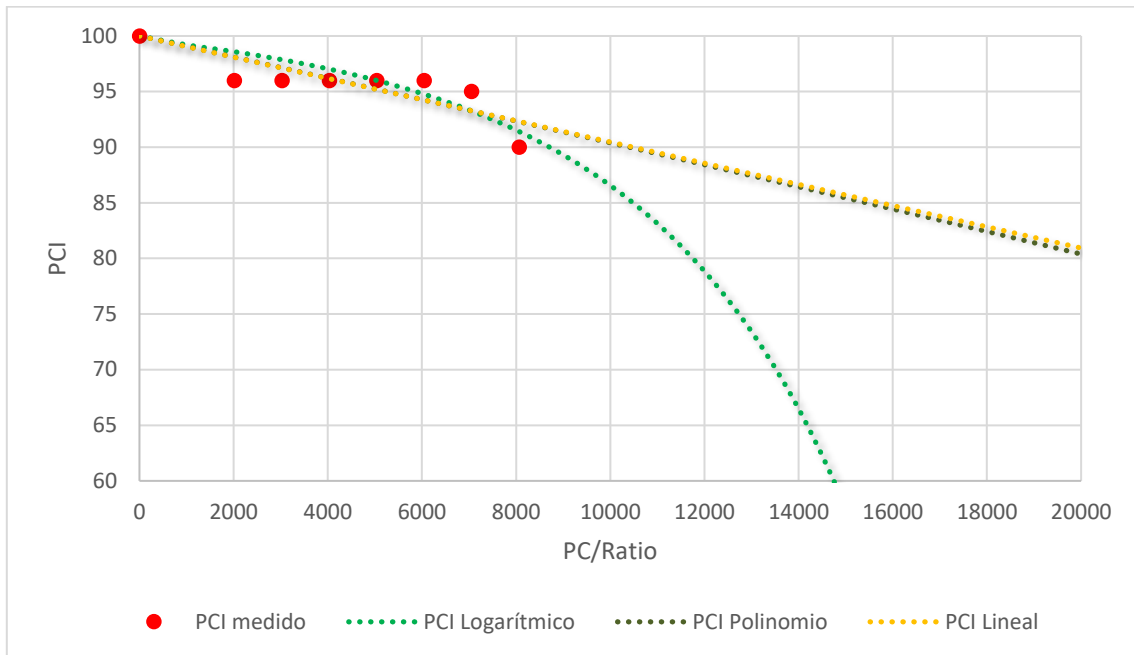


Figura 34. Curva de deterioro para el aeródromo La Florida (UO30-2), Ajuste lineal, Polinómico y Logarítmico.

Tabla 61. Métricas de ajuste para cada modelo de regresión en el aeródromo La Florida UO30-2.

Métricas UO30-2			
	Lineal	Polinomio	Logarítmico
R2	0.66	0.66	0.66
RMSE	1.49	1.49	1.49
MAE	1.25	1.25	1.23

Por otro lado, el modelo generado para la sección UP12-2 se muestra en la Figura 35, mientras que sus métricas de ajuste se encuentran en la Tabla 62.

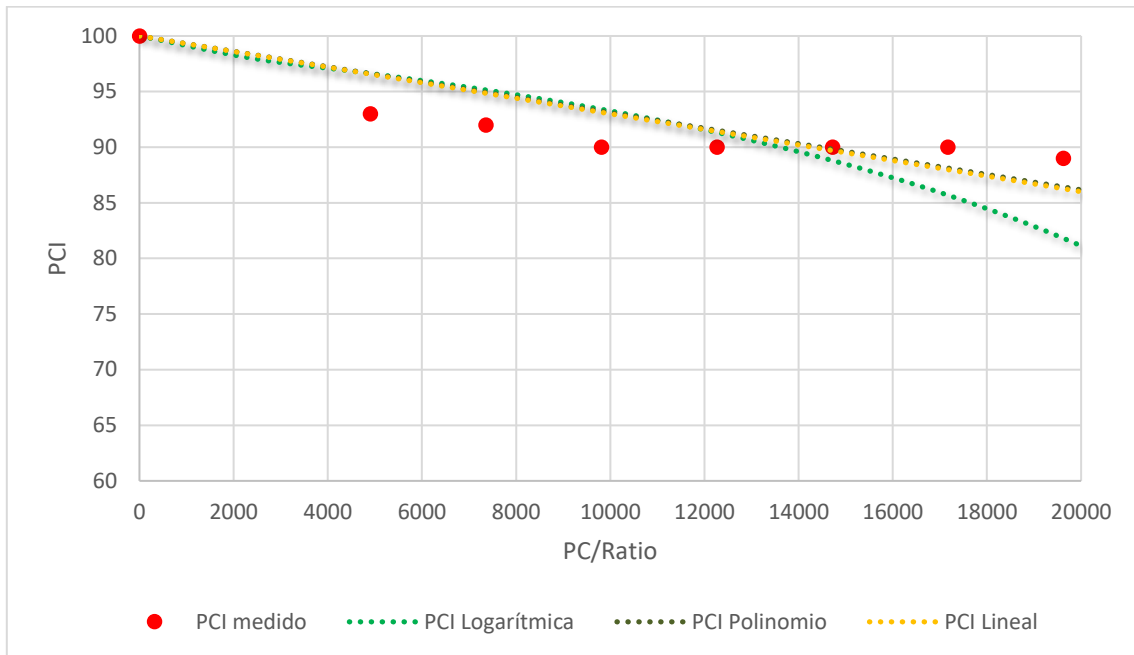


Figura 35. Curva de deterioro para el aeródromo La Florida (UP12-2), Ajuste lineal, Polinómico y Logarítmico.

Tabla 62. Métricas de ajuste para cada modelo de regresión en el aeródromo La Florida UP12-2.

Métricas UP12-2			
	Lineal	Polinomio	Logarítmico
R2	0.51	0.50	-0.21
RMSE	2.35	2.36	3.68
MAE	2.00	1.99	3.03

5.3.1.3 Aeropuerto El Tepual

Para el aeropuerto El Tepual, la franja central de la pista se encuentra dividida en dos secciones: PI-1 y PI-3 como se aprecia en la Figura 36. En ambas secciones se evaluaron tres tipos de ajuste para modelar el deterioro del PCI en función del tráfico efectivo acumulado:

- Modelo lineal,
- Modelo polinómico
- Modelo logarítmico

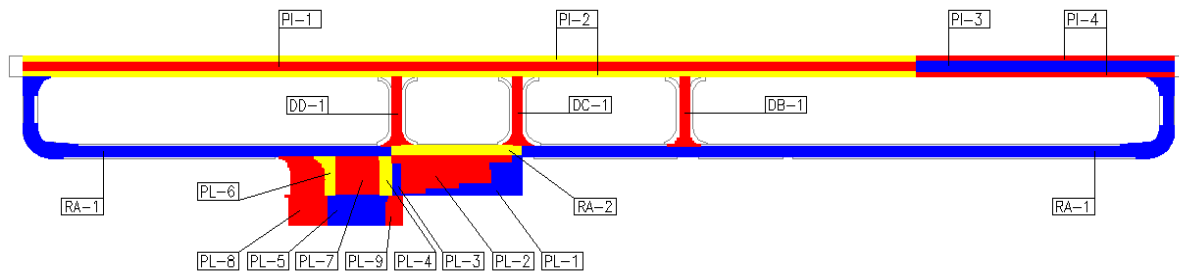


Figura 36. Plano esquemático secciones del aeropuerto El Tepual.

A continuación, se presentan los resultados obtenidos para cada sección, junto con sus respectivas métricas de ajuste.

La Figura 37 muestra la curva de deterioro generada para la sección PI-1, donde se visualizan los valores observados de PCI y los ajustes lineal, polinómico y logarítmico. Las métricas de desempeño para esta sección se presentan en la Tabla 63.

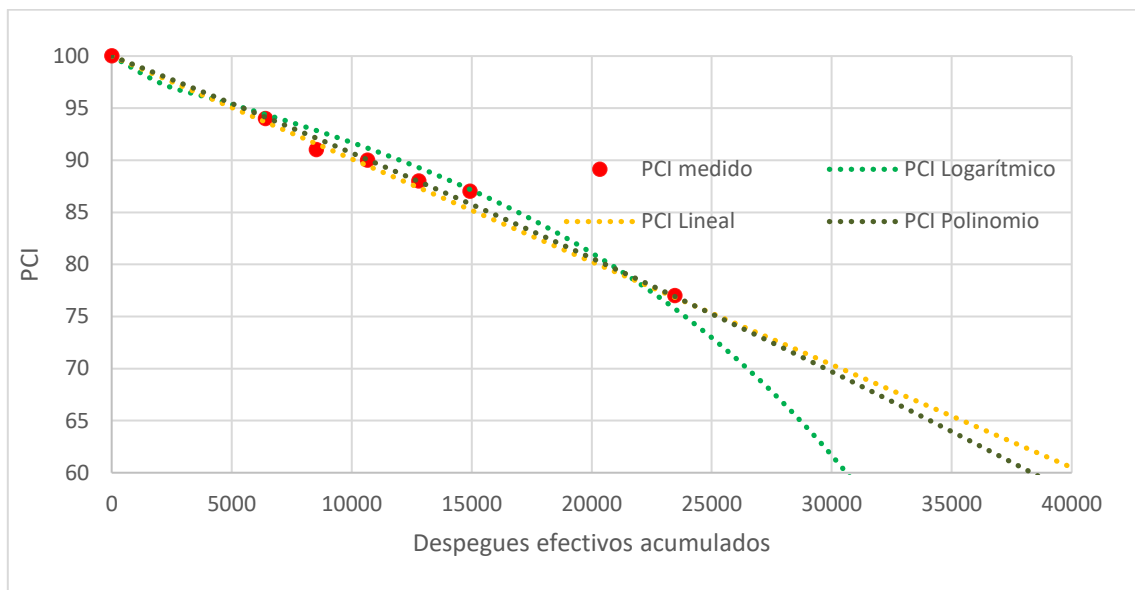


Figura 37. Curva de deterioro para el aeropuerto El Tepual (PI-1), Ajuste lineal, Polinómico y Logarítmico.

Tabla 63. Métricas de ajuste para cada modelo de regresión en el aeropuerto El Tepual PI-1.

Métricas Pista Central			
	Lineal	Polinomio	Logarítmico
R2	0.99	0.99	0.97
RMSE	0.77	0.62	1.08
MAE	0.57	0.37	0.88

En la sección PI-3, la Figura 38 muestra las curvas obtenidas para los tres tipos de ajuste evaluados. Las métricas correspondientes, son presentadas en la

Tabla 64.

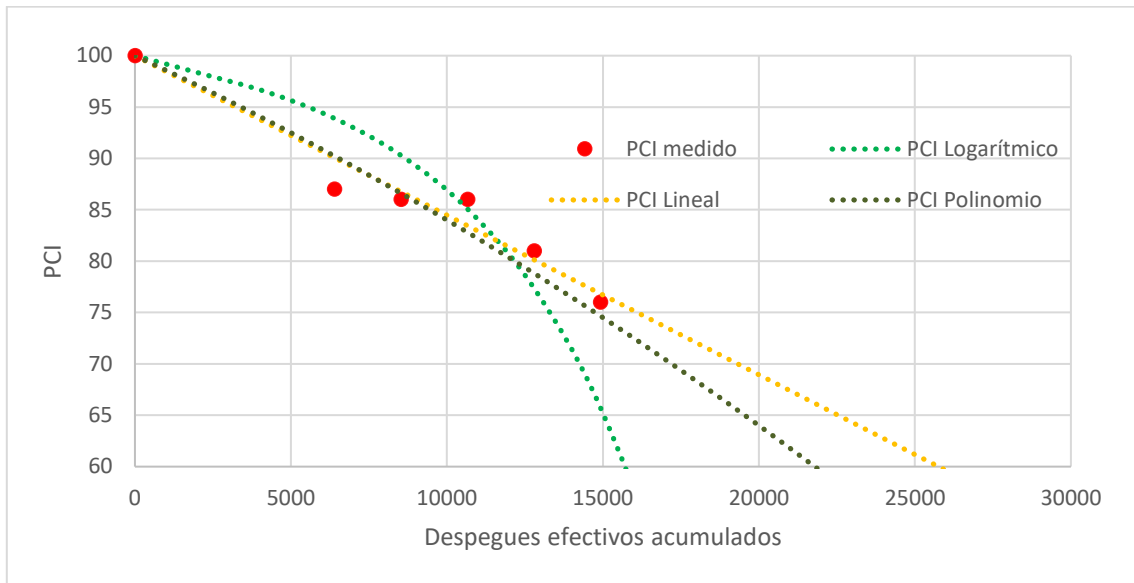


Figura 38. Curva de deterioro para el aeropuerto El Tepual (PI-3), Ajuste lineal, Polinómico y Logarítmico.

Tabla 64. Métricas de ajuste para cada modelo de regresión en el aeropuerto El Tepual PI-3.

Métricas PI-3			
	Lineal	Polinomio	Logarítmico
R2	0.94	1.00	0.98
RMSE	1.60	1.99	5.16
MAE	1.15	1.51	3.72

Con el objetivo de determinar si las secciones PI-1 y PI-3 debían modelarse de manera independiente o si correspondía consolidarlas en una única curva representativa de la franja central, se aplicaron pruebas no paramétricas para comparar la distribución de PCI entre ambas secciones. Se utilizaron las pruebas Mann–Whitney U y F*, cuyos resultados se presentan en la Tabla 65.

Tabla 65. Test no-paramétricos para comprobar similitud por pares para el aeropuerto El Tepual.

	Mann-Whitney U		F* test	
	U	p	F*	p
PI-1 vs PI-3	249	0.045097	20,111	0.073883

Dado que los resultados de ambas pruebas son parcialmente contradictorios, se incorporó un criterio adicional basado en la representatividad operacional de cada sección dentro del aeropuerto. En este caso, la sección PI-1 corresponde al sector con mayor interacción con las calles de rodaje y, por tanto, concentra una mayor proporción del tránsito de aeronaves. Debido a ello, se definió que la curva de deterioro asociada a PI-1 sería la curva representativa de la franja central para el aeropuerto El Tepual.

Para los bordes de pista (PI-2), el análisis se realizó considerando exclusivamente las zonas por donde circulan las ruedas de las aeronaves. En este contexto, se desarrollaron modelos de deterioro para los sectores de PI-2 que se encuentran en conexión directa con las calles de rodaje del aeropuerto El Tepual, específicamente Delta, Charlie y Bravo.

En el caso de la PI-2 en conexión con la calle de rodaje Delta, calle de rodaje ubicada a la izquierda de la Figura 36, los modelos de regresión lineal, polinómico y logarítmico se muestran en la Figura 39, donde se aprecia la evolución del PCI en función de los despejes efectivos acumulados.

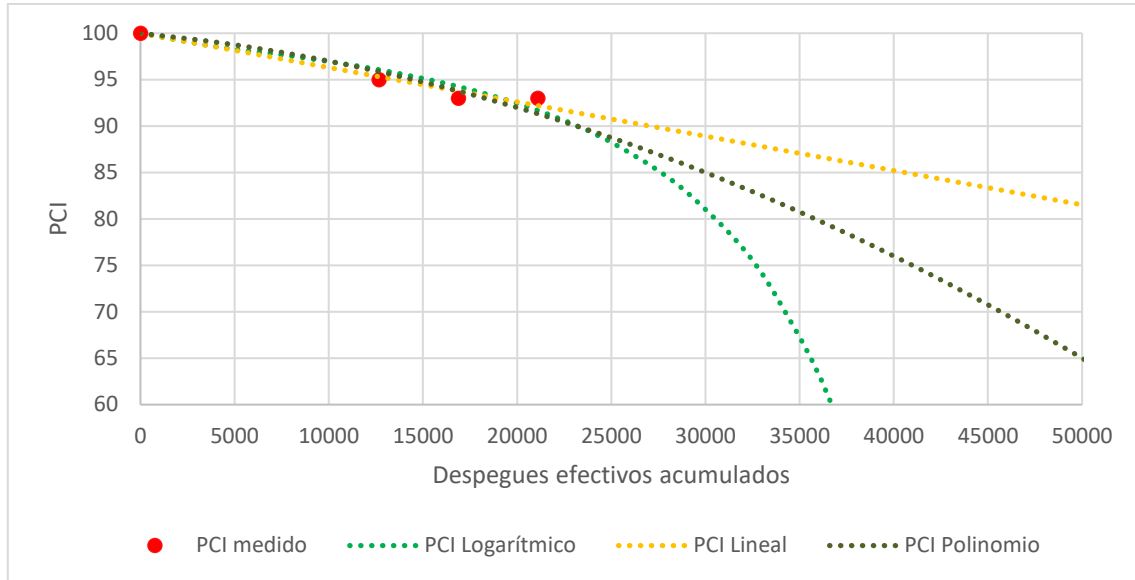


Figura 39. Curva de deterioro para el aeropuerto El Tepual (PI-2 Rodaje Delta), Ajuste lineal, Polinómico y Logarítmico.

Las métricas de ajuste correspondientes a cada modelo se presentan en la Tabla 66, incluyendo los indicadores R^2 , RMSE y MAE.

Tabla 66. Métricas de ajuste para cada modelo de regresión en el aeropuerto El Tepual PI-2 Rodaje Delta.

Métricas PI-2 RD			
	Lineal	Polinomio	Logarítmico
R2	0.96	0.87	0.87
RMSE	0.57	1.02	1.05
MAE	0.47	0.83	0.91

De manera análoga, para la PI-2 en conexión con la calle de rodaje Charlie (calle de rodaje central de la Figura 36), se realizaron ajustes lineales, polinómicos y logarítmicos. Los resultados gráficos de estos modelos se muestran en la Figura 40, mientras que las métricas de ajuste correspondientes se presentan en la Tabla 67.

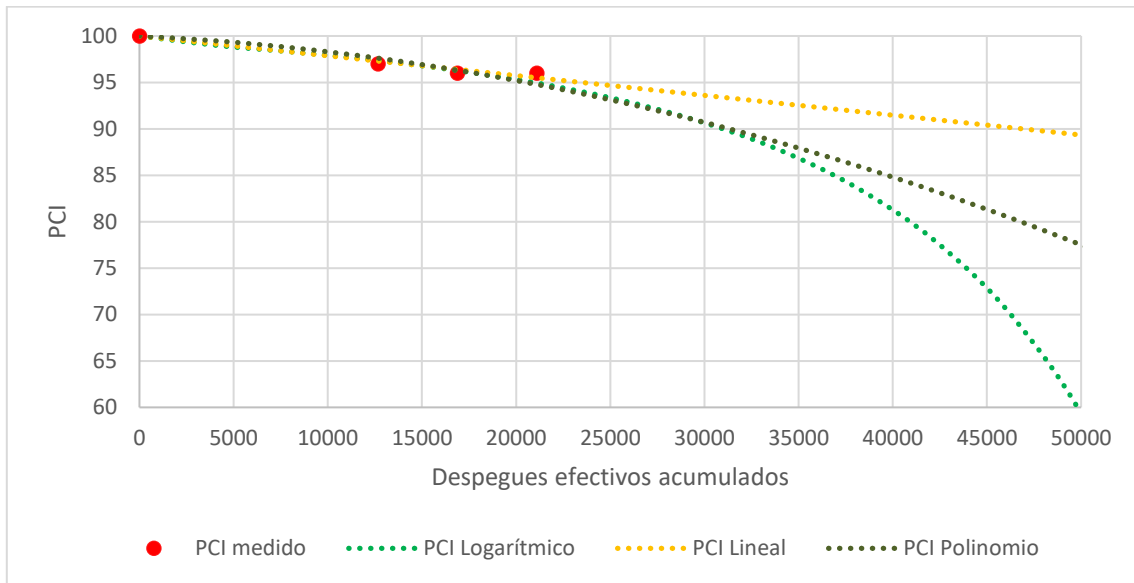


Figura 40. Curva de deterioro para el aeropuerto El Tepual (PI-2 Rodaje Charlie), Ajuste lineal, Polinómico y Logarítmico.

Tabla 67. Métricas de ajuste para cada modelo de regresión en el aeropuerto El Tepual PI-2 Rodaje Charlie.

Métricas PI-2 RC			
	Lineal	Polinomio	Logarítmico
R2	0.95	0.82	0.88
RMSE	0.35	0.70	0.58
MAE	0.30	0.54	0.43

Finalmente, para la PI-2 en conexión con la calle de rodaje Bravo (calle de rodaje que se observa a la derecha de la Figura 36), se desarrollaron los mismos tipos de modelos regresivos. La Figura 41 presenta las curvas de deterioro obtenidas para cada ajuste, y la Tabla 68 resume las métricas de desempeño asociadas a cada uno de los modelos evaluados.

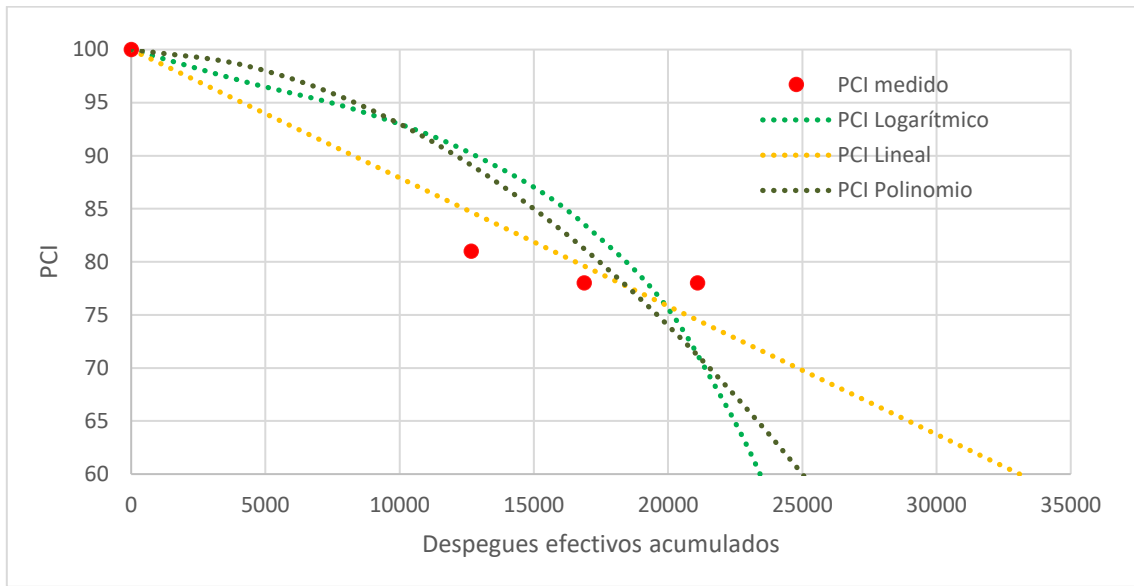


Figura 41. Curva de deterioro para el aeropuerto El Tepual (PI-2 Rodaje Bravo), Ajuste lineal, Polinómico y Logarítmico.

Tabla 68. Métricas de ajuste para cada modelo de regresión en el aeropuerto El Tepual PI-2 Rodaje Bravo.

Métricas PI-2 RB			
	Lineal	Polinomio	Logarítmica
R2	0.92	0.64	0.52
RMSE	2.67	5.54	6.35
MAE	2.20	4.54	5.38

Con el objetivo de verificar la similitud entre los modelos de deterioro obtenidos para la PI-2 en conexión con las distintas calles de rodaje, se aplicaron pruebas estadísticas no paramétricas.

En primer lugar, se realizó el test de Kruskal–Wallis, cuyos resultados se presentan en la Tabla 69, con el fin de evaluar la existencia de diferencias significativas entre los conjuntos de datos correspondientes a PI-2 RD, PI-2 RC y PI-2 RB.

Tabla 69. Test no-paramétricos para comprobar similitud entre PI-2 RB, PI-2 RC y PI-2 RD.

Kruskal-Wallis	
H	P
1	0.593549

Adicionalmente, se efectuaron comparaciones por pares mediante el test de Mann–Whitney y el F* test, cuyos resultados se muestran en la Tabla 70. En todos los casos, los valores de p obtenidos fueron superiores al umbral de significancia de 0.05.

Tabla 70. Test no-paramétricos para comprobar similitud por pares para el aeropuerto El Tepual.

	Mann-Whitney por pares		F* test	
	U	p	F*	p
PI-2 RD vs PI-2 RC	101.5	0.326908	1.801	0.132864
PI-2 RD vs PI-2 RB	110.5	0.521596	1.020	0.485156
PI-2 RC vs PI-2 RB	137	0.74852	1.7664	0.140857



Dado que no se identificaron diferencias estadísticamente significativas entre las curvas de deterioro correspondientes a las distintas conexiones de la PI-2 con las calles de rodaje, se procedió a generar una única curva representativa para esta categoría. Esta curva unificada se presenta en la Figura 42, construida a partir de un ajuste lineal, y representa el comportamiento global del deterioro del PCI para la PI-2 del aeropuerto El Tepual en zonas de borde de pista en conexión con calles de rodaje.

Las métricas de ajuste asociadas a esta curva representativa se presentan en la Tabla 71, diferenciadas por cada una de las calles de rodaje consideradas.

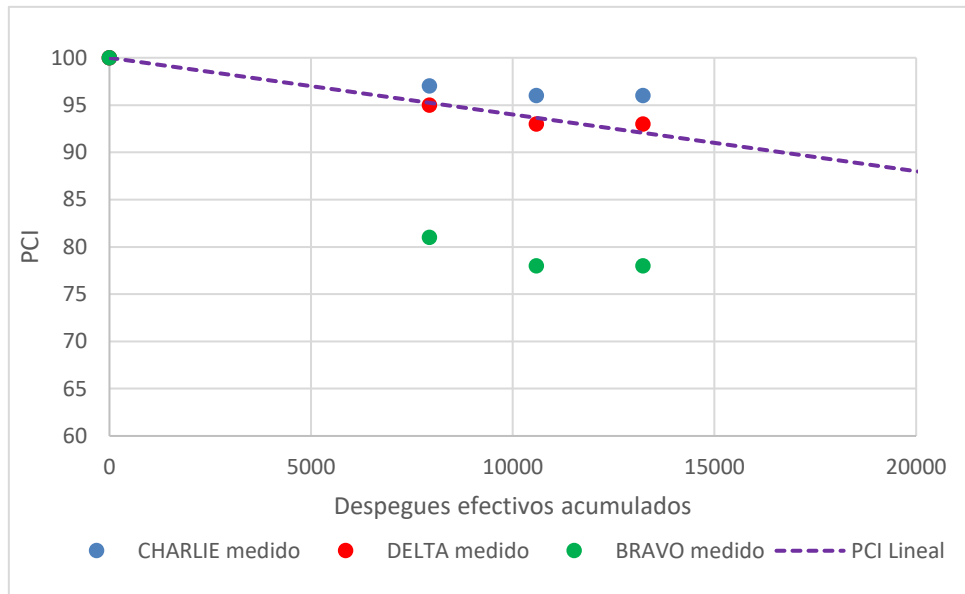


Figura 42. Curva representativa de PI-2 del aeropuerto El Tepual con el modelo lineal.

Tabla 71. Métricas de ajuste para PI-2 del aeropuerto El Tepual.

Métricas PI-2 Unificada			
	DELTA medido	CHARLIE medido	BRAVO medido
R2	0.96	-1.24	-0.92
RMSE	0.58	2.46	12.70
MAE	0.46	2.01	10.99



5.3.2 Modelos regresivos por sección de pista

Adicionalmente, se desarrollaron modelos de deterioro por sección de pista, dado que la información de PCI disponible se encuentra agregada como un valor promedio por sección de pista y no a nivel de UM. En este contexto, se realizaron ajustes regresivos empleando un modelo polinómico y un modelo logarítmico, con el objetivo de representar la evolución del PCI en función de los despegues efectivos acumulados para cada sección analizada.

Los resultados gráficos correspondientes a estos modelos se presentan en el Anexo 4, para los aeropuertos y aeródromos Desierto de Atacama, Carriel Sur, La Araucanía, Mocopulli, Cañal Bajo, Balmaceda y Presidente Carlos Ibáñez del Campo.

5.4 Extrapolación de modelos a aeropuertos con escasos datos PCI

La extrapolación de los modelos de desempeño del PCI a aeropuertos y aeródromos con disponibilidad limitada de información histórica se realizó aplicando el procedimiento metodológico definido en la Sección 4.4, el cual se basa en la utilización de curvas patrón representativas de la materialidad de la capa superficial del pavimento. En este contexto, se distinguieron pavimentos asfálticos, de hormigón y mixtos, seleccionándose para cada categoría un aeropuerto representativo que presenta la mayor continuidad y disponibilidad de registros históricos de PCI, particularmente a nivel de unidad muestral.

De acuerdo con lo establecido en la metodología, si bien en etapas previas se evaluaron distintos tipos de modelos (lineal, polinómico y logarítmico), la extrapolación hacia aeropuertos con escasos o nulos registros históricos de PCI se realizó exclusivamente mediante el modelo logarítmico. Esta elección permitió representar de manera consistente el comportamiento progresivo del deterioro del pavimento y evitar inconsistencias teóricas observadas en otros tipos de ajuste.

En los aeropuertos que no disponen de información histórica suficiente de PCI, se mantuvieron fijos los parámetros α , β y R correspondientes a la curva patrón de cada materialidad, ajustándose las PEa, en función del nivel de tránsito aéreo efectivo estimado para cada aeropuerto o aeródromo. La aplicación de este procedimiento permitió obtener curvas de desempeño donde no se tienen datos.

5.4.1 Pavimentos asfálticos

Aplicando el procedimiento descrito en la Sección 4.4, para el caso de los pavimentos asfálticos se utilizó como curva patrón la correspondiente al aeródromo La Florida, seleccionado para representar adecuadamente esta materialidad y por contar con la mayor continuidad de información histórica de PCI a nivel de Unidad Muestral.

A partir de la curva patrón del aeródromo La Florida, se obtuvieron curvas de desempeño extrapoladas para distintos aeropuertos y aeródromos de la red primaria que presentan pavimentos asfálticos y una disponibilidad limitada de registros históricos de PCI. En esta etapa, se mantuvieron fijos los parámetros del modelo logarítmico calibrado, ajustándose únicamente la pendiente de crecimiento de las pasadas efectivas acumuladas en función del nivel de tránsito aéreo efectivo estimado para cada recinto.

Las curvas obtenidas deben interpretarse como modelos de carácter preliminar y transitorio, válidos mientras no se disponga de información histórica suficiente que permita calibrar modelos específicos para cada aeropuerto o aeródromo. No obstante, estas curvas proporcionan una representación consistente del comportamiento del PCI bajo condiciones de uso operacional comparables.

La Figura 43 presenta un esquema conceptual del proceso de extrapolación de la curva patrón del aeródromo La Florida hacia otros aeropuertos y aeródromos con pavimentos asfálticos. La agrupación por zonas climáticas se utiliza únicamente con fines ilustrativos y de ordenamiento territorial, sin constituir un criterio de transferencia de las curvas de desempeño.

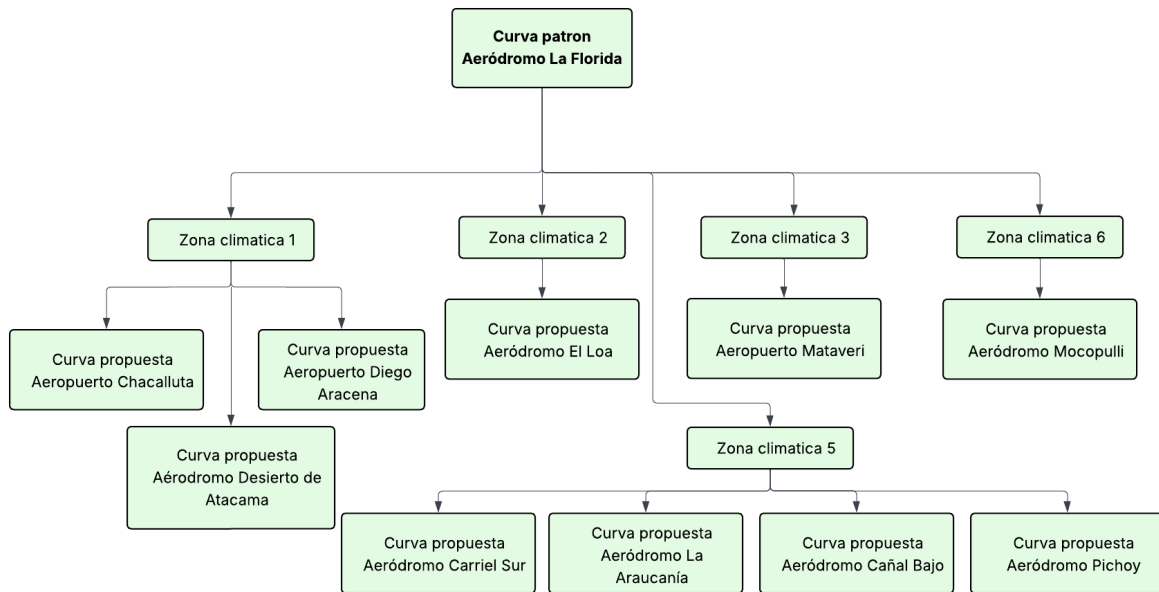


Figura 43. Guía esquemática sobre los aeropuertos/aeródromos que se obtienen en función del aeródromo patrón La Florida.

Para la zona climática 1, se obtuvo tres curvas de desempeño propuestas a partir de la curva patrón del aeródromo La Florida, correspondientes a los aeropuertos Chacalluta, Diego Aracena y al aeródromo Desierto de Atacama. Las curvas de deterioro propuestas para estos recintos se presentan en la Figura 44, donde se muestran conjuntamente la curva patrón y las curvas extrapoladas asociadas a cada aeropuerto o aeródromo de esta zona climática.

Cabe señalar que los aeropuertos La Florida y Desierto de Atacama disponen de registros históricos de PCI, por lo que en la figura se incluyen los puntos correspondientes a valores de PCI medidos. En consecuencia, las curvas ajustadas a datos observados se representan mediante líneas continuas, mientras que las curvas propuestas por extrapolación se muestran mediante líneas segmentadas, diferenciando así los modelos calibrados a partir de información histórica de aquellos obtenidos mediante el procedimiento de extrapolación descrito en la metodología.

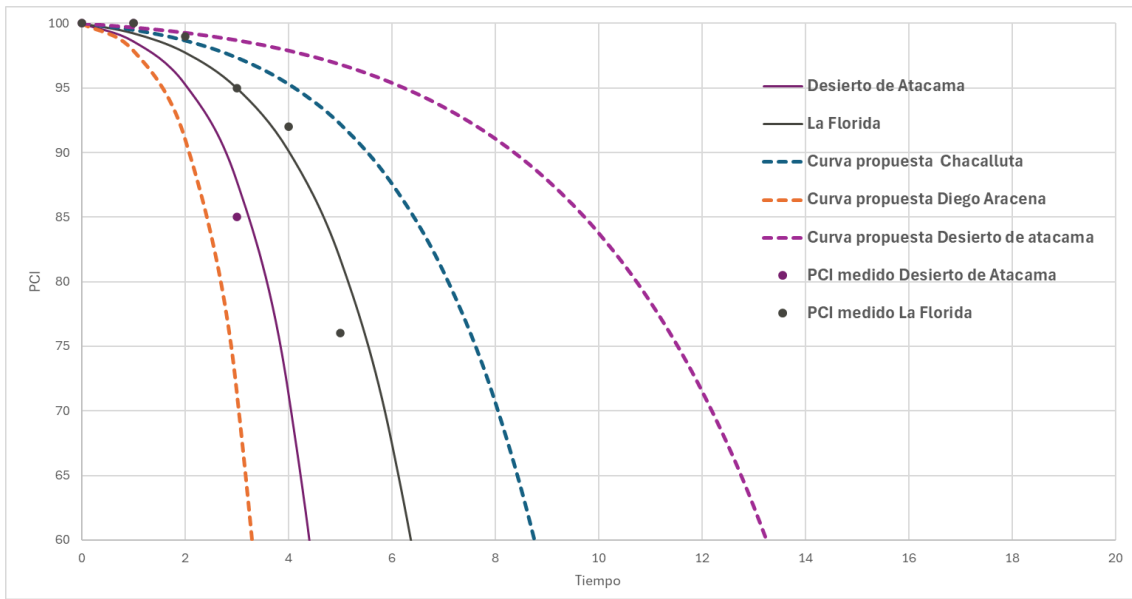


Figura 44. Curvas propuestas para la zona climática 1 a partir de la curva patrón aeródromo La Florida.

Para la zona climática 2, se obtuvo una curva propuesta a partir de la curva patrón del aeródromo La Florida (zona climática 1), correspondiente al aeródromo El Loa. La curva de deterioro propuesta para este recinto se presenta en la Figura 45, donde se muestra de manera conjunta la curva patrón y la curva extrapolada, permitiendo visualizar la evolución del PCI en función del tiempo para la zona climática 2.

Cabe destacar que, a diferencia de otros recintos, el aeródromo El Loa no dispone de registros históricos de PCI para el periodo analizado, por lo que la curva presentada corresponde exclusivamente a una curva extrapolada, obtenida mediante el ajuste de la pendiente de crecimiento de las pasadas efectivas acumuladas, de acuerdo con el procedimiento metodológico descrito previamente.

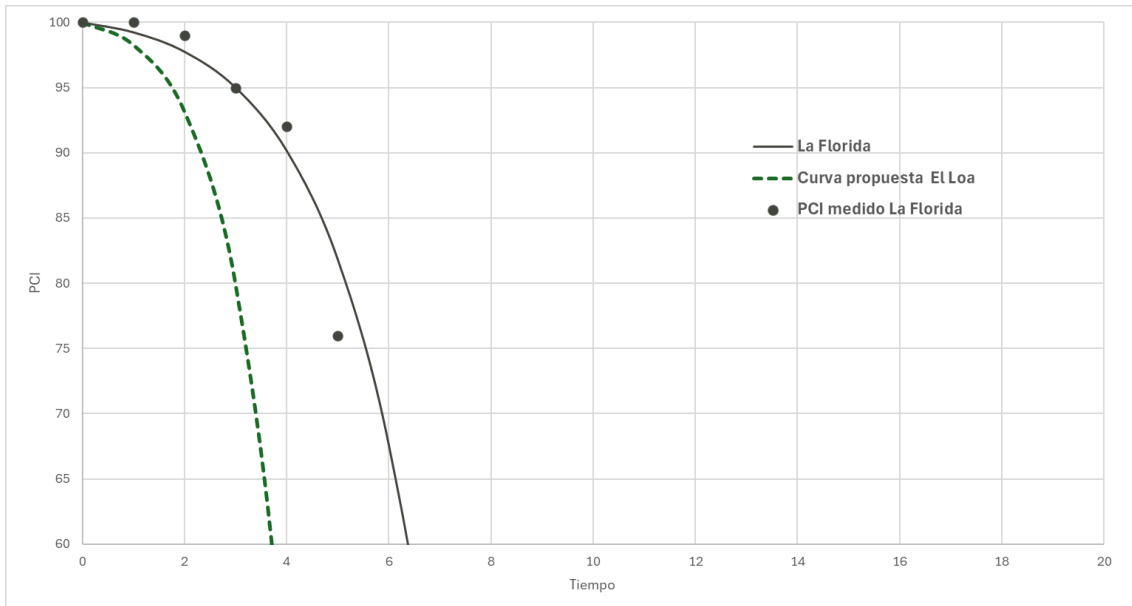


Figura 45. Curvas propuestas para la zona climática 2 a partir de la curva patrón aeródromo La Florida.

Para la zona climática 3, se obtuvo una curva propuesta a partir de la curva patrón del aeródromo La Florida, correspondiente al aeropuerto Mataverí. La curva de deterioro propuesta para este recinto se

presenta en la Figura 46, donde se muestra conjuntamente la curva patrón y la curva extrapolada, permitiendo visualizar la evolución del PCI en función del tiempo para la zona climática 3.

Cabe señalar que el aeropuerto Mataverí no dispone de registros históricos de PCI para el periodo analizado, por lo que la curva presentada corresponde a una curva extrapolada, obtenida mediante el ajuste de la pendiente de crecimiento de las pasadas efectivas acumuladas, de acuerdo con el procedimiento metodológico descrito previamente.

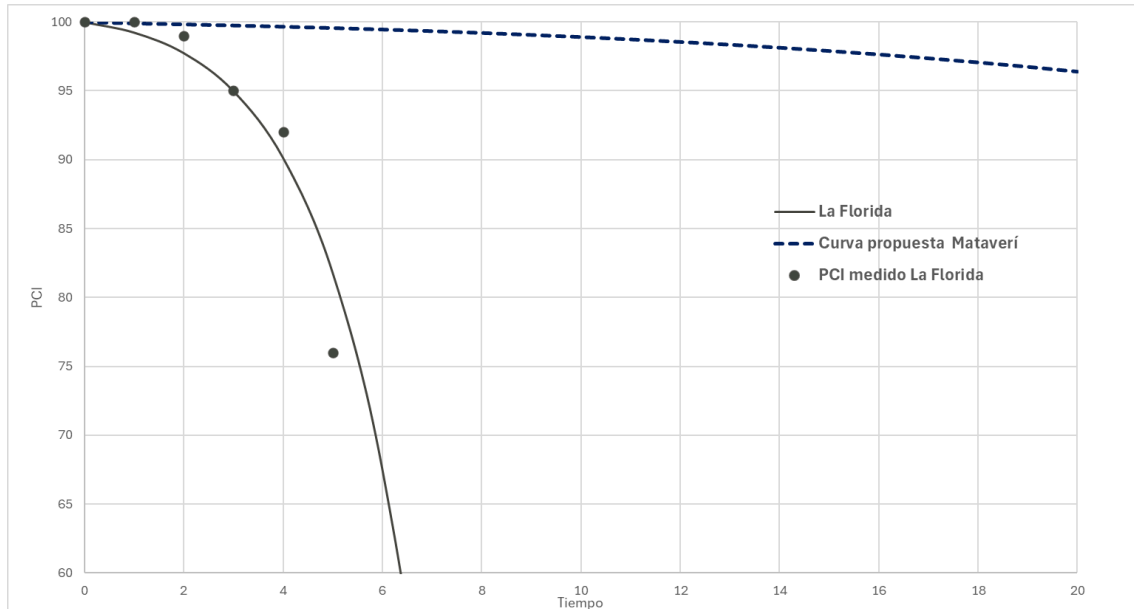


Figura 46. Curvas propuestas para la zona climática 3 a partir de la curva patrón aeródromo La Florida.

Para la zona climática 5, se obtuvo cuatro curvas de desempeño propuestas a partir de la curva patrón del aeródromo La Florida, correspondientes a los aeropuertos y aeródromos Carriel Sur, La Araucanía, Pichoy y Cañal Bajo. Las curvas resultantes para esta zona climática se presentan en la Figura 47, donde se muestra la comparación entre la curva patrón y las curvas de desempeño asociadas a cada recinto considerado.

Cabe señalar que los aeropuertos La Florida, Carriel Sur, Cañal Bajo y La Araucanía disponen de registros históricos de PCI para el período analizado. En consecuencia, las curvas representadas mediante líneas continuas corresponden a ajustes logarítmicos calibrados a partir de los valores de PCI medidos. Por el contrario, las curvas representadas mediante líneas segmentadas corresponden a curvas propuestas por extrapolación, obtenidas a partir de la curva patrón del aeródromo La Florida mediante el ajuste de la pendiente de crecimiento de las pasadas efectivas acumuladas, de acuerdo con el procedimiento metodológico descrito previamente.

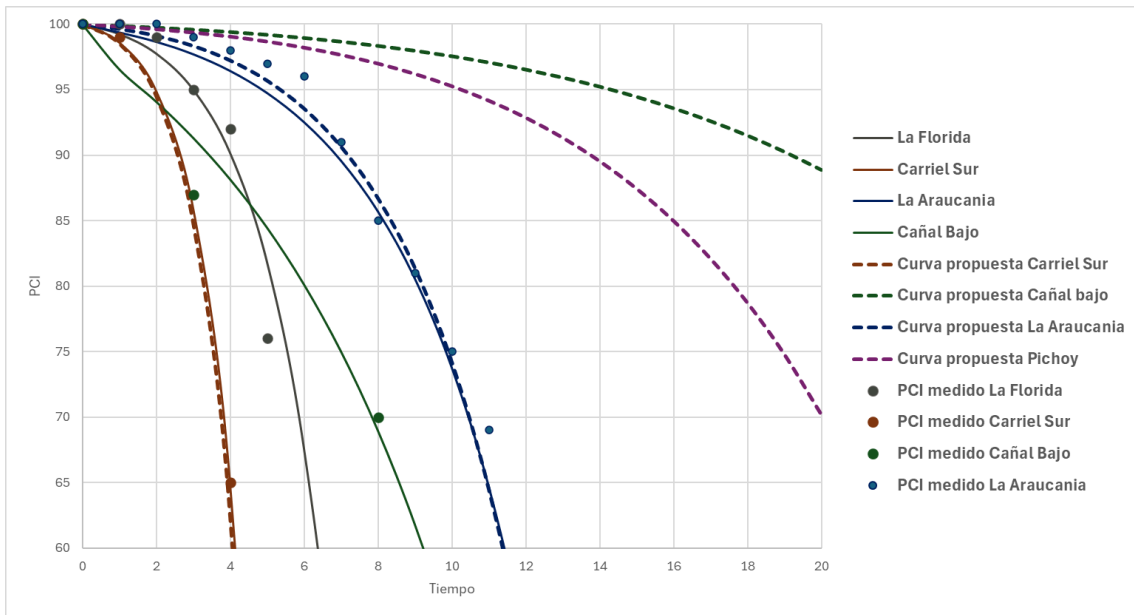


Figura 47. Curvas propuestas para la zona climática 5 a partir de la curva patrón aeródromo La Florida.

Finalmente, para la zona climática 6, se obtuvo una curva propuesta a partir de la curva patrón del aeródromo La Florida, correspondiente al aeródromo Mocopulli. La curva de deterioro propuesta para este recinto se presenta en la Figura 48, donde se muestra de manera conjunta la curva patrón y la curva extrapolada, permitiendo visualizar la evolución del PCI en función del tiempo para la zona climática 6.

Cabe señalar que el aeródromo Mocopulli dispone de registros históricos de PCI para el período analizado. En consecuencia, la curva representada mediante línea continua corresponde al ajuste logarítmico calibrado a partir de los valores de PCI medidos, mientras que la curva representada mediante línea segmentada corresponde a la curva propuesta por extrapolación, obtenida a partir de la curva patrón del aeródromo La Florida mediante el ajuste de la pendiente de crecimiento de las pasadas efectivas acumuladas, de acuerdo con el procedimiento metodológico descrito previamente.

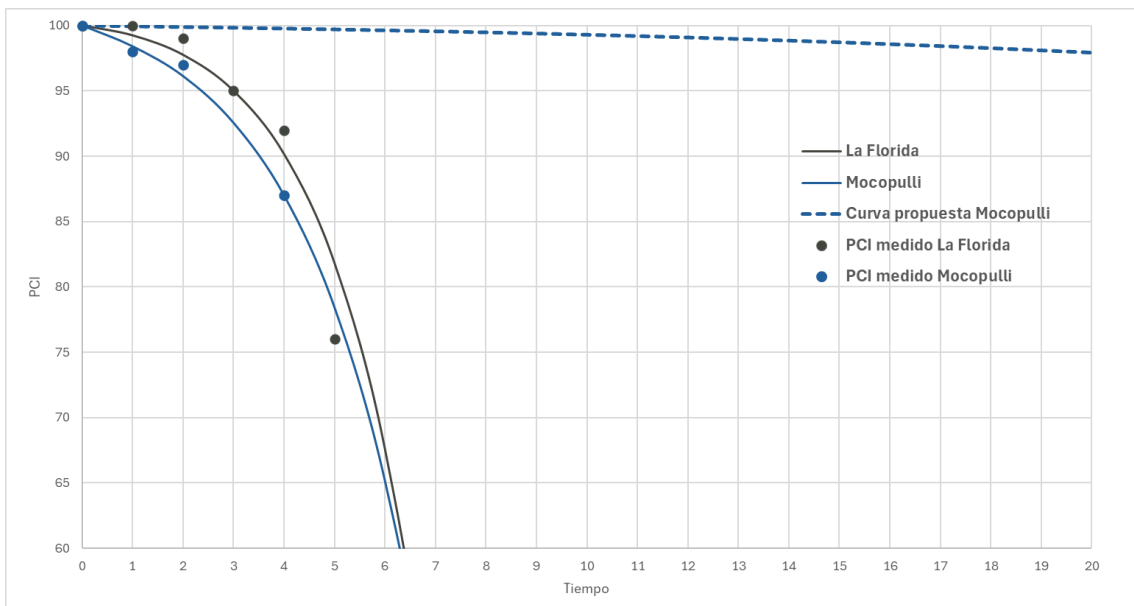


Figura 48. Curvas propuestas para la zona climática 6 a partir de la curva patrón aeródromo La Florida.

5.4.2 Pavimentos Mixtos

Aplicando el procedimiento metodológico descrito en la Sección 4.4, para el caso de los pavimentos mixtos se utilizó como curva patrón la correspondiente al aeropuerto Andrés Sabella, seleccionado por representar esta materialidad y por presentar la mayor disponibilidad y continuidad de información histórica de PCI dentro de esta categoría.

A partir de la curva patrón del aeropuerto Andrés Sabella, se obtuvieron curvas de desempeño extrapoladas para otros aeropuertos y aeródromos de la red primaria que presentan pavimentos mixtos y una disponibilidad limitada de registros históricos de PCI. En particular, la curva patrón fue empleada para representar el comportamiento del deterioro del PCI del aeródromo Balmaceda y de la pista 07–25 del aeropuerto Presidente Carlos Ibáñez del Campo, ambos ubicados en la zona climática 7.

La Figura 49 presenta un esquema conceptual del proceso de extrapolación de la curva patrón del aeropuerto Andrés Sabella hacia otros aeropuertos y aeródromos con pavimentos mixtos. La referencia a la zona climática se utiliza exclusivamente con fines ilustrativos y de ordenamiento territorial, con el objetivo de visualizar el alcance de la extrapolación, y no constituye un criterio de selección ni validación de la transferencia de curvas de desempeño.

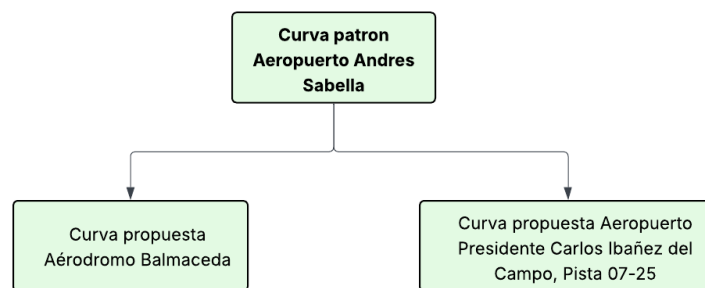


Figura 49. Guía esquemática sobre los aeropuertos/aeródromos que se obtienen en función del aeropuerto patrón Andrés Sabella.

Las curvas de deterioro propuestas para los pavimentos mixtos, obtenidas a partir de la curva patrón del aeropuerto Andrés Sabella, se presentan en la Figura 50. En esta figura se muestra la curva patrón correspondiente al aeropuerto Andrés Sabella junto con las curvas propuestas para el aeródromo Balmaceda y para la pista 07–25 del aeropuerto presidente Carlos Ibáñez del Campo, considerando recintos con la misma materialidad de pavimento.

Cabe señalar que las curvas representadas mediante líneas segmentadas corresponden a las curvas extrapoladas obtenidas a partir de la curva patrón, mientras que las curvas representadas mediante líneas continuas corresponden a ajustes logarítmicos calibrados a partir de los valores de PCI medidos. Estas últimas se asocian a los aeropuertos Andrés Sabella, Balmaceda y Presidente Carlos Ibáñez del Campo (pista 07–25), para los cuales se dispone de información histórica de PCI.

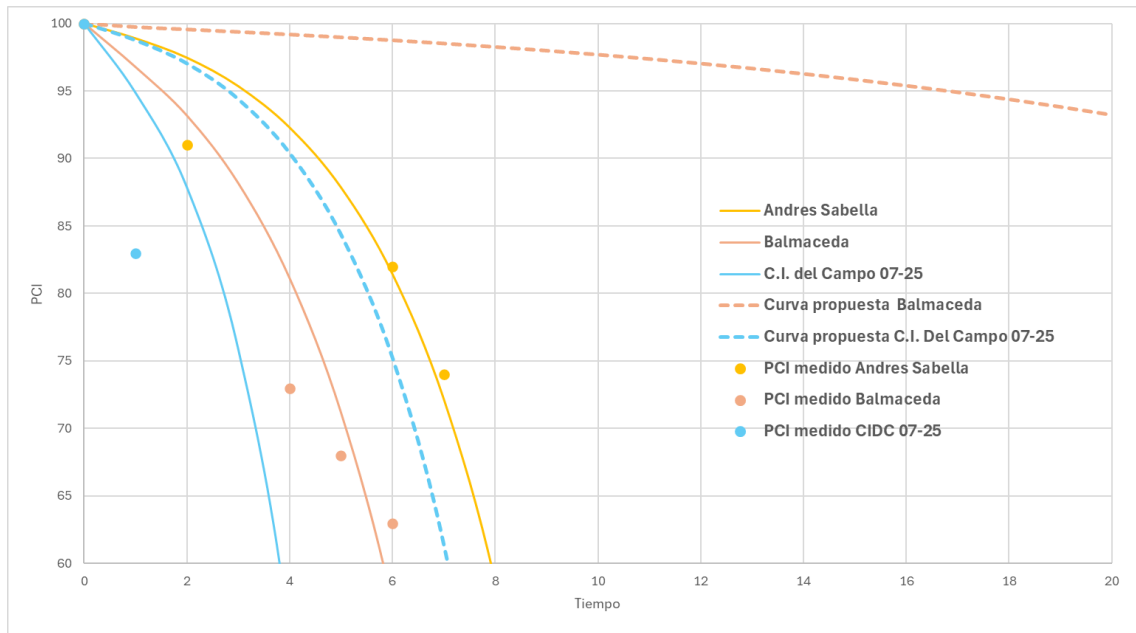


Figura 50. Curvas propuestas a partir de la curva patrón aeropuerto Andrés Sabella.



5.4.3 Pavimentos hormigón

Aplicando el procedimiento metodológico descrito en la Sección 4.4, para el caso de los pavimentos de hormigón se utilizó como curva patrón la correspondiente al aeropuerto El Tepual, el cual pertenece a la zona climática 6 y fue seleccionado por representar adecuadamente esta materialidad, además de contar con información histórica de PCI.

A partir de la curva patrón del aeropuerto El Tepual, se obtuvo una curva de desempeño extrapolada para el aeropuerto Presidente Carlos Ibáñez del Campo, correspondiente a la pista 12–30, la cual se encuentra ubicada en la zona climática 7.

La Figura 51 presenta un esquema conceptual del proceso de extrapolación de la curva patrón del aeropuerto El Tepual hacia el aeropuerto Presidente Carlos Ibáñez del Campo. La referencia a las zonas climáticas se utiliza exclusivamente con fines ilustrativos, con el objetivo de visualizar el ámbito territorial hacia el cual se extrapola el modelo, y no constituye un criterio de selección ni validación de la transferencia de curvas de desempeño.

Por su parte, la Figura 52 muestra las curvas de deterioro del PCI en función del tiempo, incluyendo la curva patrón calibrada del aeropuerto El Tepual y la curva propuesta para la pista 12–30 del aeropuerto Presidente Carlos Ibáñez del Campo. En esta figura, las curvas representadas mediante líneas continuas corresponden a ajustes logarítmicos calibrados a partir de los valores de PCI medidos, mientras que las curvas representadas mediante líneas segmentadas corresponden a las curvas extrapoladas obtenidas a partir de la curva patrón. Cabe señalar que para el aeropuerto Presidente Carlos Ibáñez del Campo, pista 12–30, se dispone de registros históricos de PCI, los cuales se incluyen en la figura como puntos medidos.

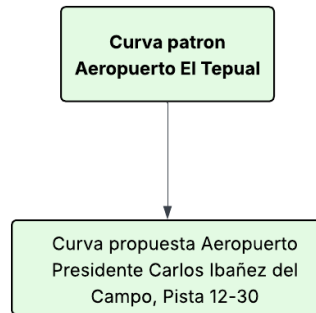


Figura 51. Guía esquemática sobre los aeropuertos/aeródromos que se obtienen en función del aeropuerto patrón El Tepual.

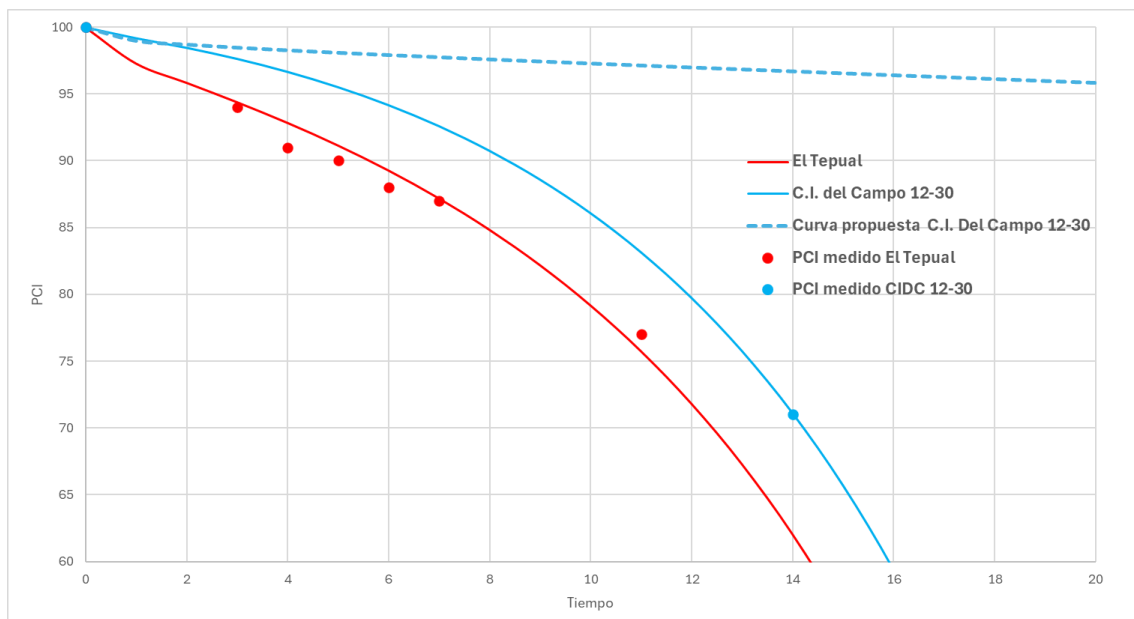


Figura 52. Curva propuesta a partir de la curva patrón aeropuerto El Tepual.



5.5 Validación extrapolación de modelos a aeropuertos con escasos datos PCI

Con el fin de evaluar la similitud entre las curvas de deterioro de PCI obtenidas mediante extrapolación y aquellas derivadas de ajustes logarítmicos calibrados a partir de datos medidos de PCI, se aplicaron pruebas estadísticas no paramétricas en los aeropuertos donde existía disponibilidad suficiente de información histórica.

Estas pruebas permitieron comparar las curvas calibradas a partir de datos medidos de PCI en el tiempo con las curvas propuestas obtenidas por extrapolación, derivadas de las curvas patrón definidas según la materialidad del pavimento, de acuerdo con el procedimiento metodológico descrito en la Sección 4.4.

Los resultados de este proceso de validación se presentan a continuación, organizados en función del tipo de pavimento analizado.

5.5.1 Pavimentos asfálticos

Para el caso de los pavimentos asfálticos, se evaluó la similitud entre las curvas ajustadas a partir de datos medidos de PCI y las curvas propuestas obtenidas por extrapolación a partir de la curva patrón del aeródromo La Florida, considerando únicamente aquellos aeropuertos y aeródromos donde existía información histórica suficiente para generar curvas ajustadas de comparación.

Los resultados de las pruebas no paramétricas aplicadas se presentan en las Tabla 72 a Tabla 76, correspondientes a los aeródromos Desierto de Atacama, Carriel Sur, La Araucanía, Cañal Bajo y Mocopulli, respectivamente. En dichas tablas se reportan los estadísticos y valores p asociados a las pruebas de Wilcoxon y F* test (o t-test y F* test, según correspondiera), utilizadas para evaluar la similitud entre las curvas reales y las curvas propuestas para cada recinto.

Tabla 72. Test no paramétrico para comprobar similitud entre curva real PCI vs curva propuesta para el aeródromo Desierto de Atacama.

Desierto de Atacama		
Test	W / F*	P
Wilcoxon	0.00000	0.00044
F* Test	1.84570	0.010830

Tabla 73. Test no paramétrico para comprobar similitud entre curva real PCI vs curva propuesta para el aeródromo Carriel Sur.

Carriel sur		
Test	W / F*	P
Wilcoxon	0.0000	0.2500
F* Test	1.0372	0.482898

Tabla 74. Test no paramétrico para comprobar similitud entre curva real PCI vs curva propuesta para el aeródromo La Araucanía.

La Araucanía		
Test	W / F*	P
Wilcoxon	21.0000	0.8543
F* Test	1.0638	0.453127



Tabla 75. Test no paramétrico para comprobar similitud entre curva real PCI vs curva propuesta para el aeródromo Cañal Bajo.

Cañal Bajo		
Test	t / F*	P
t-test	-4.3156	0.000712
F* Test	402.352	0.0000

Tabla 76. Test no paramétrico para comprobar similitud entre curva real PCI vs curva propuesta para el aeródromo Mocopulli.

Mocopulli		
Test	W / F*	P
Wilcoxon	0	0.007812
F* Test	87.7192	0

5.5.2 Pavimentos mixtos

Para el caso de los pavimentos mixtos, se realizó una validación análoga, comparando las curvas ajustadas a partir de datos medidos de PCI con las curvas propuestas obtenidas por extrapolación a partir de la curva patrón del aeropuerto Andrés Sabella. Esta comparación fue posible únicamente en aquellos recintos donde existía información histórica suficiente de PCI que permitiera construir curvas ajustadas de referencia.

Los resultados de las pruebas no paramétricas aplicadas se presentan en la Tabla 77 y Tabla 78, correspondientes al aeródromo Balmaceda y a la pista 07–25 del aeropuerto Presidente Carlos Ibáñez del Campo, respectivamente. En dichas tablas se muestran los estadísticos y valores p asociados a las pruebas aplicadas para evaluar la similitud entre las curvas reales y las curvas propuestas.

Tabla 77. Test no paramétrico para comprobar similitud entre curva real PCI vs curva propuesta para el aeródromo Balmaceda.

Balmaceda		
Test	t / F*	P
t-test	-3.141	0.090
F* Test	2501.000	0.000

Tabla 78. Test no paramétrico para comprobar similitud entre curva real PCI vs curva propuesta para el aeropuerto Presidente Carlos Ibáñez del Campo, pista 07-25.

CIDC 07-25		
Test	t / F*	P
t-test	-3.3484	0.07385
F* Test	1.4167	0.296018

5.5.3 Pavimentos hormigón

Finalmente, para el caso de los pavimentos de hormigón, se evaluó la similitud entre la curva ajustada a partir de datos medidos de PCI y la curva propuesta obtenida por extrapolación a partir de la curva patrón del aeropuerto El Tepual. La validación se realizó para la pista 12–30 del aeropuerto Presidente



Carlos Ibáñez del Campo, recinto para el cual se disponía de información histórica suficiente de PCI que permitió efectuar la comparación.

Los resultados de las pruebas no paramétricas aplicadas se presentan en la Tabla 79, donde se reportan los estadísticos y valores p asociados a las pruebas de Wilcoxon y F* test utilizados para la comparación entre la curva real y la curva propuesta.

Tabla 79. Test no paramétrico para comprobar similitud entre curva real PCI vs curva propuesta para el aeropuerto presidente Carlos Ibáñez del Campo, pista 12-30.

CIDC 12-30		
Test	t / F*	P
Wilcoxon	0.0000	0.0002
F* Test	440.7977	0.0000

6 Análisis de resultados

6.1 Correlaciones entre PCI y tráfico aéreo con y sin P/C ratio

Las correlaciones presentadas en las secciones 5.1 y 5.2 permite evaluar de manera crítica la relación entre el deterioro del pavimento aeroportuario, representado mediante el PCI, y la solicitud impuesta por el tráfico aéreo, considerada en primera oportunidad como tráfico bruto (despegues acumulados) y posteriormente como tráfico corregido mediante el P/C ratio. El objetivo de esta sección es analizar si la corrección del tráfico permite representar de forma más coherente la relación entre la solicitud aérea y la pérdida del valor de PCI del pavimento.

En primera instancia, los resultados obtenidos que utilizan tráfico bruto muestran, en aquellas secciones del pavimento donde existe circulación de aeronaves, correlaciones negativas fuertes y estadísticamente significativas entre el PCI y los despegues acumulados, lo cual es consistente con la expectativa ingenieril de que el pavimento pierde condición a medida que aumenta el número de operaciones aéreas. No obstante, esta relación no se presenta de manera homogénea en todas las secciones analizadas, ya que, en sectores laterales de pista sin tránsito directo de aeronaves, como los bordes de pista, no se observa una correlación directa entre el tráfico aéreo y el deterioro del PCI. En contraste, en zonas críticas asociadas a los bordes de pista en conexión con calles de rodaje, donde se concentran las maniobras de giro de las aeronaves, el tráfico aéreo vuelve a constituir un factor explicativo relevante en la evolución del deterioro del pavimento.

No obstante, este enfoque presenta una limitación conceptual relevante y es que el tráfico bruto no distingue entre configuraciones de tren de aterrizaje, pesos de aeronaves ni desviaciones laterales, factores que si influyen directamente en la forma en que las cargas se transmiten a través del paquete estructural del pavimento. En este contexto, la corrección mediante el P/C ratio se introduce como una herramienta de normalización de las solicitudes, permitiendo expresar el tráfico aéreo en términos de pasadas efectivas equivalentes, calculadas a partir de la flota real y considerando parámetros de carga y dispersión lateral conforme a los criterios de diseño y evaluación estructural establecidos por la FAA.

El P/C ratio no mide daño, vida remanente ni condición del pavimento, sino que actúa como un factor de transformación del tráfico, proyectando las solicitudes de las aeronaves hacia el nivel estructural crítico del pavimento. En pavimentos flexibles, esta proyección se asocia principalmente a la respuesta en las capas inferiores del paquete estructural y, en particular, a la subrasante; mientras que en pavimentos rígidos se vincula a la generación de esfuerzos en la losa de hormigón, de acuerdo con la teoría de diseño y evaluación estructural utilizada por FAARFIELD.

Desde esta perspectiva, existe una inconsistencia conceptual al correlacionar directamente el PCI, que es un índice de la condición del pavimento, basado en deterioros visibles en la carpeta de rodadura, con una variable de tráfico corregido que representa las solicitudes estructurales proyectadas a niveles



inferiores del pavimento. Sin embargo, los resultados obtenidos en esta investigación demuestran que, pese a esta diferencia conceptual, la aplicación de la razón P/C refuerza la relación estadística entre PCI y tráfico acumulado.

Las secciones que ya presentaban correlaciones fuertes entre PCI y tráfico bruto conservan magnitudes similares al aplicar la corrección mediante el P/C ratio, lo que indica que el uso del número de despegues acumulados ya capturaba adecuadamente la tendencia general del deterioro del pavimento. En este contexto, la incorporación del P/C ratio no busca corregir una relación deficiente, sino normalizar las solicitudes asociadas a la flota de aeronaves, permitiendo expresar el tráfico en términos comparables de pasadas efectivas.

Cabe destacar que, si bien en la red primaria de aeropuertos de Chile existen aeronaves con características distintas a las predominantes, su frecuencia de operación es considerablemente menor en comparación con la flota dominante, compuesta principalmente por aeronaves de la familia Airbus A320 y A321. En consecuencia, la aplicación del P/C ratio se traduce en mejoras marginales o en la mantención de los niveles de correlación, sin observarse deterioros en los ajustes. No obstante, en un escenario caracterizado por una flota más equilibrada en términos de variedad de aeronaves y frecuencias de operación, la corrección mediante P/C ratio podría capturar de manera más explícita el efecto diferencial del tráfico aéreo sobre el deterioro del pavimento.

En consecuencia, el uso del tráfico efectivo acumulado corregido mediante el P/C ratio, se justifica tanto desde el punto de vista metodológico como empírico. La evidencia obtenida indica que esta corrección preserva o refuerza la relación entre tráfico y PCI, permitiendo una representación más consistente del deterioro del pavimento y facilitando la comparación entre aeropuertos con distintas flotas, configuraciones de tren de aterrizaje y niveles de dispersión lateral, sin introducir pérdidas de ajuste en aquellos casos donde el tráfico bruto ya mostraba un buen desempeño estadístico.

6.2 Modelos regresivos representativos

En el marco de esta investigación se desarrollaron modelos regresivos tanto a nivel de UM como por sección de pista. En ambos enfoques se evaluaron tres alternativas de modelación: ajuste lineal, ajuste polinómico y ajuste logarítmico. Para los sectores correspondientes a la franja central de las pistas, los resultados mostraron un comportamiento consistente entre los distintos aeropuertos analizados, identificándose al modelo logarítmico como aquel que mejor representa la evolución del PCI en función del tráfico efectivo acumulado. En contraste, para los bordes de pista, el ajuste lineal presentó, en términos generales, un mejor desempeño en la representación del deterioro observado.

La selección del modelo logarítmico como modelo representativo para la franja central de las pistas se fundamenta principalmente en su coherencia física. Este tipo de modelo permite representar adecuadamente la pérdida progresiva de condición del pavimento, imponiendo que el PCI decrezca en el tiempo a partir de un valor inicial cercano a 100. Por el contrario, si bien el ajuste polinómico presentaba en varios casos un mejor grado de ajuste estadístico, se descartó su uso debido a que en determinadas zonas del dominio el modelo predecía valores de PCI superiores a 100, lo cual no resulta físicamente consistente bajo un criterio estricto de evaluación de condición PCI. En consecuencia, se optó por utilizar el modelo logarítmico, aun cuando su coeficiente de determinación fuera levemente inferior, manteniendo igualmente valores elevados de ajuste (R^2 del orden de 0,9) y errores acotados, con valores de RMSE y MAE inferiores a 5, lo que confirma un desempeño estadístico satisfactorio.

Para el caso de los bordes de pista, particularmente en sectores con conexión a calles de rodaje, los modelos lineales resultaron ser los más representativos del comportamiento observado. Esto se explica porque, en estas zonas, el deterioro del pavimento no está dominado exclusivamente por las solicitudes directas del tráfico aéreo, sino que presuntamente representa una mayor influencia de factores ambientales, tales como condiciones climáticas locales, drenaje superficial y efectos asociados a la exposición del pavimento, y también la edad del pavimento lo que se traduce en una evolución más lineal del PCI en el tiempo.



6.2.1 Modelos regresivos representativos por UM

Respecto a los modelos construidos a nivel de UM, este enfoque permitió una mayor discretización espacial del deterioro, favorecida por la mayor disponibilidad de datos de PCI por UM. En este contexto, se seleccionaron tres aeropuertos que cumplieran con esta condición: el aeropuerto Andrés Sabella, el aeródromo La Florida y el aeropuerto El Tepual.

Aeródromo La Florida

Para el caso del aeródromo La Florida, el análisis se desarrolló tanto para la pista central (PI-1) como para los bordes de pista (PI-2) que presentan conexión directa con las calles de rodaje, zonas por donde circulan las ruedas de las aeronaves durante las maniobras operacionales. En el caso de la pista central, se concluyó que un único modelo era suficiente para representar su comportamiento, descartando la necesidad de discretizarla en secciones internas o identificar UM críticas de forma independiente. Esto se debe a que dicha discretización no aportaba mejoras significativas en la representación del deterioro. De esta forma, la PI-1 fue caracterizada mediante una única nube de puntos que incorporó el PCI de las 59 UM, incluyendo tanto las unidades promedio como aquellas con mayor nivel de deterioro, obteniéndose un muy buen grado de ajuste, tal como se presenta en la Figura 30 y la Tabla 56.

Para los bordes de pista (PI-2), se desarrollaron dos modelos independientes como se muestra en la Figura 31 y Figura 32, asociados a las conexiones con las calles de rodaje. En estos sectores se evaluaron tanto modelos lineales como modelos logarítmicos. Si bien ambos ajustes mostraron un comportamiento aceptable, el modelo lineal presentó de manera consistente un mejor desempeño estadístico y una representación más adecuada de la tendencia observada en los datos medidos. Adicionalmente, se aplicaron pruebas no paramétricas para evaluar la similitud entre las curvas obtenidas para los sectores PI-2 en conexión con la calle de rodaje Charlie y con la calle de rodaje Bravo, verificándose que ambos comportamientos eran estadísticamente similares como se observa en la Tabla 59. En base a ello, se adoptó un único modelo lineal para representar el comportamiento del PCI en los bordes de pista, como se muestra en la Figura 33.

Adicionalmente, se construyeron modelos específicos para los umbrales de pista, considerando que estos sectores se encuentran sometidos a solicitudes operacionales distintas tanto en tipo como en cantidad respecto del otro umbral de la pista. En particular, se analizaron las secciones UO30-2 y UP12-2, tal como se aprecia en las Figura 34 y Figura 35, respectivamente. La sección UO30-2 concentra una mayor cantidad de solicitudes debido a que en este sector las aeronaves realizan maniobras de giro y alineamiento previas al despegue en dirección oriente–poniente, condición bajo la cual normalmente operan a máxima carga. En contraste, la utilización de la sección UP12-2 para despegues en dirección poniente–oriente ocurre de manera mucho menos frecuente, principalmente durante eventos meteorológicos excepcionales, lo que implica una menor acumulación de solicitudes en dicho sector. Debido a estas diferencias operacionales, se ajustaron modelos independientes, seleccionándose nuevamente el modelo lineal como el que mejor representa la evolución del PCI en función del tráfico efectivo acumulado.

Finalmente, cabe destacar que el aeródromo La Florida se adopta en esta investigación como el recinto representativo para la modelación del comportamiento de los pavimentos asfálticos de la red primaria de aeropuertos de Chile. Esta elección se fundamenta en la disponibilidad de datos históricos de PCI, en la consistencia de su operación aérea y en la coherencia observada entre el tráfico efectivo acumulado y el deterioro de PCI del pavimento, lo que permite utilizar sus modelos como referencia para la extrapolación a otros aeropuertos con pavimentos de materialidad similar.

Aeropuerto Andrés Sabella

Para el aeropuerto Andrés Sabella se analizaron nuevamente dos zonas esenciales del pavimento, en concordancia con el enfoque metodológico adoptado para el resto de los aeropuertos de la red primaria. En primer lugar, se estudió la zona central de la pista, compuesta por las secciones PI-1, PI-3, PI-5, PI-



7 y PI-9, tal como se muestra en la Figura 75. Sin embargo, cabe destacar que la disponibilidad de datos históricos de PCI se concentró únicamente en las secciones PI-1 y PI-3, razón por la cual el análisis se desarrolló sobre estas dos secciones.

Para ambas secciones se evaluaron nuevamente tres tipos de modelos regresivos: un ajuste lineal, un ajuste polinómico y un modelo logarítmico. Posteriormente, se aplicaron pruebas estadísticas no paramétricas con el fin de evaluar si existían diferencias significativas que justificaran modelar cada sección de manera independiente. Los resultados de dichos contrastes, presentados en la Tabla 43, indican que no existen diferencias estadísticamente significativas entre las secciones PI-1 y PI-3, por lo que no se justifica su modelación separada.

En consecuencia, se adoptó un único modelo logarítmico para representar el comportamiento del PCI de la zona central de la pista del aeropuerto Andrés Sabella, ajustando una única nube de puntos que integra los valores de ambas secciones. Este enfoque permitió obtener una representación coherente del deterioro del pavimento, con métricas de ajuste satisfactorias, tal como se muestra en la Figura 22 y en las métricas asociadas al modelo logarítmico presentadas en la Tabla 44.

En segundo término, se analizaron las zonas de conexión de los bordes de las pistas con las calles de rodaje, específicamente en las intersecciones con las calles Echo (Figura 23), Delta (Figura 24) y Charlie (Figura 25). Para cada una de estas zonas se evaluaron nuevamente los tres tipos de ajustes considerados en el estudio: lineal, polinómico y logarítmico. En todos los casos, el modelo lineal fue seleccionado como el más adecuado, debido a que representa de manera consistente el carácter decreciente del PCI en función del tráfico efectivo acumulado.

Adicionalmente, se evaluó si era metodológicamente pertinente desarrollar modelos independientes para cada conexión con calle de rodaje. Los resultados de las pruebas no paramétricas, presentados en la Tabla 48 y Tabla 49, evidencian que no existen diferencias estadísticamente significativas entre los comportamientos de las distintas conexiones, por lo que no se justifica su modelación por separado. En base a ello, se adoptó un único modelo lineal para representar el comportamiento del PCI en estas zonas críticas de conexión, el cual se presenta en la Figura 26 junto con sus métricas de ajuste correspondientes (Tabla 50).

Este enfoque permite representar de manera consistente el detrimento de PCI en las zonas más solicitadas de la pista del aeropuerto Andrés Sabella, evitando una sobre discretización del modelo y manteniendo coherencia tanto desde el punto de vista estadístico como desde el punto de vista físico del comportamiento del pavimento. Adicionalmente, el aeropuerto Andrés Sabella se adopta en esta investigación como el recinto representativo para la modelación del comportamiento de los pavimentos mixtos de la red primaria de aeropuertos de Chile. Esta elección se fundamenta en la alta disponibilidad de datos históricos de PCI a nivel de UM, lo que permite capturar de manera robusta la variabilidad espacial del deterioro. En este contexto, los modelos desarrollados para este aeropuerto permiten representar de forma adecuada el comportamiento de los pavimentos mixtos bajo condiciones operacionales reales, sirviendo como referencia para la extrapolación de curvas de desempeño a otros aeropuertos de la red primaria con configuraciones estructurales similares.

Aeropuerto El Tepual

Para el aeropuerto El Tepual, el análisis se enfocó en la zona central de la pista, compuesta por las secciones PI-1 y PI-3, tal como se aprecia en el esquema presentado en la Figura 83. Para ambas secciones se evaluaron nuevamente tres tipos de ajustes: un modelo lineal, un modelo polinómico y un modelo logarítmico, cuyos resultados se muestran en las Figura 37 y Figura 38, respectivamente. En ambos casos, el modelo logarítmico fue seleccionado como representativo, debido a que permite describir de manera coherente el decaimiento del PCI en función de los despegues efectivos acumulados, evitando además resultados físicamente inconsistentes, como valores de PCI superiores a 100.

Posteriormente, se aplicaron pruebas estadísticas no paramétricas con el objetivo de evaluar si era pertinente modelar de forma independiente las secciones PI-1 y PI-3. Los resultados de estos contrastes, presentados en la Tabla 65, muestran diferencias en los criterios estadísticos utilizados: mientras que la



prueba de Mann–Whitney indica diferencias significativas entre ambas secciones ($p = 0,045$), el test F* no evidencia diferencias estadísticamente significativas ($p = 0,073$). Dado que no existe unanimidad en los resultados de las pruebas aplicadas, no fue posible establecer con certeza la necesidad de modelar ambas secciones de manera independiente.

En consecuencia, se optó por seleccionar una única sección representativa de la pista central, eligiéndose la sección PI-1, debido a que presenta una mayor conexión con las calles de rodaje y, por tanto, una mayor probabilidad de tránsito efectivo de las aeronaves. Esto permite representar de forma conservadora el comportamiento del deterioro en la zona central de la pista, manteniendo coherencia tanto operativa como metodológica.

En relación con los bordes de pista, el análisis se centró exclusivamente en las zonas por donde circulan las ruedas de las aeronaves, correspondientes a la sección PI-2 en conexión con las calles de rodaje Delta (Figura 39), Charlie (Figura 40) y Bravo (Figura 41). Para estos sectores se realizaron pruebas estadísticas no paramétricas incluyendo Kruskal-Wallis, Mann-Whitney y el test F* cuyos resultados, presentados en la Tabla 69 y Tabla 70, evidencian que no existen diferencias estadísticamente significativas entre los comportamientos de las distintas conexiones. En base a ello, no se justifica la discretización de modelos para cada sección crítica, optándose por un único modelo lineal que represente el comportamiento de los bordes de pista mediante una nube de puntos integrada, tal como se muestra en la Figura 42, junto con sus métricas de ajuste correspondientes (Tabla 71).

Cabe destacar que, si bien en todos los casos se evaluaron ajustes lineales, polinómicos y logarítmicos, para la sección central de pista (PI-1) el modelo que mejor representó la evolución del PCI en función del tráfico efectivo acumulado fue el modelo logarítmico. En contraste, en los bordes de pista el modelo que mostró un mejor desempeño fue el ajuste lineal, al presentar los mejores indicadores estadísticos de ajuste entre el PCI y los despegues efectivos acumulados. Este comportamiento se explica porque, en dichos sectores, además de la acción del tráfico aéreo, el deterioro se ve influenciado por factores climáticos y ambientales, generando una evolución del PCI más cercana a una tendencia lineal que a la forma logarítmica observada en la franja central de la pista.

Finalmente, el aeropuerto El Tepual se adopta en esta investigación como el recinto representativo para la modelación del comportamiento de los pavimentos de hormigón de la red primaria de aeropuertos de Chile. Esta elección se fundamenta en la alta disponibilidad de datos históricos de PCI a nivel de UM, lo que permite capturar de manera robusta la variabilidad espacial del deterioro. En este contexto, los modelos desarrollados para este aeropuerto permiten representar de forma adecuada el comportamiento de los pavimentos de hormigón bajo condiciones operacionales reales, sirviendo como referencia para la extrapolación de curvas de desempeño a otros aeropuertos de la red primaria con configuraciones estructurales similares.

6.2.2 Modelos regresivos representativos por sección de pista

En relación con los modelos desarrollados a partir de un valor promedio de PCI por sección de pista, se construyeron modelos regresivos para los aeropuertos y aeródromos Desierto de Atacama, Carriel Sur, La Araucanía, Mocopulli, Cañal Bajo, Balmaceda y Presidente Carlos Ibáñez del Campo, considerando sus respectivas pistas. Este enfoque se adoptó debido a que, para estos aeropuertos, la información disponible de PCI se encontraba agregada a nivel de sección de pista y no con el grado de discretización requerido para un análisis por UM.

Para todos los aeropuertos considerados en este grupo, el análisis se concentró exclusivamente en la zona central de las pistas, por corresponder al sector donde circulan predominantemente las aeronaves y donde se espera que se concentre el mayor nivel de solicitud operativa. En cada caso, se desarrolló un modelo representativo por aeropuerto, obteniéndose una curva de desempeño que describe el comportamiento del deterioro del pavimento en la zona central de la pista.



En el proceso de modelación se evaluaron dos tipos de ajustes: un ajuste polinómico y uno logarítmico. En la mayoría de los casos analizados, los modelos logarítmicos presentaron un mejor desempeño en términos de coherencia del ajuste y representación del comportamiento físico del deterioro del PCI, superando a los ajustes polinómicos. En consecuencia, se seleccionó la formulación logarítmica en todos los casos para representar el deterioro de los pavimentos.

Adicionalmente, el uso del modelo logarítmico permite evitar problemas asociados a los ajustes polinómicos, en los cuales pueden generarse predicciones no físicamente consistentes, como valores de PCI superiores a 100, lo cual es técnicamente imposible dado que el PCI se encuentra acotado entre 0 y 100. De este modo, se formuló un modelo logarítmico específico para cada uno de los aeropuertos mencionados, representativo del comportamiento del PCI en la zona central de sus respectivas pistas.

Finalmente, cabe señalar que en el Anexo 2, se ilustran las secciones de pista modeladas para cada aeropuerto, mientras que en el Anexo 4 corresponden a los modelos desarrollados con sus respectivas métricas de ajustes.

6.3 Análisis Estadístico sobre extrapolación de modelos a aeropuertos con escasos datos PCI

Tal como se indicó en la Sección 6.2, tanto para los modelos desarrollados por sección de pista como para aquellos formulados a nivel de UM para la franja central de las pistas, se seleccionó de manera consistente el modelo logarítmico, dado que es la que representa de mejor forma el deterioro del PCI en función de las pasadas efectivas acumuladas.

Sobre la base de este criterio, se seleccionaron aeropuertos y aeródromos patrón en función de la materialidad del pavimento y de la disponibilidad de datos históricos de PCI, con el objetivo de extrapolar modelos de desempeño hacia aeropuertos con escasa o nula información de condición. En este contexto, se adoptó el aeródromo La Florida como curva patrón representativa de los pavimentos asfálticos, el aeropuerto El Tepual como curva patrón para los pavimentos de hormigón, y el aeropuerto Andrés Sabella como curva patrón representativa de los pavimentos mixtos. Esta selección permite disponer de curvas de referencia construidas a partir de recintos con comportamiento bien caracterizado, las cuales posteriormente son extrapoladas a otros aeropuertos considerando la zonificación climática y la tasa de crecimiento del tráfico efectivo acumulado.

6.3.1 Pavimentos asfálticos

El conjunto de curvas de desempeño propuestas para pavimentos asfálticos evidencia comportamientos diferenciados del detrimento del PCI en función de la zona climática y de las condiciones operacionales asociadas a cada aeropuerto o aeródromo analizado. En todos los casos, las curvas extrapoladas conservan la forma general de la curva patrón del aeródromo La Florida, manteniendo la coherencia física del proceso de deterioro, y presentando variaciones principalmente asociadas a la pendiente vinculada a la tasa de crecimiento del tráfico aéreo que se puede apreciar en la Figura 19.

En la zona climática 1, las curvas propuestas para los aeropuertos Chacalluta, Diego Aracena y el aeródromo Desierto de Atacama (Figura 44) muestran diferencias respecto de la curva patrón. En particular, se observa que recintos con mayores tasas de crecimiento del tráfico aéreo presentan un decaimiento más acelerado del PCI en el tiempo, como es el caso del aeropuerto Diego Aracena. Por el contrario, aquellos aeropuertos y aeródromos con menores tasas de crecimiento del tráfico, como Chacalluta y Desierto de Atacama, exhiben un deterioro del PCI más gradual, lo que se traduce en curvas de desempeño más conservadoras.

Para la zona climática 2, la curva propuesta correspondiente al aeródromo El Loa (Figura 45) presenta un deterioro más acelerado en comparación con la curva patrón del aeródromo La Florida. Este comportamiento se explica principalmente por una mayor tasa de crecimiento del tráfico aéreo en el



aeródromo El Loa, lo que incrementa el ritmo de acumulación de solicitaciones sobre el pavimento y, en consecuencia, acelera el deterioro del PCI.

En la zona climática 3, la curva propuesta para el aeropuerto Mataverí (Figura 46) muestra un comportamiento significativamente más conservador en el tiempo, con una pérdida de PCI más gradual respecto de la curva patrón. Este resultado es coherente con los bajos niveles de tráfico efectivo acumulado considerados para este recinto, los cuales se asocian a una operación aérea limitada, caracterizada por un vuelo diario en temporada estival y frecuencias del orden de dos a tres vuelos semanales durante el resto del año.

En la zona climática 5, las curvas propuestas correspondientes a los aeródromos Carriel Sur, La Araucanía, Pichoy y Cañal Bajo (Figura 47) presentan un abanico de comportamientos que refleja la heterogeneidad de las condiciones operacionales dentro de una misma zona climática. En este caso, se observa que aquellos recintos con mayores tasas de crecimiento del tráfico aéreo presentan una evolución del PCI más acelerada, mientras que los aeródromos con menores niveles de solicitud muestran una degradación funcional más lenta, manteniendo en todos los casos la forma característica de la curva patrón.

Finalmente, en la zona climática 6, la curva propuesta para el aeródromo Mocopulli (Figura 48) evidencia un deterioro del PCI más gradual en comparación con la curva patrón, lo que resulta coherente con los bajos niveles de tráfico efectivo acumulado y con una tasa de crecimiento considerablemente menor que la asociada al aeródromo La Florida.

6.3.1.1 Validación estadística de las curvas propuestas

Con el objetivo de evaluar la similitud entre las curvas de desempeño propuestas a partir de la curva patrón del aeródromo La Florida y las curvas ajustadas con datos medidos de PCI, se aplicaron pruebas estadísticas no paramétricas únicamente en aquellos aeropuertos y aeródromos que disponen de información histórica suficiente para construir curvas con datos PCI en el tiempo. Los resultados de estas pruebas se presentan en las Tabla 72 a Tabla 76.

En la zona climática 1, se comparó la curva ajustada con datos medidos de PCI con la curva propuesta para el aeródromo Desierto de Atacama, aplicando los test de Wilcoxon y F^* . Tal como se observa en la Tabla 72, ambos test arrojaron valores de p inferiores a 0.05, lo que indica que las curvas comparadas no son estadísticamente similares. Esta diferencia puede atribuirse a factores externos no incorporados explícitamente en el modelo, tales como el tipo de ligante asfáltico utilizado en la construcción del pavimento. Cabe destacar que, al momento de construcción de la pista del aeródromo Desierto de Atacama, no se encontraba implementado el sistema de clasificación por grado de desempeño (PG), a diferencia del aeródromo La Florida, lo que pudo haber influido en un deterioro funcional más acelerado del pavimento.

Adicionalmente, como se aprecia en la Figura 44, la curva medida del aeródromo Desierto de Atacama presenta un decaimiento del PCI más pronunciado que la curva propuesta. No obstante, es importante señalar que dicha curva medida se ajusta únicamente a tres puntos de PCI disponibles, considerando además un valor inicial de PCI igual a 100 como extrapolación para definir el año cero de análisis. En consecuencia, la confiabilidad estadística de la curva medida es limitada, por lo que la curva propuesta, al encontrarse directamente vinculada al tráfico efectivo acumulado, podría representar de manera más robusta la evolución funcional del pavimento.

Para las zonas climáticas 2 y 3, correspondientes al aeródromo El Loa y al aeropuerto Mataverí, respectivamente, no fue posible realizar una validación estadística de similitud entre curvas ajustadas a datos medidos y curvas propuestas, debido a la insuficiente disponibilidad de registros históricos de PCI que permitieran construir curvas de referencia comparables.

No obstante, para la zona climática 2, se observa que la tendencia de crecimiento del tráfico aéreo efectivo acumulado es similar a la del aeródromo La Florida, por lo que resulta consistente que la curva



propuesta presente una disminución de PCI más acelerada cuando la pendiente de crecimiento del tráfico efectivo es mayor. En este contexto, se debe señalar además que el aeródromo El Loa presenta condiciones climáticas particulares, asociadas a su emplazamiento en zona cordillerana, lo que introduce diferencias respecto a otros aeropuertos de la red, tales como Chacalluta, Diego Aracena, Desierto de Atacama y La Florida.

En el caso del aeropuerto Mataverí (zona climática 3), la curva propuesta presenta una evolución considerablemente distinta respecto a la curva patrón de La Florida, principalmente debido a que la pendiente de crecimiento del tráfico efectivo acumulado es significativamente menor. Esto se explica por el bajo nivel de operaciones aéreas registradas en dicho aeropuerto, que generalmente presenta entre uno y dos vuelos diarios, llegando en ocasiones a frecuencias aún menores. Esta situación se relaciona con su condición insular y la gran distancia respecto al continente, lo que restringe el tipo y frecuencia de aeronaves que operan regularmente, predominando vuelos comerciales de largo alcance. En consecuencia, el nivel de solicitaciones sobre el pavimento resulta sustancialmente inferior al observado en aeropuertos continentales como La Florida, donde opera una flota más diversa y con mayores frecuencias diarias, lo que justifica la menor tasa de deterioro observada en la curva propuesta para Mataverí.

En la zona climática 5, fue posible evaluar la similitud entre las curvas propuestas y las curvas medidas de PCI para los aeródromos Carriel Sur, La Araucanía y Cañal Bajo. En el caso de Carriel Sur y La Araucanía, los test de Wilcoxon y F^* arrojaron valores de p superiores a 0.05 (Tabla 73 y Tabla 74), lo que indica que no existen diferencias estadísticamente significativas entre las curvas comparadas, validando la metodología de extrapolación aplicada bajo condiciones operacionales comparables.

Por el contrario, para el aeródromo Cañal Bajo, los resultados presentados en la Tabla 75 muestran valores de p inferiores a 0.05, indicando que las curvas medidas y propuesta no son estadísticamente similares. Este comportamiento puede explicarse, en parte, por diferencias estructurales relevantes, tales como la capacidad de soporte de la subrasante, considerando que el aeródromo Cañal Bajo presenta un CBR del orden de 5 %, mientras que el aeródromo La Florida, utilizado como curva patrón, presenta un CBR aproximado de 17 %. Adicionalmente, la curva ajustada con datos PCI de este recinto se ajusta a un número reducido de datos medidos, lo que limita su confiabilidad y refuerza la validez relativa de la curva propuesta basada en el tráfico aéreo efectivo acumulado.

Finalmente, para el aeródromo Mocopulli (zona climática 6), los resultados de los test de Wilcoxon y F^* presentados en la Tabla 76 indican valores de p inferiores a 0.05, evidenciando diferencias estadísticamente significativas entre la curva medida y la curva propuesta. Este resultado puede estar intrínsecamente relacionado con las diferencias climáticas entre la zona climática del aeródromo patrón (zona 1) y la del aeródromo Mocopulli (zona 6), caracterizada por mayores precipitaciones y presencia de heladas. Estas condiciones climáticas, no incorporadas explícitamente en el modelo, pueden acelerar el deterioro PCI del pavimento, lo que explica que la curva propuesta no logre capturar completamente el comportamiento real observado en este recinto.

6.3.2 Pavimentos mixtos

En el caso de los pavimentos mixtos, se adoptó como curva patrón la correspondiente al aeropuerto Andrés Sabella, dado que es el recinto que presenta la mayor disponibilidad de información de PCI por unidad muestral dentro de esta categoría y cabe destacar que pertenece a la zona climática 1.

A partir de esta curva patrón, se propusieron curvas de desempeño para el aeródromo de Balmaceda y para el aeropuerto Presidente Carlos Ibáñez del Campo, correspondiente a la pista 07–25, tal como se observa en la Figura 50. Ambos recintos se encuentran emplazados en la zona climática 7, y la extrapolación se realizó manteniendo fijos los parámetros característicos de la ecuación de deterioro (α , β y R) obtenidos a partir del aeropuerto patrón, ajustándose únicamente la pendiente asociada a la tasa de crecimiento del tráfico aéreo, de acuerdo con los valores observados en la Figura 19.



Para el aeródromo de Balmaceda, la curva propuesta presenta un deterioro del PCI significativamente más gradual en comparación con la curva patrón del aeropuerto Andrés Sabella. Este comportamiento se explica por una tasa de crecimiento del tráfico aéreo considerablemente menor, lo que se traduce en una menor acumulación de solicitudes sobre el pavimento a lo largo del tiempo y, en consecuencia, en una pérdida más lenta del desempeño funcional.

En contraste, para el aeropuerto Presidente Carlos Ibáñez del Campo, pista 07–25, la tasa de crecimiento del tráfico aéreo resulta comparable a la del aeropuerto patrón. Como resultado, la curva propuesta muestra una evolución del PCI similar a la de la curva patrón, presentando pendientes y tendencias de deterioro análogas. Este comportamiento confirma que, bajo condiciones operacionales equivalentes, la metodología de extrapolación aplicada es capaz de reproducir de manera consistente el deterioro funcional observado en pavimentos mixtos.



6.3.2.1 Validación estadística de las curvas propuestas

Con el objetivo de validar estadísticamente las curvas propuestas para el aeródromo de Balmaceda y para la pista 07–25 del aeropuerto Presidente Carlos Ibáñez del Campo, se aplicaron pruebas estadísticas no paramétricas para evaluar la similitud entre las curvas propuestas y las curvas medidas de deterioro del PCI en el tiempo, como se aprecia en la Sección 5.5.2. En este caso, fue posible efectuar la validación para ambos recintos, dado que disponen de información histórica suficiente de PCI.

Los resultados de las pruebas aplicadas se presentan en las Tabla 77 y Tabla 78, correspondientes al aeródromo de Balmaceda y a la pista 07-25 del aeropuerto Presidente Carlos Ibáñez del Campo, respectivamente.

En el caso del aeródromo de Balmaceda, los resultados muestran que el test t arroja un valor de p superior a 0.05 (Tabla 77), lo que indica que no existen diferencias estadísticamente significativas entre las medias de la curva medida y la curva propuesta. Sin embargo, el test F^* presenta un valor de p inferior a 0.05, evidenciando diferencias significativas en la variabilidad entre ambas curvas. Este resultado sugiere que, si bien el nivel medio de deterioro del PCI es comparable entre la curva medida y la curva propuesta, el comportamiento disperso del deterioro difiere entre ambas.

Desde el punto de vista físico, esta diferencia puede estar asociada a las condiciones climáticas del recinto, considerando que el aeropuerto utilizado como curva patrón se emplaza en la zona climática 1, mientras que el aeródromo de Balmaceda pertenece a la zona climática 7. Esta última se caracteriza por la presencia de ciclos de congelamiento-deshielo, los cuales pueden acelerar y hacer más irregular el deterioro PCI del pavimento.

Por su parte, para la pista 07–25 del aeropuerto Presidente Carlos Ibáñez del Campo, los resultados del test t y del test F^* presentan valores de p superiores a 0.05 (Tabla 78), lo que indica que no existen diferencias estadísticamente significativas ni en las medias ni en las varianzas entre la curva medida y la curva propuesta. Este resultado evidencia una adecuada similitud estadística entre ambas curvas, validando la metodología de extrapolación aplicada para este recinto.

Cabe destacar que esta similitud se explica principalmente por la cercanía en las tasas de crecimiento del tráfico aéreo entre el aeropuerto patrón y la pista 07–25 del aeropuerto Presidente Carlos Ibáñez del Campo, lo que conduce a una evolución temporal del PCI con pendientes y tendencias similares. No obstante, estos resultados deben interpretarse con cautela, dado que las curvas patrón capturan la forma del deterioro PCI en función de las condiciones propias de su zonificación climática. En consecuencia, cuando el aeropuerto patrón y el recinto extrapolado pertenecen a zonas climáticas distintas, el comportamiento real del deterioro puede diferir significativamente, por lo que la similitud observada en este caso podría no ser necesariamente generalizable y responder, en parte, a la coincidencia de condiciones operacionales.

En términos generales, la validación estadística realizada para pavimentos mixtos confirma que la metodología propuesta permite obtener representaciones razonables del deterioro funcional del PCI, especialmente cuando las condiciones climáticas entre el aeropuerto patrón y el recinto extrapolado son equivalentes. En aquellos casos donde existen diferencias climáticas relevantes, los resultados evidencian las limitaciones inherentes al enfoque, las cuales deben ser consideradas en aplicaciones futuras del modelo.

6.3.3 Pavimentos de hormigón

En el caso de los pavimentos de hormigón, se adoptó como curva patrón la correspondiente al aeropuerto El Tepual, dado que es el recinto que presenta la mayor disponibilidad de datos de PCI por unidad muestral dentro de esta categoría. Cabe mencionar que este pertenece a la zona climática 6.



A partir de esta curva patrón, se fijaron los parámetros característicos de la ecuación de deterioro (α , β y R), ajustándose únicamente la pendiente asociada a la tasa de crecimiento del tráfico aéreo para el aeropuerto Presidente Carlos Ibáñez del Campo, correspondiente a la pista 12–30, ubicada en la zona climática 7. La relación entre la curva patrón y la curva propuesta se presenta en la Figura 52.

Del análisis de dicha figura se observa que la curva propuesta para la pista 12-30 del aeropuerto Presidente Carlos Ibáñez del Campo presenta un deterioro del PCI más gradual en comparación con la curva patrón del aeropuerto El Tepual. Este comportamiento se explica principalmente por una menor tasa de crecimiento del tráfico aéreo en el recinto extrapolado, lo que se traduce en una menor acumulación de solicitaciones aéreas sobre el pavimento en el tiempo.

En efecto, mientras el aeropuerto El Tepual presenta una tasa de crecimiento del tráfico aéreo más pronunciada, la pista 12-30 del aeropuerto Presidente Carlos Ibáñez del Campo exhibe un crecimiento considerablemente menor, tal como se observa en la Figura 19. Esta diferencia en las condiciones operacionales se refleja directamente en la pendiente de las curvas de deterioro del PCI, manteniéndose en ambos casos la forma general característica del modelo adoptado.

En términos generales, los resultados obtenidos para pavimentos de hormigón evidencian que la metodología de extrapolación aplicada permite capturar de manera coherente el efecto del tráfico aéreo en el deterioro PCI del pavimento, aun cuando los recintos pertenezcan a zonas climáticas distintas. No obstante, debe considerarse que factores climáticos propios de cada zona, tales como variaciones térmicas, precipitaciones y ciclos de congelamiento-deshielo, no se encuentran incorporados explícitamente en el modelo, por lo que las curvas propuestas deben interpretarse como una primera aproximación al comportamiento real del pavimento.

6.3.3.1 Validación estadística de las curvas propuestas

Con el objetivo de evaluar la similitud entre el ajuste de la curva con datos medidos de PCI y la curva propuesta obtenida a partir de la curva patrón del aeropuerto El Tepual, se aplicaron pruebas estadísticas no paramétricas a la pista 12-30 del aeropuerto Presidente Carlos Ibáñez del Campo, único recinto de pavimentos de hormigón que dispone de información histórica suficiente de PCI para efectuar esta comparación. Los resultados de las pruebas de Wilcoxon y F^* se presentan en la Tabla 79.

Tal como se observa en dicha tabla, ambos test arrojan valores de p muy inferiores a 0.05, lo que indica la existencia de diferencias estadísticamente significativas entre la curva real y la curva propuesta. En consecuencia, desde el punto de vista estadístico, no es posible afirmar que ambas curvas presenten un comportamiento similar.

Este resultado puede explicarse, en primer lugar, por la limitada disponibilidad de datos reales de PCI para la pista 12–30 del aeropuerto Presidente Carlos Ibáñez del Campo, cuyo ajuste de curva se construye a partir de un número reducido de mediciones PCI. Esta escasez de datos disminuye la robustez estadística de la curva medida y puede afectar su representatividad respecto del comportamiento real del deterioro del pavimento en el tiempo.

Adicionalmente, si bien el aeropuerto patrón El Tepual y el aeropuerto Presidente Carlos Ibáñez del Campo pertenecen a zonas climáticas cercanas (zonas 6 y 7, respectivamente), las condiciones ambientales específicas de cada recinto presentan diferencias relevantes. Mientras el aeropuerto El Tepual se emplaza en una zona caracterizada por precipitaciones abundantes y bajas temperaturas, el aeropuerto Presidente Carlos Ibáñez del Campo se encuentra en un entorno con condiciones climáticas más severas, incluyendo mayores variaciones térmicas, presencia frecuente de nieve y ciclos de congelamiento-deshielo más intensos. Estas condiciones pueden acelerar el deterioro PCI del pavimento de hormigón y generar patrones de degradación distintos a los capturados por la curva patrón.

En este contexto, las diferencias estadísticamente significativas observadas entre la curva medida y la curva propuesta evidencian las limitaciones inherentes al proceso de extrapolación cuando se aplica entre recintos con condiciones climáticas y ambientales marcadamente distintas, aun cuando la



materialidad del pavimento sea la misma. Por lo tanto, la curva propuesta debe interpretarse como una primera aproximación al comportamiento del PCI, siendo recomendable, para aplicaciones futuras, incorporar variables climáticas explícitas o contar con información histórica más extensa que permita una calibración más precisa del modelo.

7 Conclusiones

7.1 Sobre P/C ratio

El uso del P/C ratio demostró ser una herramienta metodológicamente pertinente para la homogenización del tráfico aéreo en el análisis del deterioro PCI del pavimento aeroportuario. Su aplicación permitió expresar el tráfico en términos de pasadas efectivas equivalentes, incorporando la influencia de la configuración del tren de aterrizaje y la dispersión lateral.

Los resultados obtenidos evidencian que la normalización del tráfico mediante el P/C ratio mejora, y en algunos casos refuerza, la relación estadística entre el tráfico aéreo acumulado y el PCI, respecto de aquella obtenida utilizando tráfico bruto. Esto confirma que el P/C ratio actúa como un refinamiento metodológico que mejora la consistencia del análisis sin introducir distorsiones en aquellos casos donde el tráfico bruto ya presentaba un buen desempeño explicativo.

Desde una perspectiva conceptual, el PCI corresponde a un índice de condición superficial, determinado a partir de la identificación y cuantificación de deterioros visibles en la carpeta de rodadura. En contraste, la razón P/C no constituye una medida de daño, vida remanente ni condición del pavimento, sino un factor de transformación del tráfico que proyecta las solicitudes de las aeronaves hacia el nivel estructural crítico del paquete. En pavimentos flexibles, esta proyección se lleva a las capas inferiores, particularmente en la subrasante; mientras que en pavimentos rígidos se proyecta sobre la losa de hormigón. En este sentido, podría advertirse una diferencia conceptual al correlacionar un índice superficial como el PCI con una variable de tráfico corregido que representa solicitudes estructurales profundas, para el caso de los pavimentos flexibles. Sin embargo, la aplicación de esta corrección permite incorporar explícitamente efectos propios del tráfico de las aeronaves, tales como la dispersión lateral de las trayectorias y la configuración del tren de aterrizaje, factores que inciden en la distribución real de las solicitudes sobre el pavimento. En consecuencia, aun cuando el PCI sea un indicador basado en deterioros superficiales, la utilización del P/C ratio para corregir el tráfico aéreo, resulta conceptualmente coherente y estadísticamente consistente con la evolución observada del deterioro, permitiendo expresar el tráfico en términos comparables de pasadas efectivas sin desvirtuar la relación empírica identificada.

Cabe señalar que, en el contexto de la presente investigación, la flota predominante que opera en la red primaria nacional está compuesta principalmente por aeronaves de la familia Airbus A320 y A321, las cuales presentan configuraciones de tren de aterrizaje y rangos de peso relativamente similares. En consecuencia, las solicitudes estructurales inducidas por estas aeronaves no difieren de manera significativa entre sí, lo que implica que la corrección del tráfico mediante la razón P/C no genera variaciones sustanciales respecto del tráfico bruto acumulado. En este escenario de relativa homogeneidad operacional, el número de despegues acumulados ya captura adecuadamente la tendencia general del deterioro observado. No obstante, en contextos donde la flota presente una mayor heterogeneidad en términos de configuraciones de tren de aterrizaje y pesos máximos de operación, la aplicación del P/C ratio permitiría reflejar con mayor claridad las diferencias en las solicitudes estructurales, potenciando así su capacidad de normalización del tráfico.

7.2 Sobre el modelo regresivo utilizado

A partir del análisis comparativo de los modelos regresivos desarrollados tanto a nivel de unidad muestral como por sección de pista, se concluye que la selección del modelo más adecuado para representar la evolución del PCI depende del sector del pavimento analizado, no existiendo un único modelo universalmente superior para todas las zonas operacionales.



En las franjas centrales de las pistas, donde el tránsito aéreo se concentra y las solicitudes operacionales se aplican de manera reiterada sobre una misma trayectoria, el modelo logarítmico resultó ser el que mejor representó el deterioro del PCI en función de las pasadas efectivas acumuladas obtenidas mediante la corrección del tráfico aéreo con el P/C ratio. En estas secciones, el modelo reprodujo de manera consistente la evolución observada del PCI, obteniéndose coeficientes de determinación superiores a 0,9 y errores de ajuste reducidos, tanto en los modelos desarrollados a nivel de unidad muestral como en aquellos construidos por sección de pista.

Por otra parte, en los bordes de pista, particularmente en sectores conectados con calles de rodaje, el comportamiento del deterioro presentó una tendencia más cercana a una evolución lineal. En estos sectores, si bien el pavimento continúa siendo influenciado tanto por el tránsito aéreo como por factores ambientales, la frecuencia de solicitud resulta menor y se distribuye entre distintas conexiones de rodaje, dado que las aeronaves pueden utilizar diferentes accesos para ingresar o abandonar la pista. Otro de los factores que podría estar influyendo más en el detrimento del PCI en estas zonas es la edad del pavimento, más que las solicitudes aéreas. En consecuencia, el modelo lineal logró capturar de mejor manera la evolución del PCI en estos puntos, resultando más representativo que el modelo logarítmico para describir el deterioro observado en dichas zonas.

Cabe señalar que, aunque en algunos casos los ajustes polinómicos presentaron indicadores estadísticos levemente superiores a los obtenidos mediante modelos lineales o logarítmicos, estos fueron descartados debido a la generación de comportamientos físicamente inconsistentes, tales como predicciones de valores de PCI superiores a 100 o incrementos de condición en ciertos rangos del dominio analizado. Tales resultados no resultan compatibles con la naturaleza del PCI como indicador de condición del pavimento, el cual debe presentar, en términos generales, una evolución decreciente en el tiempo conforme se acumulan solicitudes y envejecimiento estructural. Por esta razón, se priorizaron modelos que aseguran coherencia física en la representación del deterioro, aun cuando ello implicara aceptar coeficientes de ajuste levemente inferiores.

En síntesis, los resultados muestran que el modelo logarítmico constituye la alternativa más adecuada para representar el deterioro del PCI en las franjas centrales de pista, mientras que el modelo lineal describe de manera más coherente el comportamiento observado en bordes de pista asociados a conexiones con calles de rodaje. Esta diferenciación permite representar de manera más realista la evolución del deterioro según el patrón operacional de cada sector, contribuyendo a una modelación más consistente del comportamiento del pavimento aeroportuario en la red primaria nacional.

7.3 Sobre la extrapolación de modelos a aeropuertos con escasos datos PCI

Los resultados obtenidos en el presente estudio permiten concluir que la extrapolación de modelos de desempeño del PCI hacia aeropuertos con escasa o nula disponibilidad de datos históricos constituye una alternativa metodológicamente viable, siempre que se realice bajo criterios claramente definidos y con una interpretación adecuada de sus alcances y limitaciones.

La metodología propuesta, basada en la selección de aeropuertos patrón según la materialidad del pavimento y la disponibilidad de información histórica robusta de PCI, permitió generar curvas de referencia con una adecuada coherencia física y estadística. Estas curvas patrón, al ser extrapoladas a otros recintos mediante el ajuste de la pendiente asociada a la tasa de crecimiento del tráfico aéreo efectivo acumulado, lograron reproducir de manera razonable las tendencias generales del deterioro del pavimento, particularmente en aquellos casos donde las condiciones operacionales resultaron comparables.

La validación estadística realizada evidencia que la extrapolación presenta un mejor desempeño cuando el aeropuerto patrón y el recinto extrapolado comparten características operacionales similares, especialmente en términos de tasas de crecimiento del tráfico aéreo y configuraciones estructurales del pavimento. En estos escenarios, las curvas propuestas muestran una adecuada similitud con las curvas



medidas de PCI, confirmando la capacidad del enfoque para representar el comportamiento del deterioro del pavimento en contextos de información limitada.

No obstante, los resultados también ponen de manifiesto las limitaciones inherentes al proceso de extrapolación cuando existen diferencias relevantes en las condiciones climáticas entre el aeropuerto patrón y el recinto extrapolado. En particular, factores tales como precipitaciones, variaciones térmicas y ciclos de congelamiento-deshielo, no incorporados explícitamente en el modelo, pueden generar patrones de deterioro que no son capturados completamente por la curva patrón, aun cuando la materialidad del pavimento sea la misma. En estos casos, las diferencias estadísticamente significativas observadas entre curvas medidas y propuestas deben interpretarse como una manifestación de dichas limitaciones y no como una falla del enfoque metodológico.

Asimismo, la confiabilidad de las curvas medidas utilizadas para la validación depende fuertemente de la cantidad y calidad de los datos históricos de PCI disponibles. En aeropuertos donde las curvas medidas se construyen a partir de un número reducido de observaciones, la robustez estadística es limitada, lo que refuerza la utilidad relativa de las curvas extrapoladas basadas en el tráfico aéreo efectivo acumulado como una primera aproximación del comportamiento del deterioro de los pavimentos.

En términos generales, la extrapolación de modelos de desempeño del PCI propuesta en esta investigación debe entenderse como una herramienta de apoyo para la gestión de pavimentos aeroportuarios en contextos de información incompleta, más que como una representación exacta del deterioro real. Su principal aporte radica en proporcionar una base técnica coherente para la estimación preliminar del desempeño del pavimento, ante la ausencia de curvas desarrolladas a partir de datos históricos suficientes, facilitando la comparación entre aeropuertos y apoyando la toma de decisiones en sistemas de gestión de pavimentos aeroportuarios a escala de red.



8 Recomendaciones

8.1 Recomendaciones para los organismos responsables de la gestión de infraestructura aeroportuaria

- **Implementación de protocolos estrictos de información en terreno:** Se recomienda la adopción de un protocolo único y estandarizado para el levantamiento de información de pavimentos aeroportuarios en la red primaria, aprovechando la plataforma y aplicación móvil SIGPA-GO, desarrollada en el marco del proyecto FONDEF ID23I10113. Este protocolo debe asegurar criterios homogéneos en la medición del PCI, la correcta identificación de las Unidades de Muestreo y el registro sistemático de observaciones en terreno, con el fin de reducir discontinuidades históricas y problemas asociados a la variabilidad en los criterios de auscultación.
- **Registrar y documentar exhaustivamente las intervenciones sobre el pavimento:** Es imprescindible mantener un registro detallado, trazable y actualizado de todas las intervenciones realizadas sobre pistas, calles de rodaje y plataformas, incluyendo actividades de mantenimiento rutinario, rehabilitaciones parciales, limpieza de caucho, refuerzos estructurales y reconstrucciones. La ausencia de esta información limita significativamente la interpretación de las variaciones del PCI en el tiempo y dificulta la aplicación y validación de modelos predictivos de desempeño.
- **Consolidación de información estructural y operativa del pavimento:** Se recomienda que, junto con los datos de PCI, se disponga de información estructural actualizada del pavimento (tipo de material, espesores de capas, capacidad de soporte de la subrasante, entre otros) y de antecedentes operacionales relevantes (configuración de flota, patrones de operación, distribución del tráfico aéreo entre pistas y calles de rodaje, así como el sentido predominante de operación de cada pista). Esta información resulta clave para contextualizar el deterioro observado y mejorar la representatividad de los modelos de desempeño, siendo fundamental su almacenamiento y gestión centralizada mediante plataformas como SIGPA-GO.

8.2 Recomendaciones para futuras investigaciones

- **Reformulación del uso del P/C ratio en estudios de deterioro del pavimento:** Si bien el P/C ratio demostró ser una herramienta eficaz para homogeneizar el paso de aeronaves y representar de manera consistente el efecto del tráfico aéreo en términos de solicitaciones equivalentes, en esta investigación su aplicación se realizó proyectando dichas solicitaciones hacia niveles estructurales del pavimento, tales como la subrasante en pavimentos flexibles o en la superficie de la losa en pavimentos rígidos. Dado que el PCI corresponde a un indicador cuya determinación se basa en la condición superficial del pavimento, evaluada a partir de deterioros visibles en la capa de rodadura, se recomienda que futuras investigaciones adapten la formulación del P/C ratio de modo que la corrección del tráfico se proyecte explícitamente sobre la capa superficial del pavimento, alineando de manera más directa la variable explicativa con la naturaleza del indicador de condición utilizado.
- **Evaluación de enfoques híbridos de modelación:** Dado que los modelos logarítmicos demostraron un desempeño satisfactorio en términos de coherencia física y ajuste estadístico, se recomienda explorar enfoques híbridos que combinen la formulación empírica con técnicas de aprendizaje automático, particularmente en escenarios donde se disponga de mayores volúmenes de datos históricos. Este enfoque podría mejorar la capacidad de captura de comportamientos no lineales complejos del deterioro funcional del pavimento.
- **Aplicación de la metodología a nivel de red y análisis de escenarios:** Finalmente, se recomienda extender la metodología desarrollada hacia análisis a nivel de red aeroportuaria, utilizando las curvas de desempeño extrapoladas como insumo para la evaluación de escenarios de mantenimiento, análisis de riesgos y priorización de inversiones. Este enfoque permitiría



apoyar la toma de decisiones estratégicas en sistemas de gestión de pavimentos aeroportuarios, especialmente en contextos donde la información histórica es limitada.

9 Referencias bibliográficas

- AASHTO. (1993). *AASHTO Guidelines for Pavement Management Systems*.
- Basnet, K. S., Shrestha, J. K., & Shrestha, R. N. (2023). Pavement performance model for road maintenance and repair planning: a review of predictive techniques. *Digital Transportation and Safety*, 2(4), 253–267. <https://doi.org/10.48130/dts-2023-0021>
- Brownlee, J. (2020). *Basic Concepts in Machine Learning*. <https://machinelearningmastery.com/basic-concepts-in-machine-learning/>
- Butt, A. A., Shahin, M. Y., & Carnahan, J. V. (1994). *Application of Markov Process to Pavement Management Systems at Network Level*.
- Camarena Campos, K. (2018). *IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE GESTIÓN DE PAVIMENTOS PARA EL ÁREA DE MOVIMIENTO DE AEROPUERTOS*.
- Cárdenas Jaque, M. (2024). *REVISIÓN E IMPLEMENTACIÓN DEL NUEVO SISTEMA INTERNACIONAL PARA LA NOTIFICACIÓN DE RESISTENCIA RELATIVA DE PAVIMENTOS, MÉTODO ACR-PCR, EN AERÓDROMOS DE USO PÚBLICO DE LA RED AEROPORTUARIA DE CHILE*.
- Cordova, N. (2025). *DESARROLLO DE MODELOS DEL DESEMPEÑO DE PAVIMENTOS AEROPORTUARIOS DE LA RED PRIMARIA DE CHILE, UTILIZANDO LA BASE DE DATOS HISTÓRICA DEL PCI*.
- DGAC. (2025). *Red Aeroportuaria Nacional. Dirección General de Aeronáutica Civil*, <https://www.dgac.gob.cl/aeropuertos/red-aeroportuaria-nacional/red-aeroportuaria/>.
- Di Mascio, P., & Moretti, L. (2019). Implementation of a pavement management system for maintenance and rehabilitation of airport surfaces. *Case Studies in Construction Materials*, 11. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2019.e00251>
- FAA. (2009). *Federal Aviation Administration*.
- FAA. (2016). *Advisory Circular N°150/5320-6F*.
- Herrera, J. (2025). *Evaluación del impacto del clima y el desempeño de los pavimentos aeroportuarios de la red primaria de Chile Memoria de Título presentada por Ingeniería Civil*.
- Herrera, J., Calero, J., González, M., Collazo, M., & Travieso, Y. (2022). El método de consulta a expertos en tres niveles de validación. *Revista Habanera de Ciencias Médicas*.
- Huang, Y. H. (2012). *Pavement Analysis and Design*.
- ICAO. (2022). *Aerodrome Design Manual. Third Edition*.
- FAA. (2012). *Pass-to-Coverage Computation for Arbitrary Gear Configurations in the FAARFIELD Program*.
- McCrea, N. (2014). *A Machine Learning Tutorial With Examples: An Introduction to ML Theory and Its Applications*. <https://www.toptal.com/machine-learning/machine-learning-theory-an-introductory-primer>
- 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*, 13(6), 581–590. <https://doi.org/10.1007/s42947-020-6011-8>



- Montecinos López, A. (2021). *METODOLOGÍA Y APLICACIÓN DE ALGORITMOS DE MACHINE LEARNING EN EL DESARROLLO DE MODELOS DE DESEMPEÑO DE PAVIMENTOS AEROPORTUARIOS EN CHILE* [Memoria de Título]. Universidad Técnica Federico Santa María.
- MOP. (2025a). *Red Aeroportuaria Nacional - Dirección de Aeropuertos* <https://aeropuertos.mop.gob.cl/red-aeroportuaria-nacional/>.
- MOP. (2025b). *RED PRIMARIA - Dirección de Aeropuertos*, <https://aeropuertos.mop.gob.cl/red-primaria-2/>.
- Nazer, C. (2025). *DESARROLLO DE MODELOS DE DESEMPEÑO DEL COEFICIENTE DE FRICCIÓN DE PAVIMENTOS AEROPORTUARIOS DE LA ZONA NORTE PERTENECIENTES A LA RED PRIMARIA DE CHILE* Memoria de Título presentada por Ingeniería Civil.
- Odem, E. C., Ledbetter Prestressed, R. H., Treybig, H. J., McCullough, B. F., & Johnson, T. C. (1977). *Continuously Reinforced Concrete Airfield Pavement: Tests on Existing Pavement and Synthesis of Design Manuals, Design Manual for Continuously Reinforced Concrete Overlay Pavements, Design Manual for Continuously Reinforced Concrete Pavements, and Guide Specification Design of Civil Airfield Pavements for Seasonal Frost and Permafrost Conditions*.
- Roh, S., Lee, J., Urbino, I. J., Lin, W., & Cho, Y. (2023). Airport Pavement Maintenance Decision-Making System with Condition Cases Optimization. *Applied Sciences (Switzerland)*, 13(24). <https://doi.org/10.3390/app132413167>
- Sánchez, I. (2014). *Métodos de Regresión Estadística*. Universidad de Granada.
- Shahin, M. Y. (2007). *Pavements Management for Airports, Roads, and Parking Lots* (Second Edition).
- Solminihaç Tampier, H. de, Echaveguren, T., & Chamorro, A. (2018). *Gestión de Infraestructura Vial: Vol. Tercera Edición* (UNIVERSIDAD CATOLICA).
- Solorio, J., Márquez, Z., Montoya, M., Cárdenas, S., & Hernández, R. (2014). *Aplicación de métodos markovianos en el modelado del deterioro de carreteras*.
- Tolmo Castro, M. (2020). *FORMULACIÓN DE UN MARCO TEÓRICO PARA LA GESTIÓN DE PAVIMENTOS AEROPORTUARIOS, APLICABLE A LA RED NACIONAL DE AEROPUERTOS*.
- Valdivia Avila, M. (2017). *Sistema de gestión operativo de mantenimiento para la conservación de pavimentos en el área de movimiento - caso aeropuerto de Cajamarca 2017*.

A. Anexo 1

A continuación, se presentan los gráficos correspondientes a los análisis de las aeronaves que circulan por la red primaria.

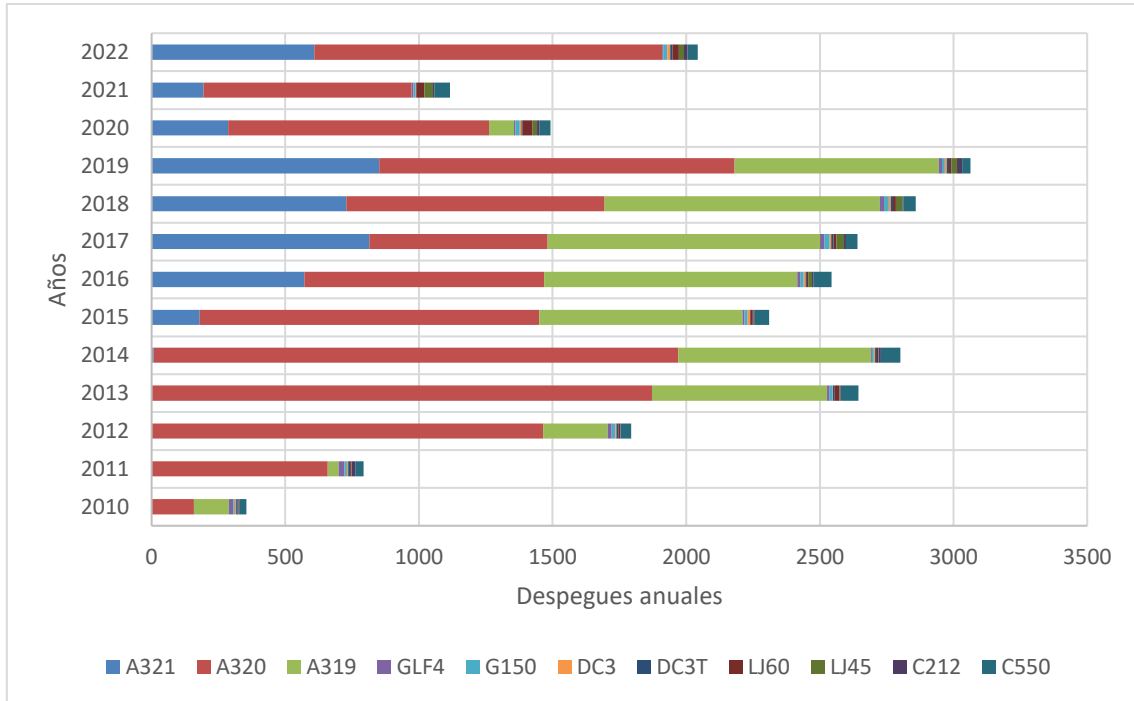


Figura 53. Despegues anuales en Aeropuerto Chacalluta

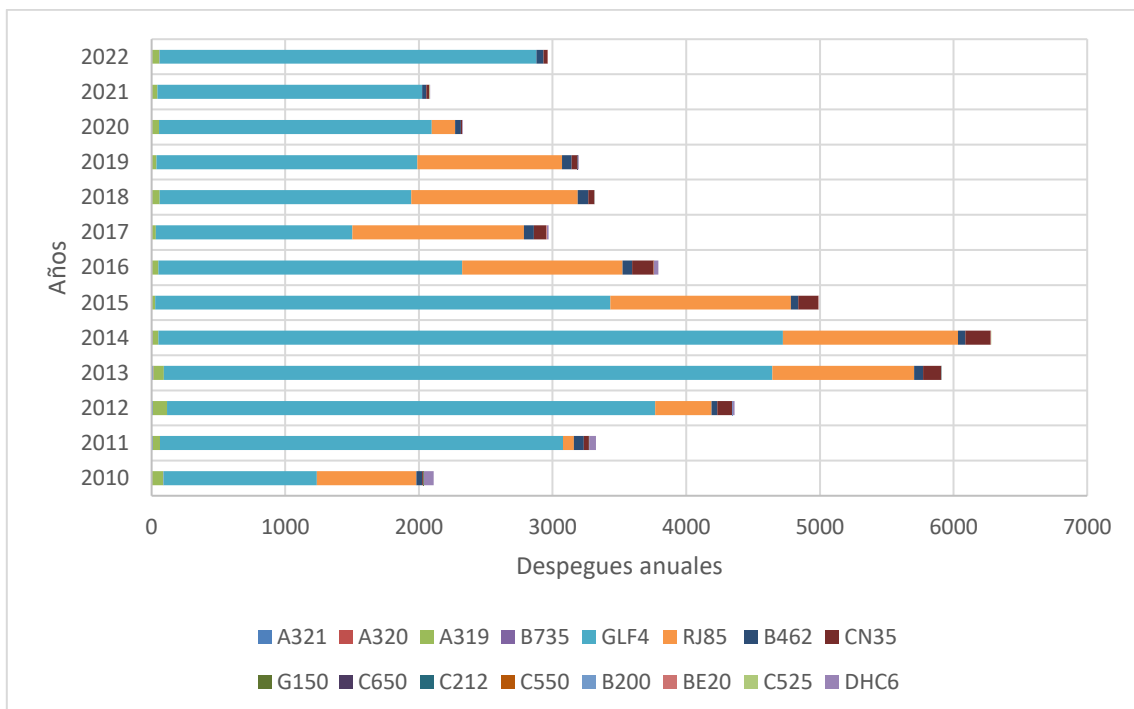


Figura 54. Despegues anuales en Aeropuerto Diego Aracena

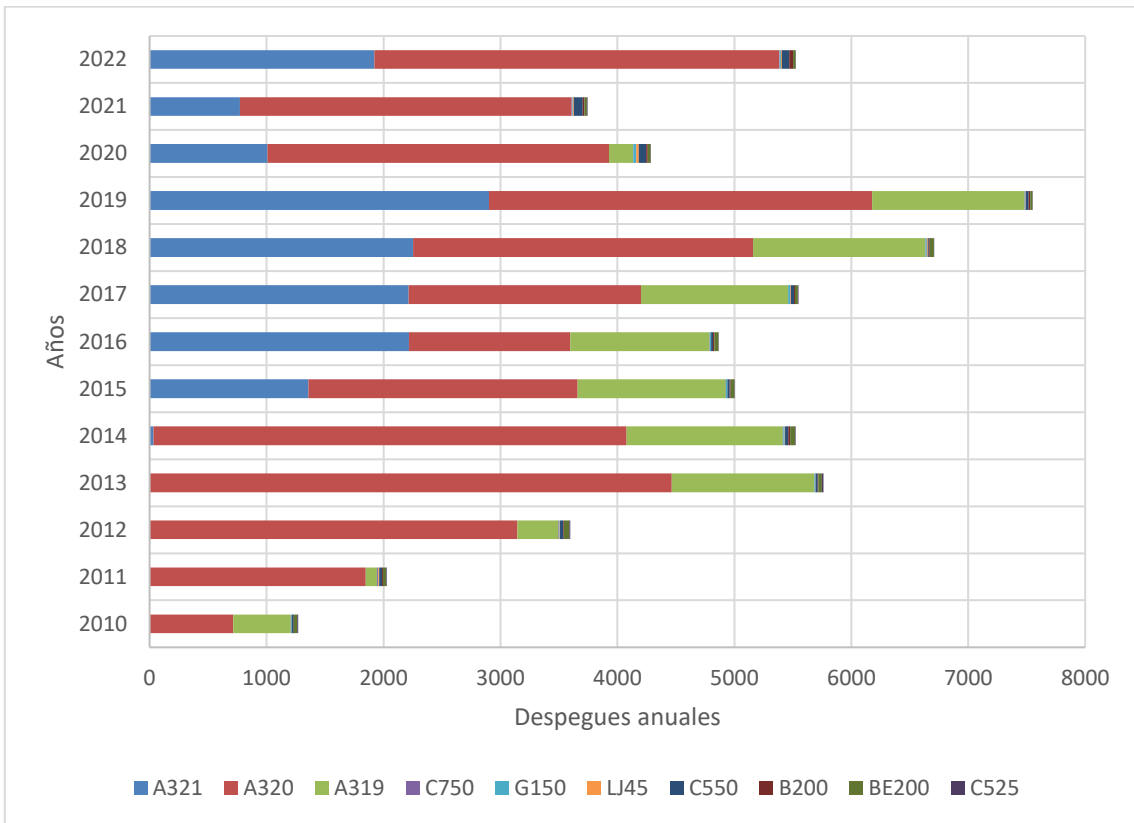


Figura 55. Despegues anuales en aeródromo El Loa.

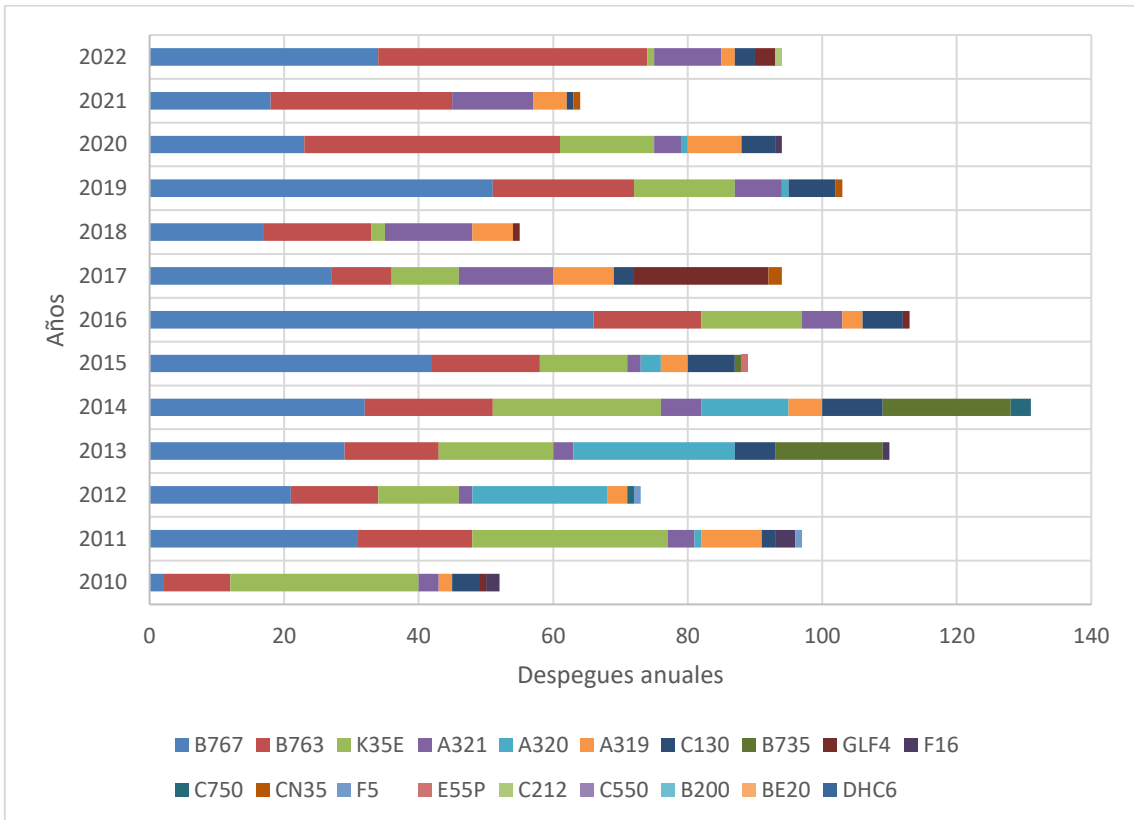


Figura 56. Despegues anuales en Aeropuerto Andrés Sabella

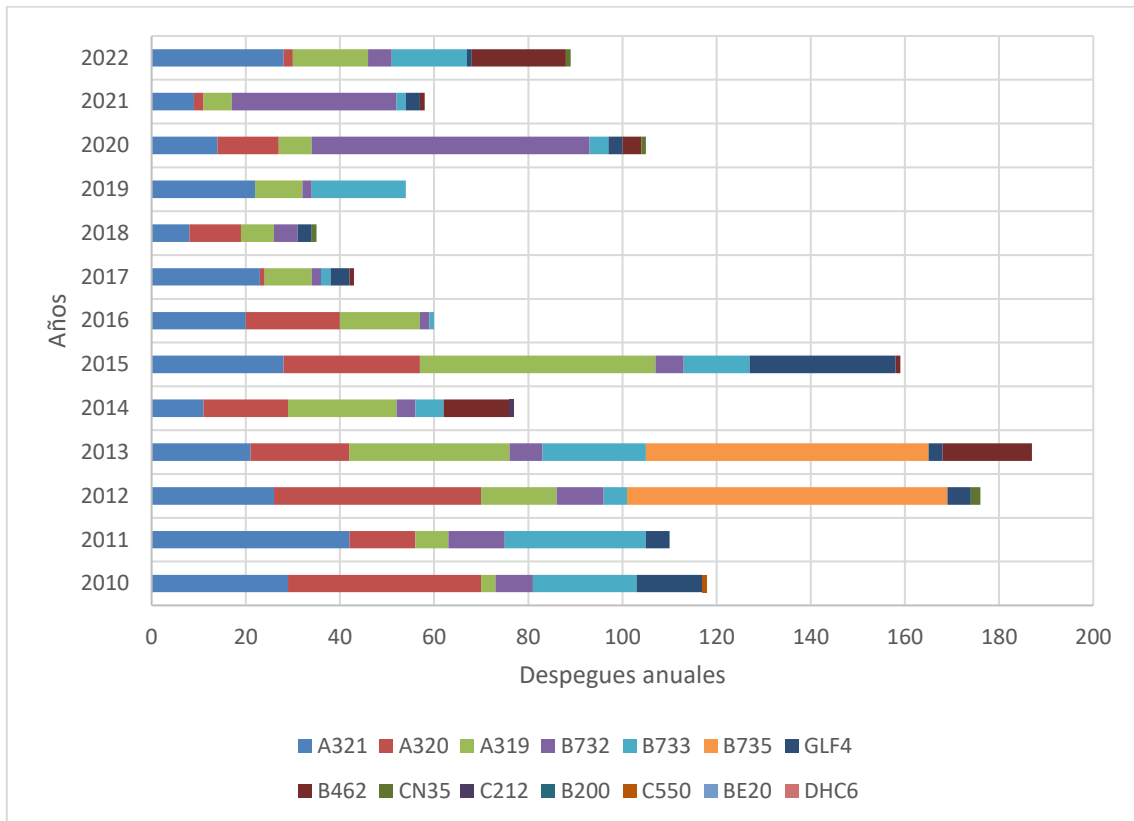


Figura 57. Despegues anuales Aeródromo Desierto de Atacama

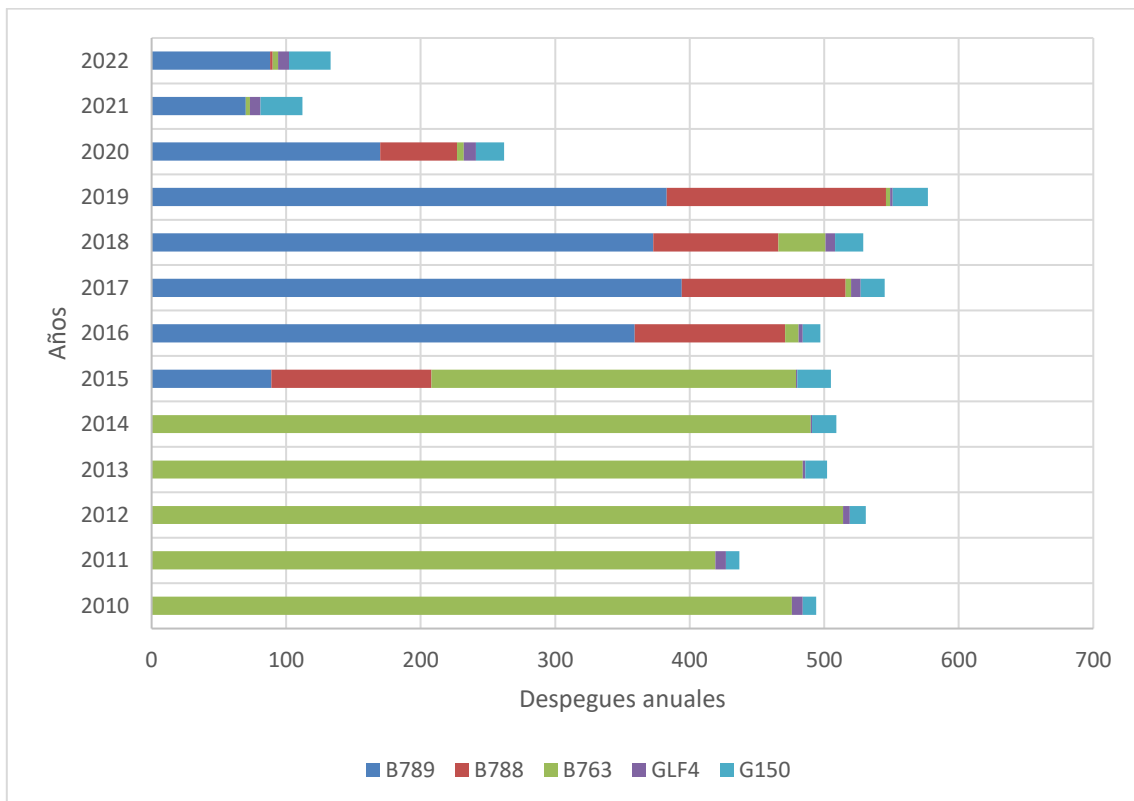


Figura 58. Despegues anuales Aeropuerto Mataverí

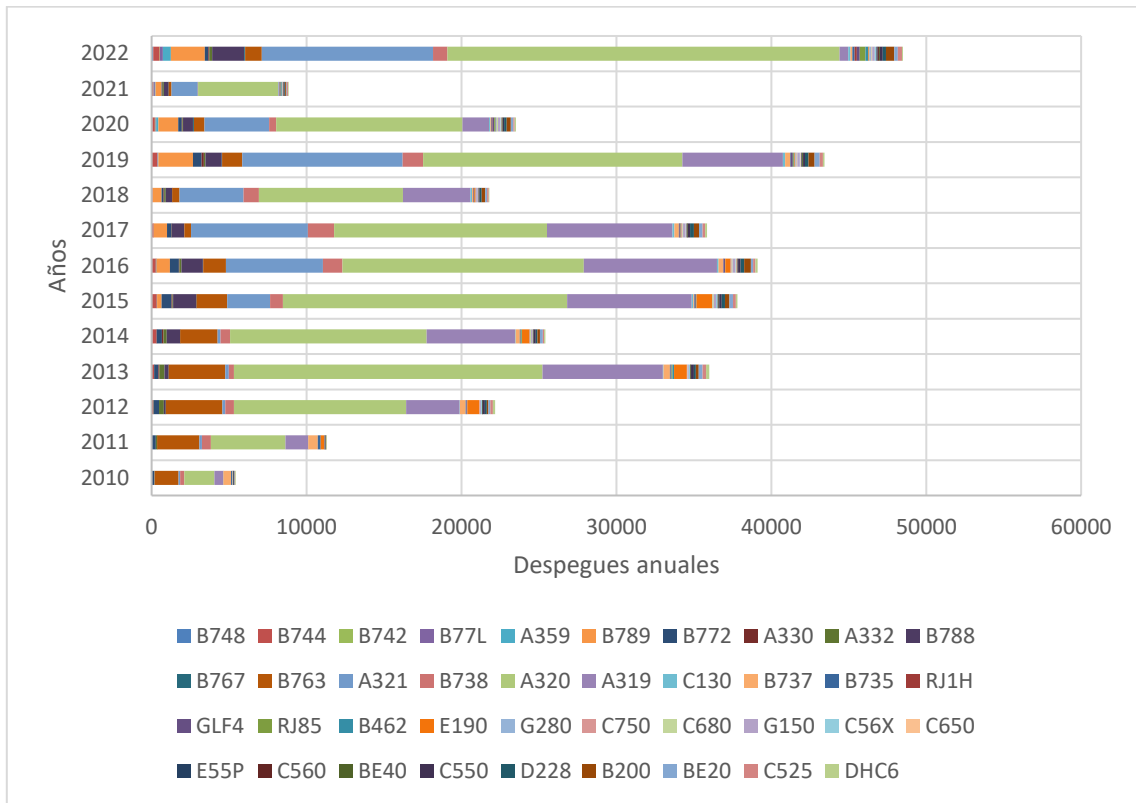


Figura 59. Despegues anuales Aeropuerto Arturo Merino Benítez, Pista 17R-35L.

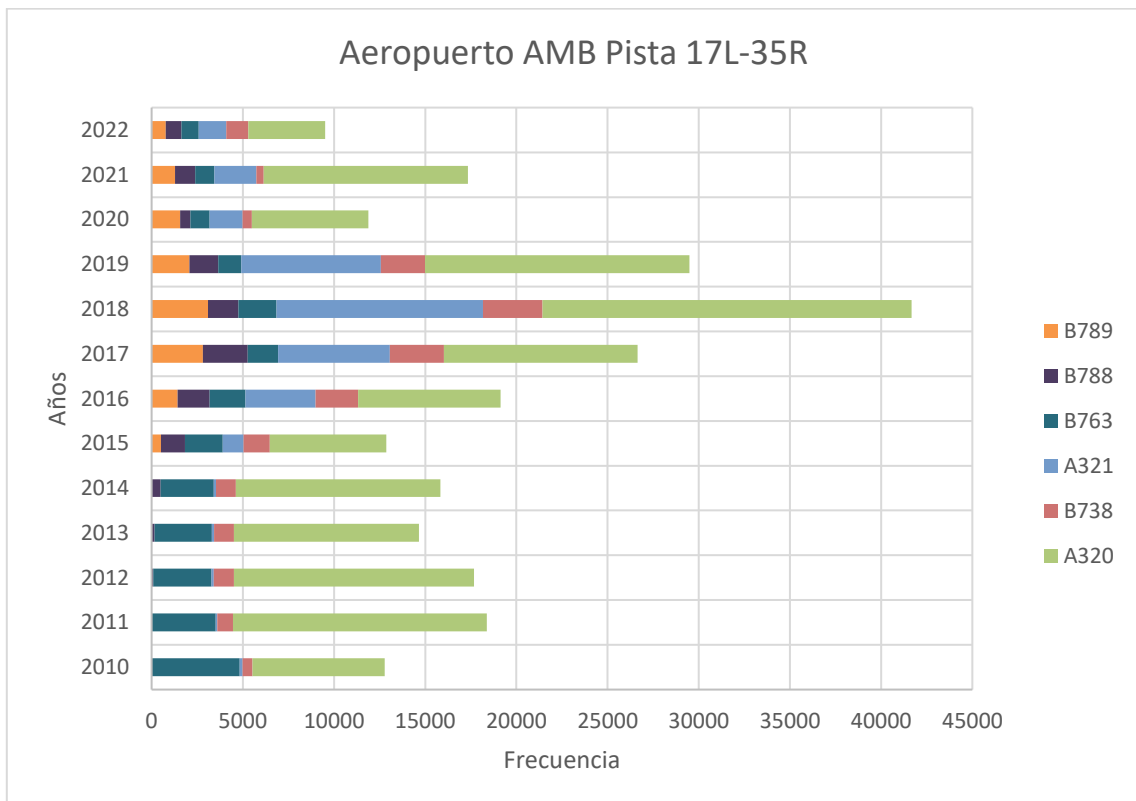


Figura 60. Despegues anuales Aeropuerto Arturo Merino Benítez, Pista 17L-35R.

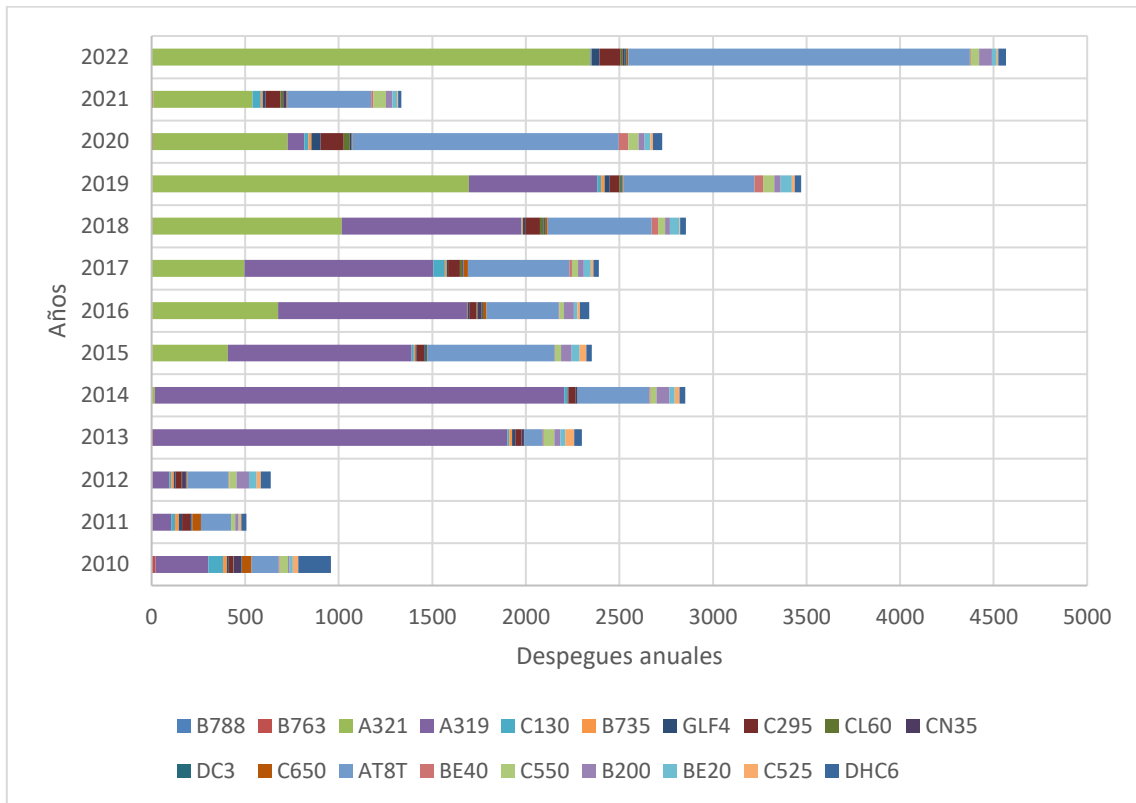


Figura 61. Despegues anuales Aeropuerto Carriel Sur.

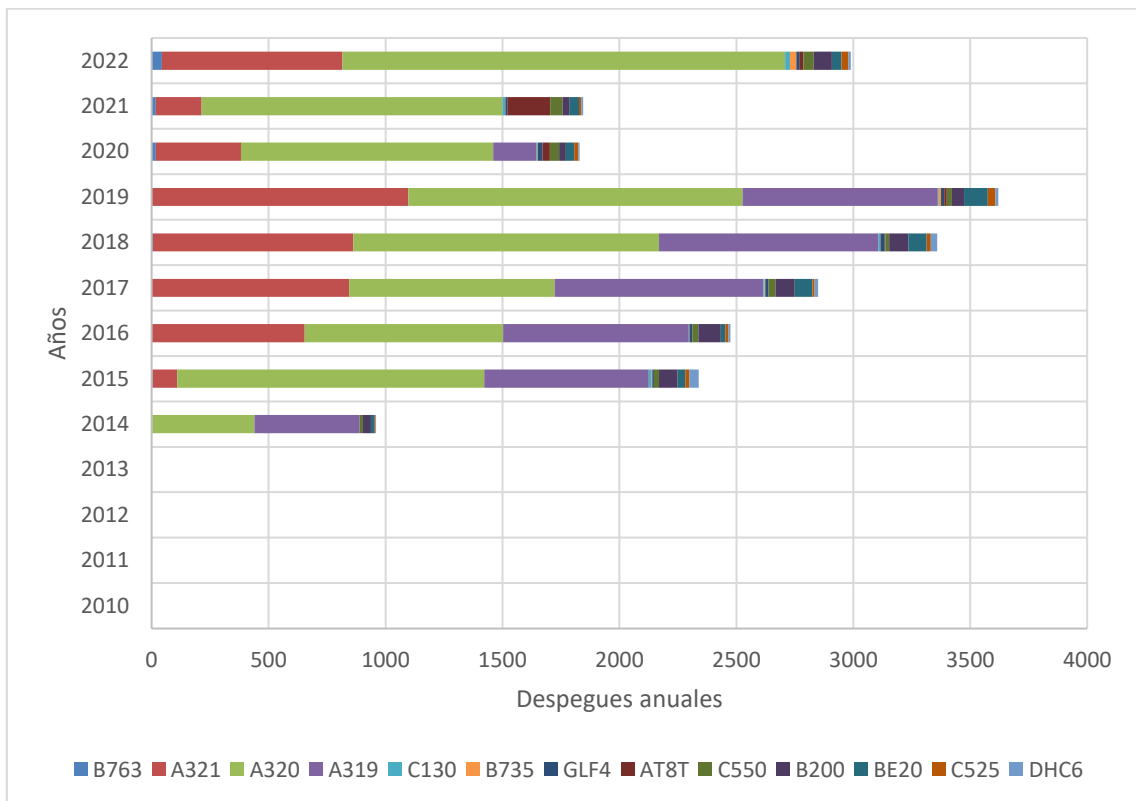


Figura 62. Despegues anuales Aeródromo La Araucanía

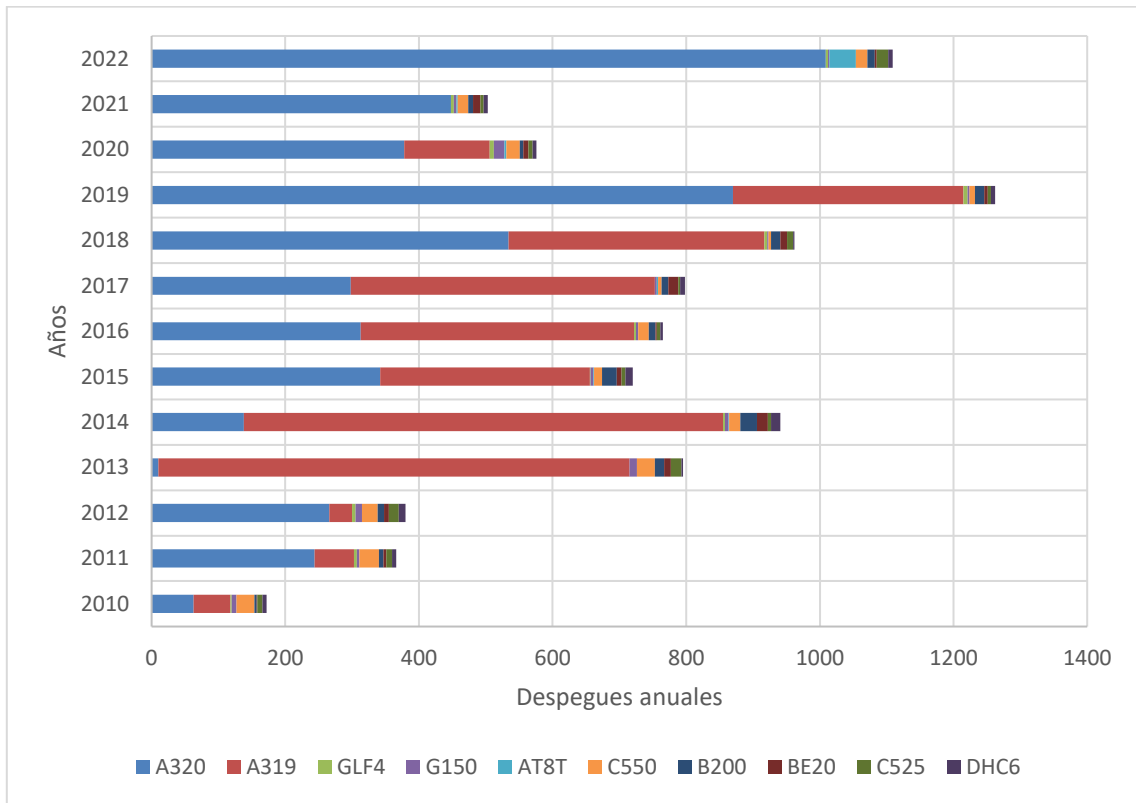


Figura 63. Despegues anuales Aeródromo Pichoy.

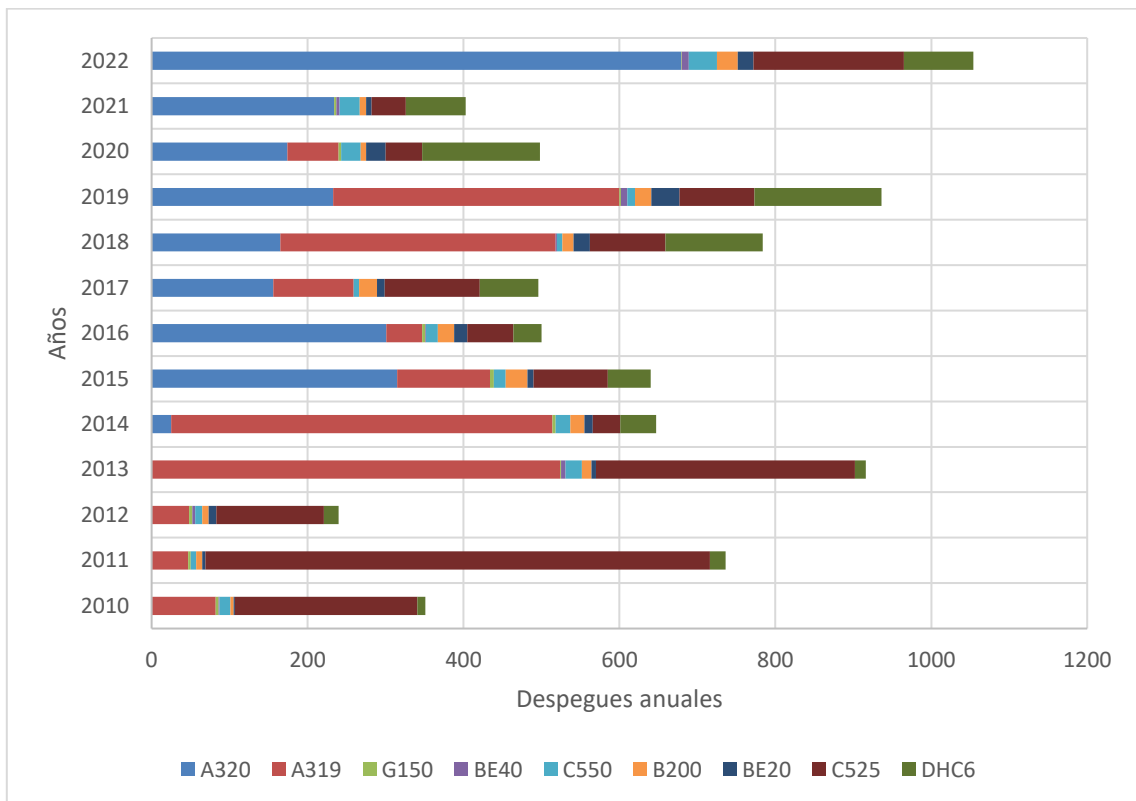


Figura 64. Despegues anuales Aeródromo Cañal Bajo

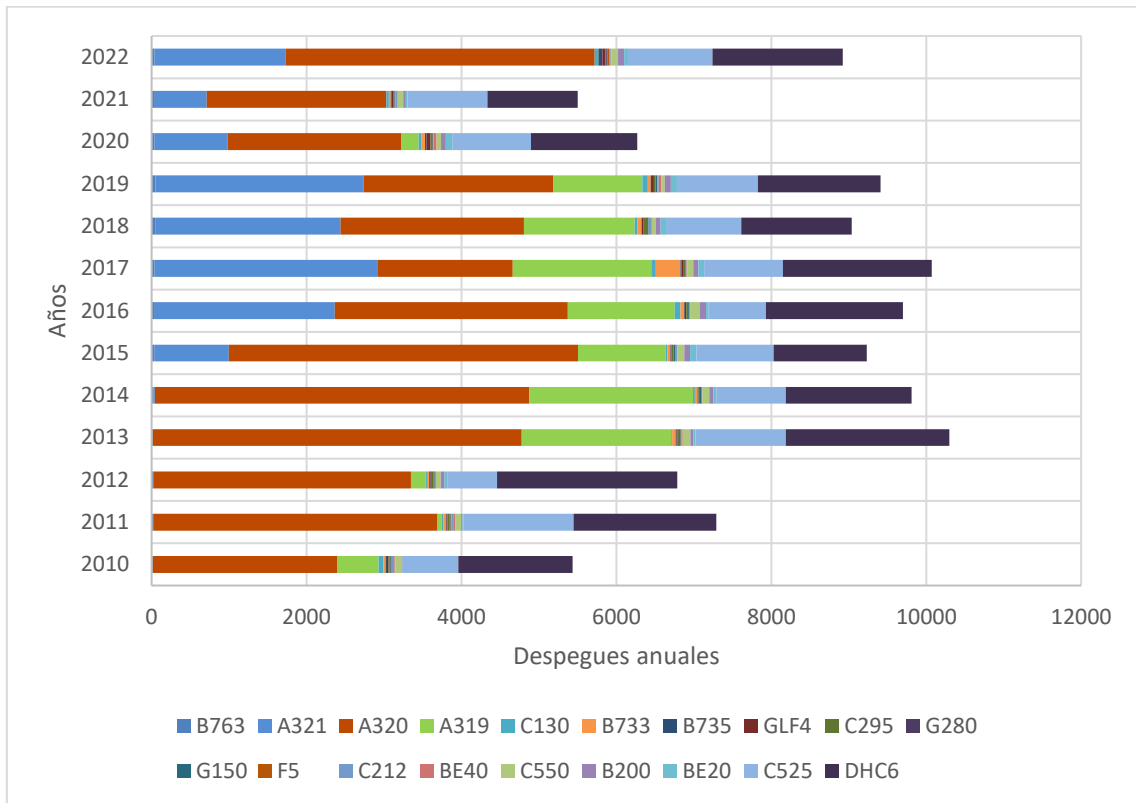


Figura 65. Despegues anuales Aeropuerto El Tepual.

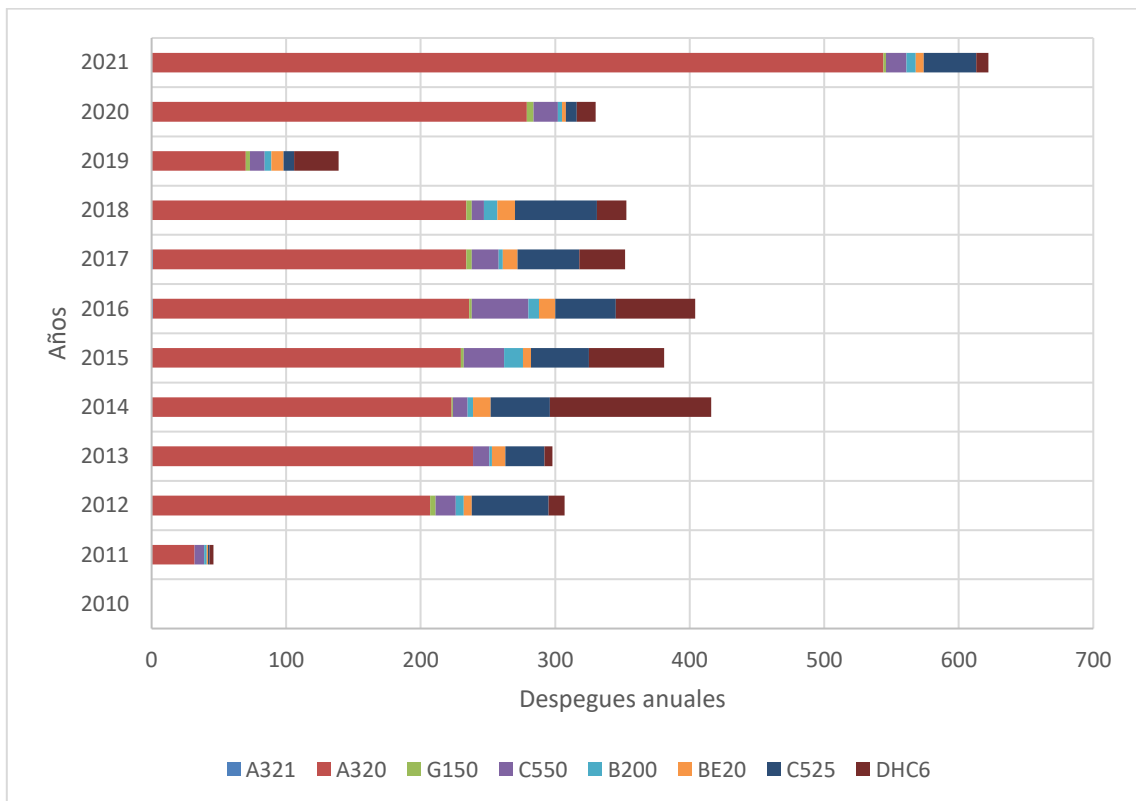


Figura 66. Despegues anuales Aeródromo Mocopulli

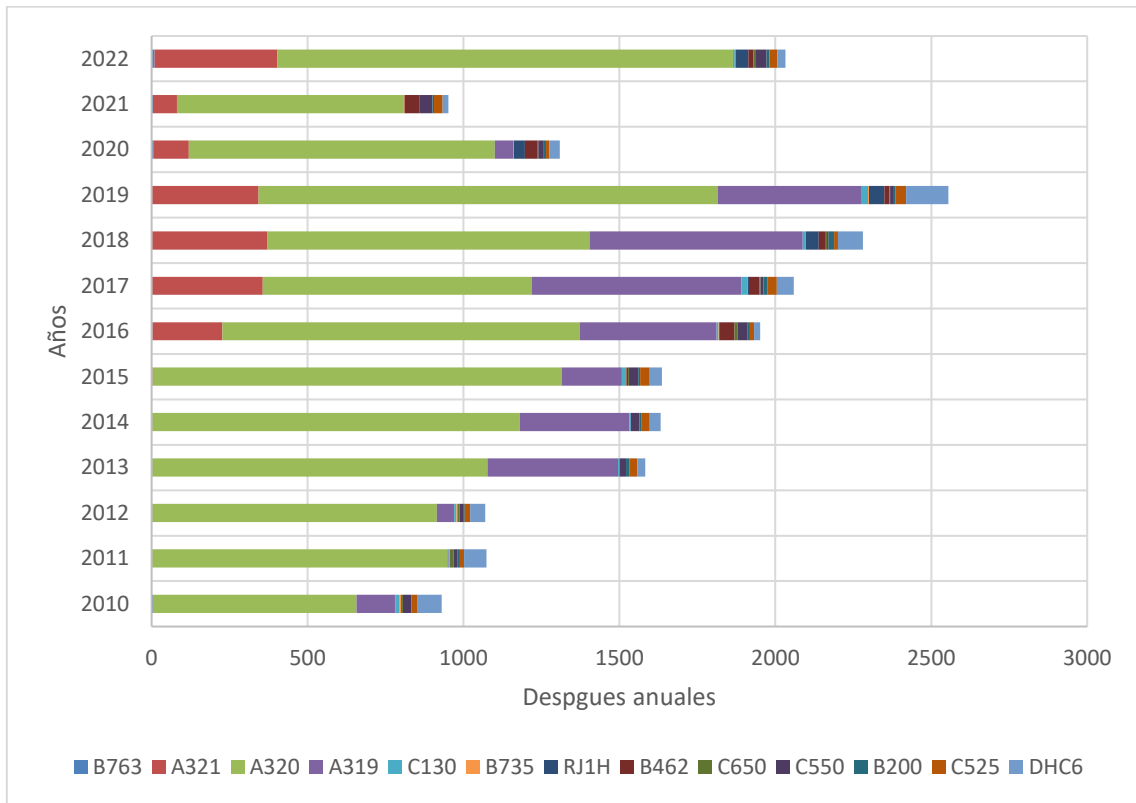


Figura 67. Despegues anuales Aeródromo Balmaceda

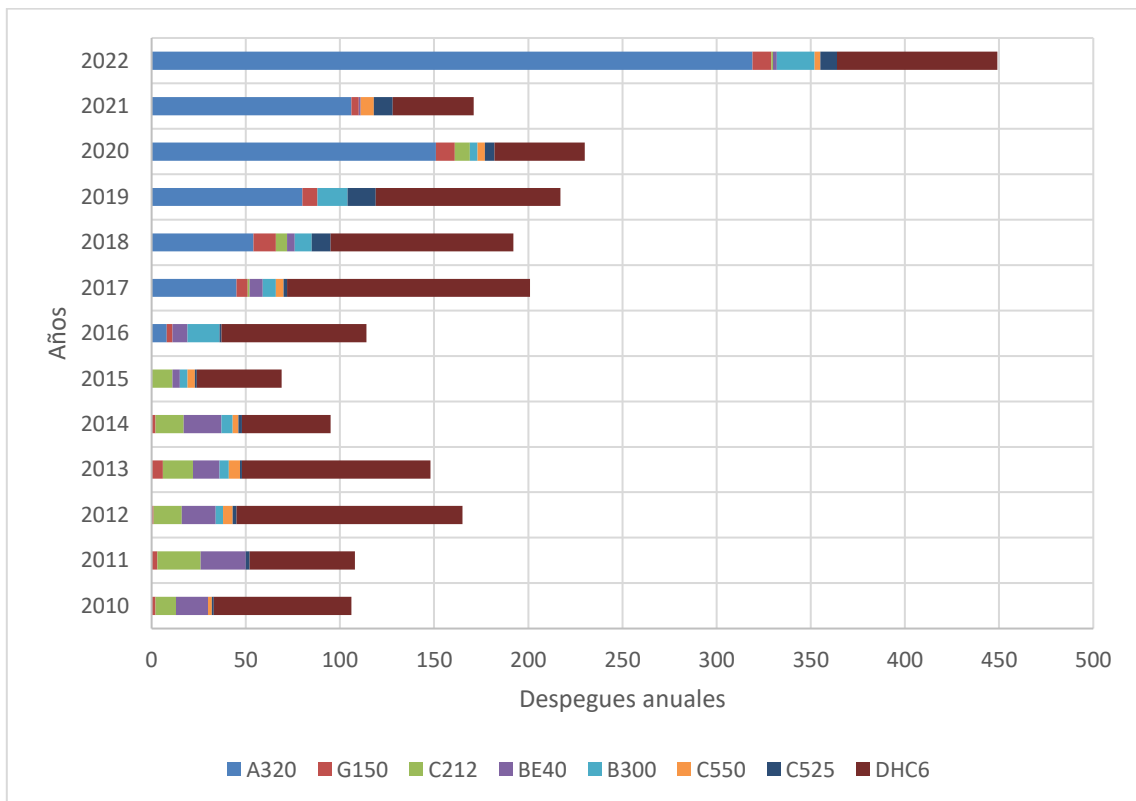


Figura 68. Despegues anuales Aeródromo Tte. Julio Gallardo

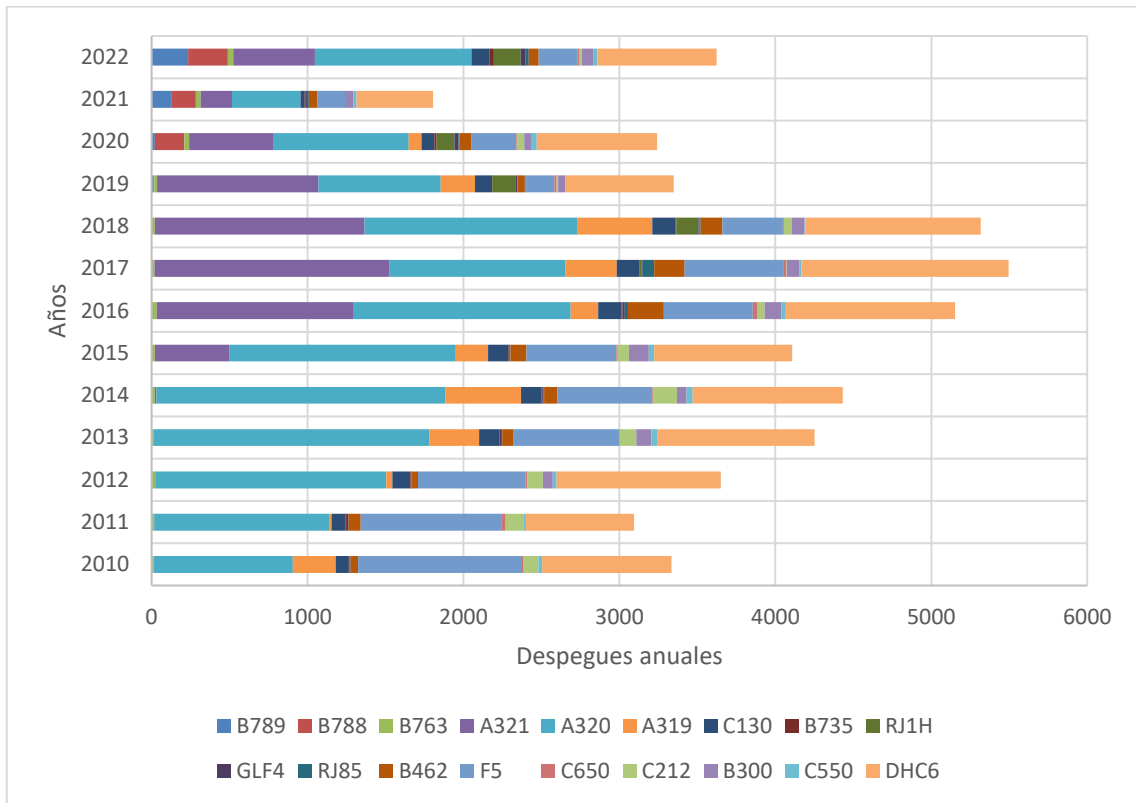


Figura 69. Despegues anuales Aeropuerto Presidente Carlos Ibáñez del Campo, Pista 07-25.

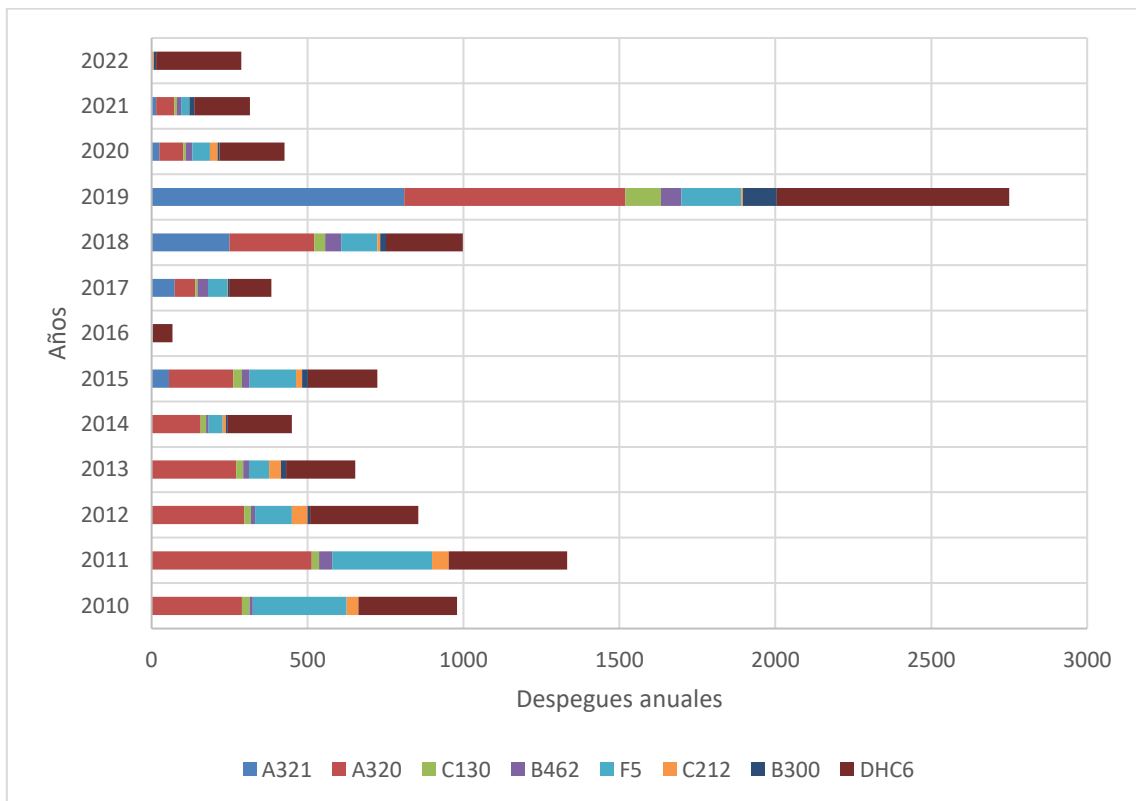


Figura 70. Despegues anuales Aeropuerto Presidente Carlos Ibáñez del Campo, Pista 12-30.

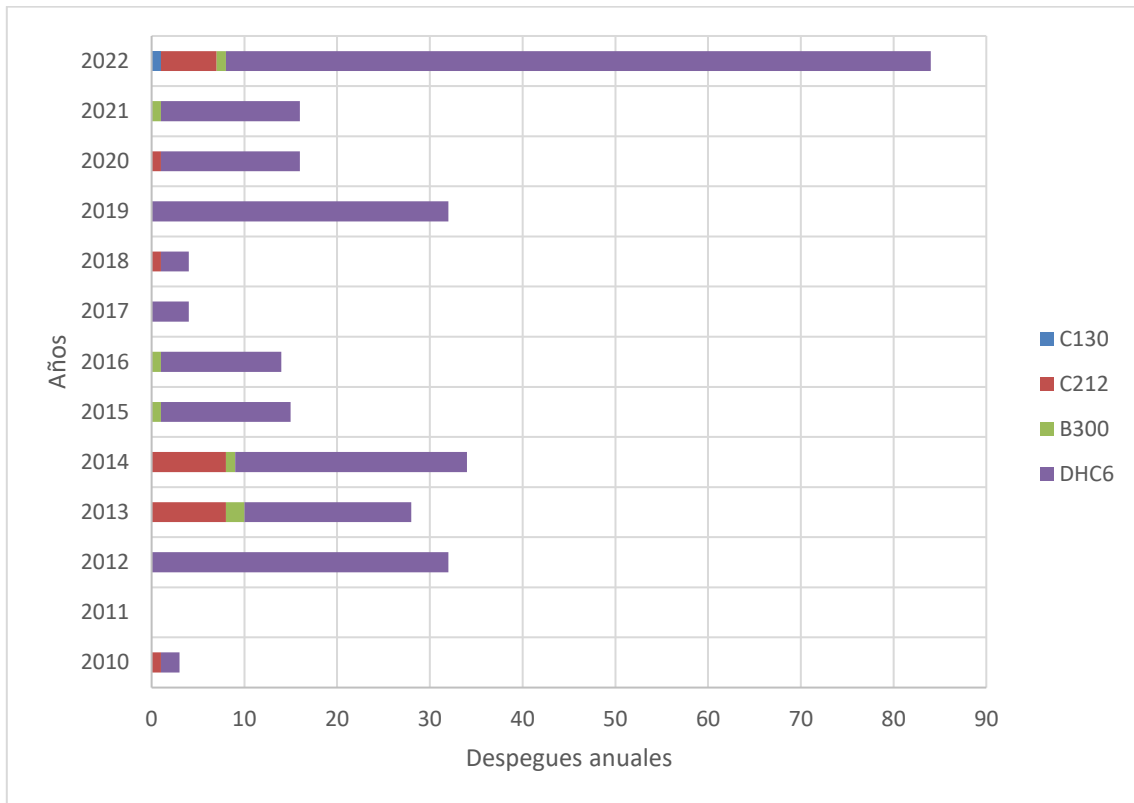


Figura 71. Despegues anuales Aeropuerto Presidente Carlos Ibáñez del Campo, Pista 01-19.

B. Anexo 2

A continuación, se presentan los planos esquemáticos de los 17 aeropuertos de la Red Primaria, elaborados a partir de la información contenida en los informes técnicos proporcionados por IDOM y FAIC. En términos generales, las zonas modeladas en todos los aeropuertos corresponden a las pistas, específicamente a los sectores por donde circulan las aeronaves.

No obstante, en aquellos aeropuertos donde se disponía de información desagregada por unidad muestral, se incorporaron adicionalmente los sectores considerados más críticos, tales como las secciones laterales de las pistas en conexión con las calles de rodaje, con el objetivo de representar de forma más detallada las condiciones de operación del pavimento.

Para el caso del aeropuerto de Chacalluta, se tiene que la pista central está compuesta por las secciones PI-1, PI-3 y PI-4, según la nomenclatura definida en los informes técnicos. El esquema de seccionamiento adoptado para este aeropuerto se presenta en la Figura 72.

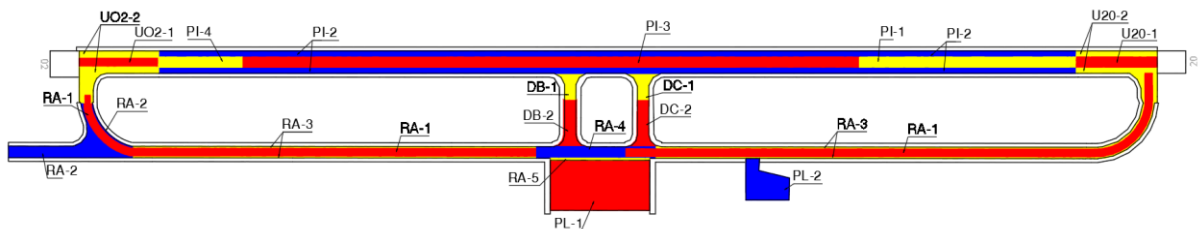


Figura 72. Plano esquemático secciones del aeropuerto Chacalluta.

Para el aeropuerto Diego Aracena, la sección central de la pista está compuesta por las secciones PI-1, PI-3, PI-5, PI-6 y PI-7 como se observa en la Figura 73.

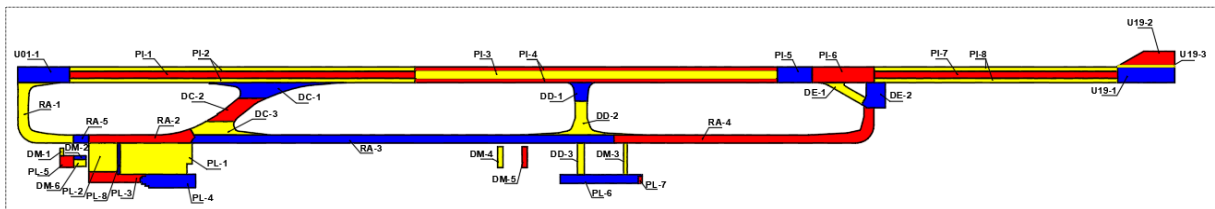


Figura 73. Plano esquemático secciones del aeropuerto Diego Aracena.

Para el aeródromo El Loa, la sección central de la pista está compuesta exclusivamente PI-1 como se observa en la Figura 74.

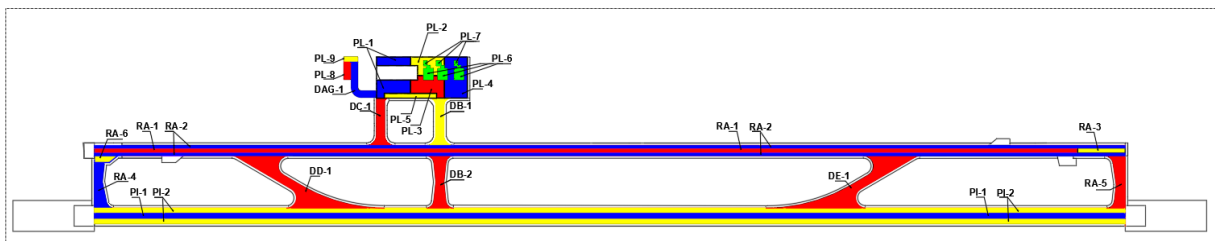


Figura 74. Plano esquemático secciones del aeródromo El Loa.

Para el aeropuerto Andrés Sabella, se dispone de información desagregada por unidad muestral, por lo que el análisis considera la pista de dicho aeropuerto diferenciada en una franja central y en secciones laterales. La franja central comprende las secciones PI-1, PI-3, PI-5, PI-7 y PI-9, mientras que las secciones laterales, correspondientes a las zonas en conexión con las calles de rodaje, incluyen las secciones PI-2, PI-4 y PI-7 como se aprecia en la Figura 75.

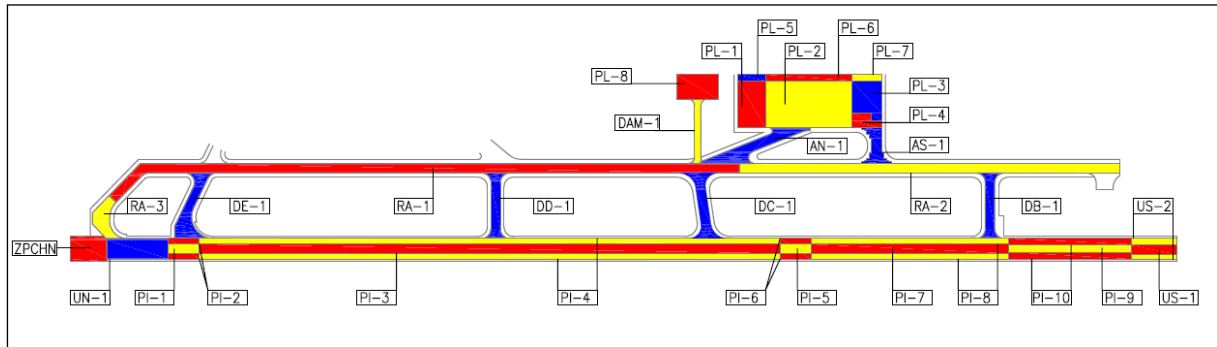


Figura 75. Plano esquemático secciones del aeropuerto Andrés Sabella.

Para el aeródromo Desierto de Atacama, se tiene que la pista central esta únicamente conformada por la sección central PI-1 como se muestra en la Figura 76.

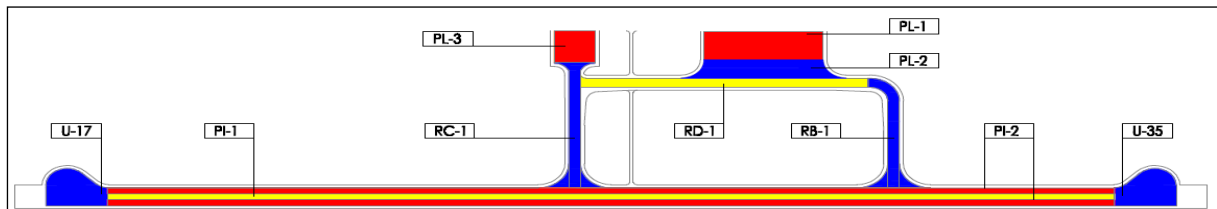


Figura 76. Plano esquemático secciones del aeródromo Desierto de Atacama.

Para el aeropuerto Mataverí, se tiene que la pista central está conformada por las secciones PI-1, PI-3, PI-5 y PI-7 como se aprecia en la Figura 77.

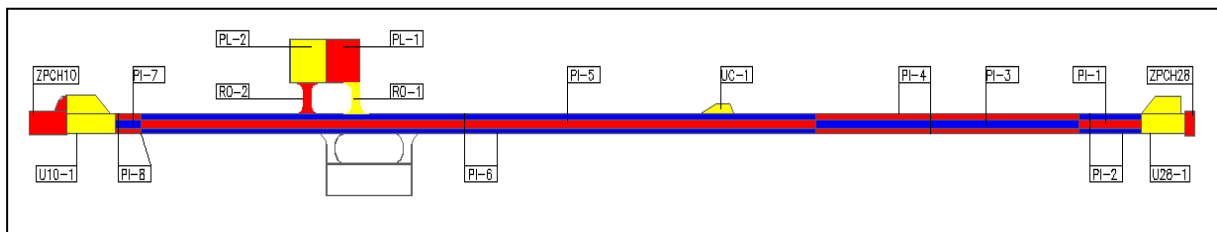


Figura 77. Plano esquemático secciones del Aeropuerto Mataverí.

Para el aeropuerto Arturo Merino Benítez, se consideran dos pistas operativas. En el caso de la pista 17R-35L, la franja central se encuentra compuesta por las secciones PIW-1, PIW-3, PIW-5 y PIW-7. Por su parte, en la pista 17L-35R, la franja central está conformada por las secciones PIE-1, PIE-3, PIE-5, PIE-7 y PIE-9, según la nomenclatura definida en los informes técnicos.

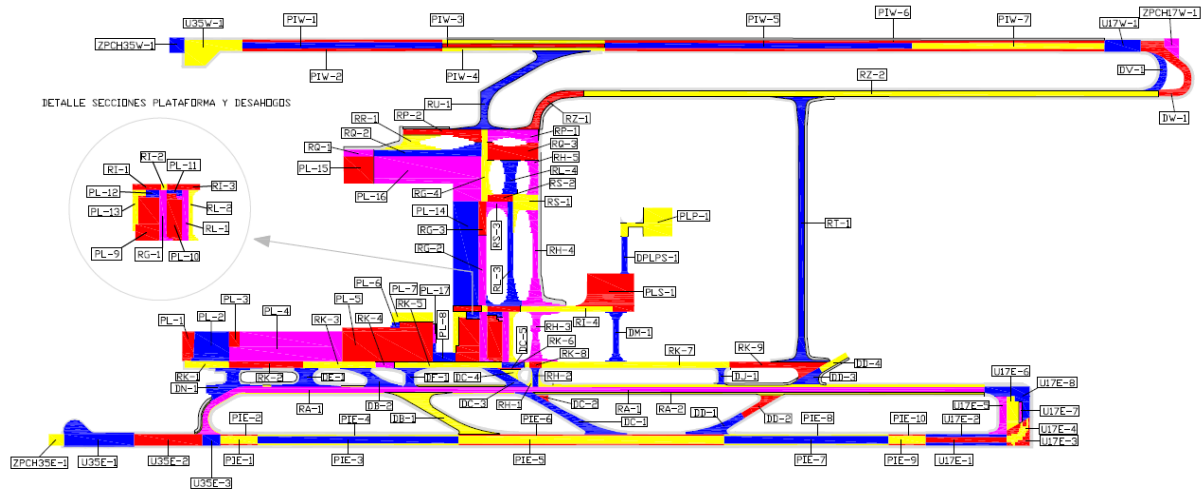


Figura 78. Plano esquemático secciones del Aeropuerto Arturo Merino Benítez.

Para el caso del aeródromo Carriel Sur, la franja central de la pista está compuesta únicamente por PI-1 como se aprecia en la Figura 79.

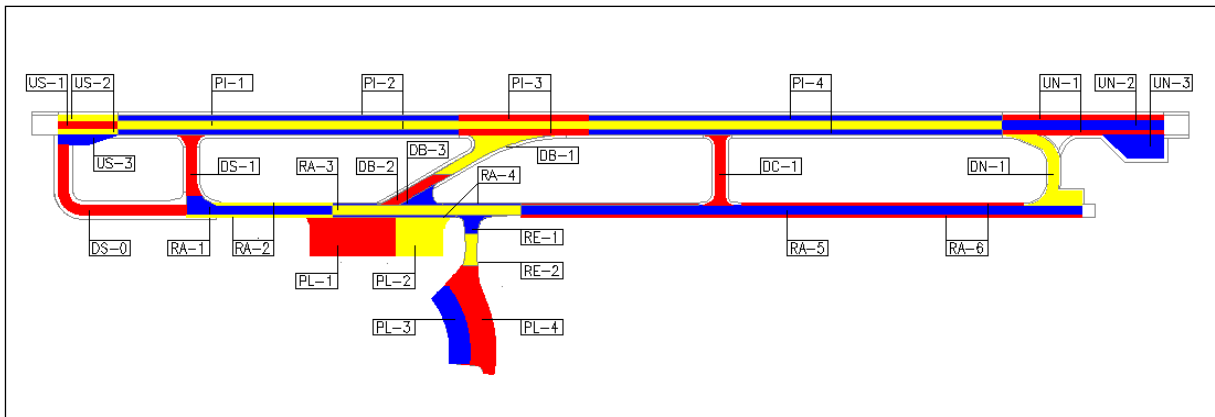


Figura 79. Plano esquemático secciones del aeródromo Carriel Sur.

En el caso del aeródromo La Araucanía, la pista central esta compuesta únicamente por la sección PI-1 como se muestra en la Figura 80.

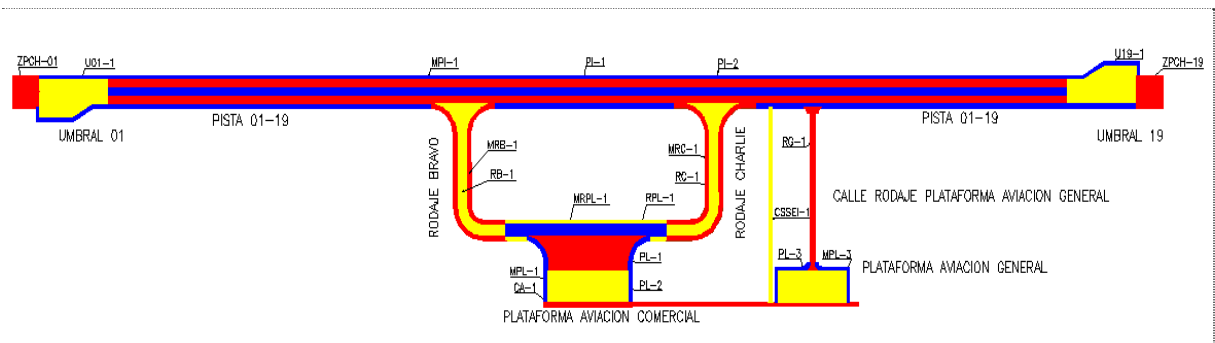


Figura 80. Plano esquemático secciones del aeródromo La Araucanía.

Para el aeródromo Pichoy, la pista central está compuesta por las secciones PI-1 y PI-3 como se muestra en la Figura 81.

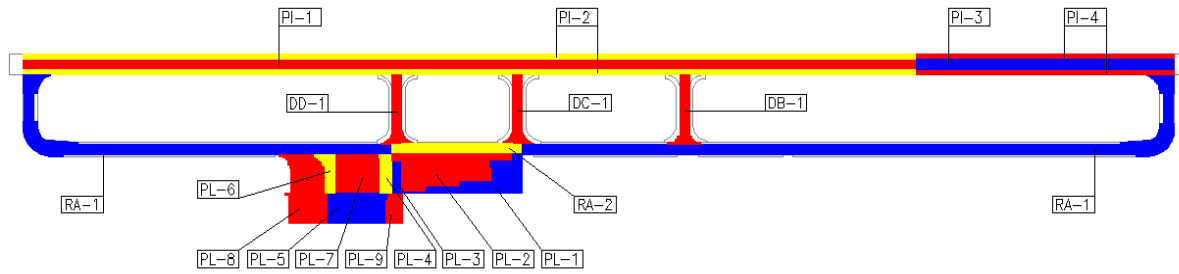


Figura 83. Plano esquemático secciones del aeropuerto El Tepual.

Para el aeródromo Mocopulli, la pista central está compuesta únicamente por la sección PI-1 como se observa en la Figura 84.

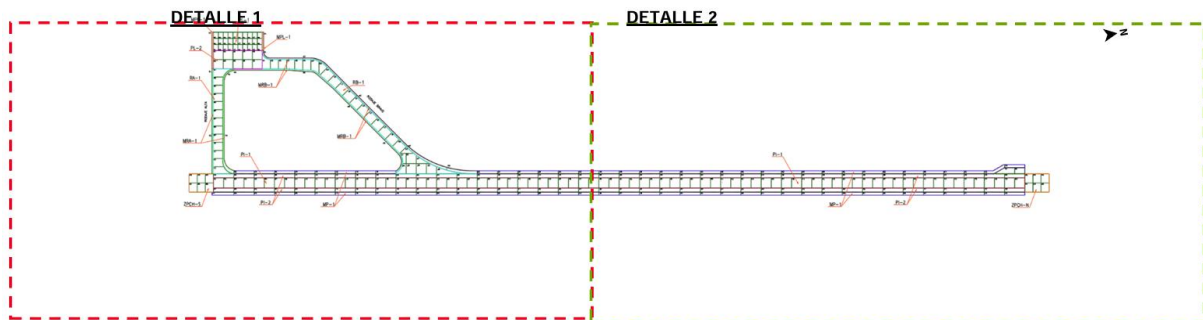


Figura 84. Plano esquemático secciones del aeródromo Mocopulli.

Para el aeródromo de Balmaceda, pista central está compuesta por las secciones PI-1 y PI-3 como se aprecia en la Figura 85.

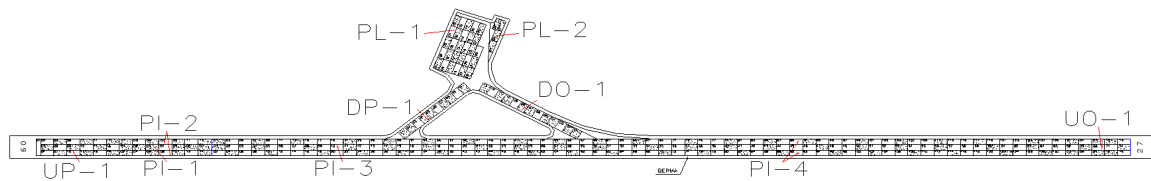


Figura 85. Plano esquemático secciones del aeródromo Balmaceda.

Para el aeródromo Teniente Julio Gallardo, la pista central está compuesta únicamente por la sección PI-1 como se muestra en la Figura 86.

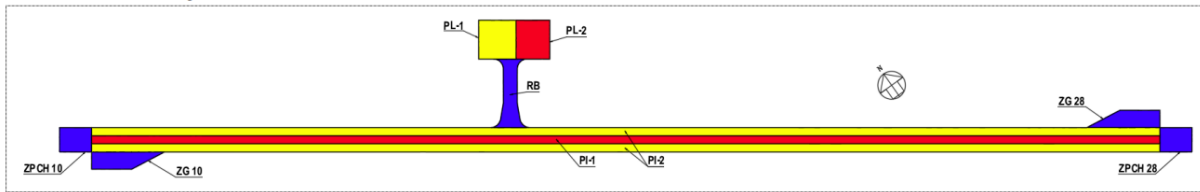


Figura 86. Plano esquemático secciones del aeródromo Teniente Julio Gallardo.

Para el aeropuerto Presidente Carlos Ibáñez del Campo, se consideran tres pistas operativas. En el caso de la pista 07–25, la franja central está compuesta por las secciones PI-1, PI-3, PI-5, PI-7 y PI-9. Para la pista 12–30, la franja central corresponde a las secciones PIC-1 y PIC-3, mientras que para la pista 01–19, la franja central se encuentra conformada por las secciones PID-1, PID-3 y PID-4, de acuerdo con la nomenclatura definida en los informes técnicos disponibles.

Figura 2.15. Secciones Airside – Auscultación FAIC 2014.²²

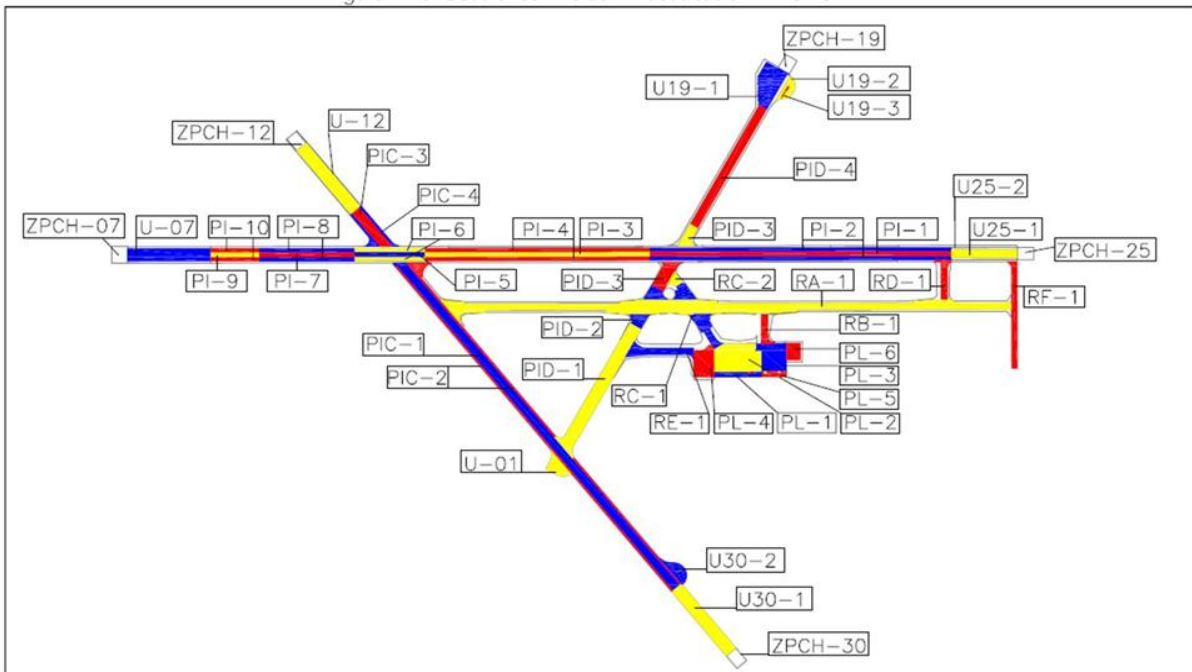


Figura 87. Plano esquemático secciones Aeropuerto Presidente Carlos Ibáñez del Campo.



C. Anexo 3

A continuación, se presenta el tráfico aéreo corregido con P/C ratio obteniendo así, las siguientes pasadas efectivas para cada aeropuerto.

Tabla 80. Tráfico aéreo Chacalluta considerando corrección con P/C ratio.

Tráfico Aéreo Chacalluta considerando corrección con Pass To Coverage Ratio									
Aeronave	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
A320	1412	914	645	481	696	956	702	560	937
A319	519	547	681	733	740	550	68	0	0
A321	5	132	420	599	535	626	210	143	447
B732	0	1	0	1	3	2	1	0	0
A318	0	0	0	0	0	0	0	0	0
C550	26	19	23	15	16	11	14	20	13
CRJ2	1	0	0	119	39	0	0	0	0
B733	3	1	3	3	1	6	10	0	0
LJ45	1	1	6	13	12	10	8	15	9
LJ60	2	4	2	5	5	4	17	14	11
G150	4	6	6	9	8	5	8	4	7
CN35	7	3	0	0	3	1	6	4	1
GLF4	2	4	6	8	9	7	2	4	2
C212	3	2	3	3	1	7	4	2	5
C650	1	3	3	3	1	4	2	0	1
DHC7	1	1	1	1	1	1	0	0	1
C56X	2	2	2	5	7	3	3	2	0
C680	6	5	6	4	1	3	6	4	5
LJ35	4	3	2	3	0	0	4	2	2
DC3T	3	1	2	4	4	4	2	0	4
DC3	2	4	3	3	3	4	3	1	5
Total	2004	1650	1816	2013	2085	2204	1070	775	1450



Tabla 81. Tráfico aéreo Diego Aracena considerando corrección con P/C ratio.

Tráfico Aéreo Diego Aracena considerando corrección con Pass To Coverage Ratio									
Aeronave	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
A320	2781	2028	1353	876	1121	1161	1215	1179	1678
A29	541	712	649	708	763	906	1102	801	1247
F16	484	399	505	329	353	346	396	346	301
A321	11	256	684	826	815	1167	794	793	1410
A319	780	804	715	763	742	645	103	0	0
B732	5	21	4	35	38	8	0	0	0
C212	112	127	112	152	127	171	131	128	142
A318	0	0	0	0	0	0	0	0	0
CRJ2	2	84	95	297	240	108	12	1	1
B733	80	38	36	33	36	18	35	26	0
BE20	39	31	32	37	44	43	26	30	64
F5	0	0	71	0	0	0	84	0	94
C295	103	82	86	51	25	23	5	12	17
500S	24	40	27	44	14	39	60	50	88
C550	24	20	24	20	18	12	12	24	20
RJ85	1	33	66	76	35	54	80	32	127
C130	22	21	28	30	31	28	17	12	21
B763	23	14	27	17	32	20	30	23	31
C525	35	43	3	6	3	27	1	2	2
DHC6	60	73	37	8	3	19	0	0	2
GLF4	13	13	17	27	17	15	24	25	20
K35E	9	53	53	43	27	9	0	2	28
B200	8	12	9	7	7	14	11	9	17
CN35	19	19	10	4	12	1	2	17	2
LJ35	28	23	12	5	0	3	4	0	1
B462	1	30	0	0	0	8	35	55	35
B735	2	5	12	19	5	7	21	18	48
RJ1H	0	0	0	0	0	0	59	74	19
E55P	2	9	9	8	5	8	9	9	10
G150	2	2	4	3	16	7	8	8	8
E190	0	0	0	0	0	4	33	20	61
Total	5211	4991	4682	4423	4530	4874	4309	3696	5494



Tabla 82. Tráfico aéreo El Loa considerando corrección con P/C ratio.

Tráfico Aéreo El Loa considerando corrección con Pass To Coverage Ratio									
Aeronave	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
B767	2697	1535	919	1325	1937	2183	1947	1892	2308
IL76	30	1282	2092	2089	2126	2739	950	727	1814
B762	910	861	810	856	1001	888	141	0	0
B763	19	30	13	6	36	33	0	0	0
K35E	112	18	49	40	62	175	5	0	0
B707	0	0	0	0	0	0	0	0	0
B752	19	14	12	19	7	19	44	56	45
A321	31	25	26	19	27	13	18	16	17
B738	12	6	8	4	6	10	10	9	25
A320	7	10	7	12	8	4	18	6	7
A319	0	0	0	18	58	0	0	0	0
MD83	12	3	4	2	3	5	3	1	1
C130	2	0	0	3	3	1	11	3	4
B737	5	2	2	4	1	2	1	4	1
B732	0	1	0	12	0	1	0	2	4
B733	0	0	0	0	0	0	13	18	1
Total	3856	3787	3943	4409	5276	6072	3160	2736	4226

Tabla 83. Tráfico aéreo Andrés Sabella considerando corrección con P/C ratio.

Tráfico Aéreo Andrés Sabella considerando corrección con Pass To Coverage Ratio												
Aeronave	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
A320	1165	1520	1786	1921	1647	1217	1082	984	951	1103	1083	1111
F16	237	242	258	234	202	197	208	219	205	154	114	201
A319	39	280	621	754	690	582	558	528	425	90	0	0
B732	973	403	185	33	16	12	1	0	1	0	0	1
A321	0	0	0	0	100	317	270	557	742	251	176	619
A318	404	276	15	0	0	0	0	0	0	0	0	0
B733	156	187	106	71	41	21	24	13	10	10	11	1
F5	0	51	49	53	36	1	0	0	24	0	27	11
C212	36	5	6	6	8	3	4	7	4	5	4	5
CRJ2	0	10	4	0	0	0	51	16	0	0	0	0
BE20	4	5	6	9	6	7	9	10	8	9	9	8
B763	2	8	13	11	10	8	8	22	34	19	13	39
C130	11	7	8	14	6	13	16	21	13	7	11	12
C550	5	4	5	5	5	4	5	3	4	3	6	6
Total	3032	2998	3063	3110	2766	2381	2237	2380	2422	1652	1455	2012

Tabla 84. Tráfico aéreo Desierto de Atacama considerando corrección con P/C ratio.

Tráfico Aéreo Desierto de Atacama considerando corrección con Pass To Coverage Ratio											
Aeronave	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
A320	984	1288	1087	650	426	437	619	548	387	630	777
A319	337	699	791	423	476	442	476	415	71	0	0
B732	453	213	2	1	1	2	2	3	0	0	0
A321	0	0	6	121	313	372	339	506	116	104	438
A318	242	21	0	0	0	0	0	0	0	0	0
B733	233	67	3	15	0	0	3	2	5	1	0
CRJ2	0	0	0	0	0	137	26	0	0	0	0
C212	8	11	5	15	5	14	13	15	21	4	8
DHC6	6	11	11	25	5	7	4	5	2	3	7
C550	9	7	4	9	7	8	3	7	5	3	9
BE20	10	12	7	12	7	10	9	8	3	1	9
CN35	23	11	9	15	10	1	6	0	7	1	1
B200	7	15	10	22	8	4	3	4	3	3	7
GLF4	7	6	2	6	2	1	19	13	8	5	12
Total	2319	2360	1936	1315	1260	1435	1521	1527	628	754	1267

Tabla 85. Tráfico aéreo La Araucanía considerando corrección con P/C ratio.

Tráfico Aéreo La Araucanía considerando corrección con Pass To Coverage Ratio										
Aeronave	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	
A320	250	750	485	502	747	816	616	735	1081	
A321	2	62	384	496	504	646	214	115	454	
A319	257	402	453	510	536	478	105	0	0	
B200	13	30	37	32	32	19	11	12	30	
BE20	6	13	8	29	30	39	14	15	16	
C550	4	6	7	8	4	6	10	14	11	
AT8T	0	0	0	0	1	5	16	90	9	
C525	1	4	3	3	4	8	4	3	8	
DHC6	2	18	4	6	13	6	3	4	4	
GLF4	0	3	6	6	8	7	9	4	6	
B763	0	2	1	1	3	0	9	9	23	
C551	3	12	6	1	5	2	2	0	0	
C680	2	8	8	5	0	2	2	0	2	
C130	0	5	1	2	3	2	2	4	8	
B733	0	8	5	3	5	1	3	11	2	
E55P	2	3	4	4	2	2	2	1	5	
G150	0	3	3	3	1	5	2	4	1	
C650	0	1	3	5	0	2	5	3	2	
B735	0	2	1	2	1	5	2	1	15	
G280	0	0	0	5	5	2	3	2	1	
D228	1	1	1	1	1	2	2	3	3	
Total	541	1332	1417	1622	1904	2055	1035	1030	1681	



Tabla 86. Tráfico aéreo Mataverí considerando corrección con P/C ratio.

Tráfico Aéreo Mataverí considerando corrección con Pass To Coverage Ratio									
Aeronave	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
B763	329	182	7	3	23	2	3	2	3
B789	0	53	214	235	222	228	101	42	52
B788	0	78	73	80	61	107	37	0	1
G150	8	12	6	8	10	12	10	15	15
B772	0	0	0	0	45	71	0	0	0
B752	5	6	9	5	9	4	3	0	4
GLF4	1	1	2	4	4	1	5	4	4
A343	3	3	2	4	4	3	1	0	0
GLEX	1	1	1	2	0	2	1	0	0
C130	0	0	3	1	0	1	1	0	1
FA7X	2	0	0	2	2	2	1	0	0
CL60	2	2	1	1	2	1	0	0	0
F2TH	2	1	1	0	1	1	0	0	0
C750	1	0	2	0	1	0	0	0	1
B737	1	0	1	0	2	0	0	0	1
DA90	0	0	0	0	0	0	2	1	1
Total	355	338	320	344	385	435	164	64	83



Tabla 87. Tráfico aéreo Carriel Sur considerando corrección con P/C ratio.

Tráfico Aéreo Carriel Sur considerando corrección con Pass To Coverage Ratio										
Aeronave	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
A320	1684	1729	1525	1278	1817	2263	2463	1724	1965	2685
A319	1456	1684	755	776	776	737	528	68	0	1
A321	0	9	312	522	384	784	1312	559	412	1815
AT8T	59	227	402	229	321	329	414	841	267	1080
B732	670	9	1	0	1	3	0	0	0	0
A318	48	0	0	0	0	0	0	0	0	0
B733	71	110	54	4	346	21	9	9	3	0
C295	20	23	26	25	40	49	32	76	49	71
DHC6	17	13	12	20	12	12	14	20	7	17
C550	22	12	13	9	13	15	23	21	26	17
B200	16	34	27	26	15	12	16	15	17	33
BE20	12	13	21	9	19	25	30	15	13	13
MU2	11	11	23	52	25	25	7	0	0	0
C130	5	5	4	0	23	1	7	8	17	1
C525	18	15	20	8	7	2	9	9	3	5
GLF4	10	4	4	7	5	9	21	37	11	32
B737	0	0	0	0	104	3	0	0	0	0
BE40	2	3	1	1	6	17	23	25	5	2
C650	0	0	2	11	12	7	3	1	1	4
CN35	7	3	2	9	2	1	0	4	7	4
C212	0	2	9	1	5	4	6	11	4	6
B735	11	1	6	1	6	5	12	10	7	2
DC10	3	1	0	0	0	0	29	0	0	0
CL60	0	1	1	3	8	11	6	21	9	8
Total	4144	3909	3220	2992	3947	4336	4965	3474	2821	5796

Tabla 88. Tráfico aéreo Mocopulli considerando corrección con P/C ratio.

Tráfico Aéreo Mocopulli considerando corrección con Pass To Coverage Ratio						
Aeronave	2017	2018	2019	2020	2021	2022
A320	187	185	186	56	221	432
C525	19	19	26	3	3	16
DHC6	27	15	10	15	6	4
C550	18	9	4	5	8	6
BE20	6	6	7	5	2	3
B200	4	2	5	3	2	4
G150	1	2	2	2	3	1
BE40	1	0	4	2	3	2
Total	262	238	243	90	247	468



Tabla 89. Tráfico aéreo Pichoy considerando corrección con P/C ratio.

Tráfico Aéreo Pichoy considerando corrección con Pass To Coverage Ratio										
Aeronave	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
A320	8	115	285	261	248	445	725	315	373	841
A319	588	598	262	341	379	319	288	107	0	0
A318	111	0	0	0	0	0	0	0	0	0
C550	13	8	6	8	2	2	4	10	8	8
B200	8	15	13	6	6	8	8	3	4	7
C551	5	5	14	9	11	6	13	5	0	0
C525	8	2	3	2	1	4	2	3	2	8
BE20	6	9	4	1	9	6	3	5	7	2
B732	37	0	0	0	0	2	0	0	0	0
DHC6	1	9	7	3	5	1	4	4	4	5
G150	7	3	2	2	2	1	2	10	2	1
C650	0	0	2	6	2	1	0	1	1	0
AT8T	0	1	1	0	1	0	0	2	1	27
GLF4	0	2	1	2	0	3	4	4	3	2
C750	3	0	0	1	0	0	1	0	0	2
B735	4	3	2	1	1	1	2	0	0	1
C680	1	2	2	1	1	0	2	3	1	0
CL60	0	0	0	1	2	1	1	3	4	3
Total	799	773	604	644	671	800	1057	473	411	907

Tabla 90. Tráfico aéreo Cañal Bajo considerando corrección con P/C ratio.

Tráfico Aéreo Cañal Bajo considerando corrección con Pass To Coverage Ratio													
Aeronave	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
A320	0	0	0	0	19	242	232	120	127	179	134	180	522
A319	63	36	37	403	376	92	35	79	272	282	51	0	0
C525	88	242	52	124	13	36	22	46	36	36	18	16	72
A318	499	504	473	110	0	0	0	0	0	0	0	0	0
DHC6	4	8	8	6	19	22	15	31	51	67	62	31	36
C550	5	3	3	8	7	6	6	3	3	4	10	10	14
B200	2	4	4	6	9	14	10	11	7	10	3	4	13
BE20	1	2	5	3	5	4	8	5	10	18	12	3	10
BE30	6	6	6	7	2	5	7	3	4	2	2	0	0
Total	668	805	588	667	451	421	335	297	509	598	291	245	668



Tabla 91. Tráfico aéreo El Tepual considerando corrección con P/C ratio.

Tráfico Aéreo El Tepual considerando corrección con Pass To Coverage Ratio													
Aeronave	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
A320	668	1028	935	1339	1358	1267	844	490	665	688	629	651	1121
DHC6	174	217	274	249	191	142	208	227	168	186	162	137	198
A321	0	0	0	0	6	286	692	857	712	799	281	199	504
C525	59	117	52	96	74	82	61	84	80	86	84	85	90
A319	151	15	54	542	594	318	389	503	402	324	65	0	0
B732	508	546	595	155	0	0	1	0	0	0	0	0	0
A318	376	157	220	12	0	0	0	0	0	0	0	0	0
C550	8	7	6	9	7	8	11	7	4	4	5	6	7
B733	7	8	7	12	9	9	12	84	13	9	13	6	1
B200	1	2	6	4	7	9	10	8	8	10	8	4	10
BE20	1	2	5	4	4	11	4	10	9	10	11	3	6
C130	13	5	3	3	5	4	16	12	8	15	7	7	10
B763	4	8	6	3	6	9	11	9	12	13	9	11	10
C295	3	6	6	8	5	6	6	7	10	5	4	2	2
GLF4	4	3	4	3	2	2	4	4	6	5	11	6	9
F16	0	1	0	0	2	11	5	2	2	3	0	0	0
C212	4	4	0	1	1	4	0	1	4	2	1	2	3
C551	0	0	0	1	2	3	2	5	6	3	2	0	0
B735	5	2	4	3	1	1	2	4	2	5	5	2	13
G150	2	2	1	1	2	2	2	1	2	2	1	1	1
BE40	1	2	1	1	0	0	1	1	1	4	4	1	1
C650	2	6	2	0	0	2	2	2	0	0	0	1	0
Total	1991	2139	2182	2446	2277	2177	2283	2319	2112	2172	1301	1125	1986



Tabla 92. Tráfico aéreo Balmaceda considerando corrección con P/C ratio.

Tráfico Aéreo Balmaceda considerando corrección con Pass To Coverage Ratio													
Aeronave	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
A320	183	266	257	303	332	369	322	243	290	413	276	204	410
A319	35	1	15	118	99	54	123	188	192	129	17	0	0
B732	154	192	179	18	0	0	1	0	0	0	0	0	0
A321	0	0	0	0	0	1	67	106	111	102	34	23	118
DHC6	9	8	6	3	4	5	2	6	9	16	4	2	3
A318	75	16	53	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
C525	2	1	1	2	2	3	1	3	1	3	1	2	2
C550	2	1	1	2	2	3	3	1	0	1	2	4	3
B462	0	0	0	0	0	1	13	9	6	4	10	13	5
RJ1H	0	0	0	0	0	0	0	1	11	13	10	0	11
C551	0	0	0	0	0	1	1	4	5	2	3	0	0
C130	3	0	1	1	1	3	1	4	1	5	0	0	1
B200	0	1	0	1	1	1	1	2	2	1	1	1	1
BE20	0	0	1	1	1	1	2	2	1	2	1	1	0
Total	463	487	515	448	443	440	537	569	631	692	357	249	554



Tabla 93. Tráfico aéreo Presidente Carlos Ibáñez del Campo, Pista 07-25 considerando corrección con P/C ratio.

Tráfico Aéreo Carlos Ibáñez del Campo considerando corrección con Pass To Coverage Ratio											
Aeronave	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
A320	1186	1414	1482	1162	1117	905	1090	627	696	350	803
DHC6	483	464	441	405	498	609	516	318	354	225	351
F5	336	333	297	281	279	310	189	92	141	87	121
A321	0	0	10	382	1007	1204	1077	827	431	161	419
A319	31	254	389	165	141	262	386	176	65	0	0
C130	61	68	70	70	80	76	80	55	44	14	62
B732	316	75	0	0	3	4	4	0	0	0	0
B462	30	49	59	72	160	135	98	32	53	38	45
B300	35	52	34	69	58	44	45	25	23	25	38
C212	44	49	71	33	20	2	23	5	22	0	9
B788	0	0	0	0	0	0	0	4	145	121	193
RJ1H	0	0	0	0	0	8	98	103	80	1	120
A318	119	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
B789	0	0	0	0	0	0	0	8	14	87	163
C550	11	16	17	16	13	6	2	0	16	9	12
B763	17	12	16	17	26	15	16	15	24	25	28
IL76	20	23	25	20	29	24	19	25	12	0	6
B733	10	15	16	13	19	10	7	11	16	13	0
C525	4	3	5	2	3	5	43	2	1	0	4
DHC7	8	10	10	13	14	14	15	9	5	0	2
C650	8	0	2	5	17	9	3	8	3	3	5
RJ85	0	1	4	2	14	53	5	1	4	9	16
C295	12	5	3	3	1	10	18	13	7	5	5
GLF4	2	8	5	2	9	5	4	8	15	6	18
G150	6	8	6	7	8	8	5	3	12	3	3
B200	1	5	5	4	3	6	9	2	5	2	12
B735	4	3	2	4	5	3	4	5	10	3	19
Total	2743	2868	2968	2747	3524	3727	3756	2375	2198	1185	2456



Tabla 94. Tráfico aéreo Presidente Carlos Ibáñez del Campo, Pista 12-30 considerando corrección con P/C ratio.

Tráfico Aéreo Carlos Ibáñez del Campo considerando corrección con Pass To Coverage Ratio													
Aeronave	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
DHC6	48	58	53	34	31	34	10	21	38	113	32	27	41
A320	81	144	83	76	44	58	0	19	76	199	22	16	0
F5	47	49	18	10	7	23	0	10	18	30	9	4	0
A321	0	0	0	0	0	17	0	22	74	241	7	4	0
A319	18	2	3	15	14	8	0	3	21	74	1	0	0
B732	28	36	22	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0
C130	5	5	4	5	4	6	0	1	7	24	2	2	0
B462	3	11	4	5	2	6	0	9	14	18	5	4	1
C212	4	6	6	4	1	2	0	0	1	1	3	0	0
RJ1H	0	0	0	0	0	0	0	1	14	41	6	0	1
B300	0	0	1	2	1	2	0	1	2	15	1	2	1
A318	20	10	13	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
C550	1	1	1	1	0	1	0	0	0	0	1	0	0
C525	0	1	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0
DHC7	1	1	0	0	0	1	0	0	1	3	0	0	0
C295	1	3	0	0	0	0	0	1	2	3	1	1	0
B733	1	1	0	1	0	2	0	1	2	2	3	0	0
B763	0	3	1	0	0	0	0	1	1	3	0	1	0
C551	0	0	0	0	0	0	0	0	1	2	1	0	0
Total	258	332	211	158	105	160	10	90	274	771	94	62	44

Tabla 95. Tráfico aéreo Presidente Carlos Ibáñez del Campo, Pista 01-19 considerando corrección con P/C ratio.

Tráfico Aéreo Carlos Ibáñez del Campo considerando corrección con Pass To Coverage Ratio													
Aeronave	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
DHC6	0	0	5	3	4	2	2	1	0	5	2	2	12
C212	0	0	0	2	2	0	0	0	0	0	0	0	2
E145	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0
E550	0	0	0	0	0	4	0	0	0	0	0	0	0
E190	0	0	0	0	0	0	0	0	4	0	0	0	0
F5	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0
B300	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Total	1	0	5	8	7	7	2	1	4	5	3	3	13

D. Anexo 4

A continuación, se presentan los modelos de deterioro desarrollados para los aeropuertos y aeródromos Desierto de Atacama, Carriel Sur, La Araucanía, Mocopulli, Cañal Bajo, Balmaceda y presidente Carlos Ibáñez del Campo, elaborados a partir de valores promedio de PCI por sección de pista. Para cada caso, se aplicaron ajustes mediante un modelo polinómico y modelo logarítmico, junto con sus correspondientes métricas de ajuste.

Las figuras incluidas en este anexo muestran la evolución del PCI en función de los despegues efectivos acumulados, mientras que las tablas asociadas resumen los indicadores estadísticos utilizados para evaluar el desempeño de cada modelo.

Aeródromo Desierto de Atacama

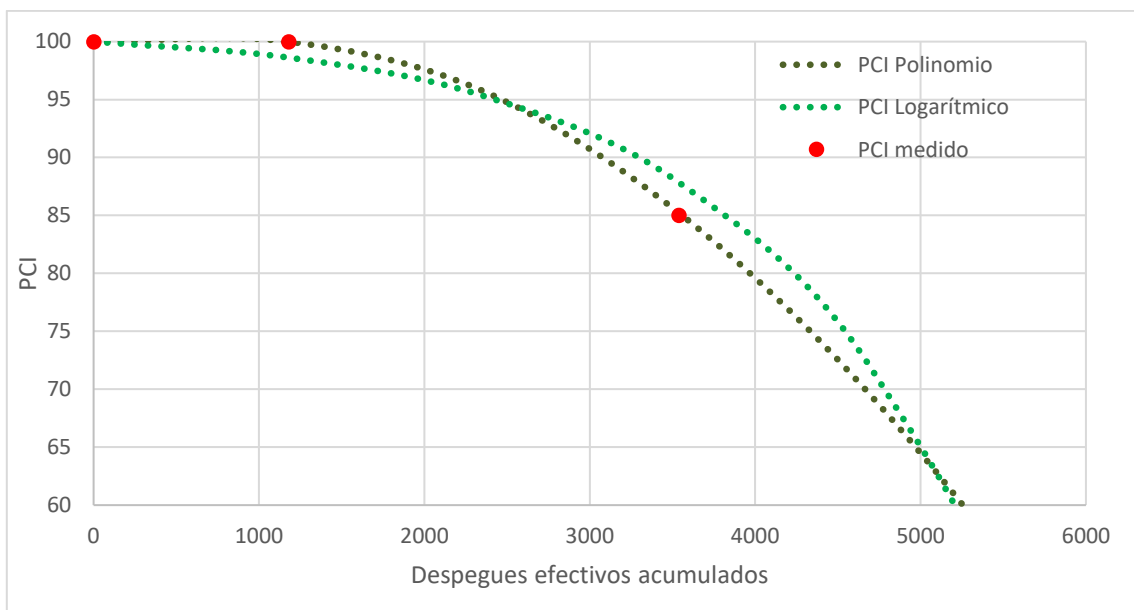


Figura 88. Curva de deterioro representativa del aeródromo Desierto de Atacama utilizando Ajuste Polinómico y Logarítmico.

Tabla 96. Métricas de ajuste para cada modelo de regresión en el aeródromo Desierto de Atacama.

Métricas		
	Polinomio	Logarítmico
R2	1.00	0.93
RMSE	0.13	1.83
MAE	0.08	1.41

Aeródromo Carriel Sur

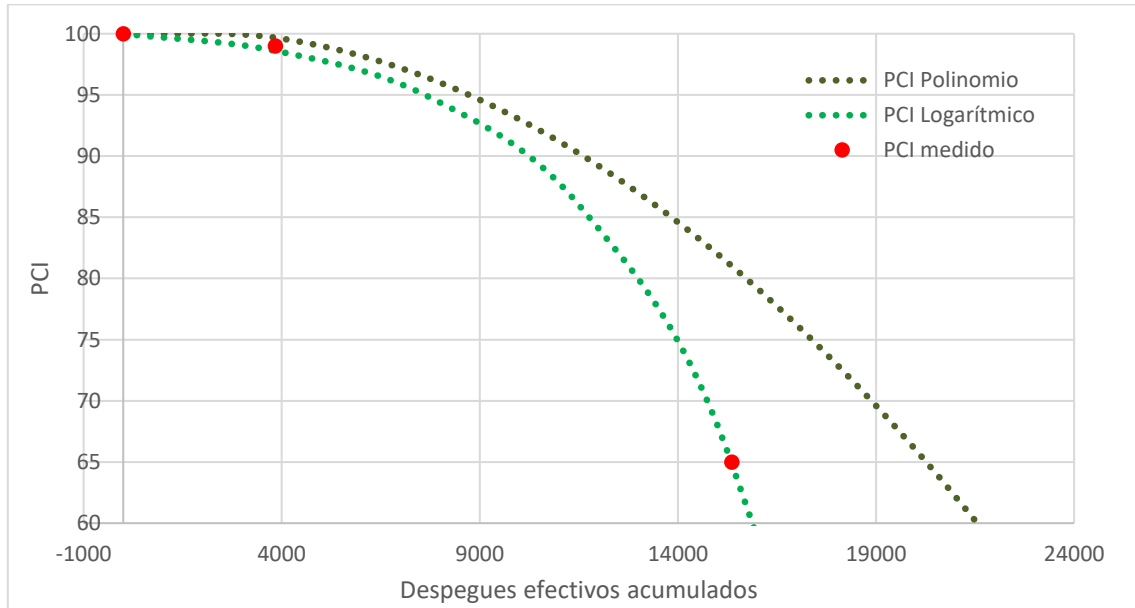


Figura 89. Curva de deterioro representativa del aeródromo Carriel Sur utilizando Ajuste Polinómico y Logarítmico.

Tabla 97. Métricas de ajuste para cada modelo de regresión en el aeródromo Carriel Sur.

Métricas		
	Polinomio	Logarítmico
R2	0.68	1.00
RMSE	9.26	0.24
MAE	5.57	0.18

La Araucanía

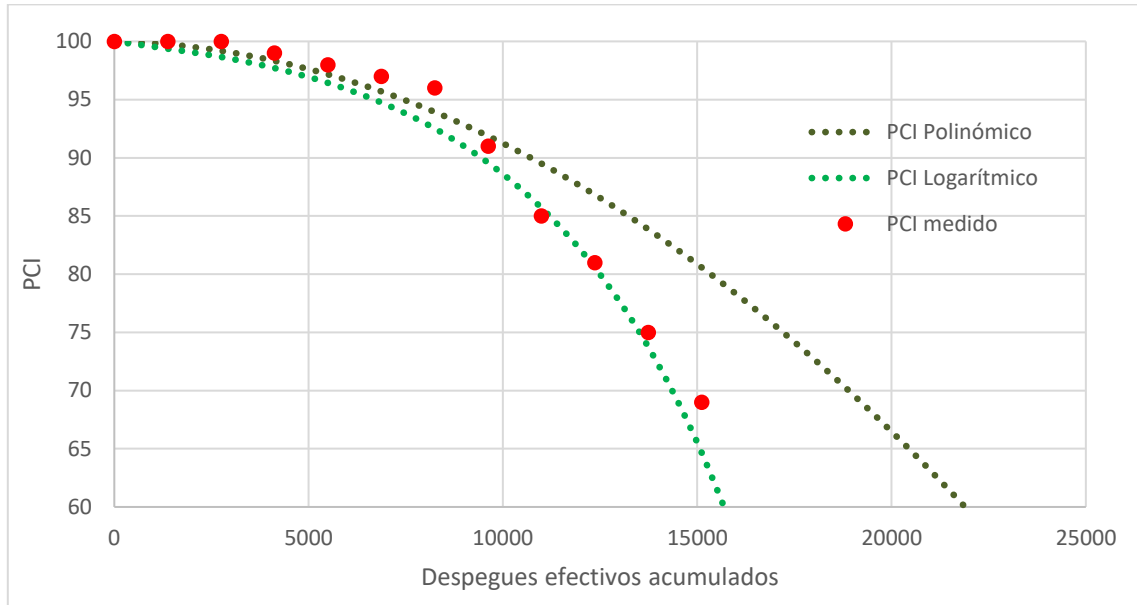


Figura 90. Curva de deterioro representativa del aeródromo La Araucanía utilizando Ajuste Polinómico y Logarítmico.

Tabla 98. Métricas de ajuste para cada modelo de regresión en el aeródromo La Araucanía.

Métricas		
	Polinomio	Logarítmico
R2	0.79	0.96
RMSE	4.79	1.96
MAE	3.13	1.55

Aeródromo Mocopulli

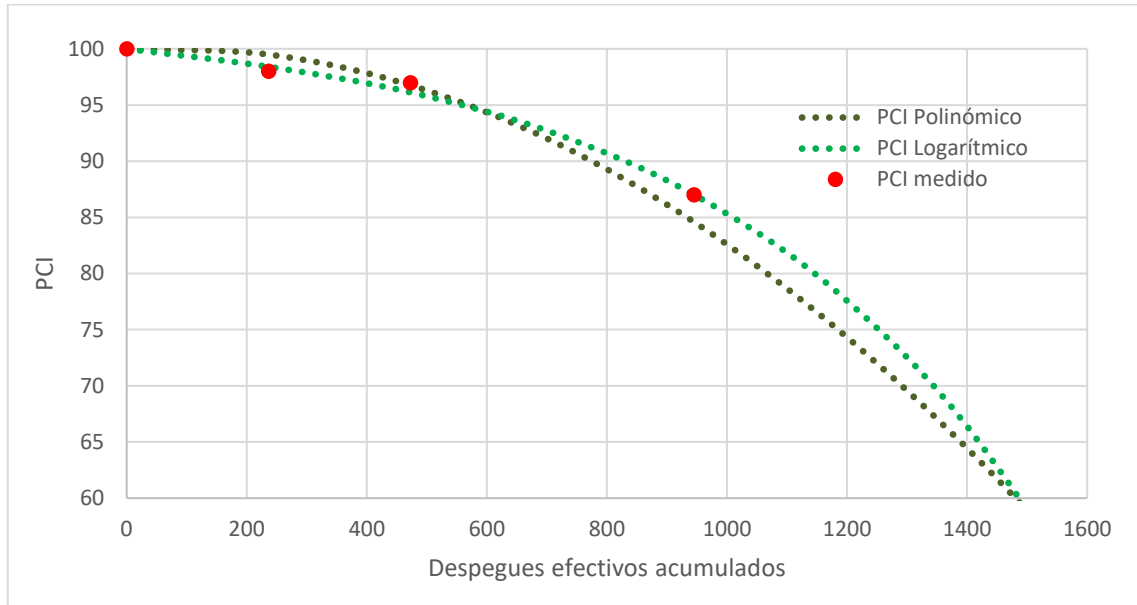


Figura 91. Curva de deterioro representativa del aeródromo Mocopulli utilizando Ajuste Polinómico y Logarítmico.

Tabla 99. Métricas de ajuste para cada modelo de regresión en el aeródromo Mocopulli.

Métricas		
	Polinomio	Logarítmico
R2	0.92	0.99
RMSE	1.42	0.48
MAE	1.04	0.32

Aeródromo Cañal Bajo

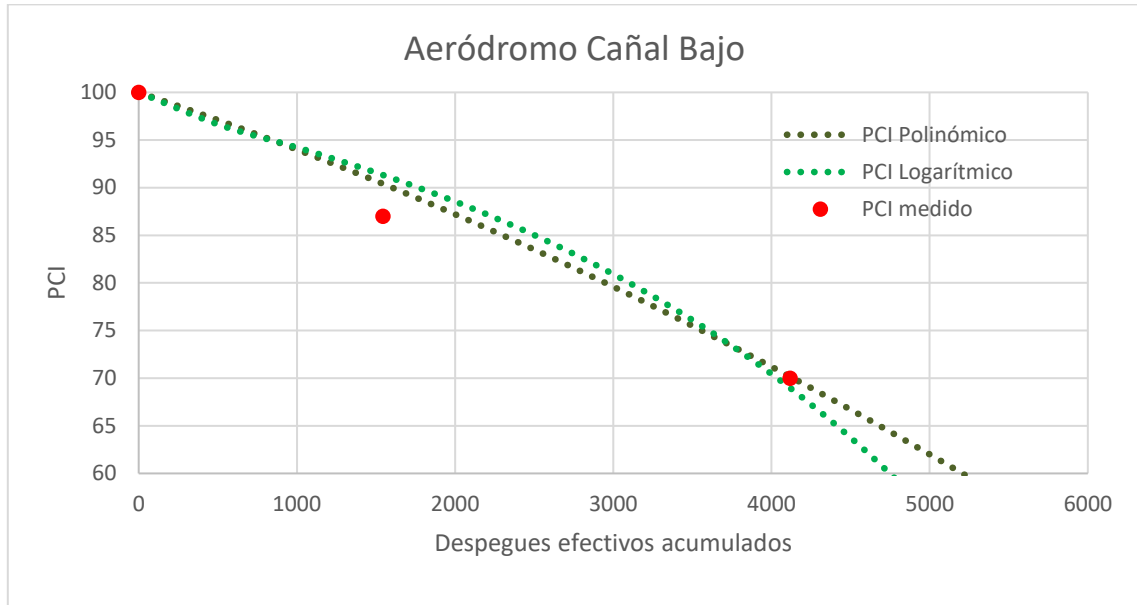


Figura 92. Curva de deterioro representativa del aeródromo Cañal Bajo utilizando Ajuste Polinómico y Logarítmico.

Tabla 100. Métricas de ajuste para cada modelo de regresión en el aeródromo Cañal Bajo.

Métricas		
	Polinomio	Logarítmico
R2	0.97	0.96
RMSE	1.97	2.57
MAE	1.19	1.78

Aeródromo Balmaceda

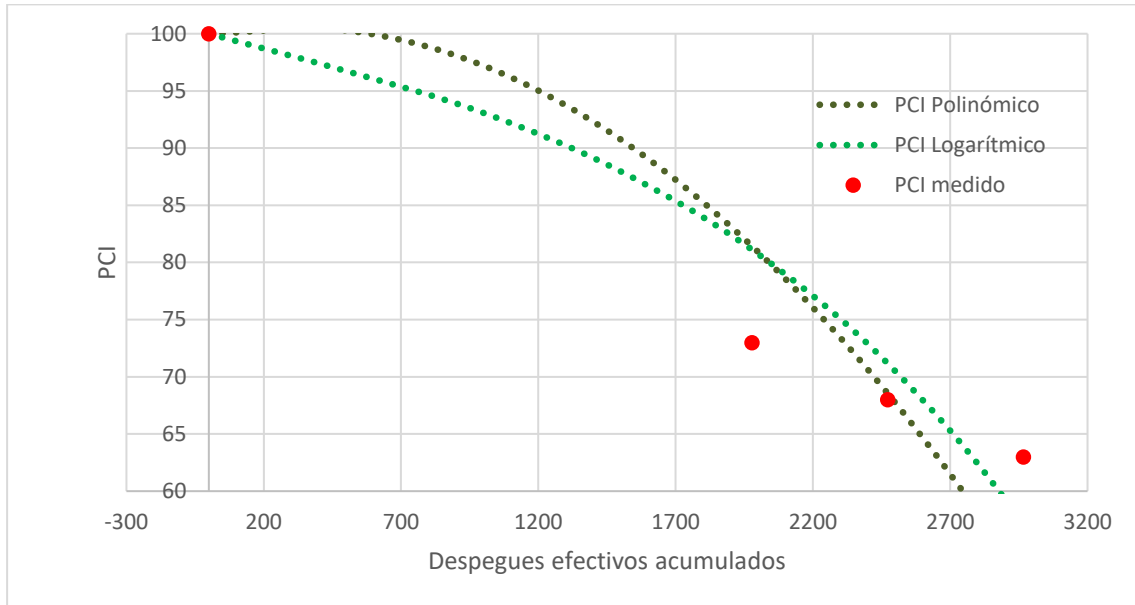


Figura 93. Curva de deterioro representativa del aeródromo Balmaceda utilizando Ajuste Polinómico y Logarítmico.

Tabla 101. Métricas de ajuste para cada modelo de regresión en el aeródromo Balmaceda.

Métricas		
	Polinomio	Logarítmico
R2	0.77	0.86
RMSE	6.79	5.29
MAE	4.90	4.32

Aeropuerto presidente Carlos Ibáñez del Campo, Pista 07-25

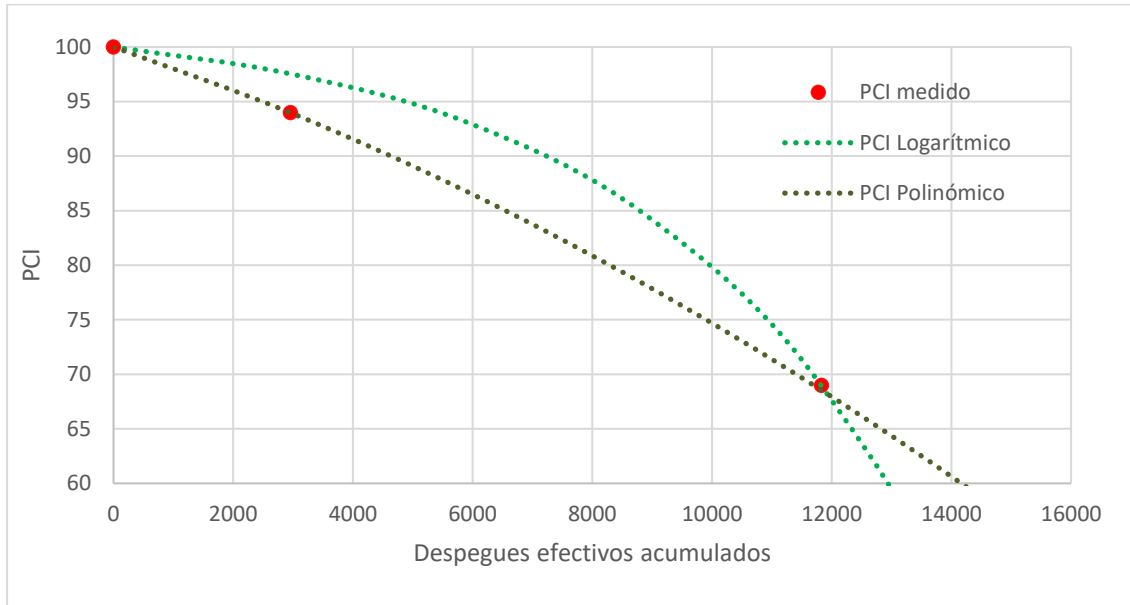


Figura 94. Curva de deterioro representativa del aeropuerto presidente Carlos Ibáñez del Campo, pista 07-25 utilizando Ajuste Polinómico y Logarítmico.

Tabla 102. Métricas de ajuste para cada modelo de regresión en el aeropuerto Carlos Ibáñez del Campo, pista 07-25.

Métricas		
	Polinomio	Logarítmico
R2	1.00	0.98
RMSE	0.27	2.04
MAE	0.16	1.20

Aeropuerto presidente Carlos Ibáñez del Campo, Pista 12-30

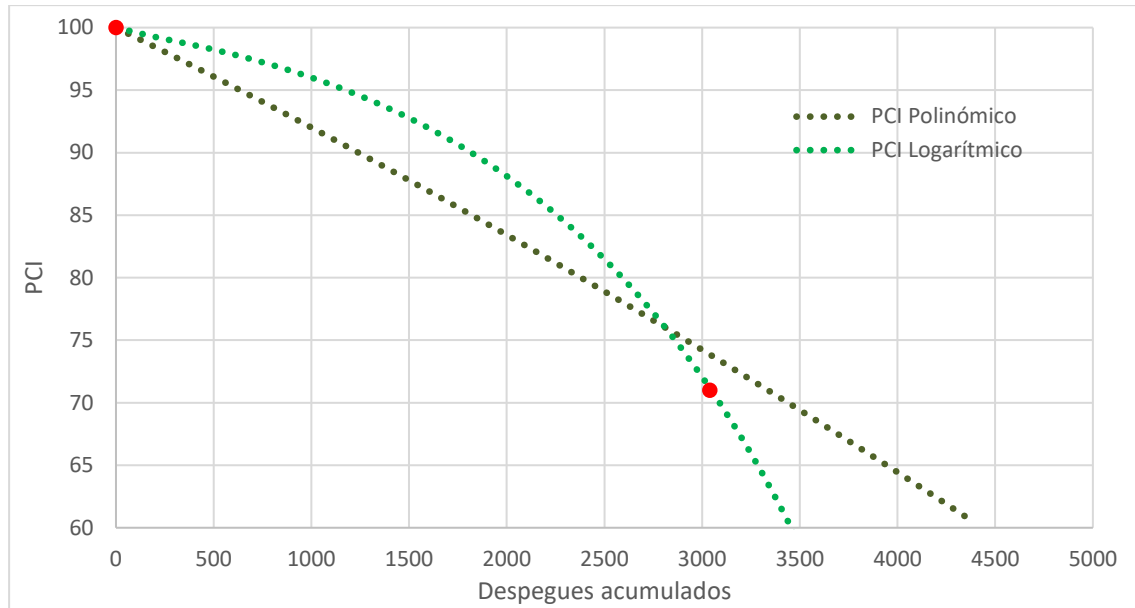


Figura 95. Curva de deterioro representativa del aeropuerto presidente Carlos Ibáñez del Campo, pista 12-30 utilizando Ajuste Polinómico y Logarítmico.

Tabla 103. Métricas de ajuste para cada modelo de regresión en el aeropuerto Carlos Ibáñez del Campo, pista 12-30.

Métricas		
	Polinomio	Logarítmico
R2	0.98	1.00
RMSE	2.01	0.10
MAE	1.42	0.07

Aeropuerto presidente Carlos Ibáñez del Campo, Pista 01-19

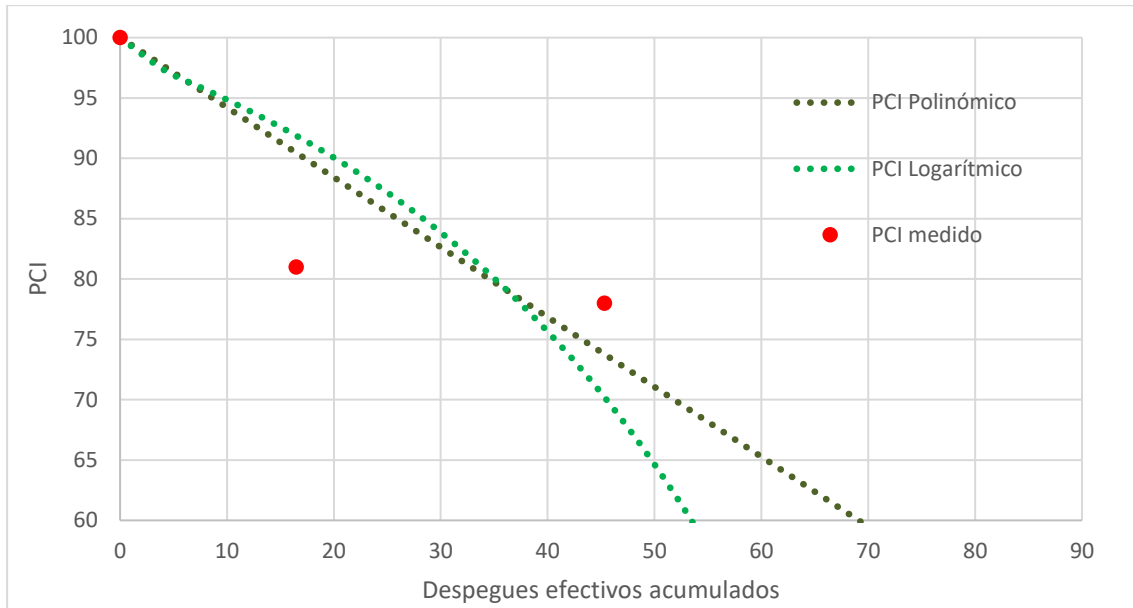


Figura 96. Curva de deterioro representativa del aeropuerto presidente Carlos Ibáñez del Campo, pista 01-19 utilizando Ajuste Polinómico y Logarítmico.

Tabla 104. Métricas de ajuste para cada modelo de regresión en el aeropuerto Carlos Ibáñez del Campo, pista 01-19.

Métricas		
	Polinomio	Logarítmico
R2	0.62	0.37
RMSE	5.98	7.72
MAE	4.56	6.22