

**APLICACIÓN DE TÉCNICAS DE FOTOGRAMETRÍA CON DRONES PARA  
LA DETECCIÓN Y CUANTIFICACIÓN DE DETERIORO DE PAVIMENTOS Y  
SU POSIBLE APLICACIÓN EN EVALUACIÓN DE PAVIMENTOS  
AEROPORTUARIOS**

Elisabet Jara Valdebenito

Informe de Habilitación Profesional presentado al  
Departamento de Ciencias Geodésicas y Geomática  
Universidad de Concepción, Campus Los Ángeles

En cumplimiento del requisito parcial

Para obtener el título de

**Ingeniero Geomático**

Escrito bajo la orientación del profesor

Felipe Guajardo Pérez. Departamento de Ciencias Geodésicas y Geomática

Aprobado por la comisión

Jesús Piña Valdés. Departamento de Ciencias Geodésicas y Geomática

M.Sc. Fotogrametría y Geoinformación Carolina Bouniot Escobar. Departamento de

Ciencias Geodésicas y Geomática

Los Ángeles

Enero, 2025

© Elisabet Jara Valdebenito

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo la cita bibliográfica del documento

## Resumen

Se evalúa la viabilidad de emplear fotogrametría mediante drones para la detección y cuantificación de deterioros en pavimentos rígidos y flexibles, comparando sus resultados con el método tradicional de inspección y considerando su posible aplicación en infraestructura aeroportuaria. El método tradicional, aunque funcional, presenta problemas relacionados con el tiempo de medición, la subjetividad del evaluador y posibles inconsistencias en el registro de datos. En la metodología para el análisis fotogramétrico, se seleccionan sitios representativos que simulan condiciones presentes en infraestructura aeroportuaria y se realizan vuelos con un dron Phantom 4 Pro. Se prueban combinaciones de alturas de vuelo y traslapes. Las fotografías capturadas se procesan en Agisoft Metashape, generando ortomosaicos y Modelos Digitales de Elevación (MDE). A partir del análisis de estos productos, se determina que una altura de 10 m con un traslape longitudinal del 80% y transversal del 70% es la mejor combinación para los requisitos del estudio. Con los ortomosaicos y MDE procesados, se utiliza QGIS para identificar, delimitar y clasificar los deterioros según su tipo y nivel de severidad. Los resultados indican que, en condiciones ideales, el análisis fotogramétrico detecta más del 98% de los deterioros existentes en los lugares estudiados, además, identifica más deterioros que el método tradicional. Los deterioros no detectados mediante el análisis fotogramétrico se encontraron en áreas con sombras u obstruidas por vehículos durante los vuelos. El análisis fotogramétrico también permite delimitar los deterioros con mayor precisión, representando su forma real, mientras que con el método tradicional se delimitan utilizando rectángulos. Los resultados muestran que este método tiene un alto potencial para analizar diversos tipos de deterioros y su posible aplicación en infraestructura aeroportuaria. De igual forma, se sugieren futuros estudios en pavimentos que presenten tipos de deterioros no encontrados en los sitios evaluados.

# Índice de Contenidos

Resumen.....	ii
Lista de Figuras.....	v
Lista de Tablas .....	vi
1. Introducción .....	7
1.1. Objetivos.....	9
2. Marco Teórico.....	10
2.1. Pavimentos.....	10
2.1.1. Tipos de Pavimentos.....	10
2.1.2. Fallas en los Pavimentos.....	12
2.1.3. Índice de Condición del Pavimento (PCI) .....	13
2.2. Fotogrametría.....	21
2.2.1. Sistema Aeronave Piloteada a Distancia (RPAS).....	21
2.2.2. Principales Parámetros de Vuelo .....	22
2.2.3. Normativa Chilena sobre Condiciones de Operación para RPAS .....	24
3. Marco Metodológico.....	25
3.1. Selección de Sitios de Muestra .....	25
3.2. Diseño de Plan de Vuelo.....	26
3.3. Procesamiento de Fotografías .....	30
3.4. Detección y Cuantificación de Deterioros .....	31
4. Resultados y Análisis.....	39
4.1. Datos Obtenidos a Partir de Vuelos .....	39
4.2. Detección y Cuantificación de Deterioros .....	42
5. Conclusiones y Recomendaciones.....	58
6. Referencias.....	60
7. Anexos .....	62

## Lista de Figuras

Figura 1: Estructura de pavimento flexible y pavimento rígido. ....	11
Figura 2: Concepto de conservación de pavimentos.....	13
Figura 3: Escala de Clasificación del Índice de Condición del Pavimento (PCI). ....	14
Figura 4: Traslape Longitudinal y Transversal.....	23
Figura 5: Sitios de estudio.....	26
Figura 6: Ejemplo de verificación de condiciones meteorológicas con aplicación UAV Forecast. ....	29
Figura 7: Evaluación de deterioros que incluyen deformación de la carpeta de rodadura. .....	36
Figura 8: Toma de datos mediante medición tradicional en terreno.....	38
Figura 9: Observación del mismo deterioro con alturas de vuelo de 10 m y 15 m. ....	40
Figura 10: Comparación de un área específica en ortomosaicos generados con las diferentes combinaciones de traslapes. ....	42
Figura 11: Impacto de la sombra en la detección de deterioros.....	44
Figura 12: Croquis de ubicación de deterioros detectados en pavimento de hormigón con medición tradicional en terreno y mediante análisis fotogramétrico. ....	47
Figura 13: Ejemplo de diferencias en delimitación entre ambos métodos de medición...	49
Figura 14: Estudio hundimiento y ahuellamiento. ....	53
Figura 15: Croquis de ubicación de deterioros detectados en pavimento asfáltico con medición tradicional en terreno y mediante análisis fotogramétrico. ....	56

## Lista de Tablas

Tabla 1: Combinaciones de traslapes longitudinal y transversal. ....	28
Tabla 2: Clasificación de Deterioros según el Método de Delimitación. ....	33
Tabla 3: Resultados de los Vuelos en Sitio con Pavimento de Hormigón.....	39
Tabla 4: Resultados de los Vuelos en Sitio con Pavimento Asfáltico. ....	39
Tabla 5: Porcentajes de detección y correspondencia de deterioros según el método de evaluación en pavimento de hormigón. ....	45
Tabla 6: Porcentajes de detección y correspondencia de deterioros según el método de evaluación en pavimento asfáltico. ....	55

## **1. Introducción**

El mantenimiento adecuado de las infraestructuras aeroportuarias horizontales (pavimentos) es fundamental para garantizar la seguridad y eficiencia de las operaciones aéreas. El país cuenta con más de 450 instalaciones aeroportuarias, que se componen de 344 aeródromos, 102 helipuertos y 7 aeropuertos. De los aeródromos, 16 forman parte de la Red Primaria, 14 pertenecen a la Red Secundaria, 303 integran la Red de Pequeños Aeródromos, y 11 corresponden a la Red de Aeródromos Militares (Dirección de Aeropuertos, 2019). Tradicionalmente, la evaluación del estado de los pavimentos en estas instalaciones y la evaluación de sus mantenciones se ha realizado a través de inspecciones visuales y evaluaciones físicas directas. Estos métodos aunque efectivos, resultan ser costosos ya que consumen mucho tiempo y requieren de personal entrenado, dependiendo su costo de la cantidad de Unidades de Muestra (UM) a evaluar, del estado del pavimento y de las ventanas de tiempo disponibles para realizar la inspección (Ministerio de Obras Públicas; Dirección de Aeropuertos; & Ghisolfo Ingeniería de Consulta S.A., 2011).

Este estudio evalúa la aplicación de un método alternativo para la realización de estas mediciones, utilizando drones y análisis fotogramétrico para la inspección del estado de los pavimentos. Este enfoque podría facilitar la recolección de información de manera eficiente, contribuyendo en la toma de datos, la evaluación del estado de los pavimentos y otorgando una posible reducción de costos, haciendo posible llevar a cabo inspecciones más frecuentes y detalladas.

Actualmente, la Dirección de Aeropuertos utiliza el Índice de Condición del Pavimento

(PCI) como instrumento de control y planificación, ya que proporciona una medida cuantitativa del estado del pavimento y facilita la toma de decisiones para su mantenimiento y reparación. De acuerdo con IDOM (2021), se recomienda la toma de datos al menos una vez al año para mantener los estándares de seguridad y operatividad requeridos; pudiéndose realizar cada dos años en virtud de las operaciones del aeródromo, sin embargo, la frecuencia de estas inspecciones y/o sus resultados no siempre están disponibles en los tiempos requeridos debido a la naturaleza laboriosa, condiciones climáticas y el tiempo de medición en terreno. El uso de drones podría superar estos desafíos al permitir el enfoque sistemático para la evaluación del estado del pavimento.

En este contexto, se hace necesario evaluar la efectividad de los drones en la inspección de pavimentos, proponiendo una alternativa tecnológica que se pueda integrar en las operaciones de mantenimiento aeroportuario.

## **1.1. Objetivos**

### **Objetivo General**

Evaluar técnicas de fotogrametría para la identificación, detección y cuantificación de distintos tipos de deterioros en pavimentos flexibles y rígidos identificados en el método PCI, comparando su precisión y eficacia con el método tradicional de inspección.

### **Objetivos Específicos**

- Identificar campos de muestra adecuados para realizar levantamientos fotogramétricos mediante la utilización dron y medición tradicional en terreno.
- Definir parámetros óptimos de vuelo para el levantamiento de información de pavimentos mediante dron.
- Obtener modelos digitales de elevación y ortofotos que permitan detectar, identificar, caracterizar y medir los distintos tipos de deterioros.
- Evaluar y comparar la precisión y efectividad del método de análisis fotogramétrico para la medición de deterioros frente al método tradicional de medición en terreno.

## 2. Marco Teórico

### 2.1. Pavimentos

De acuerdo con el Ministerio de Obras Públicas (2022), el pavimento se define como el conjunto de capas de rodadura de un camino, formado por materiales seleccionados, asfálticos, estabilizados, cementados y/o tratados, que se colocan sobre la subrasante con el objetivo de resistir las cargas impuestas por el tránsito de vehículos, proporcionando comodidad y seguridad durante su período de uso y explotación, además de proteger las capas inferiores de las condiciones ambientales. Estas capas no solo aportan estructura resistente a las sollicitaciones, sino que también ofrecen protección a las capas subyacentes.

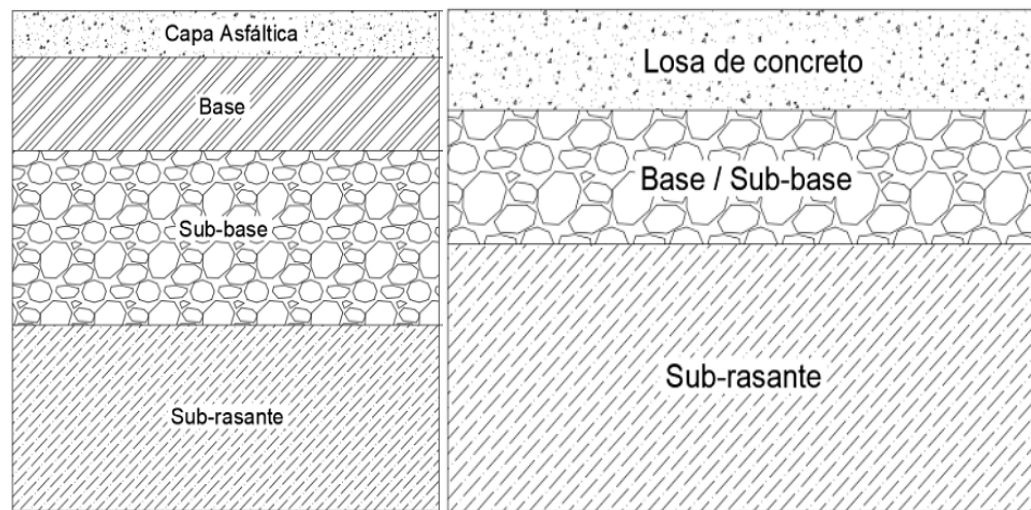
#### 2.1.1. Tipos de Pavimentos

Los pavimentos se clasifican en dos grandes categorías pavimentos flexibles y pavimentos rígidos, basados en las características de sus materiales constitutivos y su capacidad para absorber y distribuir cargas.

- Pavimentos flexibles o asfálticos: Se compone de una o más capas, que pueden ser asfálticas o de materiales seleccionados o tratados, de módulos elásticos decrecientes con la profundidad. Generalmente, la capa superficial consiste en una mezcla asfáltica mientras que las capas inferiores están formadas por materiales granulares, como los utilizados en la base y la subbase (Figura 1). En este tipo de pavimento, las cargas de rueda son resistidas principalmente por la capacidad del

sistema de absorber deformaciones, que le es conferida por las características de sus capas constitutivas y del suelo de fundación.

- Pavimentos rígidos o de hormigón: Este tipo de pavimento está compuesto por una capa de rodadura de alta rigidez y una base de apoyo hecha de material seleccionado o tratado, la cual puede omitirse si el suelo de fundación es adecuado. Generalmente, se conforma por losas de hormigón de cemento hidráulico, ya sea simple o reforzado, que se colocan sobre una subbase de agregado granular (Figura 1). Debido a la rigidez del sistema, las cargas de rueda son soportadas principalmente por la resistencia a la flexión de las losas de hormigón, disipándose ampliamente su efecto en el suelo bajo la subrasante.



*Figura 1: Estructura de pavimento flexible y pavimento rígido.*

*A la izquierda, se presenta la estructura del pavimento flexible; a la derecha, la del pavimento rígido.*

*Fuente: Molina, 2020.*

### **2.1.2. Fallas en los Pavimentos**

Los pavimentos, tanto flexibles como rígidos, están diseñados para soportar las cargas del tráfico y las condiciones ambientales mediante una estructura de capas. En los pavimentos flexibles, las capas superiores distribuyen las cargas hacia las inferiores, mientras que, en los pavimentos rígidos, la resistencia está dada principalmente por las losas de hormigón. Sin embargo, ambos tipos de pavimento son susceptibles a fallas por diversos factores. Las capas de rodadura, que están más expuestas al tránsito y a las condiciones ambientales, se tienden a desgastar por fatiga, lo que genera grietas y deformaciones en la superficie. Este tipo de deterioro superficial, si se detecta a tiempo, es relativamente sencillo y económico de reparar mediante intervenciones superficiales, manteniendo la integridad estructural del pavimento. En contraste, las fallas en la subrasante, que suelen ser causadas por la infiltración de agua a través de fisuras no reparadas, implican un deterioro estructural más severo. Estas fallas comprometen las capas inferiores del pavimento y requieren reparaciones integrales de mayor costo, como el levantamiento total de la estructura. Por lo tanto, la identificación y reparación temprana de las fallas es fundamental para prolongar la vida útil del pavimento y reducir costos a largo plazo.

Para evitar reparaciones extensas y costosas, es crucial implementar un programa de conservación preventiva que permita realizar intervenciones antes de que las fallas se agraven (Figura 2). Las evaluaciones periódicas mediante el Índice de Condición del Pavimento (PCI) permiten monitorear el estado de los pavimentos, detectando de forma temprana el inicio del deterioro y contribuyendo a la planificación de los mantenimientos necesarios. Estas evaluaciones ayudan a planificar rehabilitaciones a tiempo, evitando que los problemas superficiales evolucionen hacia fallas estructurales mayores. En

infraestructuras aeroportuarias se recomienda realizar estas inspecciones al menos una vez al año, aunque en entornos con menor tráfico, como ciertos aeródromos, este intervalo puede extenderse hasta dos años, dependiendo de las condiciones operativas y ambientales (IDOM, 2021). Este enfoque preventivo permite mantener la funcionalidad del pavimento y optimizar los recursos, reduciendo la necesidad de rehabilitaciones mayores y garantizando la seguridad de los usuarios.

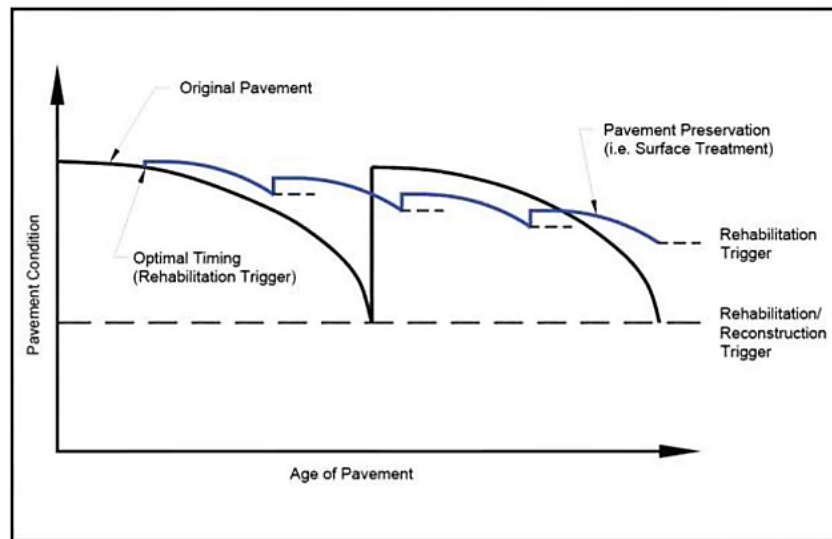


Figura 2: Concepto de conservación de pavimentos.

Fuente: Advisory Circular AC 150/5380-7B, FAA (citado en Ministerio de Obras Públicas, Dirección de Aeropuertos, & IDOM, 2021)

### 2.1.3. Índice de Condición del Pavimento (PCI)

El Índice de Condición de Pavimento (PCI) es el método más utilizado para evaluar el estado técnico de los pavimentos de aeropuertos y se basa en inspecciones visuales de los pavimentos. El PCI asigna un valor numérico de 0 a 100, donde 100 corresponde a una superficie en perfectas condiciones y 0 significa que está completamente degradada. El proceso comienza dividiendo el aeropuerto en elementos funcionales, como pistas, calles

de rodaje y plataformas, y luego en muestras individuales de tamaño definido (450 m<sup>2</sup> para pavimentos flexibles y 20 losas para pavimentos rígidos). Cada muestra se inspecciona en busca de deterioros, evaluando su tipo, gravedad y cantidad (Figura 3). Estos datos se registran y se calcula el PCI para cada muestra. El PCI final para un elemento se obtiene como el promedio ponderado de los PCI de las muestras inspeccionadas, ajustado según el área de cada muestra (Wesołowski & Iwanowski, 2020).

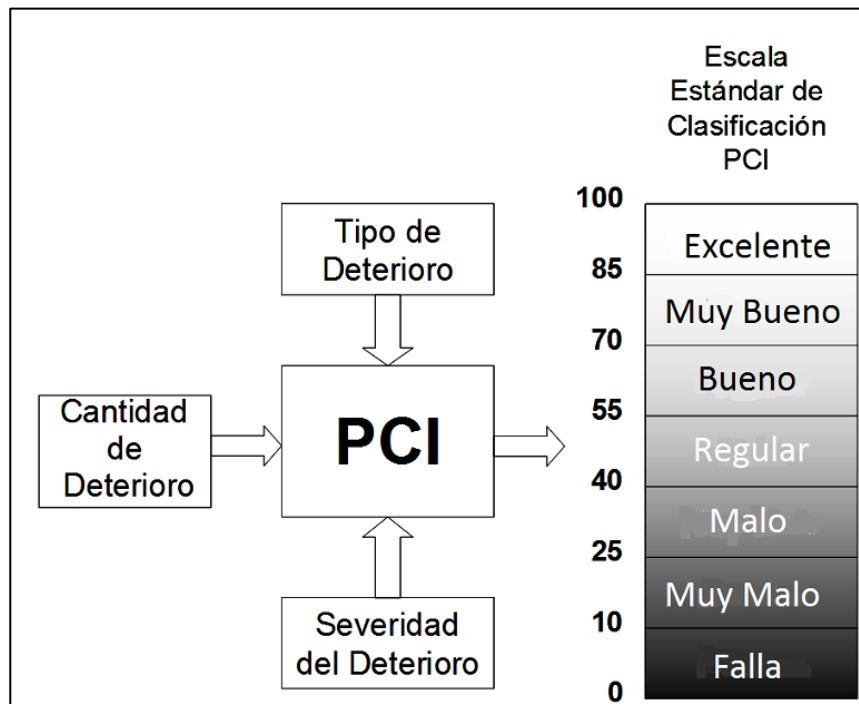


Figura 3: Escala de Clasificación del Índice de Condición del Pavimento (PCI).

Fuente: Ministerio de Obras Públicas; Dirección de Aeropuertos; & Ghisolfo Ingeniería de Consulta S.A., 2011.

El PCI considera 16 tipos de deterioros característicos para pavimentos asfálticos y 15 para pavimentos de hormigón, cada uno de los cuales está asociado a un nivel de severidad "leve", "mediano" o "alto". Estos deterioros se miden a través de inspecciones visuales en las que se determina el tipo de deterioro, su nivel de severidad y la extensión del área afectada.

La medición de deterioros en terreno se realiza identificando el tipo de deterioro presente en cada sección del pavimento y registrando su ubicación aproximada en un croquis o plano de la superficie inspeccionada. Dependiendo del tipo de deterioro, se miden distintas dimensiones como longitud, ancho, área o profundidad, utilizando herramientas como odómetros, cintas métricas y reglas. Los datos recopilados se anotan en una hoja de registro, incluyendo el nivel de severidad asignado a cada deterioro y su cantidad. Este método facilita el registro de las condiciones del pavimento en terreno, permitiendo planificar las intervenciones necesarias.

A continuación, a partir de la descripción proporcionada por Shahin (2005), se presentará una descripción de cada tipo de deterioro tanto para pavimentos flexibles como para pavimentos rígidos, detallando cómo se muestran visualmente.

- Deterioros en Pavimentos Asfálticos

- 1) **Agrietamiento por fatiga (piel de cocodrilo):** Red de grietas interconectadas formando piezas de múltiples lados y ángulos agudos que forman un patrón similar a la piel de un cocodrilo, indicando fatiga estructural debido a cargas repetitivas.
- 2) **Exudación:** Aparición de una capa brillante y pegajosa en la superficie del pavimento, causada por el exceso de asfalto en la mezcla, lo que puede afectar la fricción.
- 3) **Agrietamiento tipo bloque:** Grietas que dividen el pavimento en bloques de forma aproximadamente rectangular (de 0,3 m por 0,3 m a 3 m por 3 m aproximadamente), causadas principalmente por la contracción del asfalto o variaciones térmicas.

- 4) **Corrugación (ondulación):** Deslizamiento de la capa asfáltica que presenta crestas y valles espaciados regularmente, perpendiculares al tráfico. Es causada por la acción repetida del tráfico sobre una capa superficial o base inestable.
- 5) **Hundimiento (depresión):** Áreas hundidas en la superficie del pavimento que generan depresiones visibles donde se puede acumular agua, provocadas por asentamiento en capas subyacentes.
- 6) **Erosión por chorro de jet:** Áreas oscurecidas donde el aglutinante bituminoso ha sido quemado o carbonizado, con variaciones de profundidad que pueden llegar a 13 mm. Causado por la exposición a las altas temperaturas de los motores jet, comunes en aeropuertos.
- 7) **Agrietamiento por reflexión de juntas:** Grietas que se forman sobre las juntas de las capas inferiores del pavimento y se extienden hacia la superficie. Se encuentran alineadas con las juntas subyacentes, causadas por el movimiento diferencial entre las capas inferiores y superiores del pavimento.
- 8) **Agrietamiento lineal (longitudinal o transversal):** Grietas longitudinales que son paralelas a la línea central del pavimento y las transversales son perpendiculares a esta. Causadas principalmente por junta de pavimento mal construida o variaciones térmicas.
- 9) **Por derrame de combustible:** Ablandamiento de la superficie producto de derrames de aceite, combustibles u otros solventes.
- 10) **Bacheo:** Zonas reparadas, visiblemente diferenciadas del pavimento original, con material de parche que puede estar a diferente nivel o a diferente textura.

- 11) **Áridos pulidos:** Superficie donde los agregados superiores están desgastados o ausentes, dejando una capa lisa sin textura o partículas angulares que proporcionan resistencia al deslizamiento, causada por cargas repetidas.
- 12) **Pérdida de áridos y peladuras (disgregación):** Áreas donde los agregados superficiales se han desprendido, exponiendo las capas inferiores del pavimento. Ocurre por la erosión de la superficie debido a la acción del tránsito y factores climáticos.
- 13) **Ahuellamiento:** Depresiones visibles en los caminos de las ruedas, donde el pavimento se puede levantar ligeramente a lo largo de los bordes. A menudo es más evidente después de la lluvia cuando los caminos se llenan de agua.
- 14) **Desplazamiento por empuje de losas de hormigón:** Levantamiento o abultamiento del pavimento asfáltico adyacente a los extremos de las losas de hormigón. Ocurre cuando estas últimas se expanden y empujan el pavimento flexible, provocando grietas y abultamientos visibles.
- 15) **Agrietamiento por deslizamiento:** Grietas en forma de medialuna con extremos apuntando en la dirección del tráfico. Son causadas por el deslizamiento de la superficie del pavimento debido a fuerzas de frenado o giro.
- 16) **Hinchamiento:** Abultamiento hacia arriba en la superficie del pavimento, que puede ocurrir de manera abrupta en un área pequeña o como una ondulación más larga y gradual. Puede estar acompañado de grietas superficiales y es generalmente causado por la acción de las heladas en la subrasante.

- Deterioros en Pavimentos de Hormigón

- 1) **Levantamiento:** Abultamiento o desplazamiento hacia arriba de las losas en las juntas, formando una elevación visible en la superficie. Esto ocurre por la expansión térmica sin suficiente espacio de dilatación.
- 2) **Grieta de esquina:** Grieta que interseca las juntas en una distancia menor o igual a la mitad de la longitud de la losa, se extiende verticalmente a través de todo el espesor de la losa. Es causada por la combinación de carga y pérdida de soporte en la esquina.
- 3) **Grietas lineales, transversales y diagonales:** Grieta que divide la losa en dos o tres partes, causada usualmente por la combinación de cargas repetitivas, tensiones por contracción o tensiones de curvatura.
- 4) **Grietas de durabilidad:** Grietas finas y paralelas a las juntas, que muestran un oscurecimiento a su alrededor. Se producen por la acción de ciclos de congelación y descongelación.
- 5) **Deterioro del sello de junta:** Espacios en las juntas que permiten la infiltración de agua o acumulación de materiales, comprometiendo la expansión de las losas y provocando fisuras.
- 6) **Bacheo pequeño (menor a 0,5 m<sup>2</sup>):** Área reparada de menos de 0,5 m<sup>2</sup>, donde se ha reemplazado parte del pavimento. Es visible por la diferencia de material y puede presentar desgaste en los bordes.
- 7) **Bacheo grande (mayor a 0,5 m<sup>2</sup>):** Reparación de áreas superiores a 0,5 m<sup>2</sup>, claramente distinguible por el color o textura del material de parche, con posibles signos de desgaste en los bordes.

- 8) **Desprendimientos por disgregación de áridos:** Desprendimiento de trozos de pavimento superficial producto de la combinación del ciclo de congelación y descongelación en combinación con agregados expansivos.
- 9) **Bombeo:** Expulsión de partículas finas y granulares que provocan manchas en la superficie cerca de juntas o grietas. Esto es causado por la deflexión de la losa ante carga aplicadas.
- 10) **Agrietamiento tipo mapeo o descascaramiento:** Red de grietas superficiales acompañadas de descascaramiento, común en superficies de concreto expuestas a condiciones de congelación y descongelación.
- 11) **Asentamiento o escalonamiento:** Diferencias de elevación entre losas adyacentes, creando desniveles visibles en la junta. Esto ocurre cuando el suelo o la subbase bajo la losa se asienta o se erosiona.
- 12) **Cuarreamiento o losa fracturada:** Agrietamiento de la losa en cuatro o más partes, producto de la sobrecarga, un mal soporte o la combinación de ambas.
- 13) **Grietas de contracción:** Grietas finas, cortas, superficiales y no se extienden por toda la losa. Estas grietas se forman durante el proceso de secado y curado del concreto, principalmente debido a la contracción del material.
- 14) **Astillamiento de juntas transversales y longitudinales:** Desprendimiento de fragmentos de concreto a lo largo de las juntas transversales o longitudinales. Los bordes de las juntas se ven erosionados, dejando áreas irregulares y expuestas.
- 15) **Astillamiento de grieta de esquina:** Desprendimiento o rotura visible en la esquina de una losa, con fragmentos de concreto faltantes.

El método PCI, a pesar de ser uno de los más utilizados para evaluar el estado de los pavimentos, presenta deficiencias que pueden comprometer la calidad de los resultados, especialmente en contextos donde la infraestructura es extensa y está sometida a diversas condiciones operativas, como en aeropuertos. Entre estas deficiencias, se encuentran los problemas relacionados con la subjetividad de los evaluadores y las limitaciones del levantamiento de información en terreno. Estas dificultades afectan tanto la precisión de los resultados como la eficacia del proceso de inspección, lo que puede derivar en diagnósticos incompletos o imprecisos del estado del pavimento.

- **Problemas derivados del criterio y percepción del evaluador:** La evaluación visual del pavimento es subjetiva y puede variar entre diferentes inspectores, incluso si están entrenados bajo los mismos criterios. Dos personas distintas pueden percibir el mismo deterioro de manera diferente, ya sea en la identificación del tipo de deterioro o en la clasificación de su nivel de severidad. Esta variabilidad introduce inconsistencias en la recolección de datos y puede influir en los resultados finales del análisis PCI.
- **Problemas derivados del sistema de levantamiento de información en terreno:** El levantamiento de datos en terreno enfrenta dificultades prácticas que afectan su eficiencia y precisión. Los trabajos se deben realizar de manera rápida para no interrumpir por mucho tiempo las operaciones en el lugar. Esto, sumado a posibles errores en el registro manual de la información, aumenta el riesgo de pérdida de datos o de errores en el cálculo del PCI.

## **2.2. Fotogrametría**

### **2.2.1. Sistema Aeronave Piloteada a Distancia (RPAS)**

La utilización de RPAS, comúnmente conocidos como drones, está siendo cada vez más frecuente en diversos sectores. Su versatilidad, facilidad de uso y capacidad para acceder a áreas de difícil alcance, han llevado a su adopción en áreas como la topografía, agricultura de precisión, inspecciones industriales, seguridad y monitoreo ambiental. Esta creciente popularidad se debe a la eficiencia y precisión que ofrecen, reduciendo costos y tiempos en comparación con los métodos tradicionales de recolección de datos.

Los RPAS se pueden equipar con distintos tipos de sensores, como cámaras multispectrales, térmicas, LIDAR y cámaras RGB, dependiendo de los requerimientos del proyecto. Entre ellos, las cámaras RGB son las más utilizadas principalmente por su menor costo y amplia disponibilidad en el mercado. Además, estas cámaras ofrecen una gran versatilidad al capturar fotografías en el espectro visible (rojo, verde y azul), lo que permite generar representaciones detalladas del terreno y facilita la creación de ortomosaicos y modelos tridimensionales. En la inspección de pavimentos, las cámaras RGB son uno de los sensores más empleados debido a su efectividad en la evaluación visual de la superficie del pavimento, permitiendo identificar deterioros superficiales y evaluar su condición (Cruz, 2022).

### 2.2.2. Principales Parámetros de Vuelo

- Distancia de Muestreo del Terreno (GSD)

La Distancia de Muestreo del Terreno o GSD (por sus siglas en inglés Ground Sample Distance), se define como distancia entre los centros de dos píxeles consecutivos medidos sobre el terreno. El valor del GSD depende de factores como la altura de vuelo, la distancia focal, el ancho de la imagen y el tamaño del sensor (Cruz, 2022). El GSD se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$GSD = \frac{H \times Sw}{f \times IMw}$$

Donde:

$H$  : Altura de vuelo (mm)

$Sw$  : Ancho del sensor (mm)

$f$  : Distancia focal (mm)

$IMw$  : Ancho de la imagen (píxel)

- Altura de Vuelo

La altura de vuelo afecta directamente al GSD y a la cantidad de fotografías necesarias para cubrir un área. A mayor altura, el GSD aumenta, lo que significa que cada píxel abarca una superficie más amplia del terreno. Esto permite capturar áreas más extensas con menos fotografías, pero con un menor nivel de detalle. Por el contrario, una menor altura de vuelo

disminuye el GSD, capturando imágenes más detalladas, pero incrementando el número de fotografías requeridas para cubrir la misma extensión.

- Traslape Longitudinal y Transversal

El traslape longitudinal y transversal se refiere al porcentaje de superposición entre imágenes consecutivas capturadas durante un vuelo. El traslape longitudinal es la superposición entre imágenes tomadas a lo largo de la línea de vuelo, mientras que el traslape transversal se refiere a la superposición entre imágenes capturadas en líneas de vuelo adyacentes.

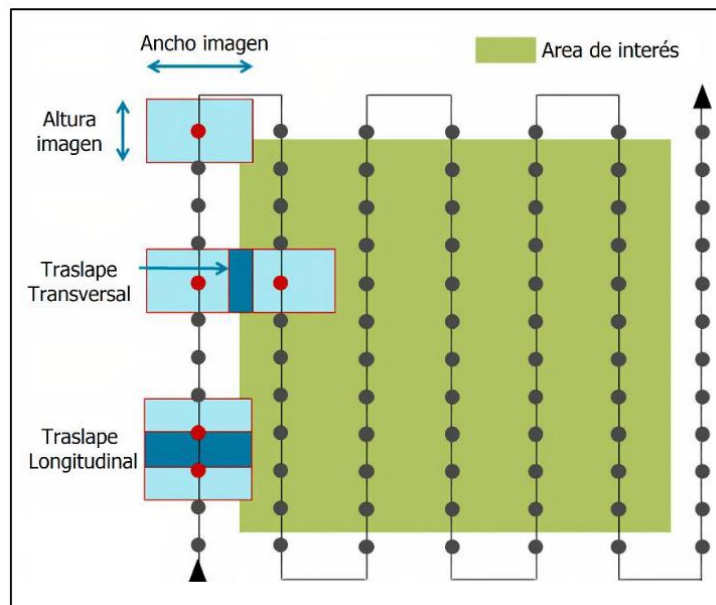


Figura 4: Traslape Longitudinal y Transversal.

Fuente: Cruz, 2022.

- Condiciones Meteorológicas

Las condiciones operativas para el uso de RPAS dependen de las características de cada dron, ya que factores como el peso, diseño y capacidad del sistema influyen en sus límites de operación. Además, de acuerdo con la normativa DAN 151, los vuelos se deben realizar en condiciones de vuelo visual (VMC), evitando lluvia, niebla y vientos fuertes que puedan desestabilizar el dron y afectar la precisión de las fotografías (Dirección General de Aeronáutica Civil (DGAC), 2023). Aunque estos rangos son comunes, siempre se debe consultar el manual específico del dron para conocer sus límites exactos y garantizar la seguridad y eficiencia del vuelo.

### **2.2.3. Normativa Chilena sobre Condiciones de Operación para RPAS**

En Chile, para volar un RPA o dron, dependiendo del tipo de operación y su propósito, se deben cumplir los requisitos establecidos por la Normativa Aeronáutica DAN 151 para operaciones en áreas pobladas con fines de interés público, o la DAN 91 para operaciones en áreas no pobladas. Estos requisitos aseguran la seguridad y el correcto uso del espacio aéreo (Dirección General de Aeronáutica Civil (DGAC), 2023). En el Anexo 1 se detallan algunas de las principales condiciones operativas que rigen dichas actividades.

### **3. Marco Metodológico**

#### **3.1. Selección de Sitios de Muestra**

Para la selección de los sitios de estudio, se eligen áreas con amplias superficies de pavimento que reproduzcan las condiciones presentes en infraestructura aeroportuaria, considerando tanto pavimentos de hormigón como asfáltico. Se priorizan ubicaciones despejadas que permitan la realización de vuelos sin obstrucciones y que presenten distintos tipos de deterioro, con variados niveles de severidad, permitiendo obtener datos que puedan ser contrastados con ambos métodos (medición tradicional en terreno y mediante análisis fotogramétrico). En este contexto, sitios como multicanchas y estacionamientos al aire libre resultan opciones adecuadas, ya que ofrecen áreas amplias y despejadas. Dado que se trata de propiedades privadas, se deben obtener los permisos necesarios de los encargados para poder llevar a cabo el estudio en estos lugares. La disponibilidad de recintos es limitada debido a la negativa de muchas empresas privadas a otorgar acceso para la toma de datos. Aun así, se identifican cuatro sitios que cumplen con los requisitos establecidos: dos con pavimento de hormigón y dos con pavimento asfáltico. En estos cuatro lugares se realizan vuelos para la recolección de datos, sin embargo, debido a la flexibilidad en la ocupación de los recintos, se decide utilizar solo dos de estos sitios para el estudio (Figura 5). Los lugares seleccionados cuentan con áreas de pavimento deteriorado, sin obstáculos que interfieran con los vuelos, y disponen de la autorización de los encargados para llevar a cabo la investigación.

- **Sitio con pavimento de hormigón:** El primer sitio corresponde al estacionamiento del Consultorio General Rural y la Dirección de Administración de Educación Municipal (DAEM) de la ciudad de Laja, en la región del Biobío. Se considera un área aproximada de 600 m<sup>2</sup> de pavimento de hormigón.
- **Sitio con pavimento asfáltico:** El segundo sitio se encuentra en la Subcomisaría I.A.T. y Carreteras BIO BIO, ubicada en la Ruta 5 Sur, kilómetro 476, en la región del Biobío. Se abarca un área de aproximadamente 800 m<sup>2</sup> de pavimento asfáltico.



*Figura 5: Sitios de estudio.*

*A la izquierda sito con pavimento de hormigón y a la derecha sitio con pavimento asfáltico. Fuente: Google Earth Pro.*

### **3.2. Diseño de Plan de Vuelo**

Se ejecutan los vuelos utilizando el dron DJI Phantom 4 Pro, que contiene un sensor CMOS de 1 pulgada con un filtro de color RGB. El diseño del plan de vuelo incluye diferentes combinaciones de altura y traslapes para evaluar la calidad y precisión de los datos obtenidos. La variación de estos parámetros permite identificar la configuración óptima para capturar los detalles del pavimento, mejorando la cobertura y eficiencia del tiempo de

vuelo. Los vuelos se realizan mediante la aplicación DroneDeploy, una herramienta que permite la planificación y automatización de misiones, permitiendo definir rutas, alturas y traslapes.

- Altura de Vuelo

En este estudio, se evalúan dos alturas de vuelo: 10 metros y 15 metros, con el objetivo de encontrar un equilibrio entre la precisión de los datos y la eficiencia operativa.

El dron Phantom 4 Pro está equipado con un sensor de 24 mm de ancho y una distancia focal de 8.8 mm, capturando imágenes con un ancho de 5472 píxeles (DJI, 2017). A partir de estas especificaciones, se calcula el GSD para ambas alturas de vuelo de la siguiente manera:

- Para 10 m (10000 mm):

$$GSD = \frac{10000 \times 24}{8.8 \times 5472} = 4.984 \text{ mm/píxel}$$

- Para 15 m (15000 mm):

$$GSD = \frac{15000 \times 24}{8.8 \times 5472} = 7.476 \text{ mm/píxel}$$

No se realizan vuelos por encima de los 15 m de altura debido a que el GSD calculado resulta demasiado elevado, comprometiendo la precisión necesaria para detectar ciertos tipos de deterioro que requieren mediciones a partir de 3 mm. Por otro lado, tampoco se

efectúan vuelos a menor altura, ya que, aunque los sitios seleccionados están despejados, se encuentran próximos a infraestructuras adyacentes, como edificios y otras construcciones. Esta proximidad hace que el vuelo a alturas menores incremente el riesgo de colisiones, afectando la seguridad de la operación. Además, las limitaciones de la plataforma DroneDeploy no permiten automatizar misiones a menor altura, lo que también restringió la posibilidad de realizar vuelos a altitudes más bajas.

- Traslape Longitudinal y Transversal

De acuerdo con el manual de DJI Terra (2024), se recomienda un traslape longitudinal de al menos 65% y un traslape transversal de al menos 60%, ajustándose según las condiciones del terreno para garantizar datos suficientes para el procesamiento fotogramétrico. En estudios similares, se recomienda emplear la combinación de 80% longitudinal y 70% transversal (Cruz, 2022). En este estudio, se probarán tres combinaciones de traslapes (ver Tabla 1), evaluando los resultados en términos de cantidad de fotografías, tiempo de vuelo y calidad de los modelos generados.

	Traslape Longitudinal	Traslape Transversal
Combinación 1	70%	60%
Combinación 2	80%	70%
Combinación 3	90%	80%

*Tabla 1: Combinaciones de traslapes longitudinal y transversal.*

- Condiciones Meteorológicas

De acuerdo con el manual del dron Phantom 4 Pro, este puede operar con vientos de hasta 10 m/s (36 km/h) y su rango de temperatura operativa se encuentra entre 0°C y 40°C (DJI, 2017). Estos parámetros se ingresan en la aplicación UAV Forecast, una herramienta que permite evaluar en tiempo real si las condiciones meteorológicas son adecuadas para volar un dron. La aplicación ofrece información sobre velocidad y dirección del viento, temperatura, visibilidad y probabilidad de precipitaciones, además permite ingresar los parámetros específicos del dron para asegurar que las condiciones sean adecuadas para la operación.



Figura 6: Ejemplo de verificación de condiciones meteorológicas con aplicación UAV Forecast.

Fuente: UAV Forecast.

- Puntos de Control Terrestre

Los puntos de control terrestre son puntos sobre el terreno con coordenadas conocidas que se utilizan como apoyo para la orientación y georreferenciación de las fotografías. La cantidad de puntos necesarios varía según el tamaño y la complejidad del área de estudio, y su distribución se realiza de manera uniforme, priorizando las esquinas y el centro del área de interés. En este caso, considerando las características de los sitios de estudio, se decide la colocación de tres puntos de control terrestre para cada lugar de medición. Uno de ellos se establece como base, se vincula con la estación de operación continua UDEC00CHL (UdeC – Los Ángeles) y se mide en modo estático durante un período de tres horas. Los otros dos puntos se miden en modo estático-rápido durante una hora cada uno, y sus coordenadas se calculan en relación con el punto base previamente definido. Para garantizar su funcionalidad, se requiere que los puntos sean claramente visibles en las imágenes capturadas, con marcas de alto contraste y un centro bien definido que facilite su identificación en el software de procesamiento. En este caso, se utiliza la demarcación existente en los sitios, ocupando vértices previamente establecidos.

### **3.3. Procesamiento de Fotografías**

El procesamiento de las fotografías se realiza con el software Agisoft Metashape, se comienza con la creación de un nuevo proyecto, donde se importan las fotografías capturadas durante los vuelos. Se revisan las imágenes para verificar que no presenten errores, como desenfoces o problemas de exposición, ya que imágenes defectuosas pueden afectar la precisión del modelo final. Luego se realiza la orientación de las

fotografías utilizando la opción de precisión máxima, obteniendo una nube de puntos dispersa. Las coordenadas geográficas se convierten a coordenadas UTM, eligiendo el sistema WGS84 UTM Zona 18 Sur. Luego, se deben ingresar los puntos de control terrestre cargando sus coordenadas (Anexo 2) en el software e identificándolos en las fotografías correspondientes. Una vez que todos los puntos de control han sido ubicados, se procede a optimizar las cámaras, lo que permite ajustar los parámetros de orientación interna y externa, reduciendo errores en las posiciones estimadas y mejorando la calidad general del modelo (Agisoft LLC, 2021) .

A continuación, se genera una nube de puntos densa con calidad extra alta. Lo anterior demanda un uso intensivo de recursos computacionales, si el equipo no es adecuado, el procesamiento puede ser lento o incluso fallar. Una vez creada la nube de puntos densa, se realiza una depuración de la nube, eliminando aquellos puntos que no corresponden al área de interés, como lo son puntos situados por debajo del nivel del terreno, puntos de objetos elevados como árboles, o ruido generado por sombras u objetos fuera de la zona de estudio. Con la nube de puntos depurada, se construye una malla con calidad extra alta. Por último, se generan el MDE a partir de la nube de puntos y el ortomosaico a partir de la malla.

### **3.4. Detección y Cuantificación de Deterioros**

Para la medición de deterioros, tanto con el método tradicional de medición en terreno como con el fotogramétrico mediante vuelos, se debe contar con una guía rápida que permita identificar el tipo de deterioro presente y evaluar su nivel de severidad de manera eficiente. Existen manuales como los elaborados por Shahin (2005), titulados "Asphalt

Surfaced Airfields: Pavement Condition Index" y "Concrete Surfaced Airfields: Pavement Condition Index", que proporcionan descripciones detalladas de cada tipo de deterioro, incluyendo sus causas, características de los diferentes niveles de severidad, consideraciones para su medición y ejemplos fotográficos. Aunque estos manuales son completos y útiles, su consulta en terreno puede resultar poco práctica debido a su extensión, lo que dificulta un acceso rápido a la información durante la evaluación. Por este motivo, se han creado tablas simplificadas tanto para pavimentos asfálticos como de hormigón, basadas en las descripciones de los manuales de Shahin, para facilitar la identificación y medición de deterioros de manera rápida, las cuales se incluyen en el Anexo 3 del presente informe.

A continuación, se detalla cómo se lleva a cabo la detección y cuantificación de los deterioros mediante los dos métodos: el análisis fotogramétrico utilizando ortomosaico y MDE, y la medición directa en terreno.

- Medición mediante análisis fotogramétrico utilizando ortomosaico y MDE

Para la detección y cuantificación de los deterioros, se utiliza el software QGIS, empleado en Sistemas de Información Geográfica (SIG) para visualizar, analizar y procesar datos geoespaciales. El análisis se realiza utilizando el ortomosaico y el MDE obtenidos a partir del procesamiento de las fotografías en Agisoft Metashape.

En el caso del MDE, se utiliza la herramienta de sombreado de relieve (Hillshade) en QGIS, que aplica una simbología para resaltar las variaciones del terreno mediante sombras, facilitando la identificación de características superficiales. Para aplicar esta herramienta,

es necesario configurar parámetros como el ángulo de elevación y el azimut de la fuente de luz. Estos valores se pueden obtener de sitios web como SunEarthTools.com, donde se ingresan datos específicos del lugar, fecha y hora del vuelo para calcular la posición del sol en el momento de la captura de las fotografías.

Los deterioros se delimitan mediante polilíneas o polígonos, dependiendo de la forma en que se deben medir: en metros lineales, metros cuadrados o según cómo se distribuyen en las losas de pavimento de hormigón. A continuación, se presentan dos tablas que clasifican cada tipo de deterioro según su método de delimitación.

<b>Pavimentos de Hormigón</b>		<b>Pavimentos Asfálticos</b>	
Tipo de Deterioro	Tipo Delimitación	Tipo de Deterioro	Tipo Delimitación
Levantamiento	Polígono	Agrietamiento por fatiga (piel de cocodrilo)	Polígono
Grieta de esquina	Polilínea	Exudación	Polígono
Grietas lineales, transversales y diagonales	Polilínea	Agrietamiento tipo bloque	Polígono
Grietas de durabilidad	Polígono	Corrugación (ondulación)	Polígono
Deterioro del sello de junta	Polilínea	Hundimiento (depresión)	Polígono
Bacheo pequeño (menor a 0,5 m2)	Polígono	Erosión por chorro de jet	Polígono
Bacheo grande (mayor a 0,5 m2)	Polígono	Agrietamiento por reflexión de juntas	Polilínea
Desprendimientos por disgregación de áridos	Polígono	Agrietamiento lineal (longitudinal o transversal)	Polilínea
Bombeo	Polígono	Por derrame de combustible	Polígono
Agrietamiento tipo mapeo o descascaramiento	Polígono	Bacheo	Polígono
Asentamiento o escalonamiento	Polilínea	Áridos pulidos	Polígono
Cuarreamiento o losa fracturada	Polilínea	Pérdida de áridos y peladuras (disgregación)	Polígono
Grietas de contracción	Polilínea	Ahuellamiento	Polígono
Astillamiento de juntas transversales y longitudinales	Polígono	Desplazamiento por empuje de losas de hormigón	Polígono
Astillamiento de grieta de esquina	Polígono	Agrietamiento por deslizamiento	Polígono
		Hinchamiento	Polígono

Tabla 2: Clasificación de Deterioros según el Método de Delimitación.

A la izquierda, deterioros en pavimentos asfálticos; a la derecha, deterioros en pavimentos de hormigón, clasificados según el uso de polilíneas o polígonos para su delimitación. Fuente: Elaboración propia.

- Medición de Deterioros en Pavimentos de Hormigón

El análisis comienza con la revisión del ortomosaico, donde se delimitan las losas que componen el pavimento para establecer el área de trabajo. Una vez definidas las losas, se procede a inspeccionarlas individualmente, realizando un acercamiento a escala 1:25 para identificar los deterioros. La inspección sigue un recorrido sistemático, comenzando por las esquinas, continuando con las juntas y finalizando en el centro de la losa. Tras detectar los deterioros, se realiza un segundo acercamiento a escala 1:10 para delimitarlo utilizando polilíneas o polígonos, según la clasificación establecida (Tabla 2). Para determinar el nivel de severidad, se siguen las especificaciones correspondientes a cada tipo de deterioro, considerando aspectos como el ancho de las grietas, la cantidad de desprendimientos o la fragmentación de la losa, entre otros factores.

A continuación, se analiza el MDE siguiendo los mismos pasos descritos anteriormente, se realiza un acercamiento a las losas, se examinan las esquinas, juntas y el centro de cada una. En caso de identificar un deterioro, se utiliza el complemento Profile Tool de QGIS, una herramienta que permite generar perfiles de elevación a lo largo de una línea trazada sobre el MDE, permitiendo medir la profundidad del deterioro y evaluar su nivel de severidad.

Para este tipo de pavimentos se crean cuatro campos en las tablas de atributos de las capas de geometría, esto para registrar la información de los deterioros identificados:

- 1) Losa: Indica la ubicación de la losa donde se encuentra el deterioro utilizando el formato fila – columna.

- 2) Tipo de Deterioro: Registra el número correspondiente al tipo de deterioro según la clasificación presentada en la tabla “Deterioros y sus Niveles de Severidad para Pavimentos de Hormigón” del Anexo 3.
- 3) Medida: Almacena las dimensiones necesarias para determinar el nivel de severidad, como el ancho de grietas o valores de desnivel.
- 4) Nivel de Severidad: Clasifica los deterioros en una escala del 0 al 3, donde 0 corresponde a deterioros sin severidad asignada (color azul), 1 representa severidad baja (color amarillo), 2 corresponde a severidad media (color naranja), y 3 a severidad alta (color rojo).

La creación de estos campos permite obtener una descripción completa de cada deterioro registrado, lo que facilita el análisis posterior de los datos.

- Medición de Deterioros en Pavimentos Asfálticos

Para el caso de los pavimentos asfálticos, el análisis también comienza revisando el ortomosaico. A diferencia de los pavimentos de hormigón, estos no cuentan con losas, por lo que la revisión se realiza partiendo desde una esquina del ortomosaico y realizando acercamientos de forma progresiva hasta detectar un deterioro. Al encontrar uno, se identifica el tipo de deterioro observado; para ello, se realiza un alejamiento si es necesario a una escala adecuada que permita visualizar el deterioro en su totalidad. Una vez identificado, se procede a delimitarlo utilizando polilínea o polígono, según corresponda, realizando un acercamiento a escala 1:10 para trazar con precisión los bordes. Finalmente, se analiza su nivel de severidad en función del tipo de deterioro presente, siguiendo las especificaciones correspondientes.

Para el análisis del MDE en pavimentos asfálticos, se sigue el mismo procedimiento empleado para los pavimentos de hormigón. Los deterioros identificados en el MDE se delimitan utilizando tanto el MDE como el ortomosaico para obtener una referencia visual clara del área afectada. En caso de ser necesario, los deterioros encontrados se analizan mediante líneas de tendencia generadas a partir de los datos obtenidos con el complemento Profile Tool de QGIS. Estos datos se analizan en MATLAB, donde se generan líneas de tendencia que se ajustan tanto al perfil original del pavimento como al tipo de deterioro a medir. A partir de estas líneas, se calcula la diferencia entre el perfil actual, obtenido del MDE, y el estado inicial del pavimento. En el caso del ahuellamiento, la evaluación se realiza a lo ancho de la calzada, de forma perpendicular al sentido del tráfico, considerando las pendientes de bombeo diseñadas para la evacuación de aguas (Figura 7). Por otro lado, para deterioros como el hundimiento, la medición se limita a la profundidad del daño, ya que no se ve afectada por las pendientes de este tipo.

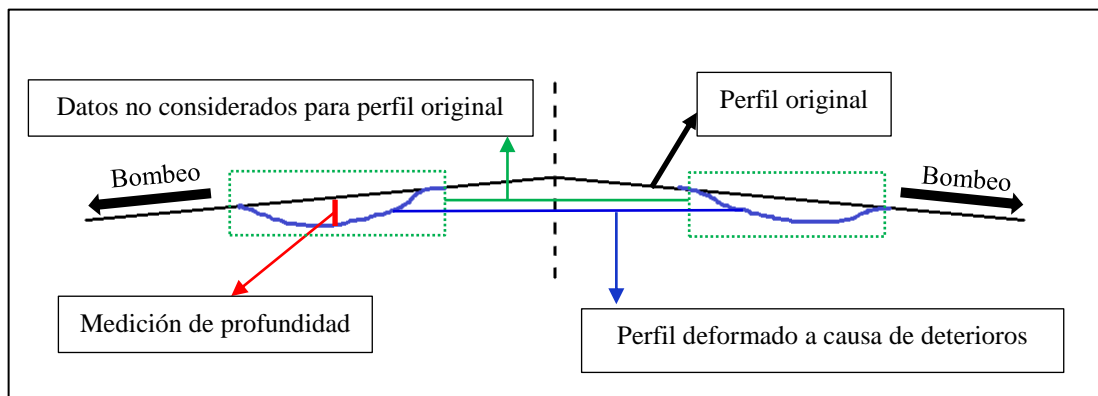


Figura 7: Evaluación de deterioros que incluyen deformación de la carpeta de rodadura.

Mediante líneas de tendencia se proyecta el perfil original considerando el bombeo. Fuente: Elaboración propia.

En los pavimentos asfálticos, los deterioros que se miden en metros lineales se delimitan con líneas, mientras que los que se miden en metros cuadrados se delimitan con polígonos;

por esta razón, para obtener la cantidad de cada deterioro, se calcula la longitud de las polilíneas y el área de los polígonos.

Para este tipo de pavimentos se crean cinco campos, de manera similar a los utilizados para pavimentos de hormigón. Se incluye un campo “Tipo de Deterioro”, que registra el número del deterioro según la clasificación establecida en la tabla “Deterioros y sus Niveles de Severidad para Pavimentos Asfálticos” del Anexo 3, un campo “Nivel de Severidad” con valores de 0 a 3, y un campo “Medida” donde se anotan las dimensiones necesarias para evaluar el nivel de severidad. Dado que en los pavimentos asfálticos no existen losas, se crea el campo “ID”, que permite identificar de manera única cada deterioro registrado. También se incluye el campo “Cantidad”, en el cual se registran las mediciones en metros lineales o metros cuadrados, según corresponda, para cada deterioro identificado.

- Medición Tradicional en Terreno

Para realizar la medición de deterioros en terreno se comienza identificando el tipo de deterioro, determinando su cantidad y registrando su ubicación aproximada en un croquis. Para esto, se utilizan fichas de inspección para cada unidad de muestra a evaluar, las cuales varían según el tipo de pavimento (asfáltico o de hormigón). Las fichas incluyen un croquis para indicar de forma aproximada la ubicación de los deterioros, una sección para registrar los datos de la unidad de muestra, el nombre del inspector y la fecha de la medición, una lista numerada con todos los tipos de deterioros posibles según el pavimento analizado y un espacio destinado a ingresar los valores medidos para cada deterioro observado. Los datos se obtienen utilizando instrumentos como odómetros, cintas métricas y reglas (Figura 8). Dado que se requiere una comparación precisa entre los datos recolectados en terreno

y los obtenidos del vuelo fotogramétrico, se diseñan fichas especiales para cada sitio de estudio. Estas fichas mantienen una estructura similar a la del método PCI, pero omiten la descripción de la unidad de muestra presente en las fichas tradicionales. Además, cuentan con un espacio amplio para el croquis, donde se dibuja la señalización horizontal de cada lugar, lo que facilita la ubicación de los deterioros durante la medición en terreno y pretende ayudar a una mejor comparación de los datos (Anexo 4).



*Figura 8: Toma de datos mediante medición tradicional en terreno.*

## 4. Resultados y Análisis

### 4.1. Datos Obtenidos a Partir de Vuelos

A partir de los vuelos realizados y del procesamiento de las fotografías, se obtienen los datos correspondientes para cada sitio de estudio. Se registra la cantidad de imágenes capturadas, la cantidad de memoria utilizada, el tiempo de vuelo y la resolución alcanzada en los ortomosaicos generados, evaluando estos aspectos según las diferentes combinaciones de altura de vuelo y traslapes longitudinales y transversales, las que se resumen en las Tablas 3 y 4.

Altura (m)	Traslape		Cantidad de fotos	Memoria (MB)	Tiempo de vuelo (min)	GSD (mm/pix)	Resolución obtenida (mm/pix)
	Longitudinal (%)	Transversal (%)					
10	70	60	29	218	1:44	4.98	2.67
	80	70	62	462	3:06		2.58
	90	80	169	1220	7:36		2.69
15	70	60	20	147	1:00	7.47	3.95
	80	70	29	214	1:48		3.91
	90	80	80	595	4:00		3.81

*Tabla 3: Resultados de los Vuelos en Sitio con Pavimento de Hormigón.*

*(Estacionamiento del Consultorio General Rural y DAEM, Laja, Región del Biobío; Área aproximada: 600 m<sup>2</sup>).*

Altura (m)	Traslape		Cantidad de fotos	Memoria (MB)	Tiempo de vuelo (min)	GSD (mm/pix)	Resolución obtenida (mm/pix)
	Longitudinal (%)	Transversal (%)					
10	70	60	54	407	3:09	4.98	2.71
	80	70	105	795	5:30		2.76
	90	80	294	2160	13:55		2.64
15	70	60	28	209	1:45	7.47	3.88
	80	70	56	372	3:15		4.01
	90	80	135	990	7:07		3.91

*Tabla 4: Resultados de los Vuelos en Sitio con Pavimento Asfáltico.*

*(Subcomisaría I.A.T. y Carreteras BIO BIO, Ruta 5 Sur Km. 476, Región del Biobío; Área aproximada: 800 m<sup>2</sup>).*

A partir de los resultados obtenidos, se realiza un análisis de la altura de vuelo y los traslapes longitudinal y transversal, el cual se presenta a continuación.

- Altura de vuelo

Tanto para pavimentos asfálticos como para pavimentos de hormigón, existen deterioros que, en niveles de severidad bajos y medios, requieren mediciones a partir de 3 mm. Las resoluciones obtenidas para los ortomosaicos con vuelos a 15 m de altura comienzan en 3.81 mm/píxel, lo que implica que algunos deterioros no se distinguen con claridad, ya que el tamaño del píxel es superior al ancho de estos deterioros. Aunque los deterioros pueden ser visibles tanto a 10 m como a 15 m de altura, la dificultad surge al delimitarlos, medir sus dimensiones y determinar su nivel de severidad, ya que la resolución alcanzada a estas alturas no permite capturar con detalle las irregularidades más finas del pavimento (Figura 9).



*Figura 9: Observación del mismo deterioro con alturas de vuelo de 10 m y 15 m.*

*A la izquierda, vuelo a 10 m de altura con resolución de 2.58 mm/píxel; a la derecha, vuelo a 15 m de altura con resolución de 3.81 mm/píxel.*

*Fuente: Elaboración propia.*

- Traslape Longitudinal y Transversal

Se evalúan las combinaciones de traslapes longitudinales y transversales, considerando parámetros como la cantidad de fotografías capturadas, el uso de memoria y la calidad de los ortomosaicos y MDE generados. En cuanto a la cantidad de fotografías y el almacenamiento requerido, se observa un aumento considerable al incrementar los porcentajes de traslape. Respecto a la calidad de los ortomosaicos, se observa que no se presentan diferencias significativas entre las combinaciones 80%-70% y 90%-80%, sin embargo, con la combinación 70%-60%, se identifican pequeñas deficiencias en la alineación de las imágenes, como se muestra en la Figura 10, donde se exhiben imperfecciones e irregularidades en el borde del objeto central. De acuerdo con lo anterior, se elige como combinación óptima de traslape longitudinal y transversal un 80% y 70%, respectivamente. Esta elección coincide con estudios similares, como el realizado en Estados Unidos y publicado recientemente denominado “Use of small unmanned aircraft systems in airfield pavement inspection: implementation and potential”, en el cual se evaluó el uso de datos de sistemas de aeronaves no tripuladas (sUAS) para la inspección de pavimentos en aeródromos (Sourav et al., 2024). Ante la coincidencia de parámetros, se consultó a los autores del estudio sobre su elección de traslapes, quienes respondieron que base en su experiencia de una década operando drones para investigación, encontraron que los traslapes 70%-80% o 60%-70% producen ortofotos confiables sin problemas. Y que usaron la combinación 80%-70% porque les ha funcionado consistentemente durante mucho tiempo. Esta respuesta refuerza la elección de los parámetros utilizados en este análisis, concordando con la experiencia práctica y los resultados.



Figura 10: Comparación de un área específica en ortomosaicos generados con las diferentes combinaciones de traslapes.

*A la izquierda se presenta el ortomosaico generado con traslape longitudinal del 70% y transversal del 60%; en el centro, con traslape del 80% y 70%; y a la derecha, con traslape del 90% y 80% respectivamente.*

#### **4.2. Detección y Cuantificación de Deterioros**

Para la medición de deterioros mediante análisis fotogramétrico, la selección de los ortomosaicos se realiza evaluando tanto la resolución obtenida como la cantidad de posibles obstáculos presentes. Dado que los vuelos se efectúan en lugares concurridos, se programan en horarios de menor congestión para reducir interferencias; sin embargo, aún puede haber obstáculos temporales, como autos estacionados o personas, lo que podría afectar la visibilidad y la precisión de las mediciones.

- Pavimento de Hormigón

En pavimentos de hormigón, los deterioros se miden por losa. Para un total de 27 losas evaluadas, se identifican 8 de los 15 tipos de deterioros clasificados para este tipo de pavimento. Mediante el método tradicional de medición en terreno se miden 97 deterioros (Anexo 5), mientras que con el análisis fotogramétrico se registran 93 deterioros (Anexo 6). De estas cantidades:

- 81 deterioros se detectan con ambos métodos coincidentemente, donde 80 presentan igual nivel de severidad.
- 16 deterioros se identifican solo mediante la medición tradicional en terreno.
- 12 deterioros se miden únicamente a través del análisis fotogramétrico.
- 109 deterioros totales en el lugar.

De los 16 deterioros detectados únicamente en terreno, se examinaron las losas donde estos se encontraban y se observó que 4 de ellos correspondían a las que, al momento de realizar los vuelos, tenían vehículos estacionados sobre ellas. Debido a esta obstrucción, solo fue posible evaluar las áreas visibles, no pudiendo registrar los deterioros que se encontraban bajo los vehículos, lo que afectó la detección completa. De los 12 deterioros restantes que solo se registraron mediante el método tradicional en el terreno, se identificó que 11 se encontraban en losas total o parcialmente cubiertas por sombra, ya sea de infraestructura adyacente o de árboles cercanos. De estos deterioros: 2 corresponden a astillamiento de esquina con nivel de severidad bajo, 3 son astillamientos de juntas transversales y longitudinales con nivel de severidad bajo, 3 pertenecen al tipo desprendimiento por disgregación de áridos, 1 es un agrietamiento de tipo mapeo en nivel de severidad bajo y 2 corresponden a grietas de contracción. Esto indica que la presencia de sombra dificulta la detección de estos tipos de deterioros con nivel de severidad bajo, como se evidencia en la Figura 11.



*Figura 11: Impacto de la sombra en la detección de deterioros.*

*En la imagen se observa que en la zona sin sombra se identifican dos tipos de deterioros: agrietamiento tipo mapeo con nivel de severidad bajo y desprendimiento por disgregación de áridos. Sin embargo, estos deterioros desaparecen abruptamente en la sección cubierta por sombra.*

El deterioro restante, que no se encontró en una losa con obstrucción ni cubierta por sombra, corresponde a un caso en el que se registraron tres deterioros del mismo tipo para esa losa, aunque en el croquis solo se dibujaron dos. Esto sugiere un posible problema derivado del sistema manual de levantamiento de información en terreno, indicando un error en el registro durante la inspección.

De los 12 deterioros detectados únicamente mediante análisis fotogramétrico, 7 corresponden a agrietamiento tipo mapeo, 3 al tipo desprendimiento por disgregación de áridos y 2 a astillamiento de juntas transversales y longitudinales. Esto indica que los deterioros tipo mapeo y desprendimiento por disgregación de áridos se identifican con mayor precisión mediante análisis fotogramétrico, ya que estos se evalúan a lo largo de toda la losa, lo que hace que su evaluación en terreno sea más compleja y susceptible de

ser omitida en el registro, mientras que el análisis fotogramétrico facilita la revisión completa de la losa permitiendo una mejor detección. Además, en los 2 deterioros restantes se observa lo siguiente: uno de ellos en terreno fue dibujado en el croquis, pero no fue registrado; mientras que el otro, fue registrado como un único deterioro en terreno, y mediante el análisis fotogramétrico se delimita en dos secciones.

Se realiza un análisis del único deterioro registrado por ambos métodos con diferente nivel de severidad. Este corresponde a un agrietamiento de tipo mapeo. En el método tradicional de medición en terreno, solo se registra el nivel de severidad medio, mientras que con el análisis fotogramétrico se identifica tanto el nivel bajo como el medio. Aunque en el método PCI se registra solo el nivel más alto de severidad para un mismo deterioro, en este estudio se opta por registrar todos los niveles de severidad observados en cada losa para obtener un análisis más detallado.

A continuación, se presenta la Tabla 5, que muestra los resultados en porcentajes, enfocada en evaluar la efectividad de ambos métodos de detección y el nivel de correspondencia entre ellos.

Deterioros	Porcentaje	
Detectados con ambos métodos	74.3%	Respecto al total de deterioros en el lugar (109)
Detectados con Método Tradicional	89%	
Detectados con Análisis Fotogramétrico	85.3%	
Detectados con Análisis Fotogramétrico en losas sin obstrucciones	99.1%	
Con coincidencia en nivel de severidad	98.8%	Respecto a total de deterioros detectados por ambos métodos (81)

*Tabla 5: Porcentajes de detección y correspondencia de deterioros según el método de evaluación en pavimento de hormigón.*

A partir de los resultados, se observa que, en condiciones óptimas sin obstrucciones, el análisis fotogramétrico ofrece una detección de deterioros más efectiva que el método tradicional. Además, existe una alta coincidencia en la clasificación del nivel de severidad de los deterioros identificados por ambos métodos.

Como se mencionó anteriormente, para este estudio se utilizaron fichas de inspección adaptadas que incluyen la señalización horizontal, a diferencia de las empleadas en el método tradicional, que carecen de esta orientación. Esta ausencia incrementa la susceptibilidad a errores en el registro de los deterioros. Asimismo, el método tradicional no permite una revisión posterior de las mediciones, ya que estas se realizan en una sola ocasión. En contraste, el análisis fotogramétrico facilita futuras revisiones al posibilitar la visualización de los modelos generados posteriormente.

La Figura 12 presenta los croquis de ubicación de los deterioros identificados mediante la medición tradicional en terreno y el análisis fotogramétrico, mostrando la distribución de los deterioros encontrados con cada método y destacando una mejor identificación de los deterioros con el análisis fotogramétrico.



Figura 12: Croquis de ubicación de deterioros detectados en pavimento de hormigón con medición tradicional en terreno y mediante análisis fotogramétrico.

A la izquierda se presenta el croquis de los deterioros identificados con el método de medición tradicional en terreno, mientras que a la derecha se muestra el croquis obtenido mediante el análisis fotogramétrico.

- Pavimento Asfáltico

En pavimentos asfálticos los deterioros se miden en metros lineales o metros cuadrados, dependiendo del tipo de deterioro. En el sitio de estudio se identifican 8 de los 16 tipos de deterioros clasificados para este tipo de pavimento. Mediante el método tradicional de medición en terreno se registran un total de 57 deterioros (Anexo 5), mientras que con el análisis fotogramétrico se registran 68 deterioros (Anexo 6). De estas cantidades:

- 56 deterioros se detectan con ambos métodos coincidentemente, donde 51 presentan igual nivel de severidad.
- 1 deterioro se identifica solo mediante la medición tradicional en terreno.
- 12 deterioros se miden únicamente a través del análisis fotogramétrico.
- 69 deterioros totales en el lugar.

De los deterioros encontrados con ambos métodos, 37 corresponden al tipo de deterioro denominado agrietamiento lineal, el cual se mide en metros lineales. Al comparar las mediciones de estos deterioros, se observa que:

- 8 no presentaron diferencias.
- 15 deterioros con diferencias en el rango de 0.1 m a 0.2 m: Esto se puede explicar por el método de medición utilizado en terreno, donde se emplea un odómetro para intentar seguir la forma de la grieta. Sin embargo, este procedimiento no logra capturar con precisión toda la forma sinuosa de la grieta. Por otro lado, las mediciones realizadas mediante análisis fotogramétrico permiten seguir la forma real del deterioro, lo que reduce las variaciones en el resultado final.

- 6 deterioros con diferencias entre 0.3 m y 0.4 m: En 2 de estos casos, las diferencias se pueden atribuir nuevamente al método de medición en terreno comparado con el análisis fotogramétrico. Uno de los deterioros supera los 10 m de longitud, lo que puede generar acumulación de diferencias al medir con odómetro, mientras que el otro deterioro presenta una grieta con forma irregular, lo que dificulta obtener una medición precisa en el terreno. Para los 4 deterioros restantes, las diferencias pueden deberse a esta misma situación o a una limitación en la visibilidad de las grietas en el ortomosaico.
- Los 8 deterioros restantes presentan discrepancias mayores, con diferencias que varían entre 0.5 m y 1.5 m. Estas discrepancias están relacionadas con el método de delimitación de los deterioros que se miden en metros cuadrados. En el método tradicional en terreno, estos deterioros se delimitan utilizando un rectángulo que cubre todo el deterioro o la mayor parte de él, lo que genera imprecisiones al no seguir con exactitud los bordes reales del deterioro. Esta forma de delimitación ocasiona diferencias significativas en las mediciones de los deterioros, como se observa en la Figura 13.

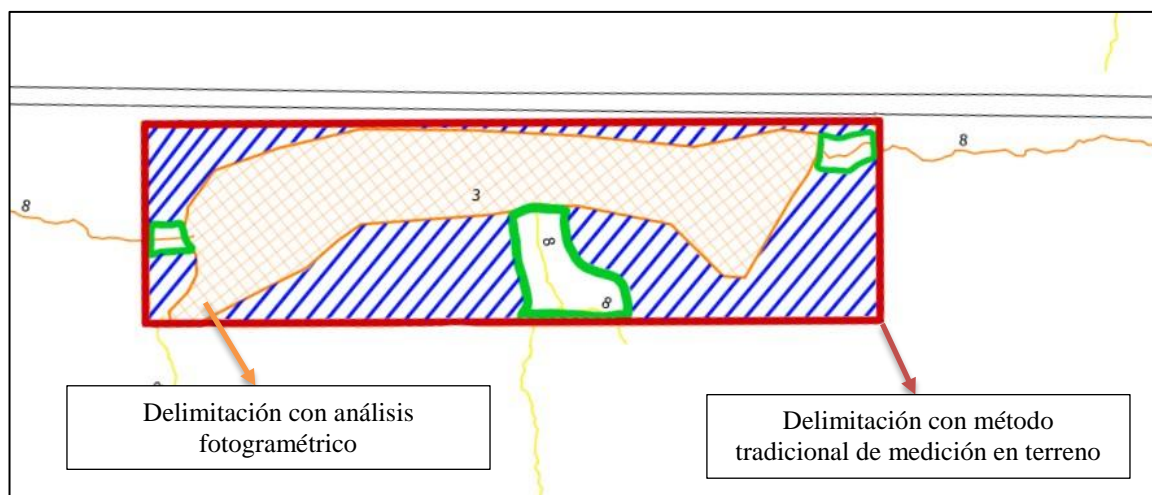


Figura 13: Ejemplo de diferencias en delimitación entre ambos métodos de medición.

En la Figura, el rectángulo rojo representa la delimitación realizada en terreno, mientras que el polígono naranja corresponde a la delimitación obtenida a partir del análisis fotogramétrico. Las áreas tachadas con líneas azules muestran las diferencias registradas en la mayoría de los deterioros medidos en metros cuadrados. Además, se evidencia en verde cómo estas delimitaciones afectan la medición de deterioros cercanos, generando las discrepancias observadas en los 8 deterioros con mayores diferencias entre los dos métodos.

De los 19 deterioros restantes, todos corresponden a tipos de deterioros que se miden en metros cuadrados. Entre ellos:

- 3 son casos de agrietamiento por fatiga, los cuales presentaron diferencias en las mediciones de hasta 1.5 m<sup>2</sup>.
- 6 corresponden a agrietamiento tipo bloque, donde 4 presentaron diferencias de área entre 0.6 m<sup>2</sup> y 1.1 m<sup>2</sup>, mientras que los otros 2 casos mostraron diferencias más significativas, alcanzando áreas de 5.2 m<sup>2</sup> y 9.3 m<sup>2</sup>.
- 2 deterioros son de hundimiento, con diferencias menores entre los métodos, registrando discrepancias de 0 y 0.4 m<sup>2</sup>.
- 1 deterioro es causado por derrame de combustible y no mostró diferencias entre los métodos de medición.
- 1 corresponde a bacheo, el cual tampoco registró diferencias en las mediciones.
- 3 deterioros son de pérdida de áridos y peladuras, donde se observan diferencias entre 3.1 m<sup>2</sup> y 5.5 m<sup>2</sup>, con valores más altos en la medición tradicional en terreno.

- 3 corresponden a ahuellamiento, registrando diferencias significativas entre ambos métodos, alcanzando discrepancias de hasta 11.3 m<sup>2</sup>, siendo más altas las mediciones realizadas mediante el análisis fotogramétrico.

Del análisis de estas diferencias se concluye que las discrepancias observadas en los 3 deterioros de tipo agrietamiento por fatiga, los 6 deterioros de tipo agrietamiento de tipo bloque y los 2 deterioros por hundimiento son debido a las diferencias en la forma de delimitación aplicada por ambos métodos. En algunos casos, la delimitación realizada en terreno registró un único deterioro, mientras que mediante el análisis fotogramétrico se identificaron dos deterioros diferentes, esto gracias a la posibilidad de realizar mediciones detalladas que permiten establecer delimitaciones más precisas y adecuadas para cada tipo de deterioro.

Para las mediciones del deterioro correspondiente al tipo bacheo, no se registran diferencias entre las mediciones realizadas con ambos métodos. Esto se debe a que este tipo de deterioro presenta una forma rectangular, lo que permite que su delimitación y cuantificación se realice de manera similar tanto en terreno como mediante el análisis fotogramétrico.

En las mediciones de los deterioros de tipo pérdida de áridos y peladuras, se observan diferencias significativas entre los dos métodos de medición. Esto se debe a que estos deterioros son visibles solo en el MDE y en menor proporción respecto a lo registrado en terreno. En el método tradicional, estos deterioros se documentan con un nivel de severidad alto. Con base en lo anterior, se puede inferir que en el MDE este tipo de deterioro es

perceptible únicamente cuando presenta un nivel de severidad elevado, lo que se podría explicar por la progresiva disminución del nivel de severidad hacia los bordes del deterioro.

Las diferencias registradas en los deterioros de tipo ahuellamiento reflejan la dificultad de observar y delimitar este tipo de deterioro en terreno. Según los manuales, este tipo de deterioro, en muchos casos, es visible únicamente después de una lluvia, lo que complica su identificación durante inspecciones en condiciones normales. La delimitación en terreno de este deterioro también presenta desafíos, ya que se basa en mediciones realizadas en diferentes puntos hasta identificar áreas sin deformaciones, lo cual no siempre resulta preciso. Sin embargo, mediante el análisis fotogramétrico, este tipo de deterioro se detecta con mayor facilidad utilizando el MDE. Su nivel de severidad se determina midiendo la profundidad, al igual que para los deterioros de hundimiento, lo que requiere obtener puntos con sus respectivas coordenadas y alturas a lo largo de las líneas indicadas (Figura 14). Estos datos se analizan utilizando scripts de MATLAB, detallados en el Anexo 7. Estas variaciones reflejan las discrepancias entre las mediciones realizadas en el terreno y las obtenidas mediante análisis fotogramétrico.

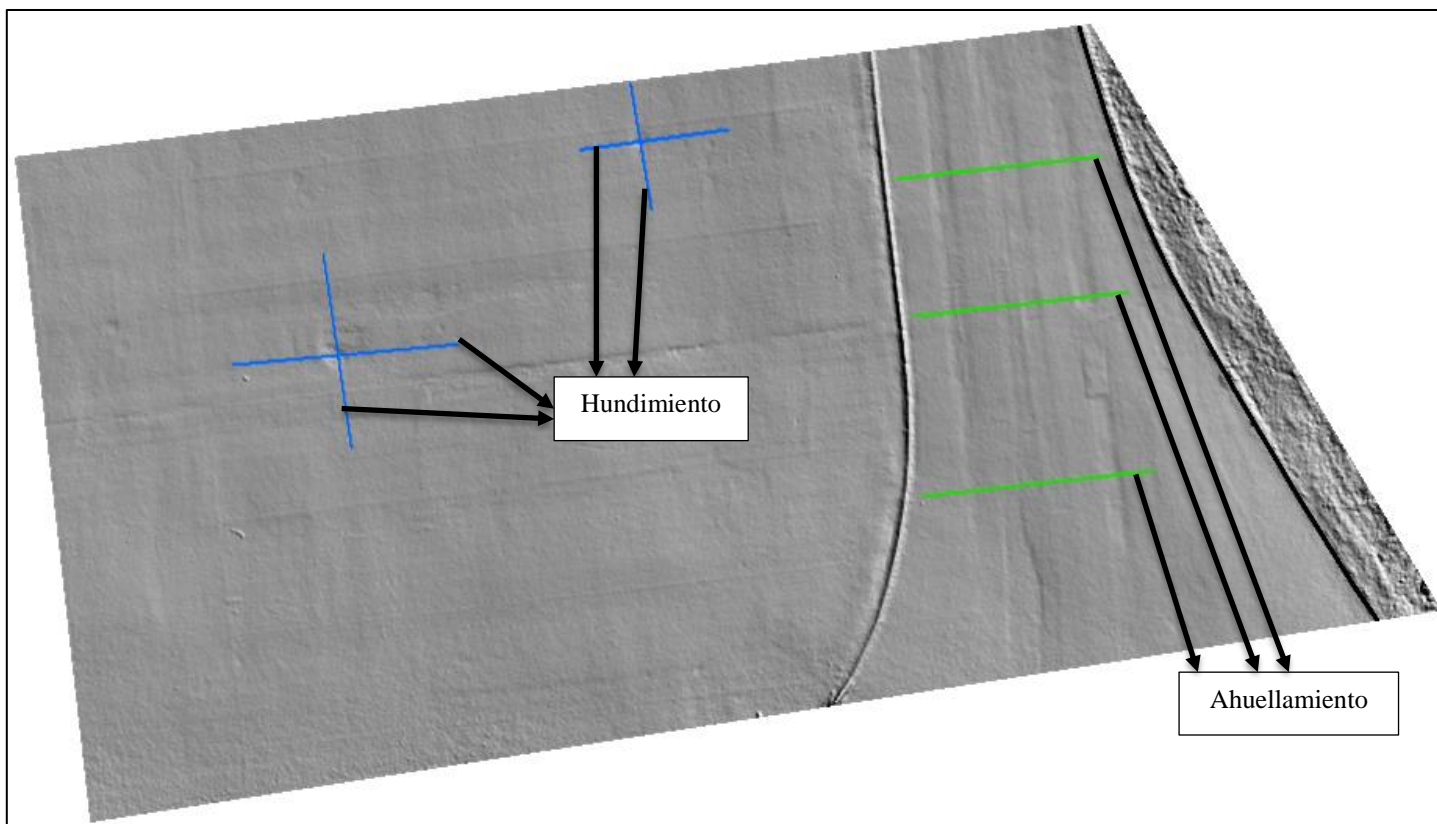


Figura 14: Estudio hundimiento y ahuellamiento.

De los 5 deterioros registrados con ambos métodos, pero con diferentes niveles de severidad, 3 de estos corresponden a agrietamiento lineal, donde 1 fue registrado en terreno con nivel bajo de severidad, mientras que el análisis fotogramétrico lo clasificó con nivel medio. Este tipo de deterioro considera grietas con anchos mayores a 6 mm como nivel medio. En terreno, no se registró la medida exacta de la grieta, solo su nivel de severidad. Sin embargo, mediante el análisis fotogramétrico, se registró una medida de 10.4 mm, lo que indica que el deterioro se debía clasificar como nivel medio. Esto refleja una limitación del método tradicional, ya que no se puede revisar la medición realizada a este deterioro posteriormente. Los otros 2 deterioros de este tipo fueron clasificados en terreno con nivel alto de severidad, mientras que el análisis fotogramétrico los identificó como nivel medio. Al revisarlos, se observó que, aunque presentan saltaduras, éstas no son severas. Sin

embargo, la existencia de éstas pudo haber influido en el registro en terreno, lo que refleja la posibilidad de subjetividades o errores de interpretación al momento de evaluar los niveles de severidad.

Uno de los casos correspondía a un deterioro por pérdida de áridos y peladuras, en terreno se registró con nivel bajo de severidad. Sin embargo, en el análisis fotogramétrico se registró con nivel alto. Este cambio se debe a que, en el MDE se identificaron áreas considerablemente menores por lo que se dedujo que éstas correspondían a un nivel alto de severidad, asumiendo que los niveles bajos y medios no eran visibles en el MDE. Finalmente, el quinto deterioro con diferencias en el nivel de severidad corresponde a ahuellamiento, este fue registrado en terreno con nivel de severidad medio, indicando una profundidad de 15 mm. Por otro lado, con el análisis fotogramétrico se midió una profundidad de 8.8 mm, evaluada en dos puntos del MDE. Esta discrepancia podría atribuirse al instrumento utilizado en terreno, el cual no era el más adecuado para este tipo de medición. En este caso, se empleó una herramienta cuya rigidez no era la idónea, ya que presentaba un nivel de flexibilidad que la hacía susceptible a inflexiones durante el proceso de medición.

El deterioro identificado únicamente mediante el método tradicional de inspección corresponde a un derrame de combustible. Esta diferencia se debe a las fechas en que se recopilaron los datos, ya que las mediciones en terreno se realizaron aproximadamente un mes después de los vuelos, periodo en el cual pudo haberse generado dicho deterioro.

De los 12 deterioros registrados únicamente mediante el análisis fotogramétrico, 1 corresponde a un ahuellamiento que no fue identificado en terreno y 11 corresponden a

agrietamiento lineal. Estos últimos no se registraron durante la inspección en terreno debido a que se encontraban próximos a otros deterioros, lo que ocasionó que fueran pasados por alto, evidenciando un posible error asociado al método tradicional de medición en terreno.

A continuación, se presenta la Tabla 6, que muestra los resultados en porcentajes, enfocada en evaluar la efectividad de ambos métodos de detección y el nivel de correspondencia entre ellos.

Deterioros	Porcentaje	
Detectados con ambos métodos	81.2%	Respecto al total de deterioros en el lugar (69)
Detectados con Método Tradicional	82.6%	
Detectados con Análisis Fotogramétrico	98.6%	
Con coincidencia en nivel de severidad	91.1%	Respecto a total de deterioros detectados por ambos métodos (56)

*Tabla 6: Porcentajes de detección y correspondencia de deterioros según el método de evaluación en pavimento asfáltico.*

A partir de los resultados presentados en la Tabla 6, se confirma nuevamente que el análisis fotogramétrico entregó mejores resultados que el método tradicional. Para este caso, al no tratarse de losas, se hace aún más complicado ubicar con precisión los deterioros utilizando el método tradicional, incluso con fichas de inspección adaptadas que incluyen la señalización horizontal. En contraste, el análisis fotogramétrico demostró una mayor efectividad. Aunque en este sitio de estudio se registró una menor coincidencia en los niveles de severidad entre ambos métodos, dicha coincidencia sigue siendo superior al 90%.

La Figura 15 muestra los croquis de ubicación donde se representan los deterioros detectados utilizando tanto el método de medición tradicional en terreno como el análisis fotogramétrico, permitiendo una comparación visual de los resultados.

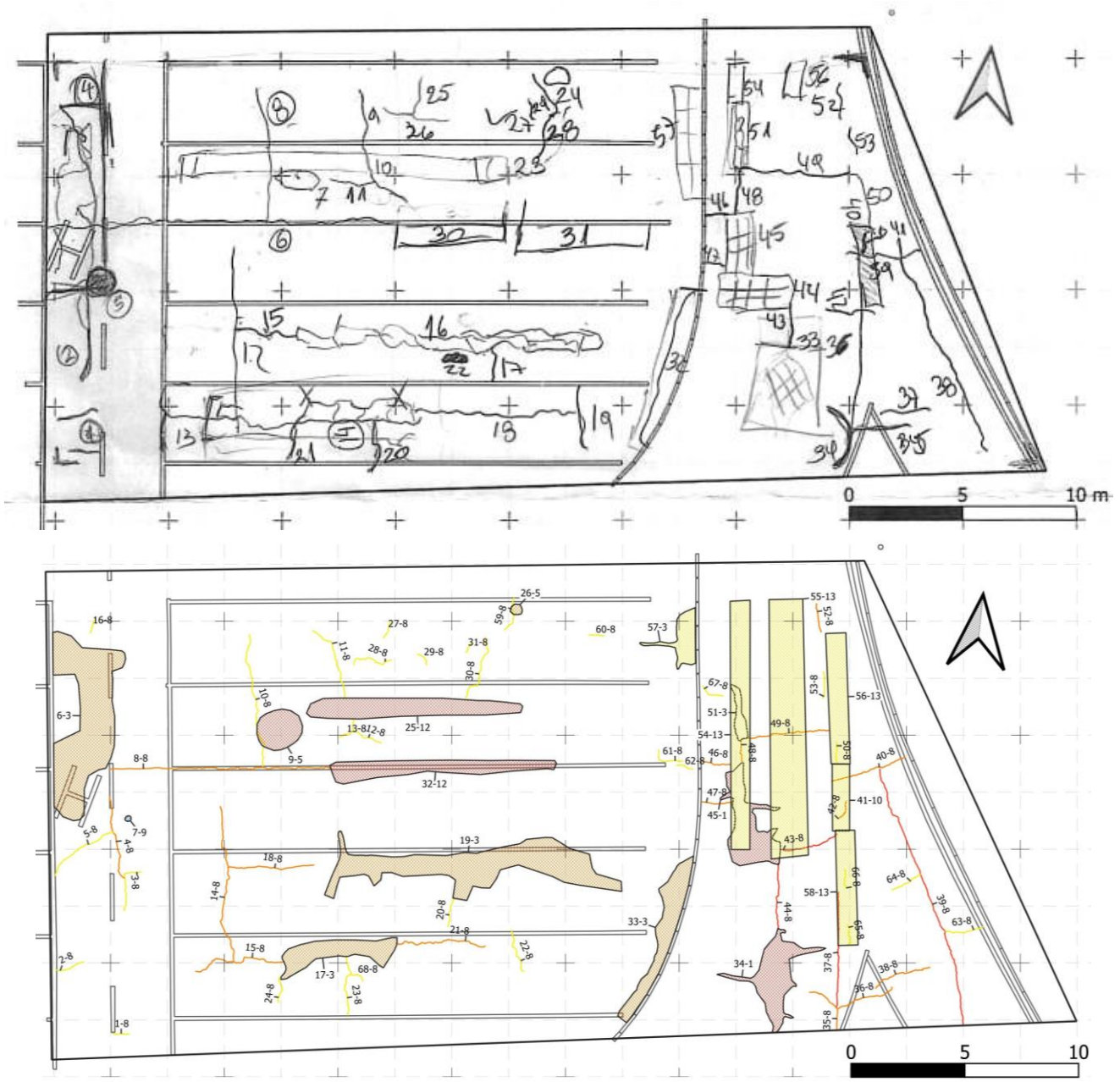


Figura 15: Croquis de ubicación de deterioros detectados en pavimento asfáltico con medición tradicional en terreno y mediante análisis fotogramétrico.

Arriba se presenta el croquis de los deterioros identificados con el método de medición tradicional en terreno, mientras que abajo se muestra el croquis obtenido mediante el análisis fotogramétrico.

- Análisis de tiempos de medición

La medición del PCI en una infraestructura aeroportuaria puede llegar a demorar desde varias semanas hasta meses, dependiendo de diversos factores. Entre estos, destacan la extensión total de las áreas a evaluar, el estado del pavimento, la experiencia de los evaluadores, las condiciones climáticas y la cantidad de operaciones programadas durante las fechas de medición, lo que puede afectar la continuidad del trabajo. Durante el tiempo que toma completar estas mediciones, es posible que se generen nuevos deterioros debido al tránsito continuo de aeronaves o por las condiciones ambientales, o bien, que los deterioros existentes evolucionen, incrementando su severidad. Esto resalta la importancia de realizar las mediciones de manera eficiente para obtener datos precisos y representativos del estado real del pavimento. En este estudio, para una misma extensión de pavimento, el tiempo requerido con el método tradicional fue de aproximadamente 3 horas, mientras que el tiempo para realizar el vuelo fue de solo 5.5 minutos. Si bien se debe considerar el tiempo adicional requerido para la toma de puntos de control, estos pueden ejecutarse de forma paralela a los vuelos. De acuerdo con lo anterior, este método podría representar una mejora significativa en cuanto a la reducción de los tiempos de interrupción de las operaciones en las infraestructuras aeroportuarias.

## 5. Conclusiones y Recomendaciones

El análisis realizado permite evaluar la fotogrametría con drones como herramienta para identificar y cuantificar deterioros en pavimentos, comparándola con el método tradicional. Los resultados muestran que este método tiene un alto potencial para analizar diversos tipos de deterioros y representa una alternativa para abordar los problemas presentes con el método tradicional.

En los sitios evaluados, se detectan una cantidad considerable de deterioros, aunque no se encuentran todos los tipos existentes para cada pavimento. Esto evidencia la necesidad de realizar futuros estudios en lugares que presenten deterioros no observados en este análisis. Durante el estudio, se prueban diferentes combinaciones de parámetros de vuelo ajustadas a las características del dron utilizado. Se concluye que los traslapes longitudinal del 80% y transversal del 70%, junto con una altura de vuelo de 10 metros, son configuraciones adecuadas para obtener ortomosaicos y MDE que cumplen con los requisitos de este estudio, manteniendo un volumen razonable de información digital. Se recomienda también el uso de drones que cuenten con diferentes tipos de sensores, como cámaras multiespectrales o térmicas, para mejorar la detección de deterioros en condiciones variadas, lo que podría ser particularmente útil para la evaluación de juntas en pavimentos rígidos.

Ambos métodos de medición presentan resultados similares en la mayoría de los casos. Sin embargo, el análisis fotogramétrico permite detectar y medir de forma más precisa deterioros como el desprendimiento por disgregación de áridos, el agrietamiento de tipo

mapeo y el ahuellamiento. En contraste, la pérdida de áridos y peladuras se identifica con mayor precisión mediante el método tradicional. Es necesario analizar este último tipo de deterioro en diferentes niveles de severidad para comprender mejor las diferencias en su detección entre ambos métodos. Además, se observan discrepancias en las cantidades medidas de deterioros en pavimentos asfálticos, lo que revela una desventaja del método tradicional al no permitir medir ni representar con exactitud la forma real de los deterioros.

Con el análisis fotogramétrico es posible realizar la toma de datos de forma más eficiente, sin interrumpir significativamente las operaciones en los sitios evaluados. Estos datos se pueden procesar y evaluar con mayor detención en oficina, considerando todos los criterios necesarios para identificar y determinar el nivel de severidad para cada deterioro, ofreciendo además la posibilidad de realizar revisiones posteriores, algo que no es factible con la medición tradicional. Se recomienda realizar este estudio en infraestructura aeroportuaria, donde no existan obstrucciones como sombras o vehículos estacionados y planificar vuelos bajo condiciones de iluminación adecuadas, ya que se observa que las sombras afectan la identificación de deterioros en niveles de severidad bajos.

La fotogrametría con drones representa una prometedora herramienta para la identificación y medición de deterioros en pavimentos rígidos y flexibles. Aunque su uso requiere validación en un mayor rango de condiciones y tipos de deterioro, aporta soluciones a problemas clave de los métodos tradicionales. Su implementación puede optimizar las prácticas de mantenimiento al proporcionar datos detallados y verificables.

## 6. Referencias

- Dirección de Aeropuertos. (2019). Red Aeroportuaria Nacional. Obtenido de <https://www.dgac.gob.cl/aeropuertos/red-aeroportuaria-nacional/red-aeroportuaria/>
- Ministerio de Obras Públicas, Dirección de Aeropuertos, & Ghisolfo Ingeniería de Consulta S.A. (2011). Diagnóstico Pavimentos por Método PCI Aeropuerto Arturo Merino Benítez. Obtenido de <https://repositoriodirplan.mop.gob.cl/biblioteca/items/d4c49130-eeac-4fdf-ac4e-e7e7c80cf2a3>
- IDOM. (2021). Etapa 5: Informe final: Informe definitivo: Diagnóstico de auscultación de pavimentos aeroportuarios de la red secundaria zona centro-norte (P/101573 - Código de Proyecto RSZCN20-GE-GN-ID-001\_REV 0). Dirección de Aeropuertos, Ministerio de Obras Públicas. Obtenido de <https://repositoriodirplan.mop.gob.cl/biblioteca/items/1edab7eb-664b-4f74-8683-b3da41fd715f>
- Ministerio de Obras Públicas, Dirección de Planeamiento, & IDOM. (2021). Diagnóstico Auscultación de Pavimentos Aeroportuarios de la Red Secundaria Zona Centro Norte. Obtenido de <https://repositoriodirplan.mop.gob.cl/biblioteca/items/1edab7eb-664b-4f74-8683-b3da41fd715f>
- Ministerio de Obras, Dirección de Vialidad, & Dirección General de Obras Públicas. (2022). Manual de Carreteras: Mantenimiento Vial, Volumen N°7 (Edición 2022), Chile. Obtenido de <https://vialidad.mop.gob.cl/areasdevialidad/manualdecarreteras/Paginas/vigenciavolumen7.aspx>
- Molina, G.A. (2020). Diseño estructural de pavimento y viabilidad económica de tres rutas cantonales en la comunidad de Turrialba. Proyecto final de graduación para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería en Construcción, Instituto Tecnológico de Costa Rica. Obtenido de [https://repositoriotec.tec.ac.cr/bitstream/handle/2238/11355/Proyecto\\_Graduaci%c3%b3n\\_Gabriel\\_Molina\\_L%c3%b3pez.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://repositoriotec.tec.ac.cr/bitstream/handle/2238/11355/Proyecto_Graduaci%c3%b3n_Gabriel_Molina_L%c3%b3pez.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Wesołowski, M., & Iwanowski, P. (2020). Evaluation of asphalt concrete airport pavement conditions based on the Airfield Pavement Condition Index (APCI) in scope of flight safety. *Aerospace*, 7(6), 78. Obtenido de <https://doi.org/10.3390/aerospace7060078>
- Shahin, M. Y. (2005). Asphalt Surfaced Airfields: PAVER™ Distress Identification Manual. Engineering Research and Development Center - Construction Engineering Research Laboratory. Sponsored by U.S. Air Force Civil Engineering

- Support Agency (AFCESA). Obtenido de <https://doi.org/10.3390/aerospace7060078>
- Shahin, M. Y. (2005). Asphalt Surfaced Airfields: Pavement Condition Index. Funded by U.S. Air Force Civil Engineering Support Agency (AFCESA/CESC), Tyndall Air Force Base, Florida.
- Shahin, M. Y., U.S. Army Engineering Research and Development Center - Construction Engineering Research Laboratory, Champaign, IL. (2005). Concrete Surfaced Airfields: Pavement Condition Index. Funded by U.S. Air Force Civil Engineering Support Agency (AFCESA/CESC), Tyndall Air Force Base, Florida.
- Luhmann, T., Robson, S., Kyle, S., & Boehm, J. (2014). Close-Range Photogrammetry and 3D Imaging.
- Dirección General de Aeronáutica Civil (DGAC). (2023). DAN 151: Operaciones de Aeronaves Pilotadas a Distancia (RPAS) en Asuntos de Interés Público, que se Efectúen sobre Áreas Pobladas. Edición 2, Enmienda 5. Santiago, Chile. Obtenido de <https://www.dgac.gob.cl/wp-content/uploads/2023/03/Master-DAN-151-Ed-2-enm-5.pdf>
- Cruz Toribio, J. O. (2022). Cálculo del Índice de Regularidad Internacional (IRI) a través de imágenes obtenidas de un vehículo aéreo no tripulado. Universidad de Costa Rica, Sistema de Estudios de Posgrado, Maestría Académica en Ingeniería de Transporte y Vías.
- DJI. (2017). Phantom 4 Pro / Pro+: Manual del Usuario (Edición 1.2). Obtenido de [https://dl.djicdn.com/downloads/phantom\\_4\\_pro/20170719/Phantom\\_4\\_Pro\\_Pro\\_Plus\\_User\\_Manual\\_ES.pdf](https://dl.djicdn.com/downloads/phantom_4_pro/20170719/Phantom_4_Pro_Pro_Plus_User_Manual_ES.pdf)
- DJI. (2024). DJI Terra: Manual del Usuario (Versión 4.0). Obtenido de [https://dl.djicdn.com/downloads/dji-terra/20240118/DJI\\_Terra\\_User\\_Manual\\_v4.0\\_EN.pdf](https://dl.djicdn.com/downloads/dji-terra/20240118/DJI_Terra_User_Manual_v4.0_EN.pdf)
- Díaz Sotomayor, M.G. (2019). Aplicación de fotogrametría y termografía aérea como herramientas para la gestión de un tramo de río. Universidad de Concepción, Programa de Magíster en Ingeniería Agrícola con mención en Recursos Hídricos. Obtenido de <https://repositorio.udec.cl/server/api/core/bitstreams/f4eee0e7-44c8-4074-b6ee-494c7bb6e9bc/content>
- Agisoft LLC. (2021). Agisoft Metashape User Manual: Professional Edition, Version 1.7. Obtenido de [https://dl.djicdn.com/downloads/phantom\\_4\\_pro/20170719/Phantom\\_4\\_Pro\\_Pro\\_Plus\\_User\\_Manual\\_ES.pdf](https://dl.djicdn.com/downloads/phantom_4_pro/20170719/Phantom_4_Pro_Pro_Plus_User_Manual_ES.pdf)
- Sourav, M. A. A., Ceylan, H., Brooks, C., Dobson, R., Kim, S., Peshkin, D., & Brynick, M. (2024). Use of small unmanned aircraft systems in airfield pavement inspection: Implementation and potential. *International Journal of Pavement Engineering*, 25(1), 2401630. Obtenido de <https://doi.org/10.1080/10298436.2024.2401630>

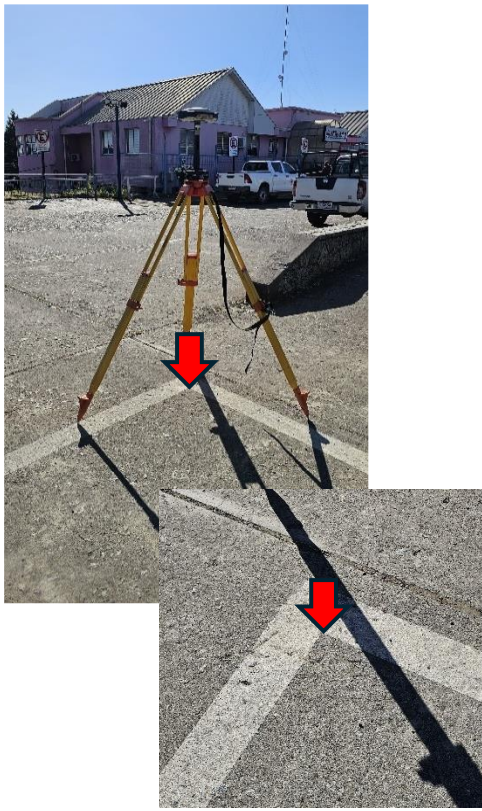
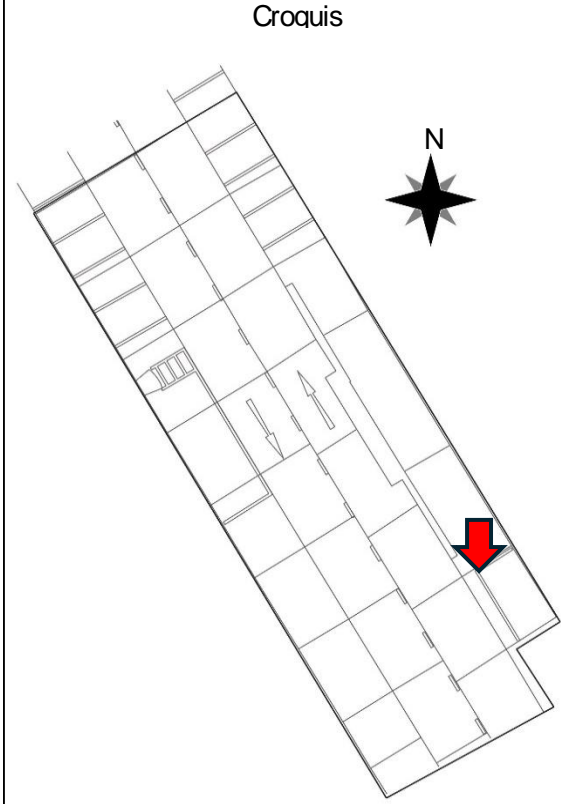
## 7. Anexos


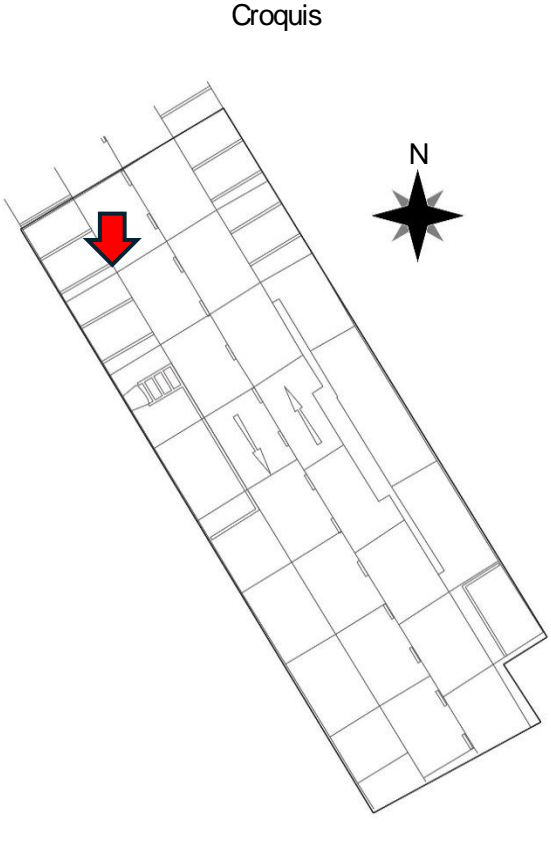
### **Anexo 1: Principales condiciones operativas para RPAS.**

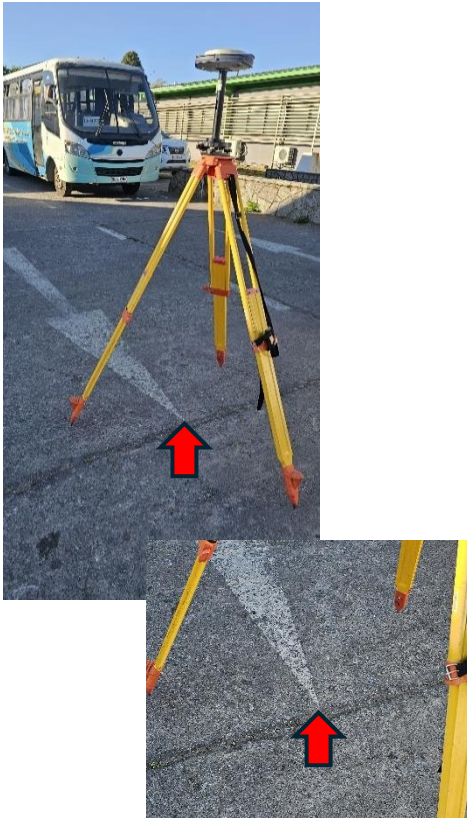
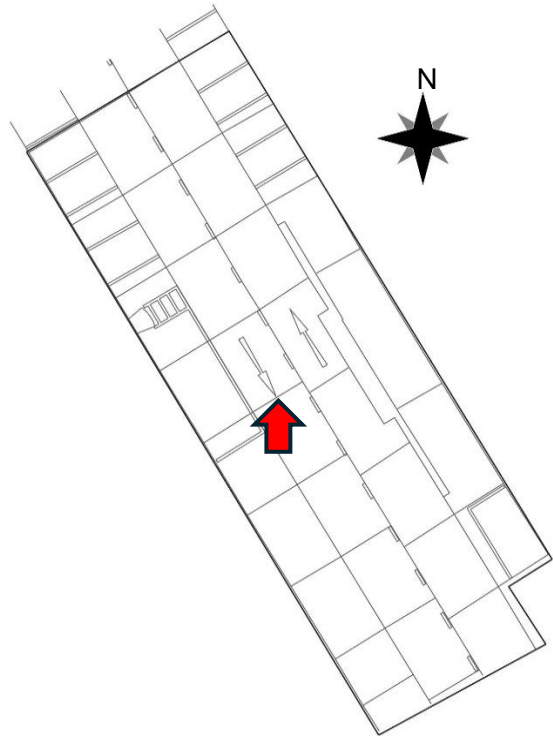
- El operador debe portar siempre la tarjeta de registro del RPA, la credencial de piloto a distancia de RPA y la autorización otorgada por la DGAC para operar en áreas pobladas.
- Los vuelos se deben realizar en condiciones meteorológicas visuales (VMC), con visibilidad adecuada.
- El piloto debe mantener contacto visual directo con la aeronave (VLOS) durante todo el vuelo. Para vuelos más allá de la línea de visión (BVLOS), el sistema debe proporcionar información precisa sobre la posición y altitud del RPAS.
- Está prohibido operar a menos de 2 km del eje de pista de un aeródromo, en zonas prohibidas, restringidas o peligrosas sin autorización y durante la noche sin permiso especial de la DGAC.
- La altitud máxima permitida es de 120 m en VLOS o 365 m en BVLOS.
- No se puede operar bajo la influencia de alcohol o drogas.
- El tiempo total de vuelo no debe exceder el 80% de la capacidad de la batería del RPAS y no puede durar más de 60 minutos por operación.
- El piloto es responsable de garantizar la seguridad de las personas y la propiedad, evitando cualquier riesgo durante el despegue, vuelo y aterrizaje.
- Un piloto a distancia durante la operación de un RPA no podrá violar los derechos de otras personas en su privacidad y su intimidad.
- Está prohibido operar en áreas donde se combaten incendios sin autorización especial.

## Anexo 2: Monografías Puntos de Control Terrestre.


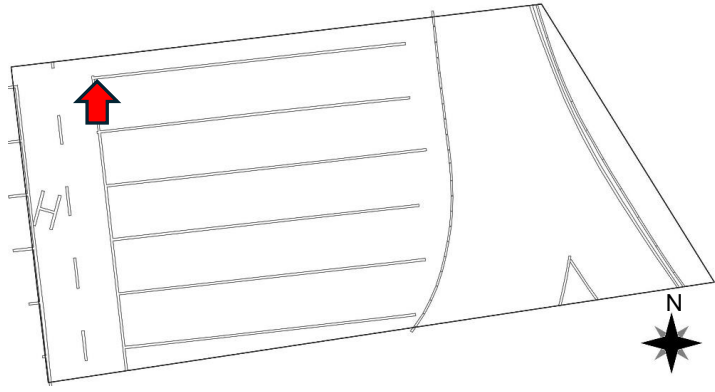
- **Sitio con pavimento de hormigón:** Estacionamiento del Consultorio General Rural y la Dirección de Administración de Educación Municipal (DAEM) de la ciudad de Laja, en la región del Biobío.

Nombre punto	BASELAJA	
Datum: ITRF2020 época 2024.328	Elipsoide: GRS80	
Sistema de Coordenadas: UTM Zona 18 Sur		
Coordenadas		
Norte (m)	Este (m)	Altura Elipsoidal (m)
5871725.2993	702712.1840	89.4557
Altura Ortométrica (m): 69.3515	Modelo Geoideal: XGM2019	
Ubicación: Punto ubicado dentro del estacionamiento del Consultorio General Rural y la Dirección de Administración de Educación Municipal (DAEM) de la ciudad de Laja, en la región del Biobío. Se encuentra al ingresar al recinto, a mano derecha, en el vértice superior izquierdo de la demarcación situada en el sector sureste del lugar.		
Fotografía Punto	Croquis	
		

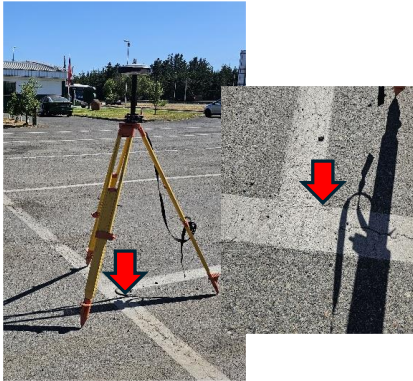
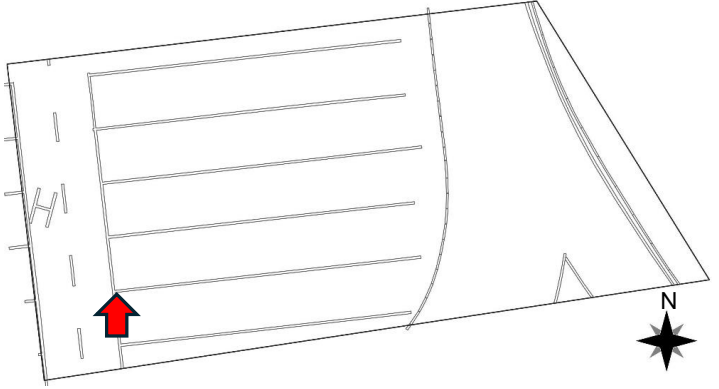
Nombre punto	LAJA2	
Datum: ITRF2020 época 2024.328	Elipsoide: GRS80	
Sistema de Coordenadas: UTM Zona 18 Sur		
Coordenadas		
Norte (m)	Este (m)	Altura Elipsoidal (m)
5871744.3300	702691.2827	89.3255
Altura Ortométrica (m): 69.2206	Modelo Geoidal: XGM2019	
Ubicación: Punto ubicado dentro del estacionamiento del Consultorio General Rural y la Dirección de Administración de Educación Municipal (DAEM) de la ciudad de Laja, en la región del Biobío. Este punto está ubicado al costado derecho de la demarcación que se encuentra frente a la entrada del Consultorio General Rural, en el sector noreste del estacionamiento.		
Fotografía Punto	Croquis	
		

Nombre punto	LAJA3	
Datum: ITRF2020 época 2024.328	Elipsoide: GRS80	
Sistema de Coordenadas: UTM Zona 18 Sur		
Coordenadas		
Norte (m)	Este (m)	Altura Elipsoidal (m)
5871731.9564	702700.6669	89.3196
Altura Ortométrica (m): 69.2151	Modelo Geoideal: XGM2019	
Ubicación: Punto ubicado dentro del estacionamiento del Consultorio General Rural y la Dirección de Administración de Educación Municipal (DAEM) de la ciudad de Laja, en la región del Biobío. Este punto se encuentra en la punta de la flecha central que indica el flujo de tránsito en dirección a la salida del recinto.		
Fotografía Punto	Croquis	
		

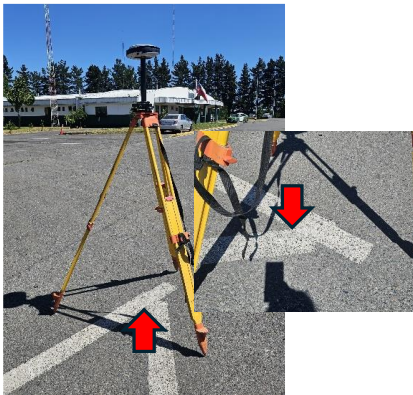
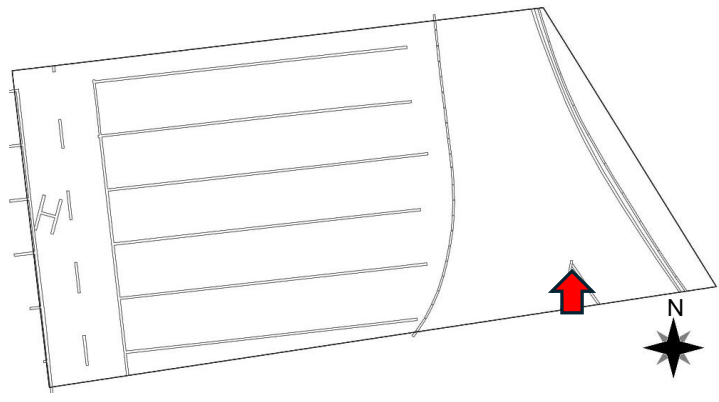
- **Sitio con pavimento asfáltico:** Subcomisaría I.A.T. y Carreteras BIO BIO, ubicada en la Ruta 5 Sur, kilómetro 476, en la región del Biobío.

Nombre punto	BASE SIAT	
Datum: ITRF2020 época 2024.328	Elipsoide: GRS80	
Sistema de Coordenadas: UTM Zona 18 Sur		
Coordenadas		
Norte (m)	Este (m)	Altura Elipsoidal (m)
5881000.6401	731434.9382	147.0737
Altura Ortométrica (m): 127.1673	Modelo Geoideal: XGM2019	
Ubicación: Punto ubicado dentro del estacionamiento de la Subcomisaría I.A.T. y Carreteras BIO BIO, ubicada en la Ruta 5 Sur, kilómetro 476, en la región del Biobío. El punto está situado en la sección este del estacionamiento, en el vértice superior interno de la primera demarcación individual de norte a sur.		
Fotografía Punto	Croquis	
		

















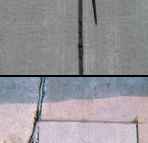


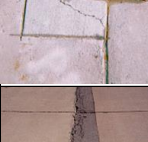

Nombre punto	SIAT2	
Datum: ITRF2020 época 2024.328	Elipsoide: GRS80	
Sistema de Coordenadas: UTM Zona 18 Sur		
Coordenadas		
Norte (m)	Este (m)	Altura Elipsoidal (m)
5880986.1389	731436.5985	147.0262
Altura Ortométrica (m): 127.1199	Modelo Geoideal: XGM2019	
Ubicación: Punto ubicado dentro del estacionamiento de la Subcomisaría I.A.T. y Carreteras BIO BIO, ubicada en la Ruta 5 Sur, kilómetro 476, en la región del Biobío. El punto está situado en la sección este del estacionamiento, en el vértice superior interno de la quinta demarcación individual de norte a sur.		

Fotografía Punto	Croquis
	




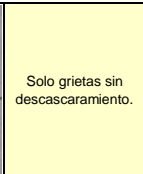





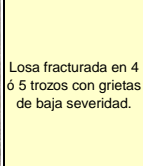


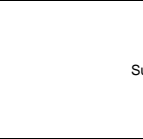
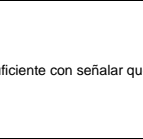


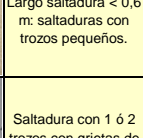


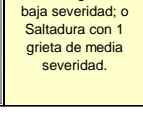
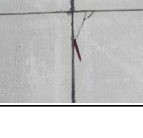
Nombre punto	SIAT3	
Datum: ITRF2020 época 2024.328	Elipsoide: GRS80	
Sistema de Coordenadas: UTM Zona 18 Sur		
Coordenadas		
Norte (m)	Este (m)	Altura Elipsoidal (m)
5880988.3521	731467.0247	148.9464
Altura Ortométrica (m): 129.0406	Modelo Geoideal: XGM2019	
Ubicación: Punto ubicado dentro del recinto de la Subcomisaría I.A.T. y Carreteras BIO BIO, ubicada en la Ruta 5 Sur, kilómetro 476, en la región del Biobío. El punto está situado en el vértice de la bifurcación demarcada en el sector sureste del recinto.		

Fotografía Punto	Croquis
	












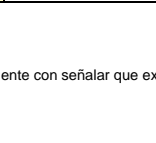
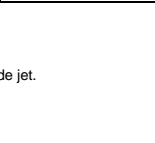
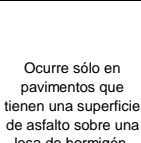










### Anexo 3: Tablas Simplificadas para la Identificación y Medición de Deterioros en Pavimentos.

Deterioros y sus Niveles de Severidad en Pavimentos de Hormigón								
N°	Tipo de Deterioro	Observaciones	Nivel de Severidad			¿Cómo medir?		
			Bajo(B):Low (L)	Medio(M):Medium (M)	Alto(A):High (H)			
1	<b>Levantamiento (Blow Up)</b>	Ocurren en climas cálidos, generalmente en una grieta transversal o junta.	 Levantamiento o rompimiento no inhabilita al pavimento y solo existe una ligera rugosidad.	 Levantamiento o rompimiento no inhabilita al pavimento, existe una cantidad significativa de rugosidad.	 Levantamiento o rompimiento inhabilita al pavimento.	En grieta: en 1 losa. En una junta: en 2 losas.		
2	<b>Grieta de esquina (Cracking Corner)</b>	Grieta que intersecta las juntas a una distancia menor o igual a la mitad de la longitud de la losa en ambos lados, medida desde la esquina de la losa.	 Bajo agrietamiento, poca o ninguna saltadura.	 Moderado agrietamiento, saltaduras moderadas, grietas no selladas tienen un ancho entre 3 y 25 mm, grietas selladas con leve o sin saltaduras, pero sello en regular estado, trozo de esquina con grietas.	 Grietas selladas o no selladas con saltaduras severas, grietas no selladas tienen un ancho mayor a 25 mm, trozo de esquina con grietas severas.	Por losa, si tiene más de un nivel de severidad se registra el más alto.		
3	<b>Grietas lineales, transversales y diagonales</b>	Dividen la losa en 2 o 3 pedazos.	 Grietas con poca o ninguna saltadura, sin sello con ancho menor a 3 mm, con sello de cualquier ancho, pero sello en buen estado o losa dividida hasta en tres trozos con grietas de baja severidad.	 Grietas selladas o no con saltaduras moderadas, grietas no selladas tienen un ancho entre 3 y 25 mm, grietas selladas con leve o sin saltaduras, pero sello en regular estado, hasta 3 trozos pero dos grietas al menos de mediana severidad.	 Grietas selladas o no con saltaduras severas, grietas no selladas tienen un ancho mayor a 25 mm.	Por losa.		
4	<b>Grietas de Durabilidad (Durability "D" Cracking)</b>	Generalmente aparece como un patrón de grietas paralelas a una junta o grieta lineal.	 Grietas "D" angostas en una zona limitada de la losa (esquina o a lo largo de una junta), baja o nula desintegración.	 Grietas "D" en una zona considerable de la losa con baja o nula desintegración; o grietas "D" en área limitada (esquina o a lo largo de una junta), pero con pérdida de material y desintegración.	 Grietas "D" en área considerable de la losa con desintegración.	Por losa, si tiene más de un nivel de severidad se registra el más alto.		
5	<b>Deterioro del Sello de Junta (Joint Seal Damage)</b>	Cualquier condición que permite que se acumulen tierra o rocas en las juntas o permite una infiltración significativa de agua.	 Sello en buen estado en toda la sección, con algún(os) de los deterioros de los niveles siguientes.	 Sello en regular estado en toda la sección, con deterioros de severidad media. Sello requiere ser reemplazado dentro de los próximos 2 años.	 Sello en mal estado en toda la sección, con deterioros de severidad alta. Sello requiere ser reemplazado inmediatamente.	Se clasifica según la condición general del sellador en una unidad de muestra. Se mide la unidad de muestra.		
6	<b>Bacheo pequeño (menor a 0,5 m2)</b>	Área donde el pavimento original ha sido removido y reemplazado por un material de relleno.	 Bacheo funciona bien, con bajo o sin deterioro.	 Bacheo deteriorado, y/o bordes con saltaduras.	 Bacheo deteriorado con bordes saltados o grietas al interior de él.	Si uno o más se encuentran en una losa, se cuenta como una losa y se deja el nivel de severidad más alto.		
7	<b>Bacheo grande (mayor a 0,5 m2)</b>	Área donde el pavimento original ha sido removido y reemplazado por un material de relleno.	 Bacheo funciona bien, con bajo o sin deterioro.	 Bacheo deteriorado, y/o bordes con saltaduras.	 Bacheo deteriorado alta incidencia en la calidad de la rodadura. Requiere reemplazo.	Si uno o más se encuentran en una losa, se cuenta como una losa y se deja el nivel de severidad más alto.		










## Deterioros y sus Niveles de Severidad en Pavimentos de Hormigón

N°	Tipo de Deterioro	Observaciones	Nivel de Severidad			¿Cómo medir?		
			Bajo(B);Low (L)	Medio(M);Medium (M)	Alto(A);High (H)			
8	Desprendimientos por disgregación de áridos (Popouts)		Más de 3 desprendimientos por 1 m2. Los desprendimientos tienen un diámetro de entre 25 y 100 mm y una profundidad de entre 25 y 50 mm.			Se mide la densidad. Verificar en al menos 3 áreas aleatorias de 1m2. Si el promedio es mayor que esta densidad se cuenta la losa.		
9	Bombeo (Pumping)		Suficiente con señalar que existe bombeo.			Una junta de bombeo entre 2 losas se cuenta como 2 losas. Si las juntas restantes alrededor de la losa igual están bombeando, se agrega 1 losa por junta de bombeo adicional.		
10	Agrietamiento tipo mapeo, descascaramiento (Scaling, Map Cracking and Cracking)	Red de grietas finas y poco profundas que se extiende solo a través de la superficie superior. 	Solo grietas sin descascaramiento.		Descascaramiento menor al 5 %.		Descascaramiento mayor al 5 %.	Si existen 2 o más niveles de severidad en una losa, esta losa contará con el nivel máximo de severidad.
11	Asentamiento o Escalonamiento (Settlement or Faulting)	Pistas y Calles de Rodaje 	Desnivel < 6 mm		Desnivel entre 6 y 13 mm		Desnivel entre 13 y 25 mm	Una falla entre 2 losas se cuenta como una losa.
		Plataformas 	Desnivel entre 3 y 13 mm		Desnivel > 13 mm		Desnivel > 25 mm	
12	CuarTEAMIENTO o Losa fracturada (Shattering Slab/ Intersecting Cracks)	Grietas que se rompen en 4 o más pedazos debido a una sobrecarga y/o un soporte inadecuado. 	Losa fracturada en 4 ó 5 trozos con grietas de baja severidad.		Losa fracturada en 4 ó 5 trozos con más de 15% de grietas de media; o más de 6 trozos con más del 85% de grietas de baja severidad.		Losa fracturada en 4 ó 5 trozos con algunas o todas las grietas de alta severidad; o más de 6 trozos con más del 15% de grietas de media o alta severidad.	No se debe registrar ningún otro tipo de deterioro si la losa tiene un nivel de severidad medio o alto.
13	Grietas de contracción (Srinkage Cracks)	Grietas finas y cortas que no ocupan toda la losa. 	Suficiente con señalar que existen grietas de contracción.			Por losa.		
14	Astillamiento de Juntas transversales y longitudinales (Spalling Transverse and Longitudinal Joints)	Ruptura de los bordes de la losa dentro de los 60mm del lado de la junta. 	Largo saltadura > 0,6 m: menos de 3 trozos con grietas de baja a media severidad o juntas levemente dañadas Largo saltadura < 0,6 m: saltaduras con trozos pequeños.		Largo saltadura > 0,6 m: más de 3 trozos con grietas de baja a media severidad; o menos de 3 trozos con más de una grieta de alta media severidad; o juntas medianamente dañadas. Largo saltadura < 0,6 m: saltaduras con desprendimiento de trozos.		Largo saltadura mucho mayor a 0,6 m; mas de 3 trozos con una o más grietas de alta severidad; o juntas severamente dañadas. Largo saltadura < 0,6 m: saltaduras con desprendimiento de trozos.	Por losa.
15	Astillamiento de grieta de esquina (Spalling Corner)	Desprendimiento o ruptura de la losa dentro de aprox. 60mm de la esquina. 	Saltadura con 1 ó 2 trozos con grietas de baja severidad; o Saltadura con 1 grieta de media severidad.		Saltadura con 2 o más trozos con grietas de media severidad; o saltadura con 1 grieta de alta severidad o saltadura muy deteriorada.		Saltadura con 2 o más trozos con grietas de alta severidad; o saltadura pérdida de trozos ó saltadura severamente deteriorada.	Por losa.

## Deterioros y sus Niveles de Severidad en Pavimentos Asfálticos

N°	Tipo de Deterioro	Observaciones	Nivel de Severidad					¿Cómo medir?	
			Bajo(B); Low (L)		Medio(M); Medium (M)		Alto(A); High (H)		
1	Agrietamiento por fatiga (piel de cocodrilo)	Ocurre solo en áreas que están sujetas a cargas de tráfico repetidas. Menos de 0,6m en lado más largo.		Longitudinales finas, poco interconectadas, sin saltadura.		Interconectadas, leve saltadura.		Bordes redondeados con saltadura.	En metros cuadrados de superficie. Toda el área debe clasificarse con el nivel de severidad más alto presente.
2	Exudación		No se definen grados de gravedad. Debe medirse cuando su magnitud afecta la resistencia al deslizamiento.					En metros cuadrados de superficie. Si se mide la exudación, los áridos pulidos no se cuenta en la misma área.	
3	Agrietamiento tipo bloque	Bloques de 0,30 x 0,30m a 3m x 3m. No es un deterioro asociado a la carga		Sin saltadura, sin sellado, ancho < 6 mm. Buen sellado ancho > 6 mm.		Leve saltadura, sin sellado o mal sellado, ancho > 6 mm.		Con saltadura.	En metros cuadrados de superficie. Si se registra agrietamiento en bloques, no se deben registrar agrietamientos longitudinales ni transversales en la misma área.
4	Corrugación (ondulación)	Pistas y Calles de Rodaje	Altura menor de 6 mm.		Altura entre 6 mm y 13 mm.		Altura mayor de 13 mm.		En metros cuadrados de superficie. Se debe colocar una regla de 3m perpendicular a las corrugaciones. La profundidad media se calcula a partir de cinco mediciones.
		Plataformas	Altura menor de 13 mm.		Altura entre 13 mm y 25 mm.		Altura mayor de 25 mm.		
5	Hundimiento (depresión)	Pistas y Calles de Rodaje		Profundidad entre 3 y 13 mm.		Profundidad entre 13 y 25 mm.		Profundidad mayor de 25 mm.	En metros cuadrados de superficie. Área con asfalto quemado, profundidad aprox. 13 mm.
		Plataformas		Profundidad entre 13 y 25 mm.		Profundidad entre 25 y 50 mm.		Profundidad mayor de 50 mm.	
6	Erosión por chorro de Jet		Suficiente con señalar que existe erosión por chorro de jet.					En metros cuadrados de superficie. Área con asfalto quemado, prof. aprox. 13 mm.	
7	Agrietamiento por reflexión de juntas	Ocurre sólo en pavimentos que tienen una superficie de asfalto sobre una losa de hormigón.		Grietas con poca saltadura, o sin saltaduras selladas o no selladas de ancho < 6 mm. Grietas selladas de cualquier ancho.		Grietas con saltadura moderada sellada o no sellada de cualquier ancho, grietas selladas con saltadura baja a media con sello en regular estado, o no selladas de ancho > 6 mm.		Grietas con saltadura severa no selladas o selladas de cualquier ancho.	En metros lineales. Si la grieta no tiene el mismo nivel de severidad en toda su longitud, cada porción debe registrarse por separado. Si los niveles no se pueden identificar fácilmente, se debe clasificar con la mayor severidad presente.
8	Agrietamiento lineal (longitudinal o transversal)	Longitudinal: paralela a la línea central del pavimento. Transversal: a lo largo del pavimento en ángulos aprox. rectos con respecto a la línea central del pavimento.		Grietas con poca saltadura, o sin saltaduras selladas o no selladas de ancho < 6 mm. Grietas selladas de cualquier ancho.		Grietas con saltadura moderada sellada o no sellada de cualquier ancho, grietas selladas con saltadura baja a media con sello en regular estado, o no selladas de ancho > 6 mm.		Grietas con saltadura severa no selladas o selladas de cualquier ancho.	En metros lineales. Si la grieta no tiene el mismo nivel de severidad en toda su longitud, cada porción debe registrarse por separado. No se debe registrar si existe agrietamiento tipo bloque.
9	Por derrame de Combustible		Suficiente con señalar que existe derrame de combustible. Si la dureza es aproximadamente la misma que la del pavimento circundante y si no se ha perdido material, no lo registre como deterioro.					En metros cuadrados de superficie.	
10	Bacheo	No se registran problemas en un bacheo, sin embargo, sus efectos determinarán el nivel de severidad.		Buen estado y comportamiento satisfactorio.		Algo deteriorado y afecta, en parte, a la calidad de la rodadura.		Muy deteriorado y afecta, significativamente a la calidad de la rodadura. Requiere ser reemplazado.	En metros cuadrados de superficie. El nivel de severidad se debe medir por separado según corresponda.

## Deterioros y sus Niveles de Severidad en Pavimentos Asfálticos

N°	Tipo de Deterioro	Observaciones	Nivel de Severidad			¿Cómo medir?		
			Bajo(B);Low (L)	Medio(M);Medium (M)	Alto(A);High (H)			
11	Áridos pulidos			Si existe, debe		Indicación del estado del pavimento. 	En metros cuadrados de superficie. Si se cuenta la exudación, no se cuentan los áridos pulidos.	
12	Pérdida de áridos y Peladuras (disgregación)		Bajo desprendimiento de áridos, en 1 m2 hay entre 5 y 20 áridos menos, y no se sueltan más de 20.		En 1 m2 hay entre 21 y 40 áridos menos, y se sueltan entre 21 y 40.		En 1 m2 hay más de 41 áridos menos, y se sueltan más de 40.	En metros cuadrados de superficie.
13	Huellamiento	Se observa mejor después de una lluvia. 	Profundidad entre 6 mm y 13 mm.		Profundidad entre 13 y 25 mm.		Profundidad mayor de 25 mm.	En metros cuadrados de superficie. Para medir la severidad se debe contar con una regla.
14	Desplazamiento o por empuje de losas de hormigón		Bajo desplazamiento con poca incidencia en la calidad de la rodadura y sin fisuras.		Significativo desplazamiento con irregularidad superficial o agrietamiento del pavimento.		Gran desplazamiento con severa irregularidad superficial o agrietamiento del pavimento.	En metros cuadrados de del desplazamiento causado por el empuje de losas de hormigón.
15	Agrietamiento por Deslizamiento		Suficiente con señalar que existe agrietamiento por deslizamiento.				En metros cuadrados de superficie.	
16	Hinchamiento		Elevación menor de 19mm.	Elevación entre 19 y 38mm.	Elevación mayor de 38mm.		En metros cuadrados de superficie.	

### Anexo 4: Fichas de Inspección Adaptadas para Medición de Deterioros.

Fichas de inspección adaptadas para pavimentos de hormigón y asfálticos, basadas en las fichas tradicionales del método PCI, modificadas con un croquis que cuenta con más espacio e incluyen la señalización horizontal de cada lugar, lo que facilita la identificación y registro de los deterioros durante las mediciones en terreno.





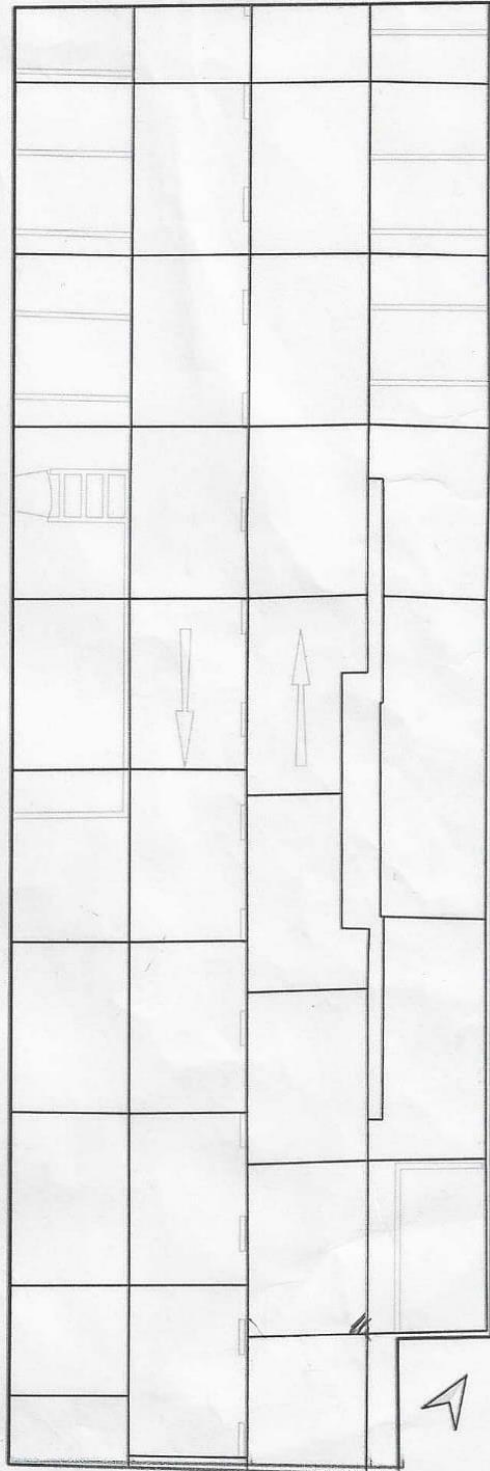
**Anexo 5: Deterioros Registrados Mediante el Método Tradicional de Medición en Terreno.**

- **Sitio con pavimento de hormigón**

Ficha de Inspección de Deterioros – Pavimentos de Hormigón				
Nº	Deterioro			
1	Levantamiento			
2	Grieta de esquina			
3	Grietas lineales, transversales y diagonales			
4	Grietas de Durabilidad			
5	Deterioro del Sello de Junta			
6	Bacheo pequeño (menor a 0,5 m2)			
7	Bacheo grande (mayor a 0,5 m2)			
8	Desprendimientos por disgregación de áridos			
9	Bombeo			
10	Agrietamiento tipo mapeo, descascaramiento			
11	Asentamiento o Escalonamiento			
12	Cuarteamiento o Losa fracturada			
13	Grietas de contracción			
14	Astillamiento de Juntas transversales y longitudinales			
15	Astillamiento de grieta de esquina			
Nº Deterioro	Nivel de Severidad	Cantidad	Unidad de Medida	Losa
5	3	—	—	H-3
3	2	1	—	H-3
5	3	—	—	H-2
13	1	1	—	H-2
14	2	1	—	H-2
15	1	1	—	H-2
8	—	—	—	H-2
10	1	—	—	H-2
5	3	—	—	H-1
15	1	—	—	H-1
14	1	—	—	H-1
5	3	—	—	G-1
15	1	—	—	G-1
8	1	—	—	G-1
5	3	—	—	G-2
14	2	—	—	G-2
14	2	—	—	G-2
8	—	—	—	G-2
10	1	—	—	G-2
10	2	—	—	G-3
5	3	—	—	G-3
14	2	—	—	G-3
14	3	—	—	G-3

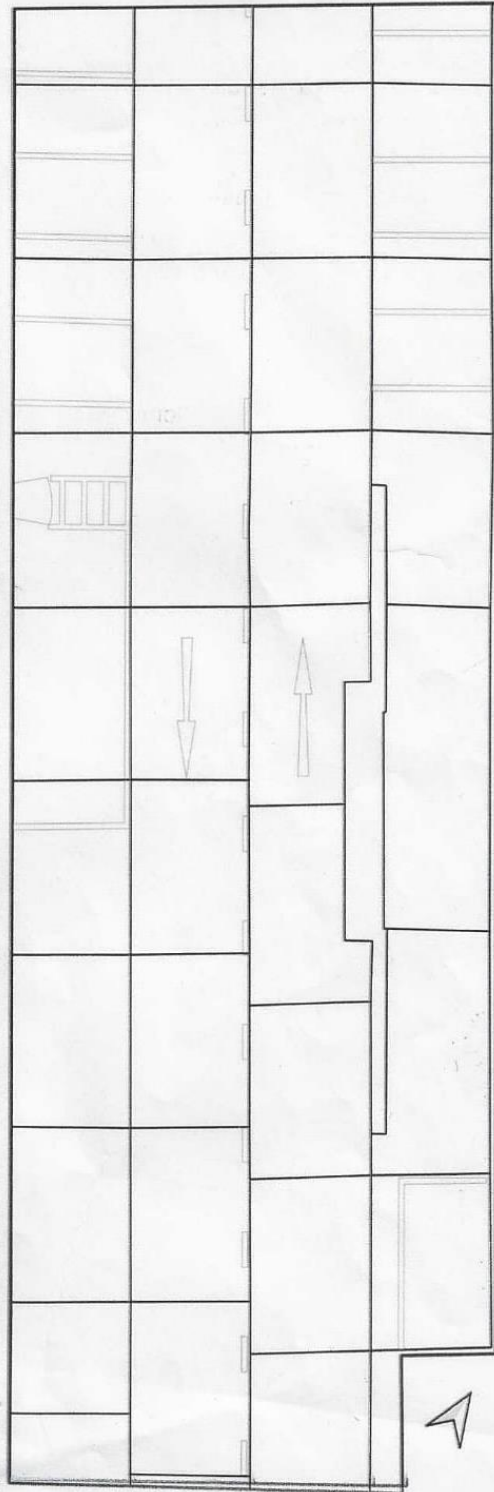
**Ficha de Inspección de Deterioros – Pavimentos de Hormigón**

Nº	Deterioro			
1	Levantamiento			
2	Grieta de esquina			
3	Grietas lineales, transversales y diagonales			
4	Grietas de Durabilidad			
5	Deterioro del Sello de Junta			
6	Bacheo pequeño (menor a 0,5 m2)			
7	Bacheo grande (mayor a 0,5 m2)			
8	Desprendimientos por disgregación de áridos			
9	Bombeo			
10	Agrietamiento tipo mapeo, descascaramiento			
11	Asentamiento o Escalonamiento			
12	Cuarteamiento o Losa fracturada			
13	Grietas de contracción			
14	Astillamiento de Juntas transversales y longitudinales			
15	Astillamiento de grieta de esquina			
Nº Deterioro	Nivel de Severidad	Cantidad	Unidad de Medida	Losa
15	2	-	-	G-3
8	-	-	-	G-3
14	2	-	-	G-3
5	3	-	-	G-4
8	-	-	-	G-4
10	1	-	-	G-4
14	2	-	-	G-4
15	1	-	-	G-4
5	3	-	-	F-3
15	1	-	-	F-3
10	1	-	-	F-3
8	-	-	-	F-3
5	3	-	-	F-3
15	2	-	-	E-3
14	1	-	-	E-3
8	-	-	-	E-3
2	1	-	-	E-3
13	-	-	-	E-3
5	3	-	-	D-3
2	2	-	-	D-2
3	2	-	-	D-2
15	1	-	-	D-3
5	3	-	-	C-3



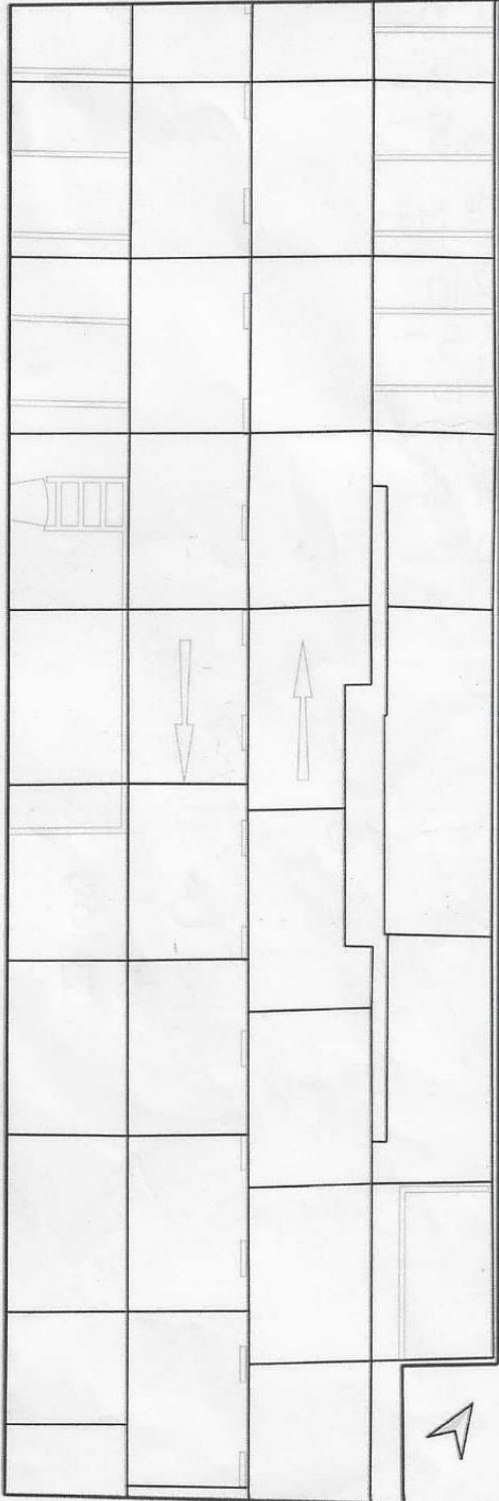
**Ficha de Inspección de Deterioros – Pavimentos de Hormigón**

Nº	Deterioro			
1	Levantamiento			
2	Grieta de esquina			
3	Grietas lineales, transversales y diagonales			
4	Grietas de Durabilidad			
5	Deterioro del Sello de Junta			
6	Bacheo pequeño (menor a 0,5 m2)			
7	Bacheo grande (mayor a 0,5 m2)			
8	Desprendimientos por disgregación de áridos			
9	Bombeo			
10	Agrietamiento tipo mapeo, descascaramiento			
11	Asentamiento o Escalonamiento			
12	Cuarteamiento o Losa fracturada			
13	Grietas de contracción			
14	Astillamiento de Juntas transversales y longitudinales			
15	Astillamiento de grieta de esquina			
Nº Deterioro	Nivel de Severidad	Cantidad	Unidad de Medida	Losa
14	1	-	-	B-3
5	3	-	-	B-3
14	1	-	-	B-3
8	-	-	-	B-3
5	3	-	-	A-3
10	1	-	-	A-3
15	1	-	-	A-4
5	3	-	-	A-4
14	1	-	-	A-4
5	3	-	-	B-4
5	3	-	-	A-2
10	1	-	-	A-2
14	2	-	-	A-2
5	3	-	-	A-1
14	1	-	-	A-1
5	3	-	-	B-1
15	1	-	-	B-1
5	3	-	-	B-2
15	1	-	-	B-2
8	-	-	-	B-2
15	1	-	-	C-2
5	3	-	-	C-2
14	2	-	-	C-2



**Ficha de Inspección de Deterioros - Pavimentos de Hormigón**

Nº	Deterioro			
1	Levantamiento			
2	Grieta de esquina			
3	Grietas lineales, transversales y diagonales			
4	Grietas de Durabilidad			
5	Deterioro del Sello de Junta			
6	Bacheo pequeño (menor a 0,5 m2)			
7	Bacheo grande (mayor a 0,5 m2)			
8	Desprendimientos por disgregación de áridos			
9	Bombeo			
10	Agrietamiento tipo mapeo, descascaramiento			
11	Asentamiento o Escalonamiento			
12	Cuarteamiento o Losa fracturada			
13	Grietas de contracción			
14	Astillamiento de Juntas transversales y longitudinales			
15	Astillamiento de grieta de esquina			
Nº Deterioro	Nivel de Severidad	Cantidad	Unidad de Medida	Losa
15	2	-	-	C-2
14	2	-	-	C-2
5	3	-	-	C-1
14	1	-	-	C-1
5	3	-	-	D-1
15	1	-	-	D-1
5	3	-	-	D-2
14	2	-	-	D-2
15	1	-	-	D-2
13	-	-	-	D-2
8	-	-	-	E-2
5	3	-	-	E-2
14	1	-	-	E-2
14	2	-	-	E-2
10	1	-	-	E-2
8	-	-	-	E-2
5	3	-	-	E-1
10	3	-	-	E-1
14	1	-	-	E-1
10	3	-	-	F-1
5	3	-	-	F-1
14	2	-	-	F-2
5	3	-	-	F-2





- Sitio con pavimento Asfáltico

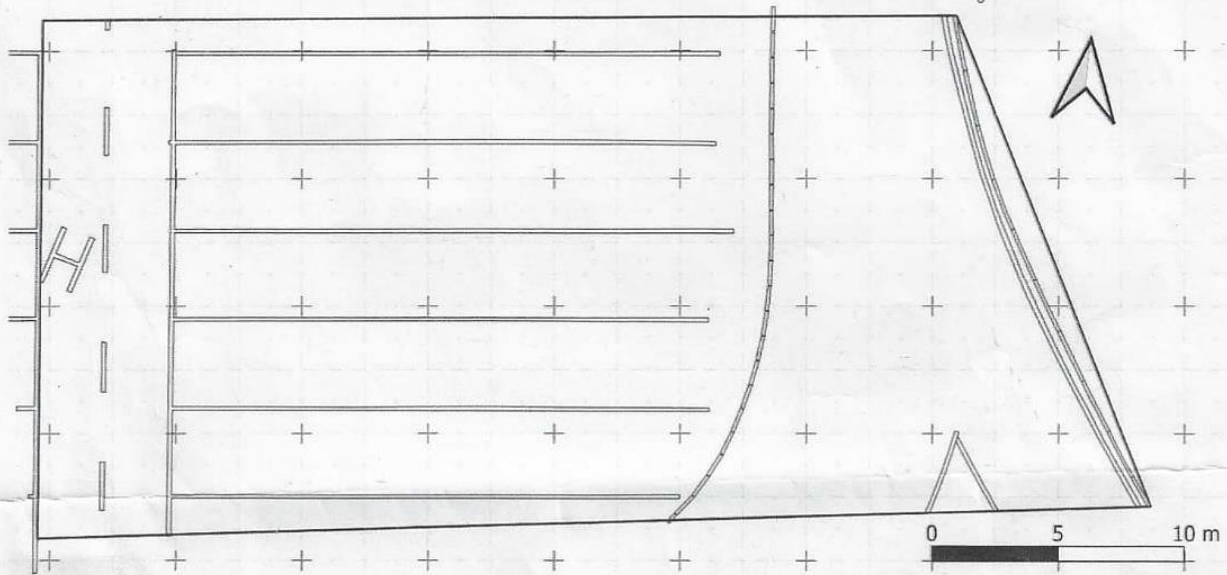
Ficha de Inspección de Deterioros – Pavimentos Asfálticos					
Nº	Deterioro	Nº	Deterioro		
1	Agrietamiento por fatiga (piel de cocodrilo)	9	Por derrame de Combustible		
2	Exudación	10	Bacheo		
3	Agrietamiento tipo bloque	11	Áridos pulidos		
4	Corrugación (ondulación)	12	Pérdida de áridos y Peladuras (disgregación)		
5	Hundimiento (depresión)	13	Huellamiento		
6	Erosión por chorro de Jet	14	Desplazamiento por empuje de losas de hormigón		
7	Agrietamiento por reflexión de juntas	15	Agrietamiento por Deslizamiento		
8	Agrietamiento lineal (longitudinal o transversal)	16	Hinchamiento		

ID	Nº Deterioro	Nivel de Severidad	Cantidad	Unidad de Medida
1	8	1	0,73	m
2	8	1	1,4	m
3	8	1	1,6	m
4	3	2	2,8 x 1,6	m <sup>2</sup>
5	9	—	0,28 x 0,25	m <sup>2</sup>
6	8	2	10	m
7	5	3	1,6 x 2,0	m <sup>2</sup>
8	8	1	6,1	m
9	8	1	2,6	m
10	8	1	1,9	m
11	8	1	1	m
12	8	2	3,2	m
13	8	2	3,8	m
14	3	2	5,9 x 1,6	m <sup>2</sup>
15	8	2	2,4	m
16	3	2	1,1 x 14,3	m <sup>2</sup>
17	8	1	1,4	m
18	8	2	4,7	m
19	8	1	2,1	m

**Ficha de Inspección de Deterioros - Pavimentos Asfálticos**

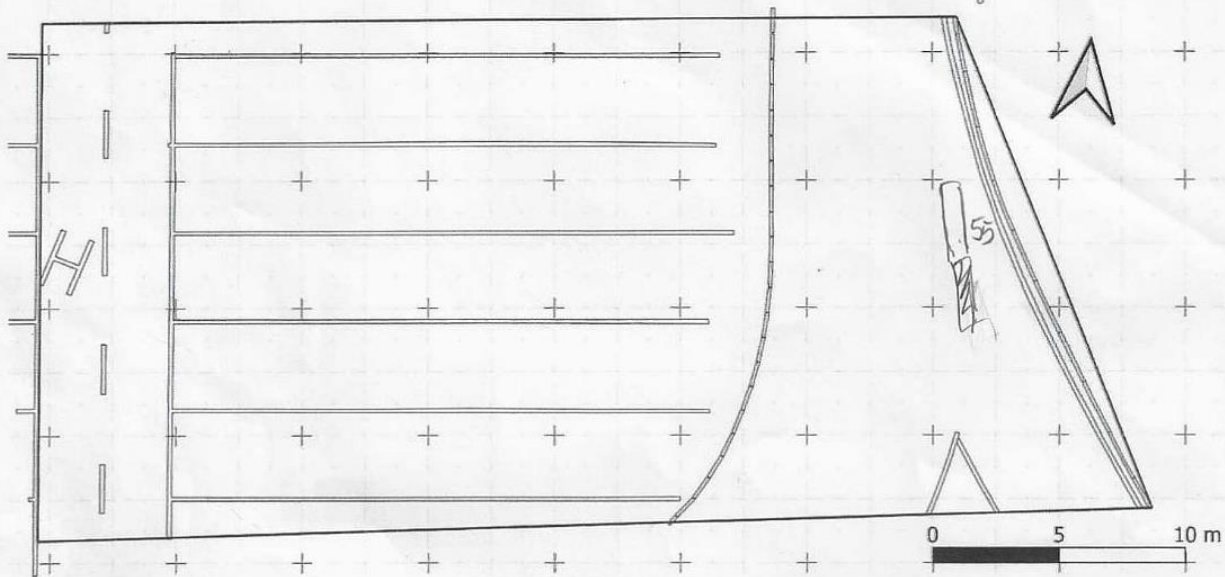
N°	Deterioro	N°	Deterioro
1	Agrietamiento por fatiga (piel de cocodrilo)	9	Por derrame de Combustible
2	Exudación	10	Bacheo
3	Agrietamiento tipo bloque	11	Áridos pulidos
4	Corrugación (ondulación)	12	Pérdida de áridos y Peladuras (disgregación)
5	Hundimiento (depresión)	13	Huellamiento
6	Erosión por chorro de Jet	14	Desplazamiento por empuje de losas de hormigón
7	Agrietamiento por reflexión de juntas	15	Agrietamiento por Deslizamiento
8	Agrietamiento lineal (longitudinal o transversal)	16	Hinchamiento



ID	N° Deterioro	Nivel de Severidad	Cantidad	Unidad de Medida
20	8	1	1,7	m
21	8	1	1,2	m
22	9	-	0,6 x 0,4	m <sup>2</sup>
23	12	1	1,1 x 11,3	m <sup>2</sup>
24	5	2	0,5 x 0,5	m <sup>2</sup>
25	8	1	1	m
26	8	1	2,3	m
27	8	1	0,8	m
28	8	1	4,3	m
29	8	1	0,6	m
30	12	3	0,7 x 4	m <sup>2</sup>
31	12	3	1,2 x 5,6	m <sup>2</sup>
32	3	2	0,8 x 7,7	m <sup>2</sup>
33	1	3	1,8 x 3,7	m <sup>2</sup>
34	8	2	2	m
35	8	2	2,7	m
36	8	3	6,1	m
37	8	2	2,9	m
38	8	3	11,8	m

**Ficha de Inspección de Deterioros – Pavimentos Asfálticos**

Nº	Deterioro	Nº	Deterioro
1	Agrietamiento por fatiga (piel de cocodrilo)	9	Por derrame de Combustible
2	Exudación	10	Bacheo
3	Agrietamiento tipo bloque	11	Áridos pulidos
4	Corrugación (ondulación)	12	Pérdida de áridos y Peladuras (disgregación)
5	Hundimiento (depresión)	13	Huellamiento
6	Erosión por chorro de Jet	14	Desplazamiento por empuje de losas de hormigón
7	Agrietamiento por reflexión de juntas	15	Agrietamiento por Deslizamiento
8	Agrietamiento lineal (longitudinal o transversal)	16	Hinchamiento



ID	Nº Deterioro	Nivel de Severidad	Cantidad	Unidad de Medida
39	8	2	3,3	m
40	10	1	0,8 x 2,8	m <sup>2</sup>
41	8	3	0,9	m
42	8	3	2,6	m
43	8	3	2,9	m
44	1 3	3	2,2 x 1,4	m <sup>2</sup>
45	1 3	3	2,6 x 0,7	m <sup>2</sup>
46	8	1	1,3	m
47	8	2	1,3	m
48	8	2	1,1	m
49	8	3	3,9	m
50	8	1	1	m
51	3	2	0,7 x 2,2	m <sup>2</sup>
52	8	2	1,3	m
53	8	1	1,3	m
54	13	1 (1,2)	0,8 x 4,2	m <sup>2</sup>
55	13	2 (1,5)	4,5 x 1,4	m <sup>2</sup>
56	13	1 (1,2)	1,5 x 2,2	m <sup>2</sup>
57	3	1	0,8 x 1,8	m <sup>2</sup>

## Anexo 6: Deterioros Registrados Mediante Análisis Fotogramétrico.

- Sitio con pavimento de hormigón

Losa	Tipo_Deterioro	Medida (mm)	Nivel_Severidad
A-1	5	-	3
A-1	14	2220.591	1
A-2	5	-	3
A-2	14	1023.36	2
A-2	10	-	1
A-2	8	31.15	0
A-3	5	-	3
A-3	10	-	1
A-3	10	-	2
A-4	5	-	3
A-4	8	32.47	0
A-4	15	-	1
A-4	14	565.08	1
B-1	5	-	3
B-1	15	-	1
B-2	5	-	3
B-2	15	-	1
B-2	8	28.05	0
B-3	5	-	3
B-3	14	268.56	1
B-3	8	37.62	0
B-3	14	1163.02	2
B-4	5	-	3
C-1	5	-	3
C-2	5	-	3
C-2	15	-	2
C-2	14	879.05	2
C-2	14	790.03	2
C-3	5	-	3
C-3	8	47.95	0
C-3	10	-	2
C-3	14	1176.78	1
D-1	5	-	3
D-1	15	-	1
D-2	5	-	3
D-2	13	-	0
D-2	15	-	1
D-2	14	2844.6	2

Losa	Tipo_Deterioro	Medida (mm)	Nivel_Severidad
D-3	2	16.6	2
D-3	3	11.88	2
D-3	3	14.13	2
D-3	5	-	3
D-3	10	-	1
E-1	5	-	3
E-1	10	-	3
E-2	5	-	3
E-2	14	850.55	2
E-3	5	-	3
E-3	15	-	2
F-1	5	-	3
F-1	10	-	3
F-2	2	-	1
F-2	5	-	3
F-2	14	2005.93	2
F-2	14	2063.22	2
F-2	10	-	1
F-2	8	28.76	0
F-2	14	279.26	1
F-3	5	-	3
F-3	15	-	1
F-3	10	-	1
G-1	5	-	3
G-1	10	2	3
G-1	10	-	1
G-1	15	-	1
G-2	5	-	3
G-2	8	41.55	0
G-2	10	-	3
G-2	10	-	1
G-2	14	2720.65	2
G-2	14	1138.19	2
G-2	14	2298.97	1
G-3	5	-	3
G-3	14	2143.11	2
G-3	14	1351.46	3
G-3	15	-	2

Losa	Tipo_Deterioro	Medida (mm)	Nivel_Severidad
G-3	10	-	2
G-3	8	25.48	0
G-4	5	-	3
G-4	10	-	1
G-4	8	35.18	0
G-4	15	-	1
G-4	14	383.59	2
H-1	5	-	3
H-1	15	-	1
H-1	14	462.37	1
H-2	5	-	3
H-2	13	-	0
H-2	8	39.86	0
H-2	10	-	1
H-2	15	-	1
H-2	14	1674.62	2
H-3	3	13.85	2
H-3	5	-	3

- **Sitio con pavimento asfáltico**

ID	Tipo de Deterioro	Medida (mm)	Nivel de Severidad	Cantidad
1	8	4.6	1	0.782
2	8	4	1	1.355
3	8	4.92	1	2.496
4	8	9.5	2	4.008
5	8	4	1	3.426
6	3	7.4	2	14.727
7	9	-	-	0.05
8	8	10.1	2	10.432
9	5	36.95	3	2.817
10	8	3.7	1	6.386
11	8	4.3	1	3.691
12	8	3.5	1	1.977
13	8	3.1	1	0.752
14	8	10.9	2	7.514
15	8	9.9	2	4.544
16	8	3	1	0.714
17	3	10.4	2	4.281
18	8	14.8	2	3.897
19	3	9.9	2	14.832
20	8	3.4	1	1.412

ID	Tipo de Deterioro	Medida (mm)	Nivel de Severidad	Cantidad
21	8	9.4	2	4.413
22	8	5	1	2.197
23	8	5.1	1	2.976
24	8	4	1	1.282
25	12	-	3	6.941
26	5	21.83	2	0.193
27	8	3	1	0.805
28	8	3.9	1	2.181
29	8	4.1	1	0.747
30	8	5.6	1	3.352
31	8	3.4	1	0.523
32	12	-	3	5.579
33	3	14.2	2	5.066
34	1	19.5	3	5.131
35	8	11.2	2	2.517
36	8	16.1	2	2.817
37	8	13.9	3	5.378
38	8	12.3	2	2.891
39	8	52.8	3	12.461
40	8	11.5	2	3.587
41	10	-	1	2.22
42	8	11.4	2	0.943
43	8	28.1	3	2.804
44	8	37.4	3	2.958
45	1	0	3	5.409
46	8	10.4	2	1.306
47	8	15.8	2	1.356
48	8	7.7	2	1.119
49	8	10.1	2	3.89
50	8	5.4	1	1.007
51	3	16.2	2	0.85
52	8	10.8	2	1.359
53	8	5.4	1	1.232
54	13	8.77	1	9.287
55	13	8.29	1	17.647
56	13	8.82	1	4.961
57	3	4.5	1	2.121
58	13	8.81	1	4.356
59	8	5.2	1	1.69
60	8	3	1	0.663
61	8	5.3	1	1.5
62	8	3.9	1	0.804
63	8	5.5	1	1.798
64	8	4.7	1	1.531
65	8	3.1	1	1.134
66	8	3.1	1	0.885
67	8	3.9	1	1.142
68	8	4.1	1	0.7

## Anexo 7: Scripts MATLAB

- **Hundimiento**

```
% Cargar datos
archivo = 'HUNDIMIENTO_PCT_1_1.txt';
formato_columnas = '%f %f %f %f'; % Distancia, X, Y,
Altura
datos = readtable(archivo, 'Format', formato_columnas,
'Delimiter', '\t');
distancias = datos.Var1; % Distancias
x_coordenadas = datos.Var2; % Coordenadas X
y_coordenadas = datos.Var3; % Coordenadas Y
altura = datos.Var4; % Valores de altura

% Suavizado de datos
tamano_ventana = 20;
valores_suavizados = movmean(altura, tamano_ventana);

% Línea de tendencia lineal
p_tendencia = polyfit(distancias, valores_suavizados,
1);
tendencia_completa = polyval(p_tendencia, distancias);

% Residuos respecto a la línea de tendencia
residuos = (valores_suavizados - tendencia_completa) *
1000;

% Filtrar residuos positivos
distancias_positivas = distancias(residuos > 0);
valores_positivos = valores_suavizados(residuos > 0);

% Nueva línea de tendencia lineal usando residuos
positivos
p_nueva_tendencia = polyfit(distancias_positivas,
valores_positivos, 1);
nueva_tendencia = polyval(p_nueva_tendencia,
distancias);

% Nuevos residuos respecto a la nueva línea de
tendencia
nuevos_residuos = (valores_suavizados -
nueva_tendencia) * 1000;

figure;
```

```

subplot(2, 1, 1);
plot(distancias, valores_suavizados, '-b', 'LineWidth',
1.5, 'DisplayName', 'Datos Suavizados');
hold on;
plot(distancias, nueva_tendencia, '-r', 'LineWidth', 2,
'DisplayName', 'Tendencia Lineal Filtrada');
xlabel('Distancia (m)');
ylabel('Altura (m)');
title('Nueva Línea de Tendencia Lineal Filtrada');
legend('show');
grid on;

subplot(2, 1, 2);
plot(distancias, nuevos_residuos, '-b', 'LineWidth',
1.5, 'DisplayName', 'Nuevos Residuos (mm)');
hold on;
yline(0, '--k', 'DisplayName', 'Línea de Tendencia');
xlabel('Distancia (m)');
ylabel('Residuos (mm)');
title('Residuos Respecto a la Nueva Línea de Tendencia
Lineal');
legend('show');
grid on;

```

- **Ahuellamiento**

```

% Cargar datos
archivo = 'AHUELLAMIENTO_PCT_1.txt';
formato_columnas = '%f %f %f %f'; % Distancia, X, Y,
Altura
datos = readtable(archivo, 'Format', formato_columnas,
'Delimiter', '\t');
distancias = datos.Var1; % Distancias
x_coordenadas = datos.Var2; % Coordenadas X
y_coordenadas = datos.Var3; % Coordenadas Y
altura = datos.Var4; % Valores de altura

% Suavizado de datos
tamano_ventana = 20;
valores_suavizados = movmean(altura, tamano_ventana);

% Línea de tendencia cuadrática
p_full = polyfit(distancias, valores_suavizados, 2);

```

```

tendencia_completa = polyval(p_full, distancias);

% Residuos respecto a la línea de tendencia
residuos = (valores_suavizados - tendencia_completa) *
1000;

% Punto de cambio de pendiente
distancia_minima = 1; % rango inicial en metros
distancia_maxima = 7; % rango final en metros
indices_validos = (distancias >= distancia_minima) &
(distancias <= distancia_maxima);
residuos_validos = residuos(indices_validos);
distancias_validas = distancias(indices_validos);
[~, indice_cambio_pendiente_en_rango] =
max(residuos_validos);
distancia_cambio_pendiente =
distancias_validas(indice_cambio_pendiente_en_rango);
indice_cambio_pendiente = find(distancias ==
distancia_cambio_pendiente);

% Dividir en rangos
distancias_primer_rango =
distancias(1:indice_cambio_pendiente);
valores_primer_rango =
valores_suavizados(1:indice_cambio_pendiente);
residuos_primer_rango = (valores_primer_rango -
polyval(polyfit(distancias_primer_rango,
valores_primer_rango, 2), distancias_primer_rango)) *
1000;

distancias_segundo_rango =
distancias(indice_cambio_pendiente:end);
valores_segundo_rango =
valores_suavizados(indice_cambio_pendiente:end);
residuos_segundo_rango = (valores_segundo_rango -
polyval(polyfit(distancias_segundo_rango,
valores_segundo_rango, 2), distancias_segundo_rango)) *
1000;

% Filtrar residuos positivos
distancias_primer_rango_positivas =
distancias_primer_rango(residuos_primer_rango > 0);
valores_primer_rango_positivos =
valores_primer_rango(residuos_primer_rango > 0);

```

```

distancias_segundo_rango_positivas =
distancias_segundo_rango(residuos_segundo_rango > 0);
valores_segundo_rango_positivos =
valores_segundo_rango(residuos_segundo_rango > 0);

tendencia_primer_rango_positivo =
polyval(polyfit(distancias_primer_rango_positivas,
valores_primer_rango_positivos, 2),
distancias_primer_rango);
tendencia_segundo_rango_positivo =
polyval(polyfit(distancias_segundo_rango_positivas,
valores_segundo_rango_positivos, 2),
distancias_segundo_rango);

nuevos_residuos_primer_rango = (valores_primer_rango -
tendencia_primer_rango_positivo) * 1000;
nuevos_residuos_segundo_rango = (valores_segundo_rango
- tendencia_segundo_rango_positivo) * 1000;

% Figuras
% Primera figura
figure;
subplot(2, 1, 1);
plot(distancias, valores_suavizados, '-b', 'LineWidth',
1.5, 'DisplayName', 'Datos Suavizados');
hold on;
plot(distancias, tendencia_completa, '-r', 'LineWidth',
2, 'DisplayName', 'Tendencia Cuadrática');
xlabel('Distancia (m)');
ylabel('Altura (m)');
title('Análisis de Tendencia');
legend('show');
grid on;

subplot(2, 1, 2);
plot(distancias, residuos, '-b', 'LineWidth', 1.5,
'DisplayName', 'Residuos (mm)');
hold on;
yline(0, '--k', 'DisplayName', 'Línea de Tendencia');
scatter(distancia_cambio_pendiente,
residuos(indice_cambio_pendiente), 100, 'g', 'filled',
'DisplayName', 'Cambio de Pendiente');
xlabel('Distancia (m)');

```

```

ylabel('Residuos (mm)');
title('Residuos Respecto a la Línea de Tendencia y
Cambio de Pendiente');
legend('show');
grid on;

% Segunda figura
figure;
subplot(2, 1, 1);
plot(distancias_primer_rango, valores_primer_rango, '-
b', 'LineWidth', 1.5, 'DisplayName', 'Datos Primer
Rango');
hold on;
plot(distancias_primer_rango,
polyval(polyfit(distancias_primer_rango,
valores_primer_rango, 2), distancias_primer_rango), '-
r', 'LineWidth', 2, 'DisplayName', 'Tendencia
Cuadrática');
xlabel('Distancia (m)');
ylabel('Altura (m)');
title('Análisis de Tendencia en Primer Rango');
legend('show');
grid on;

subplot(2, 1, 2);
plot(distancias_primer_rango, residuos_primer_rango, '-
b', 'LineWidth', 1.5, 'DisplayName', 'Residuos Primer
Rango (mm)');
hold on;
yline(0, '--k', 'DisplayName', 'Eje Cero');
xlabel('Distancia (m)');
ylabel('Residuos (mm)');
title('Residuos Respecto a Línea de Tendencia en Primer
Rango');
legend('show');
grid on;

% Tercera figura
figure;
subplot(2, 1, 1);
plot(distancias_segundo_rango, valores_segundo_rango,
'-b', 'LineWidth', 1.5, 'DisplayName', 'Datos Segundo
Rango');

```

```

hold on;
plot(distancias_segundo_rango,
polyval(polyfit(distancias_segundo_rango,
valores_segundo_rango, 2), distancias_segundo_rango),
'-r', 'LineWidth', 2, 'DisplayName', 'Tendencia
Cuadrática');
xlabel('Distancia (m)');
ylabel('Altura (m)');
title('Análisis de Tendencia en Segundo Rango');
legend('show');
grid on;

subplot(2, 1, 2);
plot(distancias_segundo_rango, residuos_segundo_rango,
'-b', 'LineWidth', 1.5, 'DisplayName', 'Residuos
Segundo Rango (mm)');
hold on;
yline(0, '--k', 'DisplayName', 'Eje Cero');
xlabel('Distancia (m)');
ylabel('Residuos (mm)');
title('Residuos Respecto a Línea de Tendencia en
Segundo Rango');
legend('show');
grid on;

% Cuarta figura
figure;
subplot(2, 1, 1);
plot(distancias_primer_rango_positivas,
valores_primer_rango_positivos, '-b', 'LineWidth', 1.5,
'DisplayName', 'Datos Filtrados');
hold on;
plot(distancias_primer_rango,
tendencia_primer_rango_positivo, '-r', 'LineWidth', 2,
'DisplayName', 'Tendencia Filtrada');
xlabel('Distancia (m)');
ylabel('Altura (m)');
title('Línea de Tendencia Primer Rango Sin Valores
Negativos');
legend('show');
grid on;

subplot(2, 1, 2);

```

```

plot(distancias_segundo_rango_positivas,
valores_segundo_rango_positivos, '-b', 'LineWidth',
1.5, 'DisplayName', 'Datos Filtrados');
hold on;
plot(distancias_segundo_rango,
tendencia_segundo_rango_positivo, '-r', 'LineWidth', 2,
'DisplayName', 'Tendencia Filtrada');
xlabel('Distancia (metros)');
ylabel('Altura (Valor)');
title('Línea de Tendencia Segundo Rango Sin Valores
Negativos');
legend('show');
grid on;

% Quinta figura
figure;
subplot(2, 1, 1);
plot(distancias_primer_rango,
nuevos_residuos_primer_rango, '-b', 'LineWidth', 1.5,
'DisplayName', 'Nuevos Residuos (mm)');
hold on;
yline(0, '--k', 'DisplayName', 'Eje Cero');
xlabel('Distancia (metros)');
ylabel('Residuos (mm)');
title('Residuos Respecto a Nueva Línea de Tendencia
Primer Rango');
legend('show');
grid on;

subplot(2, 1, 2);
plot(distancias_segundo_rango,
nuevos_residuos_segundo_rango, '-b', 'LineWidth', 1.5,
'DisplayName', 'Nuevos Residuos (mm)');
hold on;
yline(0, '--k', 'DisplayName', 'Eje Cero');
xlabel('Distancia (metros)');
ylabel('Residuos (mm)');
title('Residuos Respecto a Nueva Línea de Tendencia
Segundo Rango');
legend('show');
grid on;

```