



X EDICIÓN 2023/4

Accésit - Texto completo

Hacia la modernización del análisis del estado superficial de pavimentos en Argentina

Autores

Gustavo Mezzelani
Franco A. Piazza
Lucas A. Bresciani
Diana S. Cainelli
Horacio P. Terráneo
Julián Matter
Juana Rubiolo
Giuliana Seifer
Lucas Chiabrando
Ilán Salomón

ITYAC

ARGENTINA

HACIA LA MODERNIZACIÓN DEL ANÁLISIS DEL ESTADO SUPERFICIAL DE PAVIMENTOS EN ARGENTINA

En Argentina se cuenta con una normativa específica para la evaluación de estado de pavimentos desarrollada por la Dirección Nacional de Vialidad (DNV) en 1981.

Con el tiempo se fueron incorporando nuevas tecnologías para la evaluación, pero nunca se logró automatizar el proceso ni representar el 100% del sector estudiado.

La normativa propone caracterizar las fallas del pavimento clasificando sólo el 2% del tramo en estudio. Con equipos de medición de alto rendimiento, es posible relevar la totalidad del tramo, pero el análisis de fallas sigue siendo manual, mediante visualización de imágenes del pavimento en gabinete.

Es por eso que nos propusimos crear una nueva metodología que aprovechara al máximo las ventajas de estos nuevos equipos, adaptándose a la normativa nacional vigente. Pero además de eso, decidimos ir un paso más allá, creando un algoritmo que interprete toda la información recolectada sobre las fallas, y le recomiende al Ingeniero, cuáles serían las tareas de reparación óptimas para cada sección de pavimento en estudio.

El sistema agrupa, caracteriza y analiza fallas de pavimentos asfálticos basándose en la información relevada con el Equipo Multifunción SPIDER-LCMS®. Adicionalmente, luego de esta etapa de análisis, recomienda las tareas de reparación que considera óptimas para cada caso de manera automática.

Todo este desarrollo no podría haber sido posible sin la integración de Inteligencia Artificial (IA), que fue entrenada específicamente con datos históricos de las carreteras de nuestro país.

Si bien la mayor parte del proceso es automático, la integración de un módulo de correcciones, permite que el ojo clínico del Ingeniero mejore aún más el resultado final de la evaluación.

Este nuevo sistema reduce significativamente los tiempos de procesamiento y proporciona más información que las metodologías tradicionales. De esta forma, se moderniza la evaluación de pavimentos, permitiendo la toma de decisiones informadas para mantenimiento.

Los resultados arrojados por este sistema fueron aplicados en trabajos de relevamiento, y se contrastaron contra análisis ejecutados con la metodología tradicional, obteniéndose resultados esperanzadores respecto a su precisión.

Palabras clave: Inteligencia Artificial, Modernización, Evaluación, Pavimentos.

ÍNDICE

1 INTRODUCCIÓN.....	3
1.1 Contexto.....	3
1.2 Índice de Estado en Argentina.....	3
1.3 Procedimiento de evaluación tradicional en Argentina.....	4
1.4 Implementación de Equipos de Alto Rendimiento.....	5
1.5 Objetivos.....	6
2 DESARROLLO DEL SOFTWARE DE EVALUACIÓN DE PAVIMENTOS.....	7
2.1 Relevamiento de la información.....	8
2.2 Módulo de Evaluación Superficial:.....	10
2.2.1 Agrupación y tratamiento del ahuellamiento y la rugosidad:.....	10
2.2.2 Agrupación, caracterización y clasificación de fallas (D3 y D4):.....	11
2.2.3 Resultados de la Evaluación Automática:.....	17
2.3 Módulo de Reparaciones:.....	24
2.3.1 Tipos de Reparaciones:.....	24
2.3.2 Reparaciones individuales:.....	28
2.3.3 Unificación de Reparaciones:.....	31
2.3.4 Resultados de las reparaciones automáticas:.....	37
2.4 Módulo de Correcciones:.....	38
2.4.1 Correcciones en evaluación de pavimentos:.....	38
2.4.2 Correcciones en reparaciones de pavimentos:.....	42
2.5 Módulo de Exportación de Resultados:.....	44
2.5.1 Información gráfica exportada:.....	45
2.5.2 Información numérica exportada:.....	45
3 CONCLUSIONES.....	46
4 BIBLIOGRAFÍA.....	48
4.1 Normativas.....	48
4.2 Artículos particulares.....	48

1 INTRODUCCIÓN

1.1 Contexto

En Argentina, la Dirección Nacional de Vialidad (DNV) publicó en 1981 el Manual de Evaluación de Pavimentos, un hito normativo en el ámbito del mantenimiento vial. Este manual introdujo por primera vez en el país un sistema de evaluación estandarizado, mediante un índice combinado que permitía calificar el estado de los pavimentos con una puntuación de 1 a 10. En ese momento, el enfoque de mantenimiento preventivo basado en el diagnóstico del estado de los caminos era una innovación significativa para la región, alineándose con tendencias globales en la ingeniería vial.

Hoy, 43 años después de su publicación, la normativa vigente sigue siendo la misma, sin haber sido actualizada de manera sustancial para integrar los avances tecnológicos de los últimos tiempos. Este manual ha quedado desactualizado frente a las herramientas digitales y automatizadas que predominan en la evaluación y mantenimiento de pavimentos en otras partes del mundo.

1.2 Índice de Estado en Argentina

El *Índice de Estado (IE)* fue desarrollado en Argentina a partir de un extenso trabajo empírico realizado por la DNV. Este índice se formuló mediante la recolección de datos relacionados con el confort percibido por los usuarios al transitar las carreteras. El estudio vinculaba las impresiones de los conductores con las características superficiales de los pavimentos, buscando establecer una correlación entre el estado del pavimento y la calidad de la experiencia de conducción.

Es importante destacar que el Índice de Estado fue concebido con un enfoque de mantenimiento a nivel de red. Su objetivo no es evaluar tramos individuales de pavimento, sino proporcionar una visión general del estado de toda la red vial. Esto permite identificar de manera eficiente las áreas que requieren atención prioritaria, optimizando la planificación y ejecución de las intervenciones de mantenimiento.

A pesar de que el Índice de Estado se obtuvo principalmente en base a información local, contó con una inspiración en el *Índice de Serviciabilidad Presente (PSI)*, un parámetro ampliamente utilizado en otros países para evaluar la funcionalidad y el confort de los pavimentos.

La expresión matemática para calcular el Índice de Estado de un pavimento asfáltico es la siguiente:

$$IE = 10 \cdot e^{-(0.04 D_1 + 0.05 D_2 + 0.07 D_3 + 0.04 D_4)} \quad (1)$$

En términos generales, el índice se apoya en coeficientes que representan los grados de severidad de los distintos deterioros, los cuales son:




D_1 = Deformación Longitudinal o Rugosidad.

D_2 = Deformación Transversal o Ahuellamiento.

D_3 = Fisuración o Clasificación de Fisuras.

D_4 = Desprendimientos de Material o Baches.

Una limitación que se observa de este método es el cálculo del coeficiente D_3 que, de acuerdo a la normativa vigente, solo puede obtenerse mediante la clasificación visual de las fisuras por parte de un evaluador, que compara la falla con un catálogo brindado por el manual. Esto introduce la subjetividad del observador dentro del análisis.

FOTOGRAFIA TIPO		FOTOGRAFIA TIPO		FOTOGRAFIA TIPO	
DESCRIPCIÓN	FISURA FORMADA EN UNA SOLA LINEA GENERALMENTE LONGITUDINAL Y AISLADA CON TENDENCIA A RAMIFICARSE.	DESCRIPCIÓN	FISURA RAMIFICADA CON TENDENCIA A FORMAR UNA MALLA GENERALIZADA EN SECTORES DE PAVIMENTO.	DESCRIPCIÓN	FISURA EN FORMA DE MALLA QUE ABARCA UNA SUPERFICIE MAS AMPLIA DE PAVIMENTO Y CON TENDENCIA A FORMAR LA PIEL DE COCODRILO.
COEFICIENTE D3 CORRESPONDIENTE	2	COEFICIENTE D3 CORRESPONDIENTE	4	COEFICIENTE D3 CORRESPONDIENTE	6

FOTOGRAFIA TIPO		FOTOGRAFIA TIPO	
DESCRIPCIÓN	FISURA GENERALIZADA EN FORMA DE MALLA CERRADA, DE RETICULADO MAS CHICO, FORMANDO LA LLAMADA 'PIEL DE COCODRILO' DESPRENDIMIENTO DE MATERIAL EN CORRESPONDENCIA CON ALGUNAS FISURAS.	DESCRIPCIÓN	FISURA TOTALMENTE GENERALIZADA CON DESPRENDIMIENTO DE PANES DE MATERIAL Y FORMACION DE BACHE.
COEFICIENTE D3 CORRESPONDIENTE	8	COEFICIENTE D3 CORRESPONDIENTE	10

Figura 1 – Ejemplos catálogo de fallas de la DNV

1.3 Procedimiento de Evaluación Tradicional en Argentina

En la década de 1980, con las limitaciones tecnológicas de la época, el relevamiento de los deterioros superficiales del pavimento se llevaba a cabo a partir de ensayos manuales. Debido a esto, la evaluación del Índice de Estado (IE) se realizaba tomando como referencia únicamente los veinte metros más representativos de cada kilómetro, lo que equivale al 2% de la superficie total. Este enfoque tradicional, si bien adecuado en aquel momento, tenía el objetivo de reducir la complejidad y los recursos necesarios para la evaluación.

Con el paso del tiempo, se comenzó a adoptar la práctica de evaluar los últimos veinte metros de cada kilómetro. En algunos casos, incluso se optaba por realizar la evaluación cada dos kilómetros por cuestiones de practicidad operativa. Este cambio, permitió acelerar el proceso de evaluación, pero comprometió gravemente la precisión técnica del análisis, al basarse en una porción reducida y potencialmente no representativa de la totalidad del tramo en estudio.

1.4 Implementación de Equipos de Alto Rendimiento

En las últimas décadas, la tecnología ha avanzado significativamente en el campo de evaluación vial con la incorporación de equipos de alto rendimiento, tal como el “Equipo Multifunción SPIDER - LCMS[®]”.



Figura 2 – Equipo Multifunción SPIDER - LCMS[®]

Este equipo integra diferentes subsistemas que permiten obtener perfiles 3D gracias a la incorporación de cámaras de alta resolución y sensores láser instalados en un vehículo que recorre la carretera. Esto posibilita recolectar de forma simultánea los parámetros superficiales del pavimento, tales como la deformación longitudinal y transversal, la detección automática de fisuras y desprendimientos, la determinación de la geometría del pavimento, etc. Gracias a esta tecnología, es posible evaluar el 100% de la superficie en estudio, permitiendo obtener una caracterización más completa y detallada del pavimento en menor tiempo.

A pesar de las ventajas evidentes, la normativa vigente en Argentina no ha logrado adaptarse a estas tecnologías. Un claro ejemplo de esto es la imposibilidad de obtener el coeficiente D_3 (clasificación de fisuras) a través de un cálculo directo. El mismo solo puede ser definido por un observador, lo que hace que el proceso de evaluación dependa de la subjetividad y que, por ende, sea más lento y costoso.

Si bien esta falta de actualización tecnológica en la normativa ha limitado la integración completa de los avances actuales, el Índice de Estado sigue siendo un pilar fundamental en la evaluación de pavimentos en Argentina. La amplia trayectoria de su uso ha generado una valiosa base de datos histórica que es indispensable para la toma de decisiones futura. Conservar y respetar esta

información es crucial, ya que proporciona un marco de referencia confiable y familiar para los profesionales del sector.

1.5 Objetivos

Partiendo de este contexto, la oportunidad de innovación no solo surge del desfase entre la tecnología disponible y la normativa vigente, sino también del desafío de automatizar al máximo el proceso completo.

En este sentido, la implementación de programación avanzada e inteligencia artificial, combinada con el conocimiento de ingenieros viales con años de experiencia en el sector, podría crear una solución que modernice las metodologías tradicionales en la evaluación del estado superficial de los pavimentos en Argentina.

Es por ello que, nos propusimos cumplir con los siguientes objetivos a través del desarrollo de este proyecto:

- Mejorar la actual metodología de evaluación del estado de pavimentos contemplando la totalidad de la superficie en estudio.
- Automatizar el proceso de análisis y diagnóstico a partir de algoritmos avanzados de aprendizaje automático (IA), que sean capaces de caracterizar los deterioros superficiales de manera automática, pero que también analicen la información y recomienden reparaciones, reduciendo los tiempos en el análisis.
- Permitir la retroalimentación del modelo a medida que se recopilen más datos de diferentes pavimentos del país, mejorando la precisión del mismo.
- Integrar la participación del ingeniero vial en el proceso automatizado de forma que pueda intervenir haciendo correcciones y ajustes basados en su criterio técnico y experiencia. De este modo se garantiza que la calidad técnica no se vea comprometida y que las decisiones finales estén respaldadas.

Con estos objetivos en mente, el proyecto se orientó hacia la creación de una herramienta informática capaz de cumplir y superar los desafíos planteados en la evaluación y mantenimiento de pavimentos.

El presente trabajo se desarrolla como parte integrante de un Case Study presentado ante el Comité Técnico 3.3. "Gestión de Activos Viales" de la PIARC (Asociación Mundial de Carreteras), el cual se denomina ***"Next Steps in the Updating and Evolution of a Pavement Condition Index in Argentina"*** (***"Próximos pasos en la evolución y actualización de un Índice de Estado en Argentina"***).

Dentro de este caso de estudio, los objetivos propuestos son los siguientes:

1. Adaptar las nuevas tecnologías al Índice de Estado vigente, de manera que éste pueda ser obtenido realizando la evaluación en el 100% de la superficie, de una manera automática (o semi-automática), con buena precisión y en un tiempo reducido.

El objetivo sería lograr que los resultados obtenidos con las nuevas herramientas sean compatibles y comparables con la información histórica de índices de estado.

2. Actualizar los indicadores existentes, de manera que puedan calcularse aprovechando mejor la información extraída de los equipos de última generación, la cual hoy en día no se usa en su totalidad. Esto refiere tanto a introducir nuevos parámetros en las fórmulas, como a incluir nuevos datos o mayor volumen de información.
3. Desarrollar nuevos indicadores, basados en el procedimiento con el cual los nuevos equipamientos relevan y procesan la información.

Para desarrollar estos puntos, analizaremos las metodologías y procedimientos vigentes en distintos entes alrededor del mundo, prestando especial atención a las implementaciones y cambios más actuales.

Este trabajo, en particular, se enmarca dentro del objetivo número 1 del caso de estudio citado.

2 DESARROLLO DEL SOFTWARE DE EVALUACIÓN DE PAVIMENTOS

Como se mencionó anteriormente, el núcleo central de este proyecto está concentrado en la creación de una herramienta digital de evaluación de pavimentos, que pueda aprovechar al máximo las ventajas de los equipos de alto rendimiento.

Este software implementa algoritmos avanzados de inteligencia artificial logrando analizar el 100% del tramo en estudio, caracterizando deterioros superficiales de forma precisa y recomendando reparaciones óptimas basadas en criterios técnicos y datos históricos.

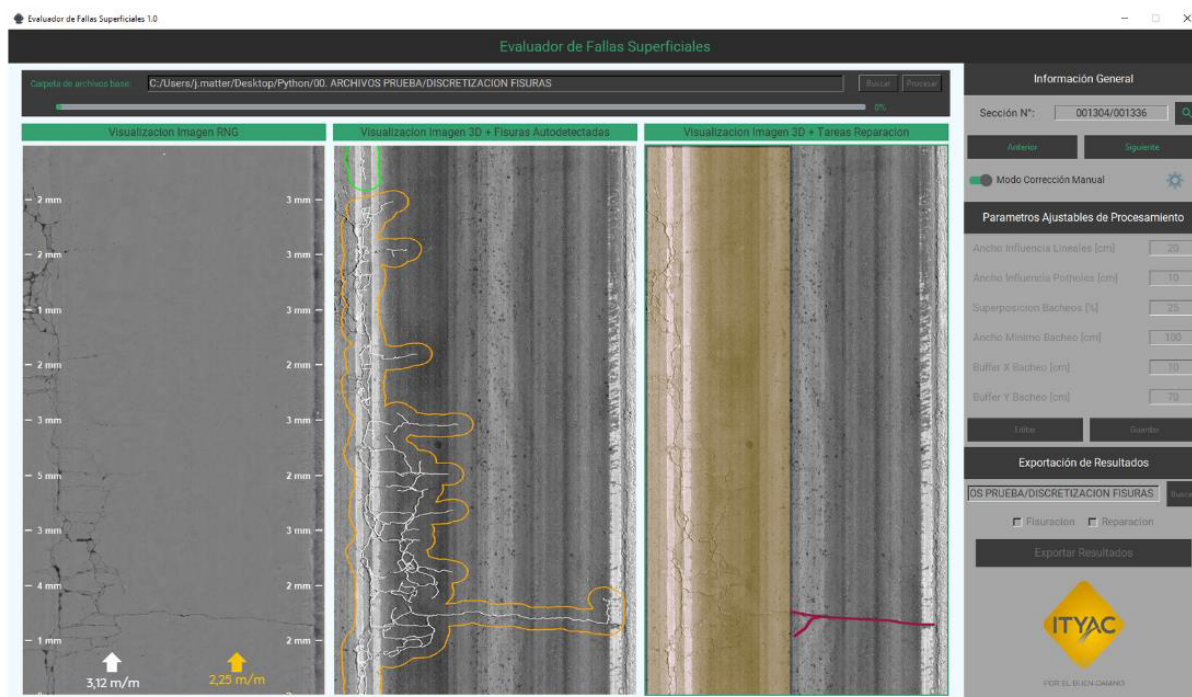


Figura 3 – Interfaz gráfica del sistema propuesto

Para entender de manera clara todas las funcionalidades que ofrece este software, resulta conveniente estudiar el proceso en partes. Cada una de estas partes abarca una fase específica del análisis y procesamiento de la información sobre el pavimento, y están organizadas en cuatro módulos principales. A lo largo de este apartado, explicaremos el funcionamiento de estos módulos, que son los siguientes:

- **Módulo de Evaluación Superficial**
- **Módulo de Reparaciones**
- **Módulo de Corrección**
- **Módulo de Exportación de Resultados**

2.1 Relevamiento de la Información

Antes de que el software pueda realizar su análisis y procesamiento, es crucial contar con datos precisos y detallados sobre el estado del pavimento. Esta información base se obtiene mediante el uso de equipos de alto rendimiento, como el equipo SPIDER integrado con tecnología LCMS (Laser Crack Measurement System[®]), que es capaz de recolectar datos del pavimento discretizando el mismo en secciones de 10 metros de longitud.

El sistema LCMS genera tres tipos de imágenes para cada sección de pavimento: una imagen de intensidad, una imagen de profundidad y una imagen 3D (composición de las dos anteriores).

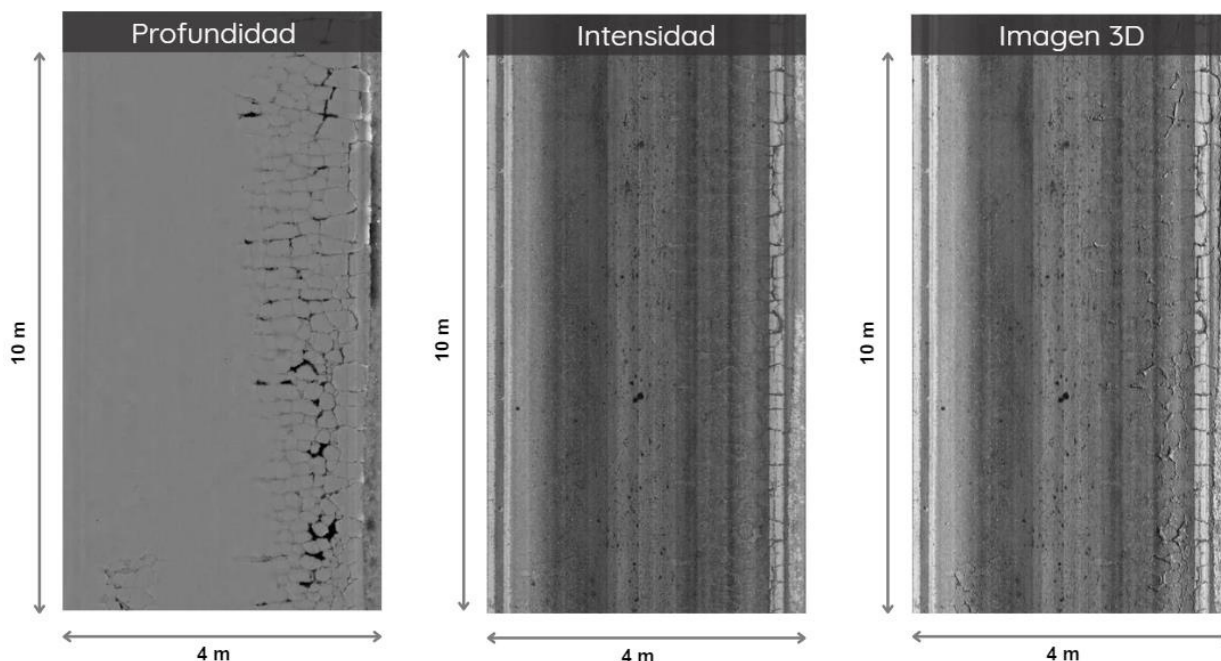


Figura 4 – Tipos de imágenes con tecnología LCMS

Estas imágenes se complementan con información numérica detallada de toda la sección, lo que proporciona una visión cuantitativa del estado del pavimento.

Dentro de estos parámetros numéricos, los que nos interesan para el posterior procesamiento de nuestra herramienta digital son los siguientes:

- Rugosidad (D_1): Relacionada con las deformaciones longitudinales del pavimento, se mide mediante sensores que capturan el perfil del pavimento a lo largo del tramo, especialmente en las huellas por donde el tránsito transfiere la carga.
- Ahuellamiento (D_2): Las deformaciones transversales del pavimento se detectan con precisión gracias a los sensores láser, que miden la profundidad de las huellas formadas por el tráfico, enfocándose en las áreas de mayor carga vehicular.
- Fisuración (D_3): Se capturan imágenes de alta resolución de toda la superficie del pavimento, las cuales permiten auto-detectar las fisuras presentes en la sección.
- Desprendimientos de material (D_4): A través de las imágenes generadas, se auto-detectan los desprendimientos de material en toda la superficie del pavimento, con sus respectivas características.

Como se mencionó anteriormente, toda esta información recolectada se organiza automáticamente en secciones de 10 metros de longitud y el ancho completo del carril. Para cada sección, la medición permite obtener valores diferenciados por huella (interna y externa), que corresponden a las zonas

donde el tránsito transfiere la carga de manera más significativa. Estas huellas quedan delimitadas por las denominadas "bandas de medición" establecidas por el sistema LCMS.

Mientras que los valores de rugosidad y ahuellamiento se obtienen específicamente dentro de las huellas, los desprendimientos de material y la fisuración se miden en toda la superficie de la sección.

2.2 Módulo de Evaluación Superficial

El objetivo principal del **Módulo de Evaluación Superficial** es obtener un valor de Índice de Estado para cada una de las secciones discretizadas durante el relevamiento de la información.

Este módulo se encarga de procesar y organizar la información obtenida con el sistema LCMS. El mismo trabaja con los valores de **rugosidad (D_1)** y **ahuellamiento (D_2)** obtenidos directamente de la medición, así como con la información de **fisuración (D_3)** y **desprendimientos de material (D_4)**, que requieren un procesamiento adicional.

2.2.1 Agrupación y tratamiento del ahuellamiento y la rugosidad

El procesamiento de la deformación longitudinal y transversal se realiza de la siguiente manera:

- Rugosidad (D_1): Se obtiene el valor del IRI (*Índice de Regularidad Internacional*) promedio cada 10 metros, el cual describe la regularidad longitudinal de cada huella.
- Ahuellamiento (D_2): Los datos del ahuellamiento se capturan de manera segmentada en intervalos de 1 metro, con un valor por cada huella (rodera).

Toda esta información se presenta en la interfaz gráfica del software, donde se integran los valores numéricos con la imagen de profundidad, facilitando así la interpretación por parte del ingeniero vial.

El uso de una representación visual a través de una imagen permite que el usuario estudie de forma intuitiva y rápida el estado del pavimento en cada sección, destacando áreas de potencial deterioro. Esta presentación gráfica es crucial para que un especialista pueda tomar decisiones informadas sobre posibles intervenciones de mantenimiento en los sectores más deteriorados.

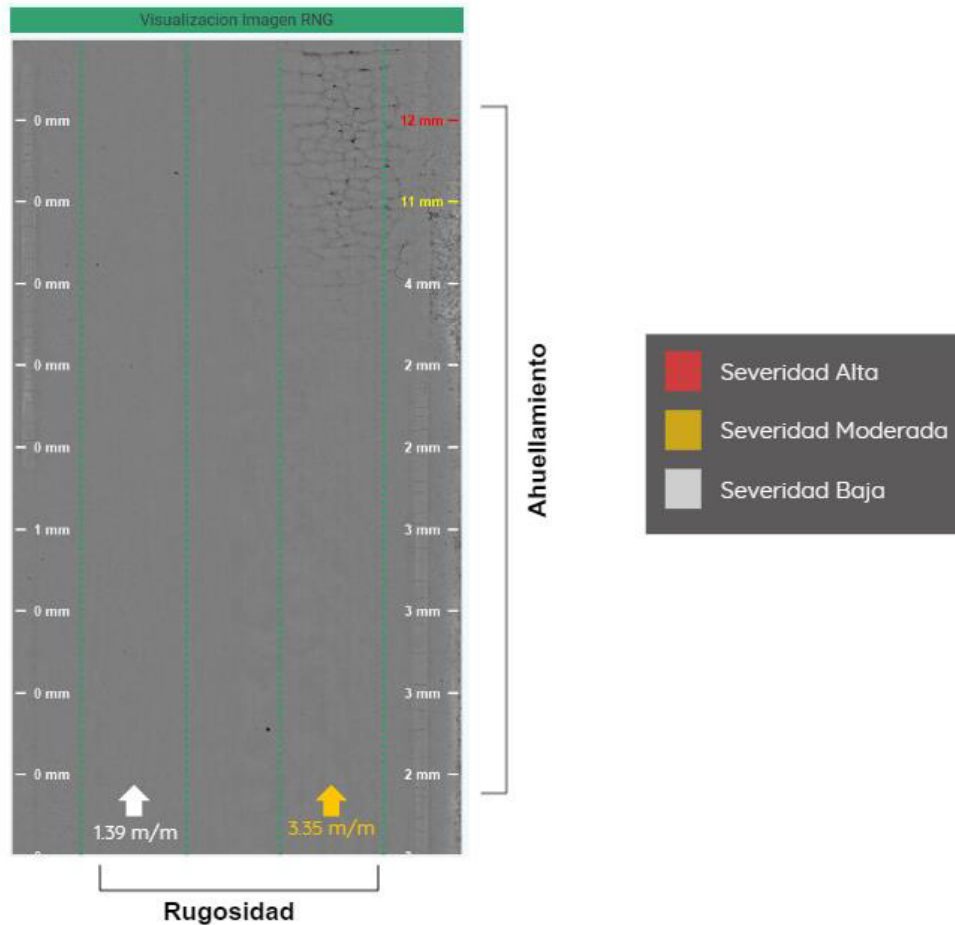


Figura 5 – Visualizaciones de rugosidad y ahuellamiento

2.2.2 Agrupación, caracterización y clasificación de fallas (D_3 y D_4)

El procesamiento de los coeficientes referidos a las fallas superficiales del pavimento (D_3 y D_4) requiere un análisis más profundo, ya que se trata de deterioros que deben ser identificados, caracterizados y clasificados automáticamente. El proceso consta de 3 pasos fundamentales: agrupación, caracterización y clasificación.

2.2.2.1 Algoritmo de agrupación de fallas

El primer paso en el procesamiento de las fallas superficiales del pavimento es la agrupación de fisuras y desprendimientos de material. Esta fase es fundamental, ya que permite organizar los deterioros detectados de manera más precisa, facilitando la interpretación y el análisis en las etapas posteriores del procesamiento.

Durante el proceso de relevamiento, las fisuras son definidas automáticamente por el sistema LCMS, pero de una forma que no permite extrapolar directamente esta información al cálculo del Índice de Estado. Esta agrupación inicial puede verse en la siguiente figura:

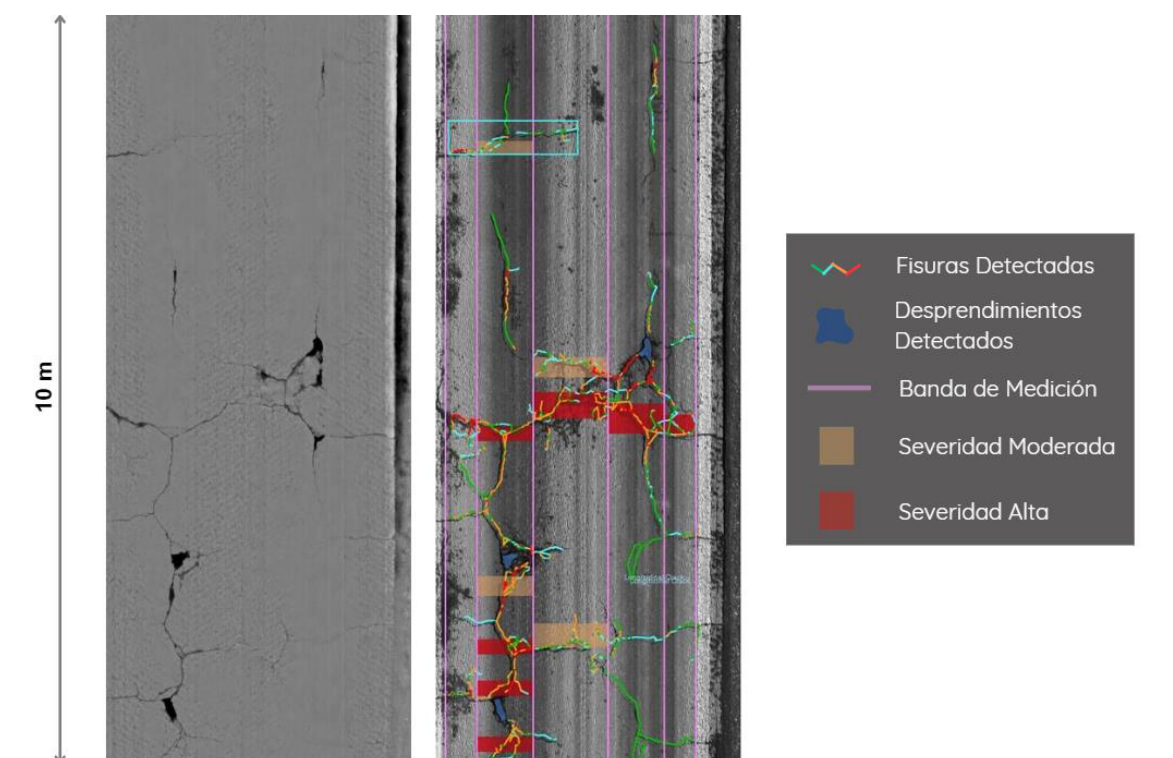


Figura 6 – Agrupamiento de fallas durante el proceso de relevamiento

La información proporcionada por estos equipos incluye dos características genéricas de las fallas:

- Área aproximada: delimitada por rectángulos restringidos por las bandas de medición.
- Severidad: dividida en dos categorías: moderada y alta.

Este enfoque tiende a excluir fisuras lineales aisladas, limitando la representatividad de la evaluación. Con el fin de superar este obstáculo, el **algoritmo de agrupación propuesto** introduce un enfoque más robusto para organizar las fisuras y desprendimientos de material auto-detectados. El mismo asigna un *ancho de influencia configurable* alrededor de cada fisura lineal o desprendimiento de material. Estos anchos de influencia pueden ser configurados a través de la interfaz gráfica del software, permitiendo adaptar el proceso de agrupación a las condiciones específicas de cada pavimento.

Tras realizar pruebas en diferentes pavimentos, se determinó que los anchos de influencia óptimos para iniciar una iteración son 20 cm para fisuras y 10 cm para desprendimientos de material. Estos valores se basan en la hipótesis de que, con el tiempo transcurrido entre la medición y la reparación de la superficie, las fisuras tienden a extenderse y unificarse, lo que justifica la necesidad de considerar un área de influencia para reflejar mejor la evolución esperada hasta el momento de su reparación.

Este nuevo enfoque permite al software agrupar automáticamente las fallas cuyas áreas de influencia se superponen, creando una agrupación más representativa de la realidad y facilitando un análisis más preciso para la toma de decisiones futuras.

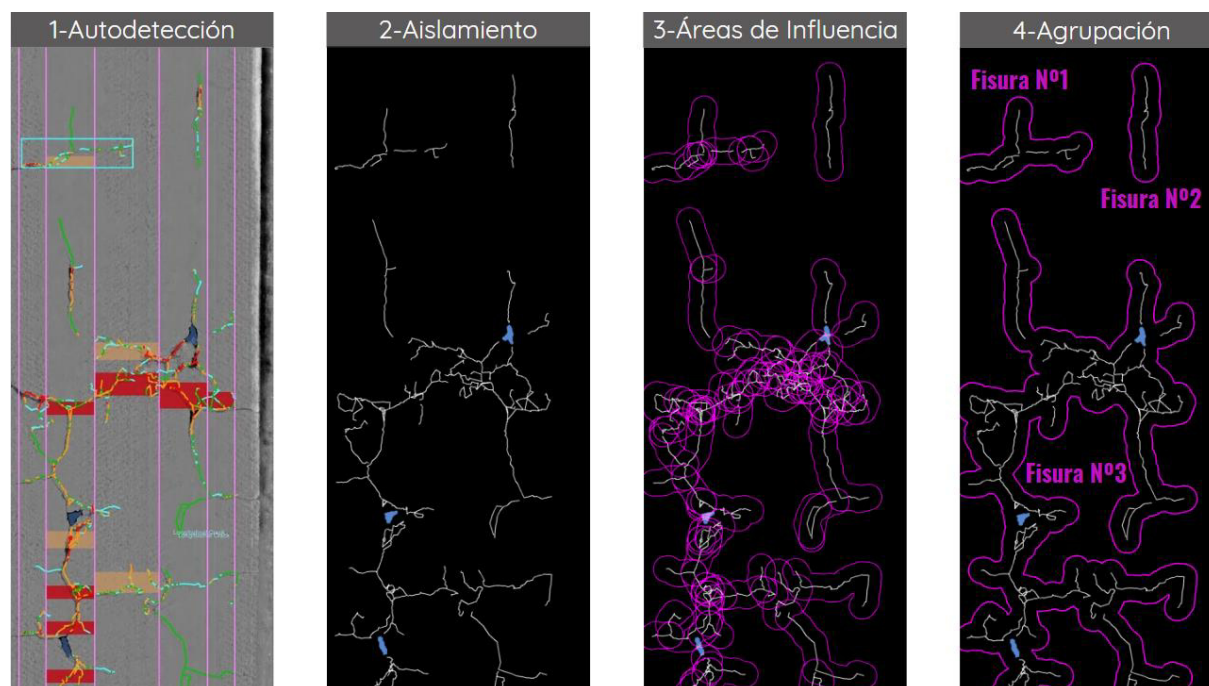


Figura 7 – Proceso propuesto de agrupación de fallas

En la **Figura 7**, se observa el proceso de agrupación de fisuras. El ancho de influencia asegura que las fallas no se consideren de forma aislada si su proximidad sugiere una evolución conjunta.

Así, al analizar conglomerados de fallas en lugar de fisuras aisladas, se facilita la posterior clasificación automática de las mismas.

2.2.2.2 Algoritmo de caracterización de fallas

El segundo paso en el procesamiento automático de las fallas superficiales es la caracterización numérica de las fisuras y desprendimientos de material previamente agrupados. Este proceso permite describir el comportamiento físico de cada falla.

A diferencia del enfoque de la normativa nacional, que se basa únicamente en la observación subjetiva del evaluador, el algoritmo de caracterización propuesto utiliza parámetros numéricos que describen con exactitud las particularidades de cada fisura. Esto no solo facilita su posterior clasificación, sino que también proporciona una base sólida de información para definir el tipo de reparación más adecuado.

Durante el desarrollo de este algoritmo, se examinaron diferentes parámetros y se estudió su correlación con la clasificación tradicional de fisuras establecida por la Dirección Nacional de Vialidad.

Como resultado, se identificaron los siguientes **parámetros directos** como los más representativos para describir una fisura:

- Área de la fisura.
- Cantidad y longitud total de fisuras lineales.
- Lado máximo y lado mínimo de la fisura.
- Cantidad y área de desprendimientos de material.

En la siguiente figura, puede observarse una ilustración con la modelación geométrica de las fisuras superficiales:

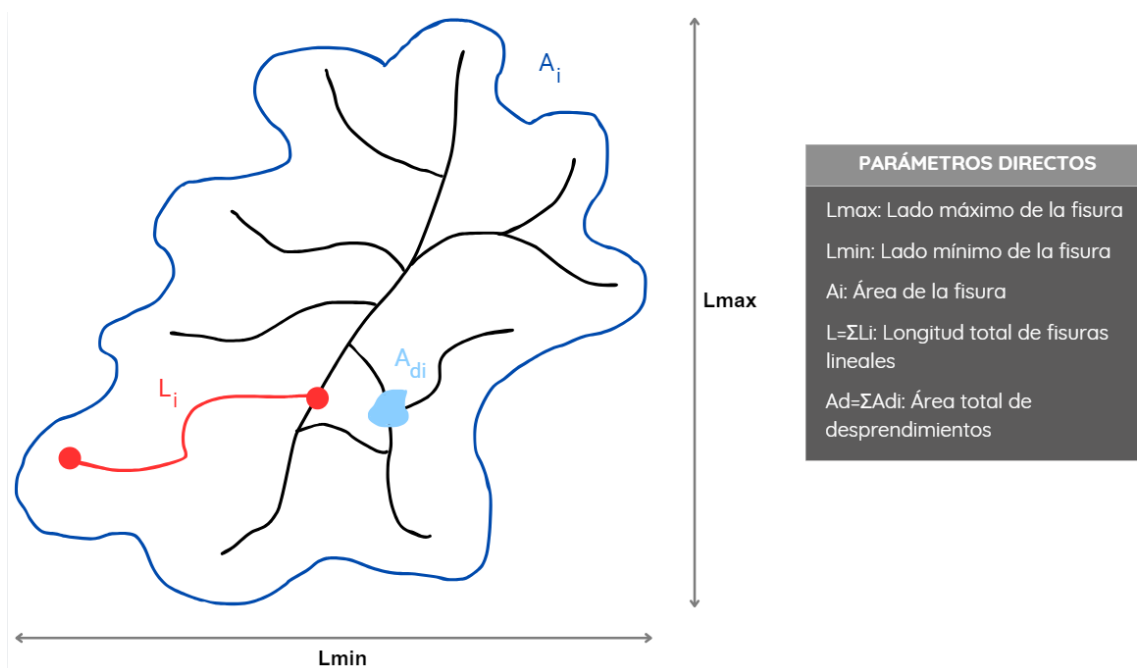


Figura 8 – Modelo geométrico fisura superficial

Además, se calcularon relaciones indirectas entre los diferentes parámetros, que mostraron una fuerte correlación con la clasificación del manual de la DNV. Estos **parámetros indirectos** son fundamentales para obtener una caracterización más completa:

- Relación de desprendimientos:

$$\text{Relación de desprendimientos} = \frac{\text{Área desprendimientos}}{\text{Cant. desprendimientos}} \quad (2)$$

- Densidad de fisuración:

$$\text{Densidad de fisuración} = \frac{\text{Longitud total fisuras lineales}}{\text{Área fisura}} \quad (3)$$

- Fisuración por metro:

$$\text{Fisuración por metro} = \frac{\text{Longitud total fisuras lineales}}{\text{Lado máximo de la fisura}} \quad (4)$$

De esta manera, se obtiene una descripción exhaustiva de las fallas. Esta nueva metodología no solo *elimina la subjetividad* inherente del método tradicional, sino que también garantiza un análisis más acertado del estado del pavimento.

Además, la posibilidad de contar con información detallada sobre cada fisura individual permite al ingeniero tener un mejor control sobre decisiones futuras.

2.2.2.3 Algoritmo de clasificación de fallas

El último paso en el procesamiento automático de fallas es la clasificación, tarea que se lleva a cabo mediante el uso de un algoritmo de aprendizaje automático (IA).

En esta fase, nos propusimos entrenar una IA capaz de interpretar fisuras y asignarles la clasificación de acuerdo con la normativa nacional.

Para ello, fue necesario contar con una *base de datos robusta y validada*. La misma, que contiene más de **130.000 fisuras**, fue construida con la colaboración de ingenieros viales con amplia experiencia en la evaluación de pavimentos. Cada fisura registrada incluye tanto parámetros directos como indirectos, así como imágenes de alta resolución y su respectiva clasificación manual.

El algoritmo de aprendizaje automático utilizado para clasificar las fisuras fue el **Bosque Aleatorio** (*Random Forest*), que ha demostrado ser altamente eficiente para problemas de clasificación complejos.

El **Bosque Aleatorio** está compuesto por una combinación de múltiples **Árboles de Decisión**, donde cada árbol intenta clasificar una fisura haciendo preguntas basadas en los parámetros numéricos de la misma. Un ejemplo de pregunta que un Árbol de Decisión podría hacer es el siguiente:

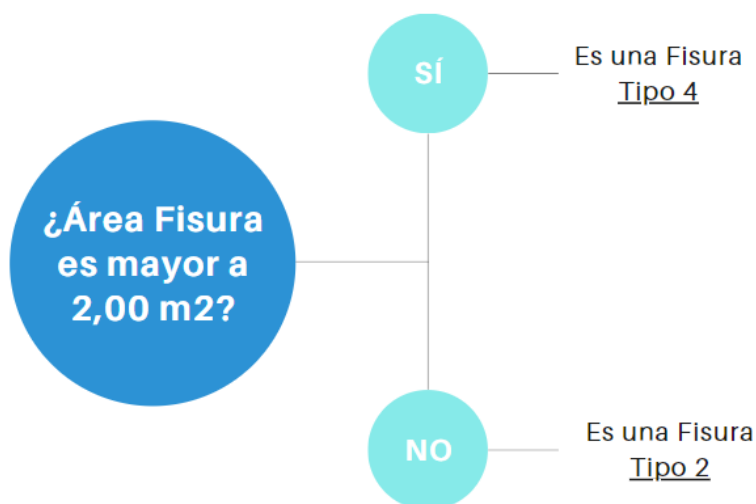


Figura 9 – Pregunta ejemplo de un árbol de decisión

El entrenamiento comienza presentándole a la IA una gran cantidad de ejemplos de fisuras, acompañados de sus respectivas clasificaciones.

A medida que el proceso iterativo avanza, va ajustando estas preguntas, identificando cuales son las que mejor se adaptan al problema y mejorando su capacidad de análisis.

Es así como el modelo comienza a identificar patrones que permiten hacer predicciones con cierto grado de precisión.

Algunas de las características más importantes a destacar de esta fase son las siguientes:

- **Eficiencia:** La IA está compuesta por **120 árboles de decisión integrados**, que trabajan en conjunto para clasificar cada falla de manera precisa.
- **Capacidad de Análisis:** El modelo contiene **130.950 nodos de decisión** (preguntas), lo que le permite considerar una gran variedad de características al momento de realizar cada clasificación.
- **Rapidez:** El sistema es capaz de clasificar cada fisura en **0,004 segundos**, lo que admite procesar grandes volúmenes de datos en muy poco tiempo, optimizando el proceso de evaluación vial.

Esto reduce significativamente el tiempo que los ingenieros viales dedicaban anteriormente a la clasificación manual de fallas, ya que la IA puede realizar esta tarea de forma automatizada, asegurando consistencia y exactitud en los resultados.

2.2.3 Resultados de la evaluación automática

En el proceso de evaluación automática, se monitorearon diversas variables para asegurar un análisis completo del estado del pavimento. Sin embargo, no todas las variables requieren un análisis detallado posterior a su recolección. Por ejemplo, tanto la **rugosidad** (D_1) como el **ahuellamiento** (D_2) se capturan directamente en el relevamiento de campo mediante los equipos de medición. En cuanto al **coeficiente** D_4 , el software detecta automáticamente los desprendimientos aislados de la fisuración.

Una vez organizada esta información (D_1 , D_2 y D_4), estos coeficientes se pueden integrar de manera directa al cálculo del Índice de Estado (IE).

Sin embargo, el **coeficiente** D_3 , correspondiente a la fisuración, requiere un análisis más detallado, ya que su complejidad radica en la variedad de fisuras identificadas.

Aunque se monitorearon muchas otras variables a lo largo de todo el desarrollo del sistema, en este análisis nos enfocaremos en las tres variables más críticas para el coeficiente D_3 : **precisión de clasificación, sobreajuste del modelo y confianza de las predicciones.**

A continuación, se analizarán estos tres pilares, detallando los resultados obtenidos y su impacto en el cálculo del coeficiente D_3 y, por ende, en la evaluación general del pavimento.

2.2.3.1 Precisión de clasificación

La **precisión** lograda con este nuevo método de clasificación automática es uno de los resultados más importantes para evaluar el éxito del sistema. Sin embargo, es fundamental comprender que la naturaleza subjetiva de este problema hace que alcanzar una precisión del 100% sea imposible.

Para ilustrar esta subjetividad de este proceso de clasificación de fisuras, realizamos un experimento donde dos ingenieros viales experimentados clasificaron manualmente el mismo lote de fisuras, utilizando los mismos criterios establecidos por la normativa. A pesar de seguir los mismos estándares, se observó una **discrepancia del 15%** entre ambos diagnósticos. Este resultado pone en evidencia las zonas grises existentes entre las categorías de fisuras, donde la interpretación humana puede variar dependiendo de los matices observados en el pavimento.

2.2.3.1.1 Matriz de Confusión – La herramienta para evaluar la clasificación

Dado este contexto, no es apropiado evaluar los resultados de la IA simplemente calculando una precisión global, ya que un solo valor porcentual podría ocultar las particularidades de cada tipo de fisura y dar una visión incompleta de la efectividad del sistema. En su lugar, utilizamos una matriz de confusión, una herramienta comúnmente utilizada en problemas de clasificación, que nos permite analizar los aciertos y errores de la IA para cada clase de fisura de manera individual.

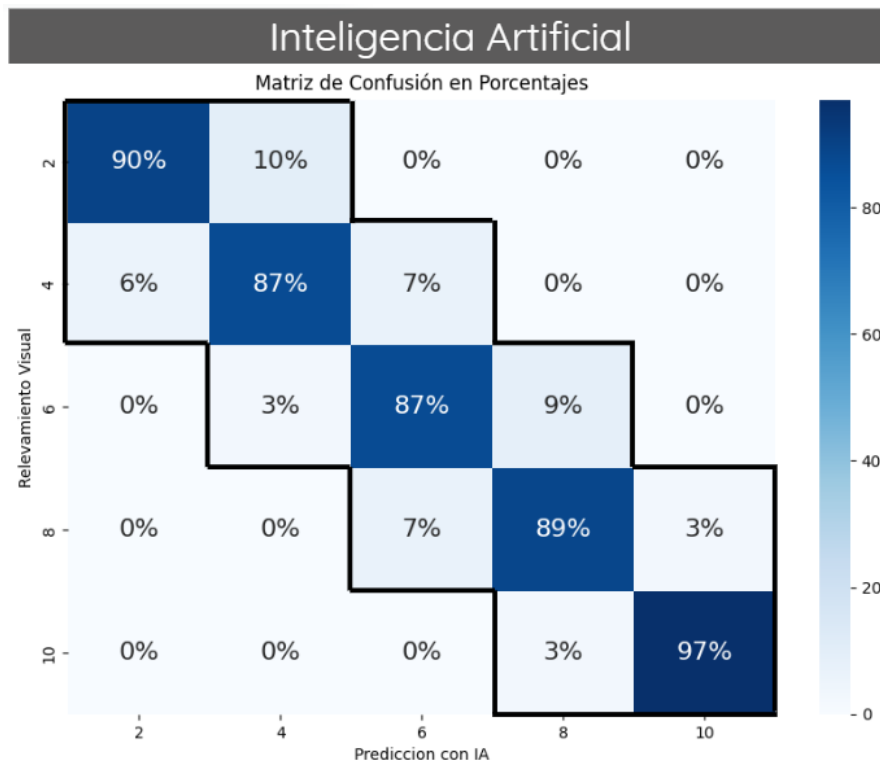


Figura 10 – Matriz de confusión con resultados de IA

En la **matriz de confusión** ilustrada en la **Figura 10**, se observa la relación entre la predicción con IA y la clasificación visual de fisuras. La misma organiza los resultados de clasificación mostrando cuántos ejemplos fueron clasificados con acierto (diagonal azul) y cuántos fueron asignados incorrectamente a otras categorías. Este enfoque nos permite estudiar el comportamiento de cada clase de fisura por separado y evaluar qué tan bien el modelo está diferenciando entre las diversas categorías.

Lo más valioso de este análisis es que, en los casos en los que el modelo comete errores, estos errores **no se desvían más de una categoría adyacente**. Es decir, si una fisura es clasificada incorrectamente, la IA generalmente la asigna a una categoría inmediatamente superior o inferior. Esto refleja los *matices grises* que existen entre las categorías de fisuras en el catálogo de fallas: algunas fisuras pueden situarse entre dos categorías, sin encajar perfectamente en una u otra.

2.2.3.1.2 Interpretación de los errores en categorías adyacentes

Los errores entre categorías adyacentes no representan un fallo significativo del modelo, sino más bien una **reflexión de las limitaciones propias del catálogo de fisuras**. Algunas fallas, por su forma, tamaño o severidad, pueden estar en el límite entre dos categorías. Por ejemplo, una fisura podría no encajar perfectamente en una clasificación de tipo 2 o tipo 4, sino situarse en algún punto intermedio. Esto introduce una subjetividad en la metodología y, en consecuencia, posibles discrepancias.

A pesar de estas variaciones, los resultados obtenidos para cada clase de fisura son *más que suficientes para llevar a cabo un análisis preciso y exhaustivo del estado del pavimento*. Las clasificaciones correctas en la diagonal de la matriz de confusión demuestran que el modelo logra asignar la mayoría de las fisuras a su categoría adecuada, y los errores en categorías adyacentes no son lo suficientemente significativos como para afectar el diagnóstico general.

En resumen, la precisión alcanzada por la IA en cada clase individual de fisura demuestra que el modelo es robusto y puede ser utilizado con confianza para evaluar el estado del pavimento.

2.2.3.2 Sobreajuste del modelo

Para entrenar la IA de manera adecuada, dividimos nuestra base de datos de más de 130.000 fisuras en dos conjuntos: uno de entrenamiento y otro de validación. El conjunto de entrenamiento contiene la mayor parte de las fisuras (90%) y se utiliza para que la IA aprenda a clasificar, mientras que el conjunto de validación se reserva para hacer pruebas posteriores y verificar que la IA pueda generalizar correctamente.

Uno de los desafíos más importantes en el entrenamiento de modelos de inteligencia artificial es evitar el sobreajuste (*overfitting*). Este fenómeno ocurre cuando un modelo "aprende demasiado" de los datos de entrenamiento, es decir, memoriza detalles y patrones específicos de estos en lugar de generalizar su aprendizaje para ser efectivo con casos nunca antes analizados.

Durante el proceso de entrenamiento, la IA solo analiza y ajusta sus predicciones utilizando el conjunto de entrenamiento, sin tener acceso a los datos de validación. Una vez finalizado el entrenamiento, probamos el modelo con el conjunto de validación, que contiene fisuras que la IA nunca ha visto antes. Esto nos permite evaluar qué tan eficazmente el modelo puede generalizar su aprendizaje a nuevas fisuras y asegurarnos de que no haya memorizado simplemente los ejemplos del conjunto de entrenamiento.

De esta manera, al comparar los resultados obtenidos en los datos de validación con los de entrenamiento, podemos monitorear si existe consistencia en el rendimiento. Si el modelo se desempeña bien en ambos conjuntos, significa que está generalizando de forma correcta, evitando así el sobreajuste.

2.2.3.2.1 Monitoreo del sobreajuste

A medida que la IA realizaba iteraciones (epochs) para mejorar su precisión, se verificaba que las métricas de precisión (accuracy) y error (loss) no se desviaran significativamente entre el conjunto de entrenamiento y el de prueba. Este monitoreo nos permitía garantizar que el modelo **aprendiera a generalizar** de manera efectiva.

El siguiente gráfico muestra cómo se comportaron las curvas de precisión y pérdida durante el entrenamiento y validación del modelo:

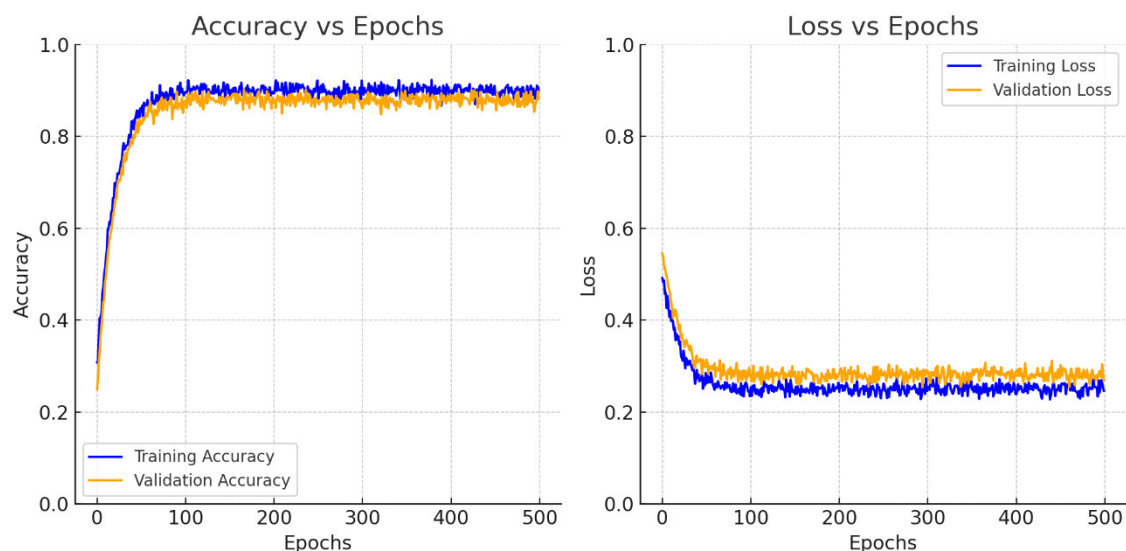


Figura 11 – Gráfico de precisión y pérdida en función de las Iteraciones

Como se puede observar en el gráfico, a medida que el número de iteraciones aumentaba, las curvas de **precisión** y **pérdida** de los datos de entrenamiento y prueba se mantenían cercanas, lo que indica que no se produjo un sobreajuste. Este comportamiento es crucial, ya que asegura que el modelo no solo memoriza los ejemplos del conjunto de entrenamiento, sino que también es capaz de clasificar fisuras que no había visto anteriormente con una precisión similar.

2.2.3.2.2 Comparación de resultados – Entrenamiento vs validación:

Además del análisis global del modelo, realizamos un recalcu de la matriz de confusión tanto para los datos de entrenamiento como para los de validación, lo que nos permitió verificar que la precisión del modelo no solo se mantenía a nivel general, sino también para cada tipo de fisura. En este análisis, los **porcentajes de aciertos por clase** fueron muy cercanos entre los datos de entrenamiento y los de validación, asegurando que el modelo es confiable y está bien preparado para clasificar casos futuros de manera precisa, sin importar la diversificación de fisuras que se presente en el pavimento.

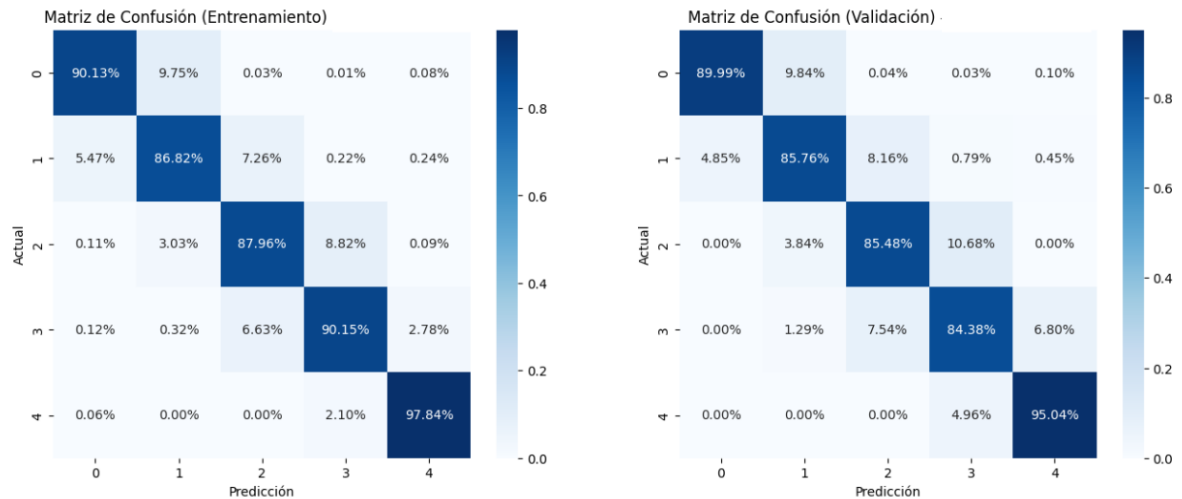


Figura 12 – Comparación de matrices de confusión para entrenamiento y validación

Como podemos ver en la **Figura 12**, la variación de los porcentajes que integran la diagonal azul de ambas matrices es despreciable.

2.2.3.2.3 Diversidad de la base de datos, un factor clave para la generalización

Es importante destacar que la base de datos con la que se entrenó el modelo incluye información recolectada de **1.500 km-carril**, distribuidos en **15 rutas** de **5 provincias** diferentes de Argentina. Esta diversidad añade una **gran variedad de asfaltos y condiciones de pavimento**, lo que es crucial para garantizar que el modelo tenga la capacidad de interpretar diferentes escenarios. Gracias a esta variedad, el modelo es capaz de realizar predicciones aplicables a un amplio rango de condiciones viales, lo que refuerza su robustez y confiabilidad para casos futuros.



Figura 13 – Ubicación geográfica de los pavimentos de prueba

En resumen, el monitoreo continuo del rendimiento y la comparación entre el entrenamiento y la validación nos aseguraron que el modelo no sufriera de sobreajuste. Además, la diversidad de la base de datos contribuye a que el modelo sea capaz de generalizar correctamente en futuros casos, manteniendo una alta precisión tanto en el conjunto de entrenamiento como en el de prueba.

2.2.3.3 Confianza de las predicciones

Una de las herramientas más potentes que ofrece la clasificación mediante inteligencia artificial (IA) es la posibilidad de acompañar cada predicción con un valor adicional: la **confianza de la predicción**. Este valor indica el *nivel de certeza* con el que la IA está clasificando una fisura en una categoría determinada, reflejado en un porcentaje.

El **porcentaje de confianza** se convierte en un indicador clave para el ingeniero vial, ya que las fisuras con un bajo porcentaje de confianza son más propensas a tener una clasificación incorrecta. Esto permite al ingeniero enfocar su análisis en aquellas fisuras cuya predicción automática es menos confiable, facilitando la revisión y corrección de posibles errores en el procesamiento automático.

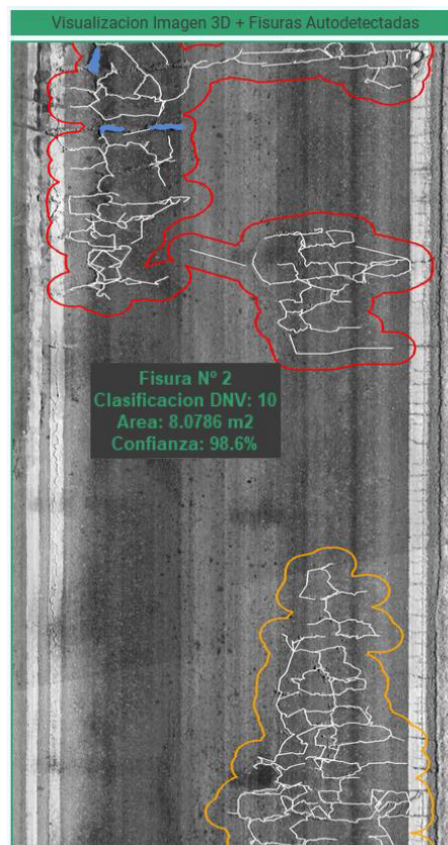


Figura 14 – Visualización de la confianza de una fisura

Este valor de confianza añade una nueva capa de eficiencia al proceso de evaluación. En lugar de tener que revisar manualmente todas las fisuras, el ingeniero puede priorizar aquellas con menor confianza en la clasificación, lo que acelera el proceso de corrección sin comprometer la calidad

técnica del análisis. Este enfoque será tratado con mayor profundidad en el **Módulo de Correcciones**.

2.2.3.3.1 Relación entre confianza y errores de clasificación

Para evaluar el impacto de la confianza en la predicción sobre los errores cometidos por la IA, realizamos un análisis de datos. Este análisis nos permitió observar cómo las predicciones con menor porcentaje de confianza se relacionaban con un mayor número de errores.

A partir de este estudio, llegamos a una conclusión sorprendente:

Si bien el procesamiento automático parte de una precisión global del 90%, al filtrar las fisuras que tienen un porcentaje de confianza menor al 80%, logramos elevar la precisión global a un 97%, revisando únicamente el 18% de las fisuras.

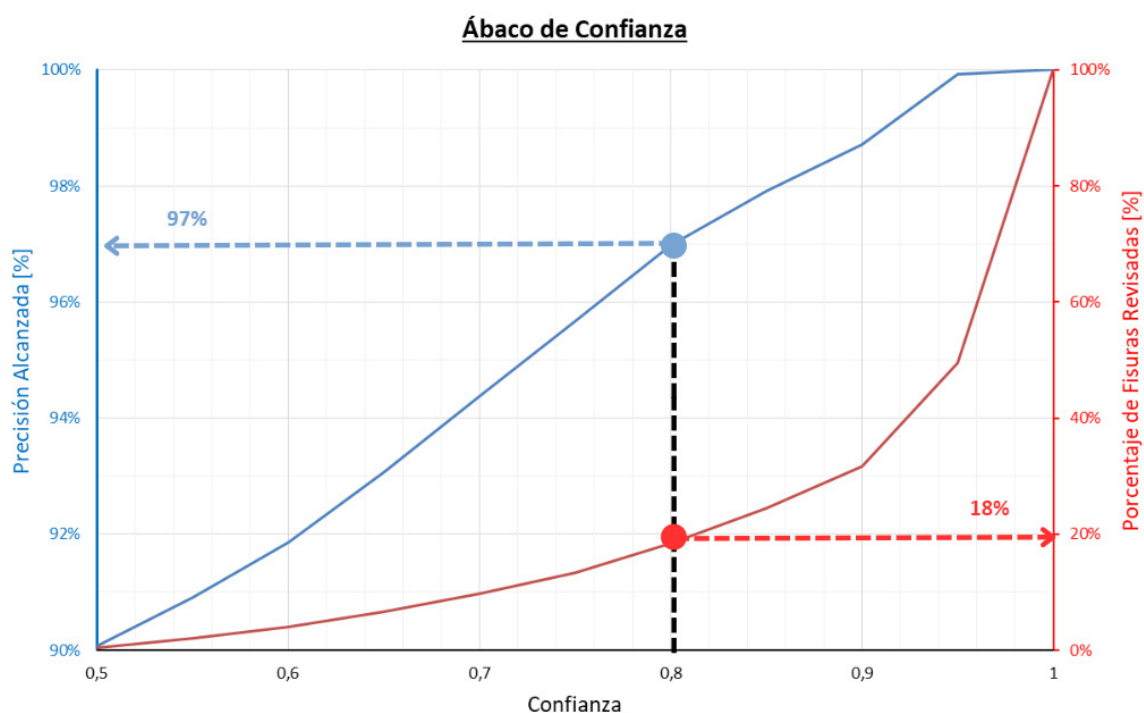


Figura 15 – Ábaco de confianza en relación a fisuras

Este resultado es extremadamente valioso, ya que permite a los ingenieros optimizar el tiempo invertido en la revisión del procesamiento automático, logrando una mejora significativa en la precisión global sin tener que revisar el 100% de las fisuras.

En resumen, el valor de confianza proporcionado por la IA no solo ayuda a identificar posibles errores en la clasificación, sino que también **permite mejorar la precisión global del sistema con un esfuerzo significativamente menor**.

Además, este análisis, en el que se demostró que al filtrar las fisuras con menor confianza podemos ahorrar una gran cantidad de trabajo sin perder calidad, se complementa perfectamente con las implementaciones del **Módulo de Correcciones** (que trataremos más adelante). Estas dos herramientas en conjunto permiten que el proceso de evaluación sea más ágil, manteniendo la alta calidad técnica y eficiencia que se busca en el diagnóstico del estado del pavimento.

2.3 Módulo de Reparaciones

El **Módulo de Reparaciones** tiene como objetivo principal recomendar al ingeniero vial las tareas de reparación necesarias a partir del análisis de los deterioros superficiales realizado en el **Módulo de Evaluación Superficial**. Este proceso permite generar una propuesta detallada de las intervenciones de mantenimiento requeridas para cada sección del pavimento, optimizando la planificación y ejecución de las reparaciones.

A través de este módulo, se pueden obtener tanto documentación gráfica detallada como cálculos precisos sobre las reparaciones necesarias. Específicamente, el sistema proporciona:

- Imágenes que indican qué tipo de reparación se debe realizar y dónde exactamente, dentro del carril, junto con las especificaciones técnicas de cada intervención.
- Un cómputo automático de las reparaciones, permitiendo estimar de manera precisa los recursos necesarios (materiales, mano de obra, etc.) para ejecutar las tareas de mantenimiento.

De esta manera, el **Módulo de Reparaciones** no solo facilita la identificación de las tareas a realizar, sino que también optimiza el proceso de planificación y asignación de recursos, garantizando que las reparaciones se proyecten de manera eficiente en un futuro próximo.

2.3.1 Tipos de reparaciones

Para desarrollar este módulo, se tomaron en cuenta las opiniones de ingenieros viales especializados en mantenimiento de pavimentos. Ellos contribuyeron a describir con precisión cuáles son las **tareas de reparación** más comunes en Argentina y las características específicas de cada una. Las reparaciones contempladas son las siguientes:

2.3.1.1 Sellado de fisuras

El **sellado de fisuras** es una de las tareas más habituales para prevenir el deterioro prematuro del pavimento. Consiste en aplicar un material asfáltico que sella la grieta de la fisura, evitando la infiltración de agua, que podría acelerar el proceso de degradación. Esta técnica es especialmente común para tratar fisuras lineales que aún no han formado un patrón de "piel de cocodrilo".

En relación con el catálogo de fisuras de la normativa nacional, esta tarea de reparación se aplica principalmente a *fisuras Tipo 2* y, en algunos casos, a *fisuras Tipo 4* que presenten una severidad leve. La característica más importante de esta reparación es conocer la longitud total de sellado, ya que esto permitirá estimar con precisión la cantidad de material necesario para su ejecución.



Figura 16 – Ejemplo sellado de fisuras

2.3.1.2 Bacheo superficial

El **bacheo superficial** es una reparación común, que consiste en remover las capas superficiales del pavimento asfáltico y reemplazarlas por asfalto nuevo. Esta tarea se utiliza cuando las fisuras superficiales son causadas por fatiga en las capas ligadas, lo que indica que solo las capas superiores están afectadas, permitiendo una intervención más localizada.

Este tipo de reparación es ideal cuando las fallas se limitan a la parte superior del pavimento, ya que se enfoca en las zonas donde el daño no ha penetrado a las capas más profundas. La variable clave en este tipo de intervención es el área que debe ser reparada, ya que de esta dependerá la cantidad de material que se debería reemplazar y los recursos necesarios para ello.



Figura 17 – Ejemplo bacheo superficial

2.3.1.3 Bacheo profundo

El **bacheo profundo** se utiliza cuando el daño afecta no solo las capas asfálticas superficiales, sino también las capas no ligadas inferiores del pavimento. Este tipo de reparación es necesario cuando se ha perdido la resistencia estructural de las capas no ligadas, lo que puede manifestarse a través de grandes desprendimientos de material o deformaciones excesivas.

Un indicativo claro de la necesidad de un bacheo profundo es la infiltración de agua en las capas inferiores o la presencia de deformaciones puntuales que sugieren una falla en la estructura del pavimento. Al igual que en el bacheo superficial, la variable principal en esta reparación es el área afectada, pero debido a la mayor cantidad de material y mano de obra necesarios para recomponer las capas inferiores, este tipo de reparación es más costosa y requiere más recursos.



Figura 18 – Ejemplo bacheo profundo

2.3.1.4 Fresado y repavimentación

El **fresado y repavimentación** es una tarea de reparación más extensa, que se emplea cuando un gran porcentaje del tramo en estudio está dañado tanto superficial como profundamente. En estos casos, si se observan muchas fallas continuadas, la mejor opción es realizar un fresado de las capas superiores, seguido de una preparación adecuada de la superficie fresada y, finalmente, una repavimentación completa.

Este tipo de intervención se considera cuando las fallas no se limitan a áreas puntuales. Si bien este procedimiento es más complejo y normalmente requiere un estudio más detallado de los módulos de las capas del paquete estructural y un cálculo de refuerzo, el software no abarca completamente este análisis debido a su complejidad.

Sin embargo, los indicadores que el software proporciona (como la información detallada de fisuración y el ahuellamiento) son de gran ayuda para que el ingeniero vial pueda tomar decisiones informadas sobre si es necesario abordar reparaciones puntuales (como las tres anteriores) o si es mejor plantear un proyecto de fresado y repavimentación completo.

A partir de los datos detallados que el software ha recolectado en el módulo de evaluación superficial, es posible asignar a cada falla del pavimento la tarea de reparación más conveniente de manera automática.

En el siguiente apartado, explicaremos cómo el sistema analiza las características específicas de cada fisura identificada y decide de forma automática cual es la reparación óptima para cada caso.

2.3.2 Reparaciones individuales

El primer paso que aborda el **Módulo de Reparaciones** es la asignación de reparaciones individuales a los deterioros identificados en el **Módulo de Evaluación Superficial**.

El algoritmo asigna una **tarea de reparación individual temporal** a cada falla detectada en el pavimento. Esta asignación inicial permite que cada fisura cuente con una recomendación de reparación específica, la cual, en una fase posterior, será procesada por el algoritmo de unificación de reparaciones. Este último se encargará de combinar varias reparaciones individuales según una lógica planteada, lo que optimiza las intervenciones en el pavimento (esto se analizará en el siguiente apartado).

2.3.2.1 Primera aproximación: relación con la clasificación de la DNV

En un primer intento, se buscó establecer una relación directa entre la clasificación de fisuras del Manual de la DNV y las tareas de reparación correspondientes. No obstante, surgieron ciertas complicaciones que hicieron difícil este enfoque:

- **Fisuras Tipo 4:** Algunas fisuras de este tipo podían requerir sellado o bacheo dependiendo de su severidad, lo que complejizaba asignar una reparación automática solo con su clasificación.
- **Diferencia entre Bacheo Superficial y Bacheo Profundo:** Para distinguir entre estas dos reparaciones, se necesitaba de características adicionales que indicaran si la fisura afectaba solo las capas superficiales o si alcanzaba las capas más profundas del pavimento, donde las deformaciones del pavimento serían clave.

A raíz de esta primera aproximación, entendimos que era necesario desarrollar una inteligencia artificial que pudiera considerar más datos para determinar con mayor precisión qué tipo de reparación asignar en cada caso.

2.3.2.2 Análisis posterior: parámetros clave para la asignación de reparación individual

Tras un análisis más exhaustivo de los datos, se concluyó que, dentro de los parámetros directos e indirectos, las variables más influyentes en la decisión entre tipos de reparaciones son las siguientes:

- **Densidad de Fisuración:** Esta variable permite observar si existe una concentración de muchas fisuras en un área pequeña. Un alto valor de densidad indica que la fisuración se encuentra muy concentrada, lo que generalmente sugiere la necesidad de realizar una reparación superficial en lugar de un simple sellado. La densidad ayuda a identificar cuándo el daño está lo suficientemente extendido como para requerir una intervención más significativa.

- **Información sobre desprendimientos de material:** Esta variable es clave para determinar si existe infiltración de agua en las capas inferiores del pavimento. Si se detectan desprendimientos de material, especialmente en combinación con el desarrollo de fisuras, es probable que haya una pérdida de resistencia en las capas inferiores debido a la infiltración de agua, lo que sugiere la necesidad de un bacheo profundo para reparar los daños estructurales en las capas no ligadas del pavimento.

A pesar de la importancia de estos parámetros, aún quedaba por resolver la detección de hundimientos puntuales dentro de las fisuras, lo que permitiría asignar bacheos profundos únicamente a las situaciones que realmente lo requieran.

2.3.2.3 Optimización del algoritmo: nuevas variables

Tras la primera aproximación, quedó claro que para lograr una asignación precisa de las tareas de reparación, era necesario incorporar más datos. Así, además de los parámetros directos e indirectos de las fisuras (discutidos previamente en el módulo de evaluación superficial), se añadieron nuevas variables para diferenciar con mayor precisión entre las posibles reparaciones. Estas nuevas variables permiten al algoritmo identificar si una falla requiere de un bacheo profundo.

Las nuevas variables incorporadas en el análisis fueron las siguientes:

- **Porcentaje de huella ocupada por la fisura:** Esta variable cuantifica qué porcentaje del área de la huella está siendo afectado por la falla. Es crucial para que la IA determine si la fisura está ocupando suficiente espacio dentro de la huella como para que el ahuellamiento sea relevante en la asignación de la reparación. Si, por ejemplo, solo una pequeña parte de la fisura afecta la huella, es probable que la deformación transversal (ahuellamiento) no esté directamente relacionada con esta. Así, la variable garantiza que el sistema pueda identificar de manera más precisa cuándo la fisura y la deformación de la huella están lo suficientemente relacionadas como para influir en la decisión de la tarea de reparación.
- **Ahuellamiento dentro de la fisura:** Es fundamental analizar las deformaciones en las áreas donde la fisura se superpone con las huellas de tránsito. Cada huella tiene 10 valores de ahuellamiento, uno por cada metro de la sección. Sin embargo, es común que la fisura superficial no siempre coincida completamente con todos los valores de ahuellamiento. En estos casos, se implementó un mecanismo para manejar la información de forma eficiente: cuando la fisura coincide espacialmente con el valor de ahuellamiento, ese valor de ahuellamiento se le entrega al algoritmo. Sin embargo, en zonas donde la fisura no se extiende lo suficiente para coincidir con el valor de ahuellamiento, se asigna un valor *None* indicando que no hay relación en esa parte específica. Esto permite que la IA evite asociar hundimientos no vinculados a la fisura.

En el siguiente esquema, puede comprenderse mejor la interpretación física de estas nuevas variables:

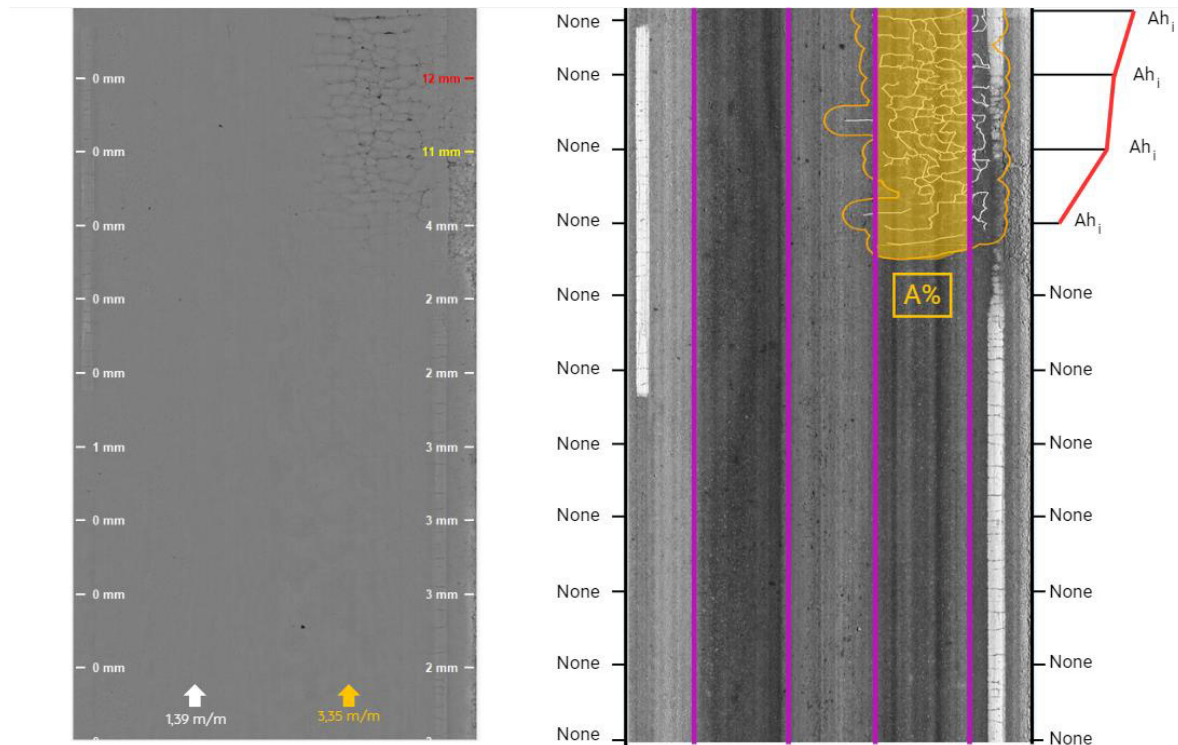


Figura 19 – Esquema nuevas variables

En resumen, la primera variable permite a la IA inferir el grado de relación entre la fisura y la deformación en la huella. Esto es esencial para determinar si el ahuellamiento tiene un impacto significativo en la fisura, o si se trata de una situación independiente. Por otro lado, el análisis de las deformaciones dentro de la fisura permite a la IA identificar la formación de un "cuenco de deformación" en las áreas donde la fisura coincide con las huellas de tránsito. A partir de esta información, el algoritmo es capaz de analizar el gradiente de deformaciones y así distinguir entre una deformación puntual o una más distribuida.

2.3.2.4 Asignación de tarea de reparación individual con IA

Con las variables analizadas previamente (densidad de fisuración, desprendimientos, porcentaje de fisura en cada huella y deformación dentro de la fisura), se creó una nueva base de datos compuesta por 10.000 fallas individualizadas. Cada una de estas incluye todas las características relevantes para asignarle una tarea de reparación individual.

La asignación de estas tareas fue realizada por ingenieros viales dedicados a mantenimiento y reparación de pavimentos. Para cada fisura, los expertos definieron manualmente si era necesario realizar un sellado, un bacheo superficial o un bacheo profundo, en función de las características del deterioro.

Con esta base de datos conformada, se procedió a entrenar un nuevo modelo de IA utilizando un algoritmo de aprendizaje automático del tipo Bosque Aleatorio (*Random Forest*), similar al empleado en la clasificación de fisuras descrita previamente. El modelo fue entrenado y monitoreado con los mismos criterios explicados para la clasificación de fisuras, asegurando que el algoritmo aprendiera a asociar las características específicas de cada falla con la reparación más adecuada.

A diferencia del modelo de clasificación de fisuras, este nuevo modelo de asignación de reparaciones no requería un enfoque tan complejo. Esto se debe a que las tareas de reparación (sellado, bacheo superficial o bacheo profundo) son más fáciles de diferenciar entre sí que las distintas categorías de fisuración. Mientras que en la clasificación de fisuras hay múltiples *zonas grises* donde una fisura podría encajar en dos categorías distintas, en el caso de las reparaciones, las opciones son más concretas y no generan tanta ambigüedad.

Es por ello que, no se necesitó de una base de datos tan voluminosa ni un modelo de aprendizaje automático tan complejo para alcanzar buenos resultados.

Al final del entrenamiento, el modelo alcanzó una precisión del 92% en la asignación automática de tareas de reparación individuales. Este resultado demuestra que la IA es capaz de analizar de manera eficaz las variables clave y recomendar las reparaciones necesarias con un alto grado de confianza.

2.3.3 Unificación de reparaciones

En la experiencia práctica del mantenimiento de obras viales, no es común realizar una reparación específica para cada deterioro detectado en el pavimento. Todos los ingenieros coincidieron en que, en la realidad de obra, las tareas de reparación se planifican de manera más global, abarcando múltiples fallas en una única intervención, con el fin de hacer el trabajo más eficiente y reducir los costos. Asignar una tarea de reparación a cada fisura de manera individual sería un enfoque excesivamente detallado y costoso.

Sin embargo, definir una tarea de reparación temporal por falla es fundamental para el desarrollo del algoritmo de unificación. Esta asignación preliminar proporciona una base clara sobre qué tipo de intervención necesitaría cada falla específica, lo que permite al software entender cómo agrupar varias reparaciones en una sola.

Por esta razón, el algoritmo de unificación de reparaciones es clave dentro del software, ya que su objetivo es combinar varias reparaciones individuales en una sola intervención cuando sea posible.

Para implementar este proceso de unificación, se desarrolló una lógica basada en los criterios técnicos proporcionados por ingenieros viales. Estos criterios tienen en cuenta tanto la cercanía física de las fisuras como su severidad, tipo de falla y la extensión del daño, entre otros factores. Además, se definieron especificaciones técnicas mínimas para garantizar que las reparaciones sigan los

estándares de calidad requeridos. Por ejemplo, se establece un tamaño mínimo para un bacheo, de manera que las tareas no sean tan pequeñas que resulten inviables.

Este algoritmo se encarga de traducir estos criterios técnicos en un procesamiento automático, mediante fases que identifican y agrupan las reparaciones individuales de acuerdo con los principios establecidos por los ingenieros.

En las siguientes secciones, se explicarán las diferentes operaciones que el algoritmo realiza para unificar las reparaciones de manera automática. Si bien el proceso es técnicamente complejo, especialmente en términos de programación, nos centraremos en explicar cada operación de manera clara y concisa. De esta forma, se comprenderán todas las consideraciones técnicas que se tuvieron en cuenta durante el desarrollo, resaltando los razonamientos lógicos detrás de la unificación de reparaciones sin necesidad de profundizar en los aspectos más técnicos de la programación.

2.3.3.1 Especificaciones técnicas de las reparaciones

Antes de pasar a la unificación de las reparaciones, es fundamental establecer ciertas especificaciones técnicas que se aplican exclusivamente a las tareas de bacheo. Todas estas especificaciones son configurables por el ingeniero a través de la interfaz gráfica del software, lo que permite una personalización acorde a las necesidades del proyecto y las herramientas disponibles en obra. A continuación, se detallan las principales especificaciones que el software considera:

- **Ancho mínimo de bacheo:** Este parámetro define el ancho mínimo que debe tener el bacheo, adaptándose al ancho de la maquinaria disponible para realizar el trabajo.
- **Largo mínimo de bacheo:** Muchas veces en obra, intervenir en una longitud pequeña de la superficie trae más inconvenientes que soluciones, por eso se introdujo este parámetro.
- **Separación en X entre la fisura y el bacheo:** Esta distancia adicional se establece para prever la evolución futura de la fisura y evitar que el trabajo de bacheo provoque una propagación del deterioro hacia partes sanas del pavimento. Define cuánto más ancho debe ser el bacheo en comparación con la fisura original, asegurando que la intervención sea duradera.
- **Separación en Y (cabezas de bacheo):** Este parámetro considera la extensión adicional que la maquinaria necesita antes y después de la fisura para ingresar y salir de la zona de trabajo. Asegura que el bacheo cubra no solo la fisura, sino también el área necesaria para el correcto manejo de la maquinaria, evitando daños en las áreas circundantes.

En la siguiente figura, se ilustran las especificaciones técnicas antes mencionadas:

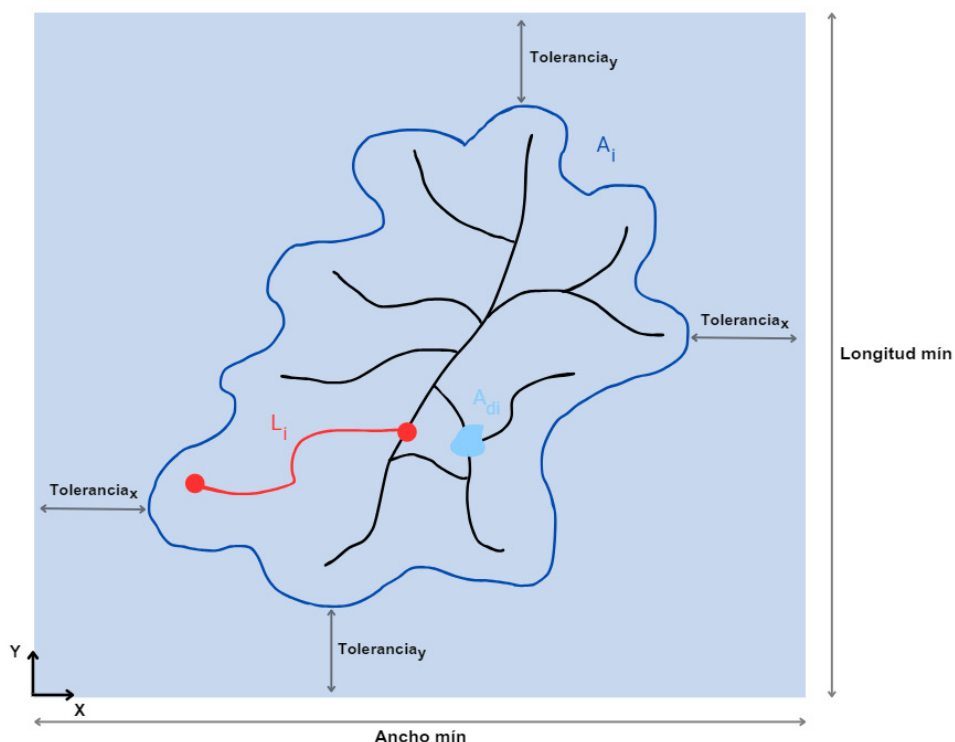


Figura 20 – Esquema especificaciones técnicas bacheo

De esta manera, el sistema proporciona la flexibilidad necesaria para adaptarse a las condiciones específicas de cada proyecto de reparación y a las herramientas disponibles en campo.

2.3.3.2 Combinación de reparaciones

Como mencionamos previamente, en este apartado no profundizaremos en la lógica interna de programación del algoritmo, sino que nos enfocaremos en describir las principales operaciones de unificación de reparaciones que realiza el software de manera automática. A continuación, se describen las principales operaciones que el sistema ejecuta.

2.3.3.2.1 Reducción de bacheos

Durante el análisis de diversas fallas de gran severidad, se observó un comportamiento recurrente: muchas de estas fisuras presentan áreas puntuales con mayor densidad de fisuración. A partir de estas observaciones, se llegó a la conclusión de que, en estos casos, la intervención más eficiente sería realizar bacheos en las zonas con mayor densidad de fisuración, y aplicar sellado en las áreas donde la fisura se presenta de manera más lineal.

Para abordar este problema de manera eficiente, el software discretiza cada falla en "diferenciales de área", que permiten analizar la densidad de fisuración en distintas partes de la misma. Luego, agrupa estos diferenciales en dos conjuntos principales: aquellos con mayor densidad y aquellos con menor densidad.

Una vez identificadas estas áreas, el sistema genera una forma rectangular que agrupa los diferenciales de mayor densidad, creando así un bacheo que cubre la zona con mayor deterioro. Por otro lado, para las áreas con menor densidad, se genera una polilínea que sigue el trayecto de las fisuras lineales y asigna una tarea de sellado, lo cual permite cubrir estas zonas sin necesidad de realizar un bacheo innecesario.

En la siguiente imagen, puede observarse gráficamente este proceso:

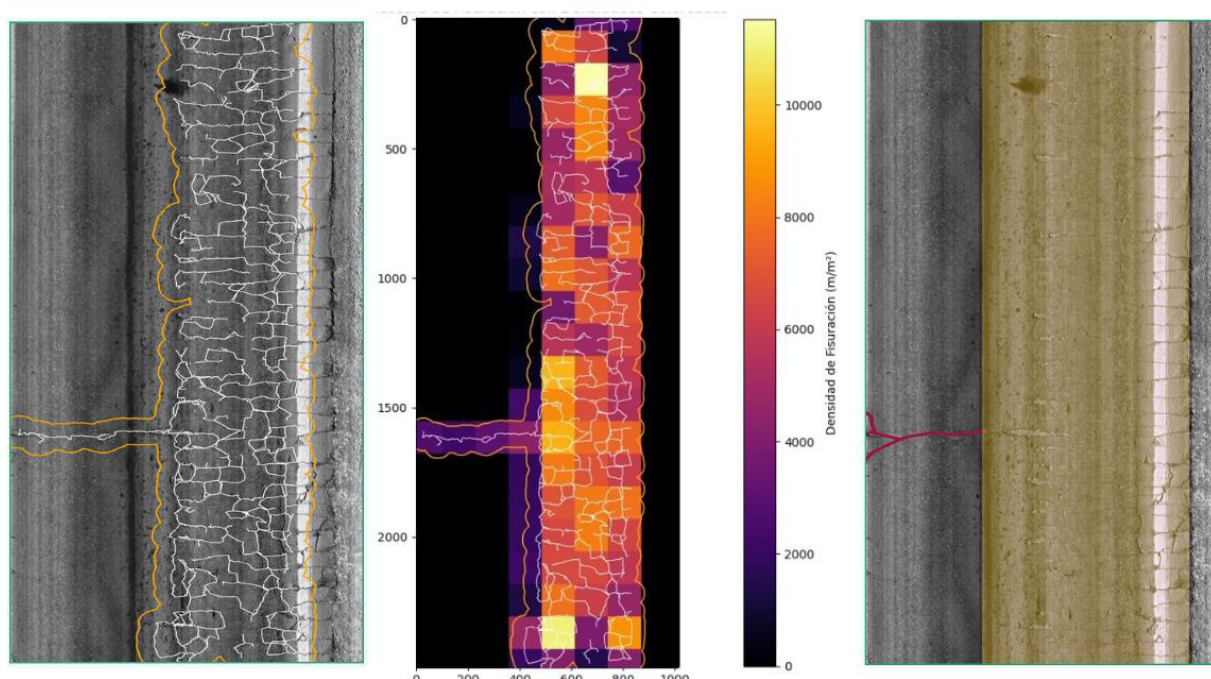


Figura 21 – Proceso de reducción de bacheos

Este enfoque permite aplicar bacheos solo donde es necesario, y sellados en las zonas menos afectadas.

2.3.3.2.2 Unificación de bacheos con fisuras selladas

En una misma sección, pueden coexistir fisuras lineales de menor severidad (sellado) como fisuras de mayor gravedad (bacheo). Aunque estas fisuras no forman parte de la misma falla individual, al proponer una tarea de bacheo para la fisura de mayor gravedad, se puede abarcar parcial o totalmente, fisuras lineales aisladas dentro del área de intervención.

Para resolver este solapamiento de reparaciones, el software aplica un proceso de unificación en el que elimina automáticamente las tareas de sellado correspondientes a fisuras lineales que quedan completamente contenidas dentro del área de bacheo.

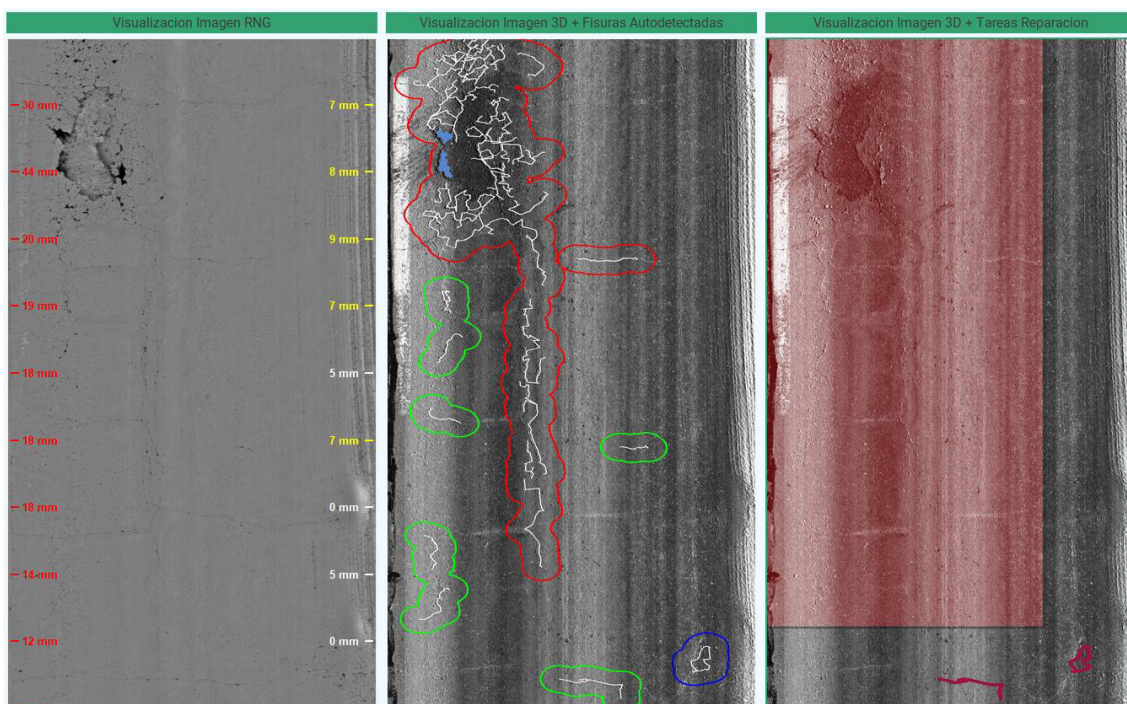


Figura 22 – Ejemplo de eliminación de sellado dentro de bacheo

En el caso de que una fisura lineal se encuentre parcialmente contenida dentro del área de bacheo, el software recorta la fisura automáticamente, ajustando la longitud de sellado a las partes que quedan fuera del bacheo.

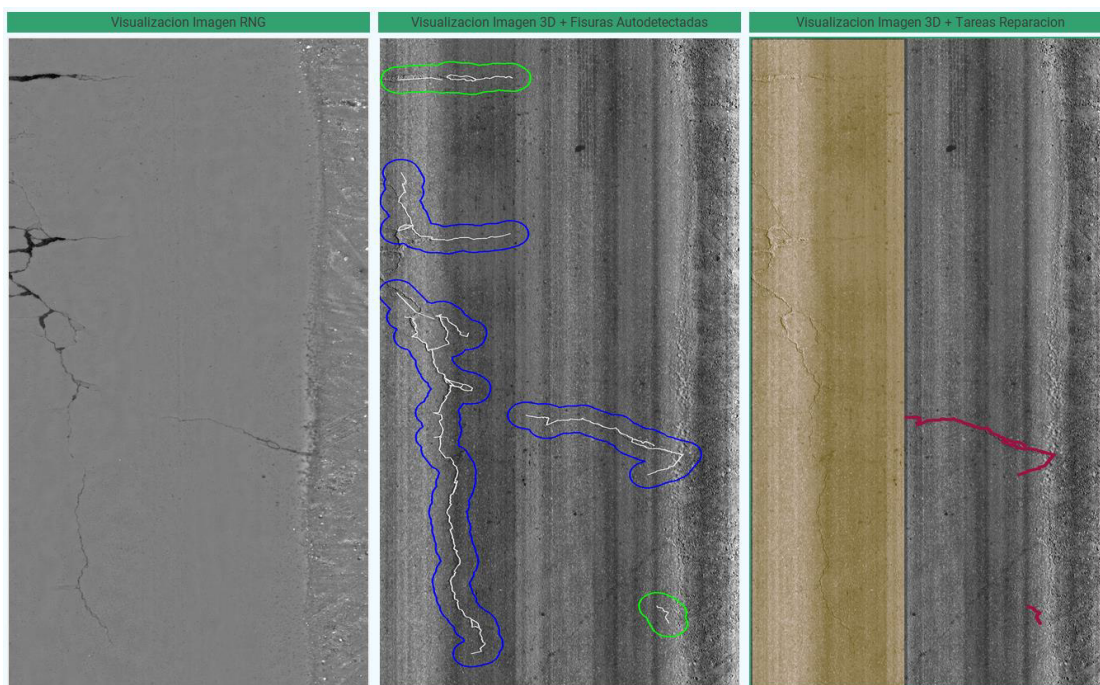


Figura 23 – Ejemplo de recorte de sellado dentro de bacheo

De esta forma, el algoritmo asegura que no se realice un sellado innecesario en las zonas ya intervenidas por bacheos.

2.3.3.2.3 Unificación entre bacheos

Durante el proceso de reparación, puede darse el caso de que dos fisuras superficiales separadas generen tareas de bacheo cuyas áreas de intervención se solapan entre sí. Según la experiencia compartida por ingenieros viales, la unificación de estos bacheos depende de cada situación particular. En algunos casos, es preferible realizar un único bacheo general que cubra ambas fisuras, mientras que en otros es más eficiente mantener los bacheos individuales, a pesar de la superposición parcial.

Para implementar este criterio en el algoritmo, se introdujo una variable de control denominada porcentaje de superposición de bacheos. Esta variable evalúa la porción de área de los bacheos que se intersecta en relación con la suma del área total de cada bacheo individual.

$$\% \text{ Superposición bacheos} = \frac{\text{Área superpuesta}}{\text{Área total bacheos}} \cdot 100\% \quad (5)$$

El objetivo de esta variable es ayudar a decidir cuándo es más eficiente unificar las tareas de bacheo y cuándo es mejor mantenerlas separadas.

- **Baja superposición:** Si el porcentaje de superposición entre bacheos es bajo, realizar un bacheo unificado no sería eficiente, ya que implicaría intervenir una cantidad significativa de pavimento sano innecesariamente.

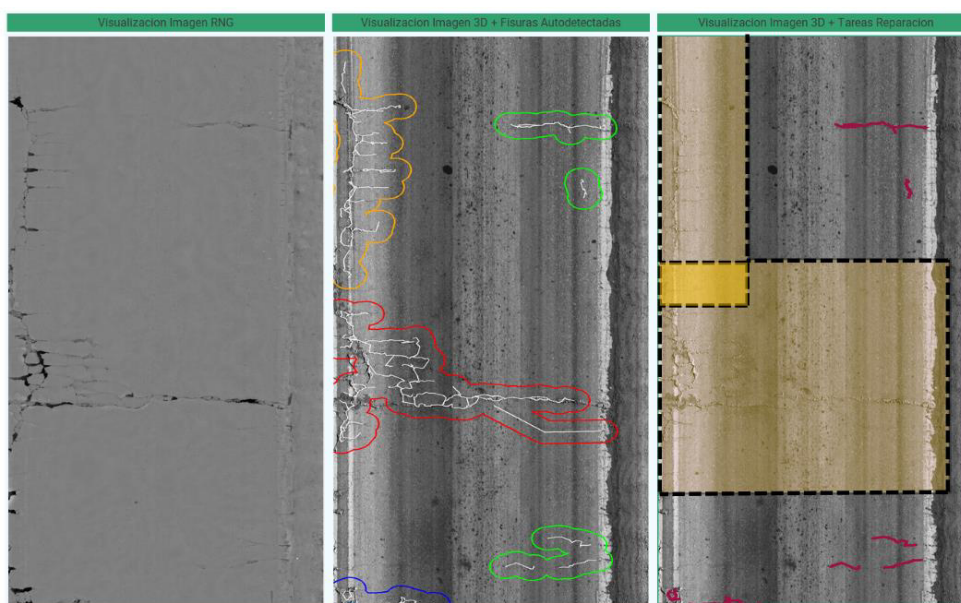


Figura 24 – Ejemplo de baja superposición de bacheos

- **Alta superposición:** Si el porcentaje de superposición es alto, es más práctico en obra unificar el bacheo y optimizaría el tiempo de trabajo.

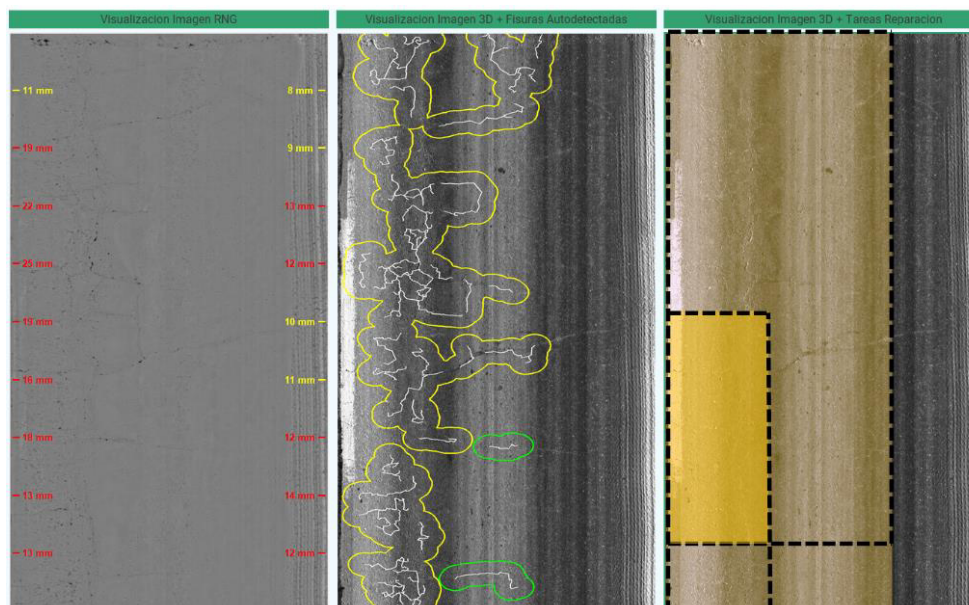


Figura 25 - Ejemplo de alta superposición de bacheos

El porcentaje de superposición es configurable por el ingeniero a través de la interfaz gráfica, lo que le permite ajustar el criterio según las condiciones particulares del proyecto. Sin embargo, tras realizar varias pruebas, se consideró que un porcentaje de superposición del 25% es un valor adecuado como punto de partida para una primera iteración. Esto garantiza una solución equilibrada entre eficiencia operativa y conservación de pavimento sano.

2.3.4 Resultados de las reparaciones automáticas

El **Módulo de Reparaciones** toma la información obtenida del **Módulo de Evaluación Superficial** y, considerando todos los criterios y verificaciones previamente descritos, establece un procesamiento automático para la asignación de tareas de reparación. Este proceso automatizado es altamente eficiente, con un rendimiento en términos de precisión y velocidad muy similar al del módulo de evaluación.

Sin embargo, dado que el proceso de reparaciones requiere un nivel de precisión aún mayor para tomar decisiones, es fundamental que el ingeniero perfeccione este procesamiento automático para ultimar detalles y asegurar que las recomendaciones finales se ajusten de manera óptima a las necesidades específicas de su proyecto.

Es por ello que el software cuenta con un **Módulo de Correcciones**, el cual permite al ingeniero ajustar las tareas de reparación recomendadas por el sistema, asegurando un plan de mantenimiento más preciso y confiable. Este módulo será descrito en detalle en el próximo apartado.

2.4 Módulo de Correcciones

El **Módulo de Correcciones** marca la transición del procesamiento automático a la intervención manual del proyectista. Si bien los módulos anteriores se encargan de procesar y generar recomendaciones de forma automática, en esta etapa se le otorga al ingeniero el control total para ajustar y personalizar tanto la evaluación del pavimento como las reparaciones propuestas, asegurando que se tomen en cuenta las particularidades de cada proyecto.

El objetivo principal de este módulo es proporcionar al ingeniero vial todas las herramientas necesarias para revisar, validar y corregir la información generada de manera automática. Esto permite acelerar el proceso de revisión y centrarse en la toma de decisiones críticas, optimizando la calidad final del diagnóstico y del plan de mantenimiento. El sistema ha sido diseñado para facilitar esta tarea, brindando al usuario una interfaz clara y visual que permite realizar correcciones de manera simple.

Para que la explicación de este módulo sea más amena con el lector, vamos a dividirla en dos:

- **Correcciones basadas en la evaluación de pavimentos**
- **Correcciones basadas en las reparaciones propuestas**

2.4.1 Correcciones en evaluación de pavimentos

Una vez completado el procesamiento automático de evaluación del software, se tiene acceso a una interfaz gráfica donde para visualizar de forma clara y detallada los resultados obtenidos, navegando a través de las secciones de ruta. Esta visualización incluye tanto los valores numéricos como las representaciones gráficas que permiten una rápida interpretación del estado del pavimento.

Si bien el sistema ofrece un análisis detallado de parámetros como la rugosidad y el ahuellamiento, estos valores suelen estar basados en mediciones objetivas que no requieren ajustes manuales. Por lo tanto, la única información que podría ser revisada y potencialmente modificada por el ingeniero es la relativa a la fisuración, ya que es un aspecto que, en ciertos casos, puede requerir la intervención manual para asegurar que las detecciones automáticas sean precisas y coherentes con el estado real del pavimento.

A continuación, indagaremos en las diferentes funcionalidades que presenta este módulo.

2.4.1.1 Visualización de las principales características de la fisura superficial

El ingeniero tiene la posibilidad de interactuar directamente con cada fisura identificada en la interfaz gráfica del software. Al colocar el cursor sobre una fisura, se despliega información que permite analizar sus principales características. Entre los datos más importantes que se pueden visualizar se encuentran:

- **Área de la fisura:** indicando el tamaño de la misma.
- **Confianza de la predicción:** reflejando la seguridad con la que el algoritmo de clasificación ha identificado y categorizado la fisura.
- **Clasificación según la normativa de DNV:** asignada automáticamente por el algoritmo, basada en los parámetros previamente analizados.

Además, al estar las fisuras superficiales integradas con la imagen 3D de la sección de pavimento, se obtiene una visión clara de su ubicación y extensión dentro de la superficie en análisis.

Para facilitar la rápida identificación del tipo de fisura, el sistema utiliza un código de colores. Cada falla se muestra en un color que corresponde a su clasificación según el catálogo de fallas de la DNV, lo que permite al ingeniero tener una noción de la severidad y tipo de cada fisura detectada rápidamente

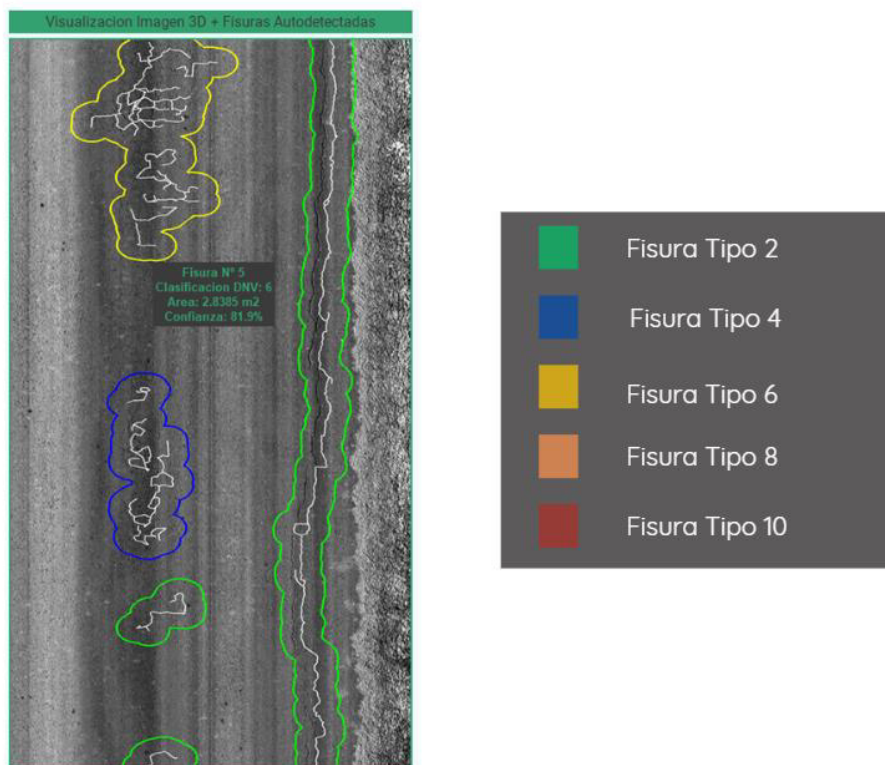


Figura 26 – Ejemplo visualización de fisuras superficiales

2.4.1.2 Unión de fisuras superficiales potencialmente agrupables

El software también ofrece la opción de unificar fisuras cercanas que, aunque no se detectaron como una misma falla durante el procesamiento automático, podrían considerarse como un conjunto. Esto suele ocurrir cuando las áreas de influencia de fisuras, propuestas en el proceso de agrupación, no

llegan a intersectarse completamente debido a una mala auto-detección realizada por los equipos de medición.

En estos casos, el ingeniero puede interpretar que dos o más fisuras cercanas forman parte de una única falla mayor. El software facilita esta corrección manual, permitiendo al usuario seleccionar las fisuras involucradas y unificarlas en una sola.

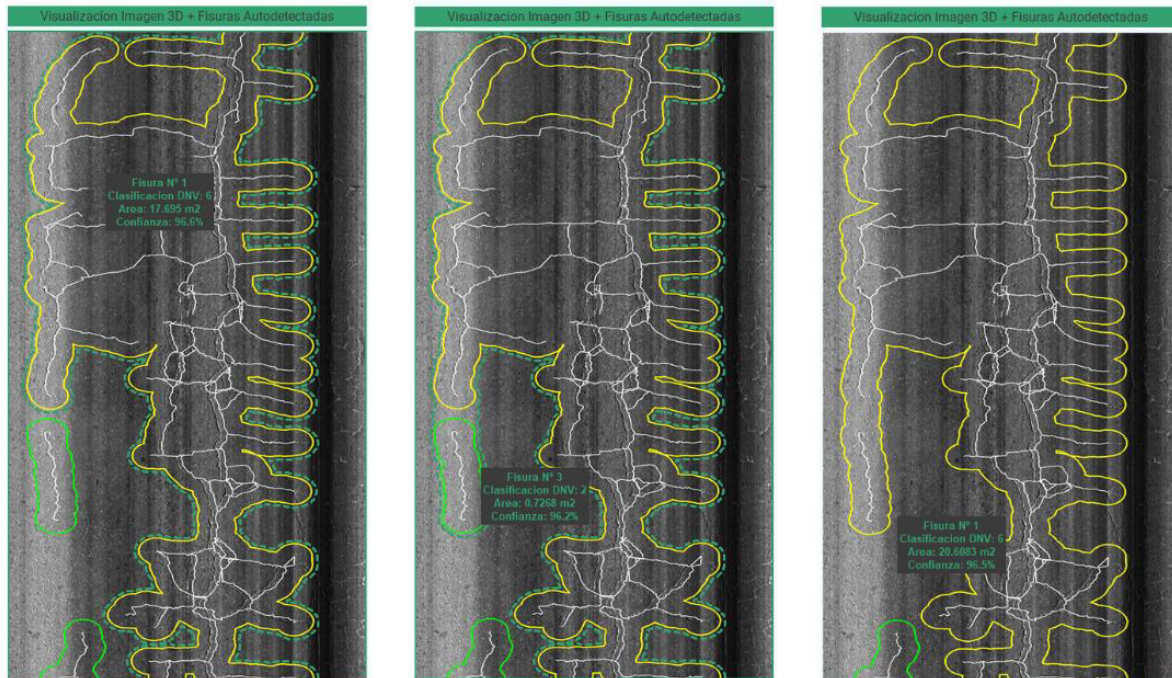


Figura 27 – Proceso de unión de fisuras

Una vez que se unifican las fisuras, el sistema actualiza automáticamente todos los parámetros de la misma, tales como su área, densidad, etc. Además, la IA realiza una re-clasificación, lo que asegura que su categoría y severidad se ajusten a las nuevas características resultantes de la unión.

2.4.1.3 Cambio en la clasificación de las fisuras superficiales

El software también otorga la capacidad de modificar manualmente la clasificación de una fisura si se considera que la clasificación propuesta por la IA no refleja con precisión el estado real del pavimento. Esta corrección puede hacerse de manera sencilla y rápida con un solo clic en la interfaz gráfica.

Una vez seleccionada la fisura, el ingeniero puede elegir la nueva clasificación dentro de las categorías establecidas en el catálogo de fallas de la DNV (2, 4, 6, 8, 10), ajustando así la interpretación de la severidad de la fisura.

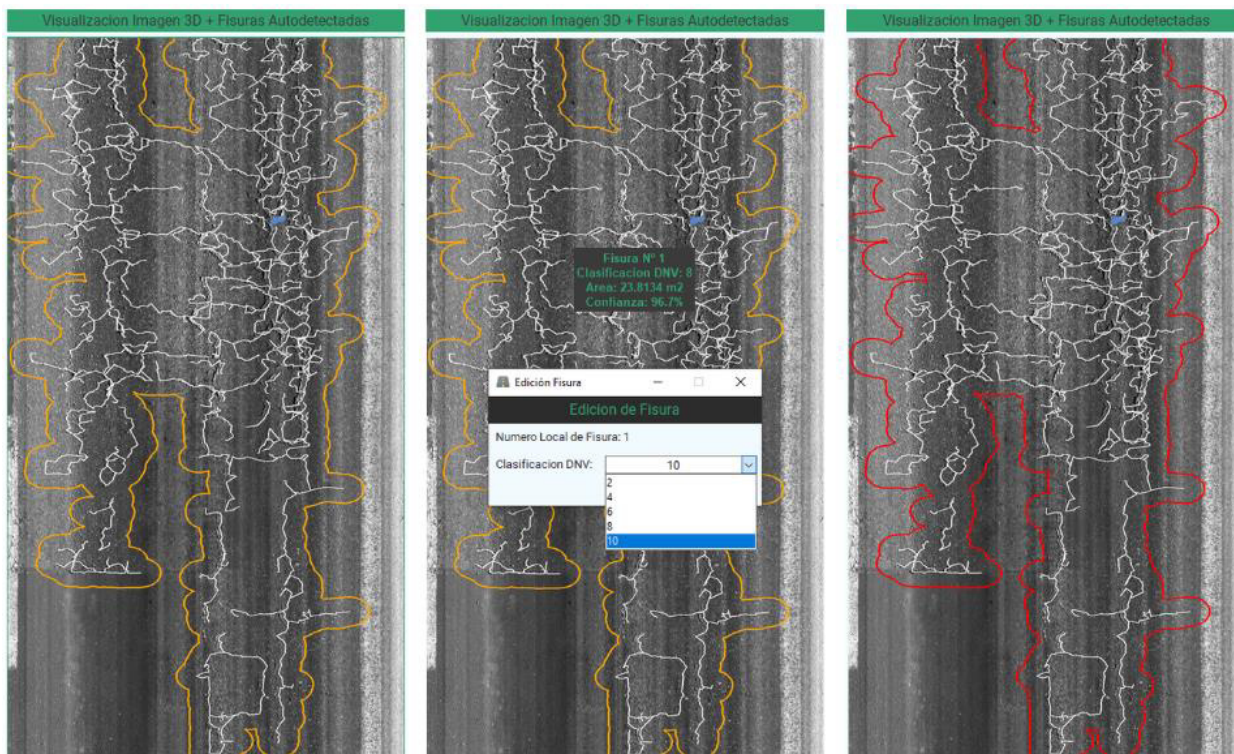


Figura 28 – Ejemplo modificación en la clasificación

Al realizar el cambio, el sistema actualiza automáticamente todos los parámetros relacionados con la fisura, como el coeficiente D_3 , que afecta al cálculo del Índice de Estado (IE) de la sección.

2.4.1.4 Filtrado de secciones a corregir

Uno de los recursos más potentes que ofrece el software es la activación del "Modo Corrección Manual", una herramienta que permite filtrar y enfocar la revisión únicamente en las secciones de pavimento que más lo requieren, optimizando así el tiempo dedicado a la corrección del procesamiento automático.

Este modo del software, restringe la navegación solo a las secciones que cumplen con uno o ambos de los siguientes criterios:

- Secciones que presentan fisuración
- Secciones con al menos una fisura cuya predicción de clasificación tiene un rango de confianza inferior al valor definido manualmente.

Al establecer un *umbral de confianza* específico, el usuario puede filtrar las secciones que contienen fisuras cuyo nivel de confianza en la predicción es menor al deseado, permitiéndole centrarse en revisar solo las fisuras más susceptibles de error.

El sistema, al estar respaldado por datos masivos de 130.000 fisuras en su base de entrenamiento, puede calcular la precisión global esperada en función del umbral de confianza que el ingeniero define. Para ilustrar esto, se presenta el siguiente ábaco:

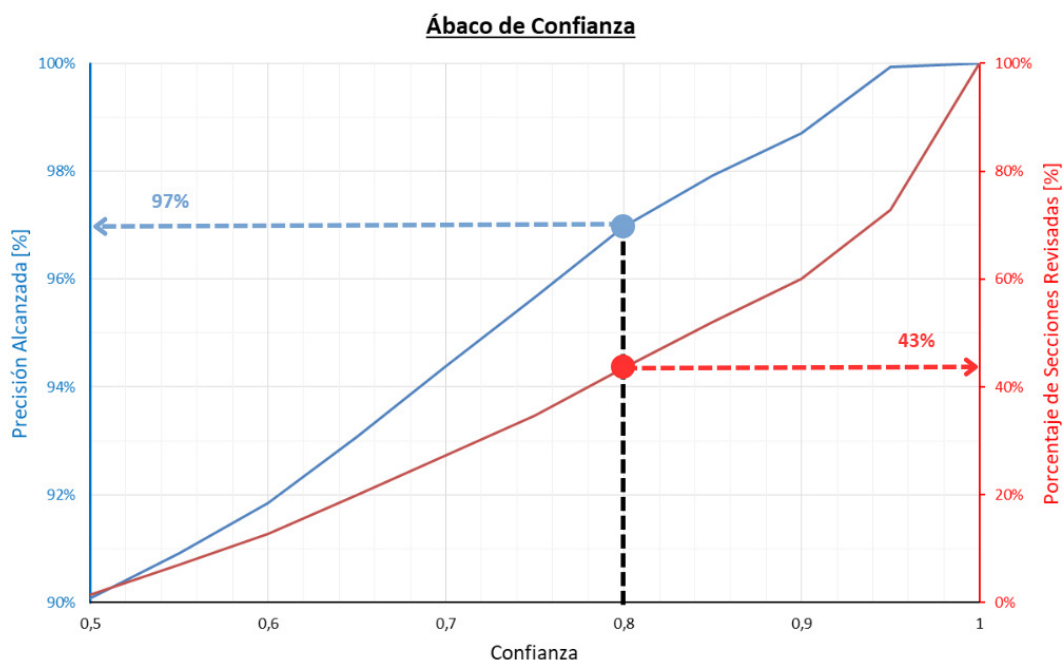


Figura 29 – Ábaco de confianza en relación a secciones

Este ábaco muestra la relación entre el umbral de confianza de las predicciones y el porcentaje de secciones fisuradas que deben ser revisadas. Cuanto más alto es el umbral de confianza, mayor será el número de secciones a revisar.

Esto permite que el ingeniero pueda definir el umbral de confianza para su revisión, contemplando el alcance y la rigurosidad de la evaluación que está llevando adelante.

Es importante destacar que el ábaco está calculado solo para secciones fisuradas. Esto significa que el porcentaje estimado de secciones a revisar se refiere exclusivamente a las que contienen fisuras. Por lo tanto, el volumen real que el ingeniero deberá revisar es considerablemente menor, ya que las secciones sin fisuras no necesitan intervención.

Las pruebas realizadas en diferentes tramos muestran que la reducción en el volumen de revisión puede variar según el grado de deterioro del tramo en estudio. Sin embargo, en general, se ha observado que **la reducción en las secciones a revisar oscila entre un 75% y un 85%**, si se quiere lograr una precisión global del 97% o mayor.

2.4.2 Correcciones en reparaciones de pavimentos

El **Módulo de Reparaciones** se alimenta directamente de la información generada en el **Módulo de Evaluación Superficial** para ejecutar su procesamiento automático. Esto significa que cualquier

corrección realizada en la fase de evaluación, como ajustes en la fisuración, se reflejará automáticamente en las reparaciones recomendadas.

Sin embargo, es fundamental tener en cuenta que, aunque el procesamiento automático de reparaciones está optimizado para ofrecer una precisión muy elevada, el ojo clínico del ingeniero vial es insustituible cuando se trata de identificar detalles que pueden escaparse a un algoritmo. Por esta razón, el **Módulo de Correcciones** ofrece un conjunto de herramientas intuitivas que permiten al ingeniero ajustar y mejorar las propuestas de reparación.

A continuación, indagaremos en las diferentes funcionalidades de corrección de reparaciones.

2.4.2.1 Ajuste manual de reparaciones

El usuario tiene la posibilidad de modificar manualmente las reparaciones automáticas. Puede cambiar el tipo de reparación asignada. Por ejemplo, puede decidir cambiar un bacheo profundo por uno superficial si considera que la falla no afecta las capas más profundas del pavimento.

2.4.2.2 Ajuste de dimensiones de reparaciones

En algunos casos, el ingeniero puede considerar que las dimensiones de una reparación no se ajustan completamente a su proyecto. Es por eso que se le permite modificar las dimensiones propuestas, tanto en longitud como en ancho, para optimizar la ejecución de la reparación.

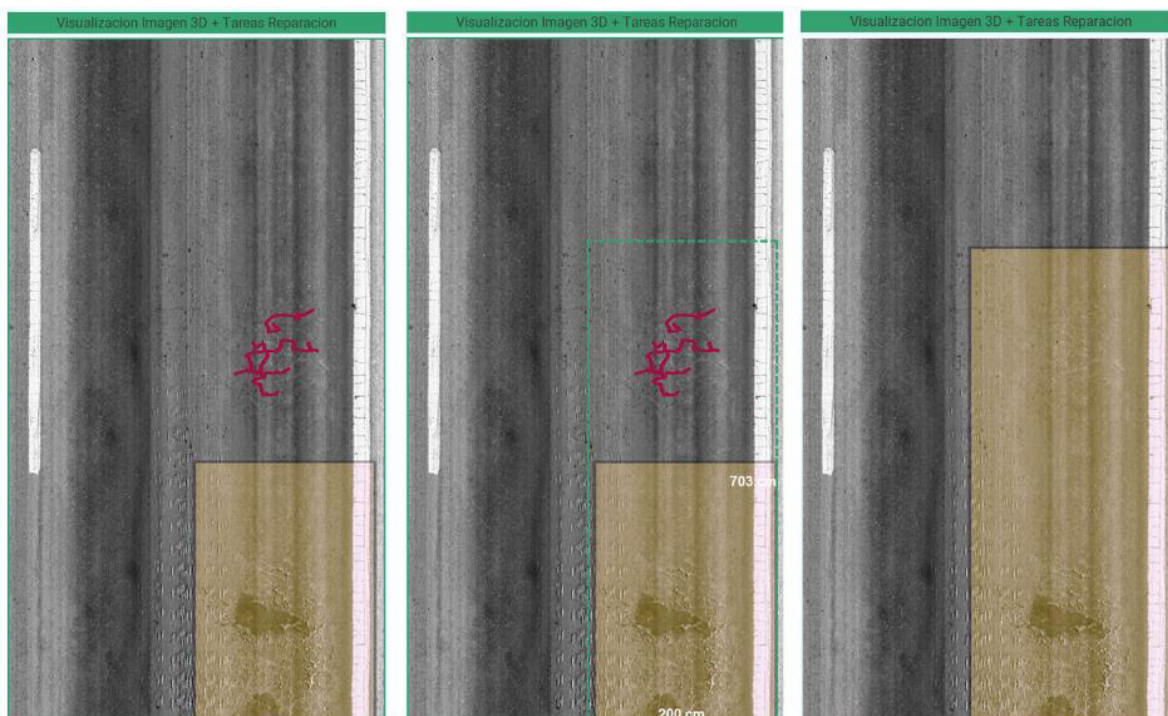


Figura 30 – Ejemplo de ajuste en dimensiones

2.4.2.3 Eliminación o adición de reparaciones

El ingeniero puede eliminar reparaciones propuestas que considere innecesarias, o agregar nuevas en áreas donde no se hayan propuesto correctamente. Esta flexibilidad es fundamental para asegurar que el plan de mantenimiento cubra todas las áreas críticas del pavimento, sin incluir reparaciones innecesarias.

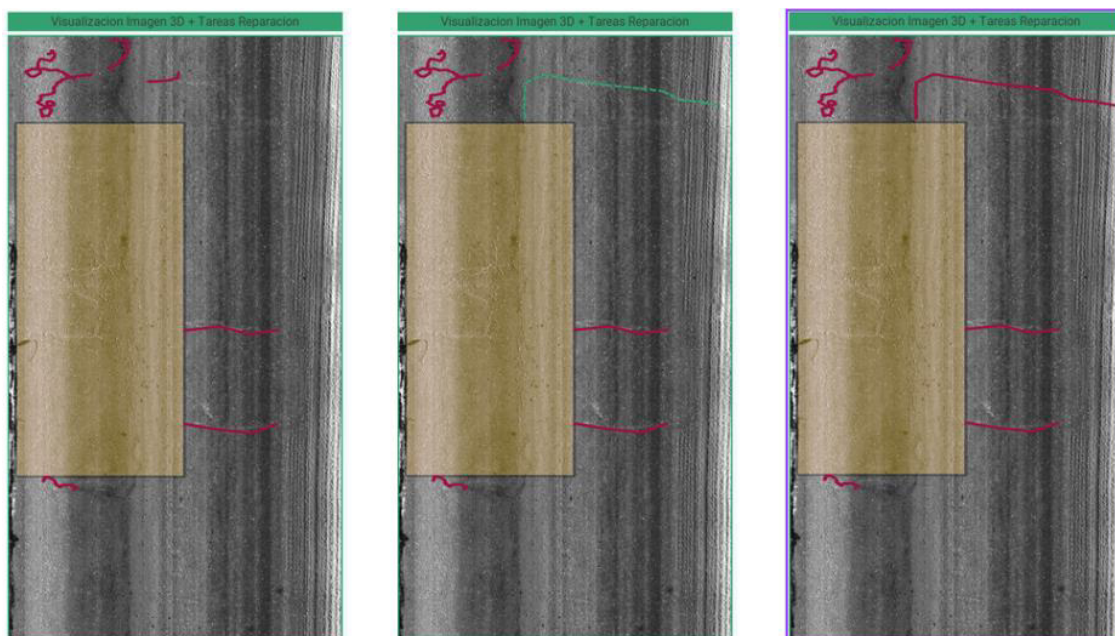


Figura 31 – Ejemplo creación y eliminación de fisura sellada

El Módulo de Correcciones ha sido diseñado para que el ingeniero vial pueda aplicar sus criterios y conocimientos de manera intuitiva y dinámica, interactuando directamente sobre las imágenes y datos de las secciones del pavimento que está evaluando. Cada intervención realizada, ya sea en la evaluación del estado del pavimento o en las reparaciones propuestas, se lleva a cabo de forma visual, garantizando una experiencia de usuario fluida.

Además, cada modificación realizada durante el proceso de corrección, es almacenada por el software. Esto asegura que los ajustes y decisiones queden registrados y estén disponibles para ser utilizados en la siguiente etapa del proceso: la exportación de resultados.

2.5 Módulo de Exportación de Resultados

El **Módulo de Exportación de Resultados** permite consolidar toda la información procesada, analizada y corregida en formatos más accesibles y amigables para su posterior estudio. Tras haber completado el análisis automático y las correcciones manuales, el ingeniero tiene la opción de exportar tanto la documentación gráfica como datos numéricos, ya sea para la evaluación del pavimento, las reparaciones propuestas, o ambos.

El objetivo de este módulo es otorgar la información de una manera clara y estructurada para su revisión o para la presentación a otros interesados. Este paso es fundamental para cerrar el ciclo de análisis, permitiendo que los resultados obtenidos en el software puedan ser utilizados fuera de la plataforma.

A continuación, se describen a grandes rasgos los tipos de información que pueden ser exportados desde el sistema.

2.5.1 Información gráfica exportada

El software permite exportar dos tipos principales de imágenes de las secciones procesadas, que son las mismas sobre las cuales el ingeniero trabajó durante su análisis en la interfaz gráfica:

- **Imagen 3D del LCMS con fisuras montadas:** Esta imagen muestra el pavimento en alta resolución, combinada con la clasificación asignada durante el procesamiento automático. Las fisuras se representan claramente sobre la superficie del pavimento, lo que permite una documentación gráfica precisa del estado de la carretera y de los resultados del análisis de fisuración.
- **Imagen 3D del LCMS con tareas de reparación:** Similar a la primera, esta imagen también utiliza la visualización 3D, pero en este caso se superponen las tareas de reparación propuestas en función del análisis de fallas. Estas reparaciones están visualmente integradas sobre la superficie del pavimento.

Ambos tipos de imágenes son herramientas fundamentales para dejar documentado todo el análisis realizado, además de ser útiles para presentar y compartir el estado del pavimento y las recomendaciones de intervención.

2.5.2 Información numérica exportada

El software permite exportar toda la información numérica generada durante el procesamiento y análisis del pavimento en formato Excel. Cada archivo Excel contiene distintas pestañas que organizan los parámetros obtenidos, tanto de la evaluación como de las reparaciones propuestas. Esta estructura facilita el manejo de grandes volúmenes de datos y permite al usuario explorar la información de manera detallada y organizada.

Dentro de las pestañas, se encuentran datos clave como rugosidad, ahuellamiento, fisuración y desprendimientos de material, además de las tareas de reparación recomendadas. A modo de ejemplo, se deja una imagen con el formato de una de estas planillas:

N° xml	Pr [m]	D1	I.R.I [H.E]	I.R.I [H.I]	D2	AHU. [H.E]	AHU. [H.I]	D3	D4	IE
000019	200	5	3,9	3,6	3	13,2	6,8	8	0	4
000020	210	6	3,7	4,4	1	7,2	3,6	8	0	4,3
000021	220	5	2,9	4	2	10,2	4	8	0	4,2
000022	230	6	3	4,3	1	8,9	4,2	8	0	4,3
000023	240	5	3,1	3,5	2	10,4	4,5	6	0	4,9
000023	240	6	4,6	3,8	2	10,9	7,1	8	0	4,1
000023	240	5	3,4	3,3	2	10,8	4,8	8	0	4,2
000024	250	5	3,4	3,5	1	9,4	4,6	8	3	3,9
000025	260	5	3	3,6	2	10,3	4,6	8	0	4,2
000026	270	5	3	3,6	1	8,2	4,3	8	1	4,3

Figura 32 – Planilla de exportación de información numérica

Queda a criterio del usuario realizar análisis adicionales o aplicar estadísticas a partir de esta información.

La unidad mínima de discretización de los datos es de 10 metros, lo que es más que suficiente para realizar estudios en tramos más amplios o generar discretizaciones personalizadas para cada análisis particular.

3 CONCLUSIONES

La infraestructura vial es fundamental para el desarrollo de un país y el bienestar social. Esta facilita la movilidad de personas y bienes, y permite el acceso a servicios como educación y salud, entre otras cosas. Pero si no se garantiza su buen estado, estas funciones se ven degradadas.

Argentina, nuestro país, es una república con una vasta red vial, donde las infraestructuras viales han sufrido un envejecimiento considerable, y los recursos disponibles para su mantenimiento son escasos. En este contexto, los esfuerzos actuales deben enfocarse en mantener y rehabilitar lo existente.

Nuestro objetivo en este proyecto, en línea con las necesidades existentes, es el de mejorar la forma en la que se evalúa el estado de las rutas, y el proceso en el que se gestionan sus reparaciones, buscando optimizar tiempos y recursos.

En nuestro camino nos encontramos con la realidad de que, para conocer el estado de una ruta, ya no es necesario caracterizarla con un tramo representativo, ya que, en realidad, tenemos toda la información disponible para conocer exactamente cuál es su situación. Pero aquí apareció el desafío. A partir de los avances tecnológicos que se están desarrollando cada vez con mayor velocidad, el reto actual (y futuro), no es la falta de información, sino que es el de gestionar grandes volúmenes de información.

En este proyecto, al combinar inteligencia artificial con la experiencia de ingenieros viales del país, no solo se logró automatizar gran parte del proceso de evaluación y reparación, sino que además pudimos aprovechar de una mejor manera la información disponible (antes no aprovechada) para obtener resultados más precisos.

Cuando hablamos de información nos referimos a aquellos datos relevados en campo y procesados, pero también nos referimos a la experiencia adquirida por los profesionales, que ahora tendrán la posibilidad de gestionar sus tiempos y direccionar sus esfuerzos de una forma más eficiente.

El desarrollo de este sistema nos permite entonces invertir menos tiempo en conocer el estado actual de estas infraestructuras, en forma más precisa, y adicionalmente, nos facilita más tiempo para plantear estrategias que puedan optimizar los recursos.

Hemos logrado desarrollar una herramienta que no solo optimiza los tiempos de procesamiento, sino que también mejora la calidad de los datos, proporcionando a los ingenieros una herramienta robusta para el diagnóstico de cada proyecto.

Es importante remarcar que para nosotros este proyecto no es un punto final, sino que pretende ser una base sólida para futuras mejoras. La capacidad de los algoritmos para aprender de los datos recolectados permitirá que cada vez que se realicen evaluaciones y reparaciones, el sistema se vuelva más eficiente, reduciendo aún más los tiempos y costos de evaluación.

De este modo, el sistema combina el conocimiento acumulado de profesionales experimentados con las innovaciones de las nuevas generaciones de ingenieros, creando un puente entre el legado de la experiencia y los avances tecnológicos.

Es necesario continuar avanzando hacia una modernización en la forma en la que se realiza el análisis del estado de los pavimentos. Finalmente, creemos que hay mucho por hacer, y que nos encontramos en el buen camino.

4 BIBLIOGRAFÍA

4.1 Normativas

[1] Publicación de la Dirección Nacional de Vialidad, República Argentina (1983) Metodología de Evaluación de Estado de los Pavimentos.

[2] Norma ASTM 867-97, "Standard Terminology Relating to Traveled Surface Characteristics".

[3] Norma ASTM E 950-98, "Standard Test Method for Measuring the Longitudinal Profile of Traveled Surfaces with an Accelerometer Established Inertial Profiling Reference".

[4] Norma ASTM E 1448-92(98), "Standard Practice for Calibration of Systems Used for Measuring Vehicular Response to Pavement Roughness".

4.2 Artículos Particulares

[5] Tagle A.L., Bruck M., y Monticelli C., "Uso de Rugosímetros tipo BPR en las Evaluaciones Viales". Vigésima Segunda Reunión de la Comisión Permanente del Asfalto. San Juan, Argentina Noviembre de 1980.

[6] Tagle., Sanvitale., Rodríguez., y Tang., Estudio de Necesidades Viales. Simposio sobre Evaluación y Refuerzo de Pavimentos y la Energía en el Transporte. Tucumán, Argentina. 1980.

[7] Tagle A.L., Sanvitale A.J., Rodríguez P.G., y Tang P., "Estudio de Necesidades Viales". Simposio sobre Evaluación y Refuerzo de Pavimentos y la Energía en el Transporte. Tucumán, Argentina, Septiembre de 1980.

[8] Tosticarelli J.R., y Pagola M.B., "Calibración de Rugosímetros según Patrones Internacionales". Vigésima Sexta Reunión de la Comisión Permanente del Asfalto". Buenos Aires, Argentina, Diciembre de 1990.

[9] Poncino H.E., Pagola M.B., Giovanon O., y Noste M.L., "Actualización de Condiciones Técnicas exigidas a las Calzadas Pavimentadas sobre Rugosidad de Pavimentos". Carreteras N° 149, pág. 44. Octubre de 1996.

[10] COST 325 (European Co-operation in the Field of Scientific and Technical Research), "Nuevos Métodos y Equipos de Auscultación de Carreteras", Informe Final. Ministerio de Fomento, España, 1998.

[11] Sanvitale. A., Tosticarelli J., Martinez P., Mezzelani G., "Modernización de la toma de datos de la Metodología de Evaluación de Pavimentos". XXXI Reunión del Asfalto, Carlos Paz, Córdoba, Argentina, Noviembre de 2000.

[12] Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC) Méthode d'essai N° 49 "Mesure et interprétation du profil en travers": Nantes, Francia, Septiembre de 2001.

[13] Tosticarelli J., Mezzelani G., Muzzolini J., y Martinez P., "La cuantificación de los parámetros fundamentales del perfil transversal con equipos de alto rendimiento, Simposio CPA "Evaluación y refuerzo de pavimentos", Buenos Aires, Argentina, Diciembre de 2003.

[14] Mezzelani G., "Design, assembly and initial operation of a multifunction device for pavement and road safety condition monitoring in Argentina", Pavement Evaluation Conferences 2010, Roanoke, Virginia, USA, Octubre de 2010.

[15] Abrate F., Novoa F., Mazzitelli D., Gafurri N., Viano A., Raillat P., Tosticarelli J., Mezzelani G., "Adquisición y puesta en servicio de nuevo equipamiento de auscultación de pavimentos de la DNV, República Argentina" XVI Congreso Argentino de Vialidad y Tránsito, Córdoba, Argentina, Octubre de 2012.

[16] Mezzelani., Piazza., Experiences in the use of Automatic 3D distress evaluation system for pavement monitoring in Argentina. IX Simposio Internacional sobre "Características superficiales de Pavimentos" SURF. Milán, Italia, Septiembre de 2022.

[17] Morano., Aguirre., Perazo., Mezzelani., Piazza., Bresciani., Gestión de Activos Viales en la Provincia de Buenos Aires, Argentina. 2024.

[18] Mezzelani, "Next Steps in the Updating and Evolution of a Pavement Condition Index in Argentina". Comité Técnico 3.3. "Gestión de Activos Viales" de la PIARC (Asociación Mundial de Carreteras). 2024