



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE
FACULTAD DE HUMANIDADES

ESPECIALIZACIÓN EN TECNOLOGÍAS
DE LA INFORMACIÓN GEOGRÁFICA

Trabajo Integrador Final
Georreferenciación de estados de pavimentos a través de aplicaciones móviles.

Autor: Leonardo E. Vulcano

Tutor: Dr. Cristian Da Silva

Fecha de presentación: 29 de septiembre 2025



ÍNDICE:

1. INTRODUCCIÓN

2. ALCANCES DEL TRABAJO

2.1 Alcance Temporal

2.2 Alcance Espacial

3. OBJETIVOS

3.1 Objetivo general

3.2 Objetivos particulares

4. ANTECEDENTES

5. MARCO TEÓRICO

6. FUENTES DE INFORMACIÓN Y METODOLOGÍA

7. RESULTADOS

7.1 Análisis descriptivo de las variables

7.2 Productos cartográficos

7.3 Caracterización de superficie de baches y tipo

7.4 Regresión lineal

8. CONSIDERACIONES FINALES

9. FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

10. DOCUMENTOS DE REFERENCIA

11. LISTA DE TABLAS Y FIGURAS



1 - INTRODUCCIÓN

La gestión eficiente de las redes viales es esencial para garantizar la movilidad, seguridad, sostenibilidad y la comunicación entre ciudades. El estado de los pavimentos constituye un indicador clave para evaluar la calidad de las rutas y planificar adecuadamente las actividades de mantenimiento y rehabilitación. Sin embargo, los métodos tradicionales de evaluación (basados en inspecciones visuales realizadas por personal especializado) suelen ser subjetivos, lentos y con altos costos operativos, lo que limita su escalabilidad y frecuencia.

Ante esta carencia de metodologías ágiles y accesibles, surge la necesidad de desarrollar herramientas que integren tecnologías modernas para optimizar la recolección, el procesamiento y la visualización de datos sobre el estado de la infraestructura vial. En este contexto, el presente trabajo propone una metodología simplificada y de bajo costo para la georreferenciación y análisis de estados de pavimentos mediante el uso de aplicaciones móviles y Tecnologías de Información Geográfica (TIG).

El objetivo general consiste en desarrollar un Indicador de Regularidad Internacional (IRI) a partir de tecnologías geoespaciales, que permita representar y analizar el estado de los pavimentos para facilitar la toma de decisiones en la gestión vial. La metodología implementada incluye la captura de datos mediante sensores integrados en dispositivos móviles, el relevamiento georreferenciado de deterioros superficiales como fisuras y baches, y el procesamiento de la información mediante Sistemas de Información Geográfica (SIG).

Como resultado de este proceso, se obtuvieron productos cartográficos temáticos que visualizan la distribución espacial del Índice de Regularidad Internacional (IRI) y la severidad de los deterioros, así como un análisis estadístico que explora la relación entre estas variables. Estos resultados no solo validan la viabilidad del enfoque propuesto, sino que también aportan información estratégica para la priorización de intervenciones y la optimización de recursos en el mantenimiento vial.

2 - ALCANCES DEL TRABAJO

2.1 Alcance Temporal

En el aspecto temporal, se decidió tomar los datos correspondientes a los meses comprendidos entre diciembre 2024 y mayo 2025, debido a que se cuenta con relevamiento in situ realizado en el marco de una actualización de relevamientos, llevada a cabo por el departamento de Construcciones Viales perteneciente a la Dirección de Vialidad Provincial de la Provincia del Chaco (DVP).

2.2 Alcance Espacial

En cuanto al aspecto geográfico, se tomó como referencia un tramo de la Ruta Provincial N° 9, localizado entre la localidad de Capitán Solari y Colonias Unidas.

La Ruta Provincial N°9 tiene una orientación Sureste – Noroeste, se ubica en el departamento de Sargento Cabral, posee una longitud total de 12.3 km, la calzada está construida de pavimento rígido.

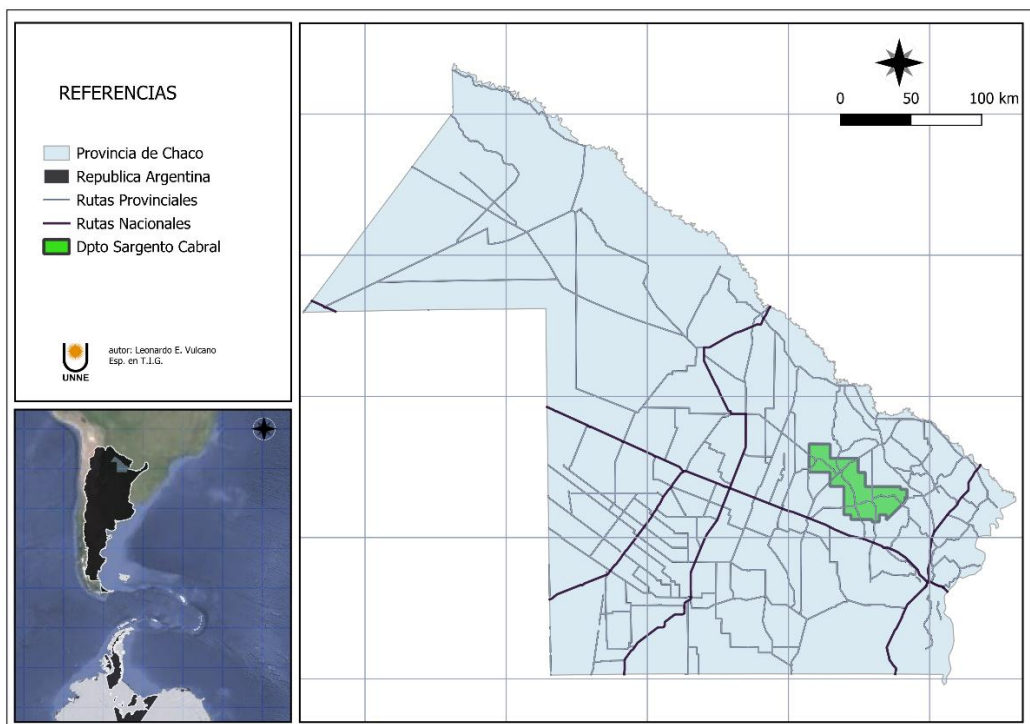


Figura 1: Ubicación Departamento Sgto. Cabral en provincia del Chaco.

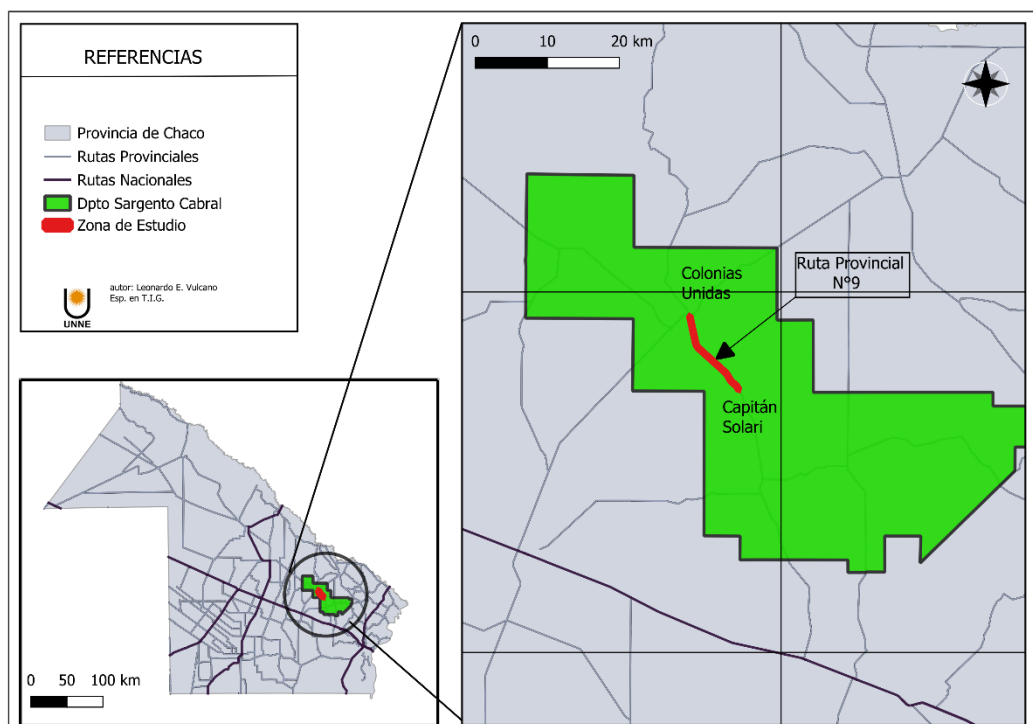


Figura 2: Ubicación de la Zona de estudio (Tramo de Ruta Provincial N°9).



3 - OBJETIVOS

3.1 Objetivo General:

Desarrollar y validar una metodología basada en TIG y aplicaciones móviles para la evaluación georreferenciada del estado de pavimentos, con el fin de facilitar la toma de decisiones en la gestión de infraestructura vial.

3.2 Objetivos Específicos:

- Identificar los índices y metodologías más relevantes para la evaluación de pavimentos.
- Diseñar una metodología que integre datos de evaluación de pavimentos con herramientas SIG y aplicaciones móviles.
- Generar Productos Cartográficos que permitan la visualización de los distintos índices de estados de pavimentos.
- Validar la utilidad y aplicabilidad del sistema mediante el análisis estadístico.

4 - ANTECEDENTES

La evaluación de los deterioros en pavimentos es un proceso clave para garantizar la funcionalidad, seguridad y durabilidad de las infraestructuras viales. Desde sus inicios, las metodologías para evaluar el estado superficial y estructural de los pavimentos han evolucionado en respuesta a la necesidad de obtener datos más objetivos, precisos y sistemáticos que respalden la toma de decisiones en conservación y mantenimiento (Huang, 2004; Shahin, 2005).

En las primeras etapas, el procedimiento habitual consistía en inspecciones visuales directas, realizadas por personal capacitado que recorría las calzadas registrando manualmente el tipo, la severidad y la extensión de los deterioros como fisuras longitudinales y transversales, baches, deformaciones plásticas, desprendimientos superficiales y pérdidas de textura (AASHTO, 1993). Aunque sencillo y de bajo costo, este método dependía en gran medida de la experiencia del inspector y podía verse afectado por la subjetividad, especialmente en redes extensas o ante deterioros incipientes (Shahin, 2005).

Para superar estas limitaciones, durante las décadas de 1970 y 1980 surgieron metodologías normalizadas y sistemas de calificación, entre los que destaca el *Pavement Condition Index* (PCI) desarrollado por el *U.S. Army Corps of Engineers*. Este sistema establece una lista tipificada de deterioros, clasificados según su severidad (leve, media, alta) y extensión, para calcular un índice numérico de 0 a 100 que representa el estado funcional del pavimento (ASTM D6433-20; Shahin, 2005). Otros índices empleados internacionalmente incluyen el *International Roughness Index* (IRI), que mide la irregularidad longitudinal del pavimento, y el *Present Serviceability Index* (PSI), que combina datos estructurales y funcionales (Huang, 2004; Sayers, Gillespie & Queiroz, 1986).

La evolución tecnológica permitió incorporar equipos de auscultación no destructiva, como deflectómetros de impacto (FWD), perfilómetros láser, escáneres 3D y sistemas de video-inventario georreferenciado. Estas tecnologías permiten cuantificar parámetros geométricos y estructurales, reducir la variabilidad de los resultados y cubrir grandes longitudes de red en menos tiempo (Ferregut et al., 2011; Federal Highway Administration [FHWA], 2013).

En los últimos años, los avances en visión por computadoras, aprendizaje profundo (deep learning) y procesamiento digital de imágenes han permitido desarrollar sistemas automáticos para la detección, clasificación y medición de deterioros a partir de imágenes o videos capturados desde vehículos, teléfonos móviles o vehículos aéreos no tripulados (VANT) (Dorafshan, Thomas & Maguire, 2018; Koch et al., 2015). Estos métodos mejoran la frecuencia y objetividad de las evaluaciones, permitiendo análisis masivos y generando datos útiles para sistemas de gestión de pavimentos.

En conjunto, la evolución de las técnicas de evaluación refleja una “evolución” desde métodos artesanales basados exclusivamente en la experiencia del inspector hacia sistemas integrados, soportados por tecnologías avanzadas y modelos de datos geoespaciales. Este proceso responde a la necesidad de mantener y rehabilitar las redes viales de forma eficiente, sostenible y basada en datos objetivos.

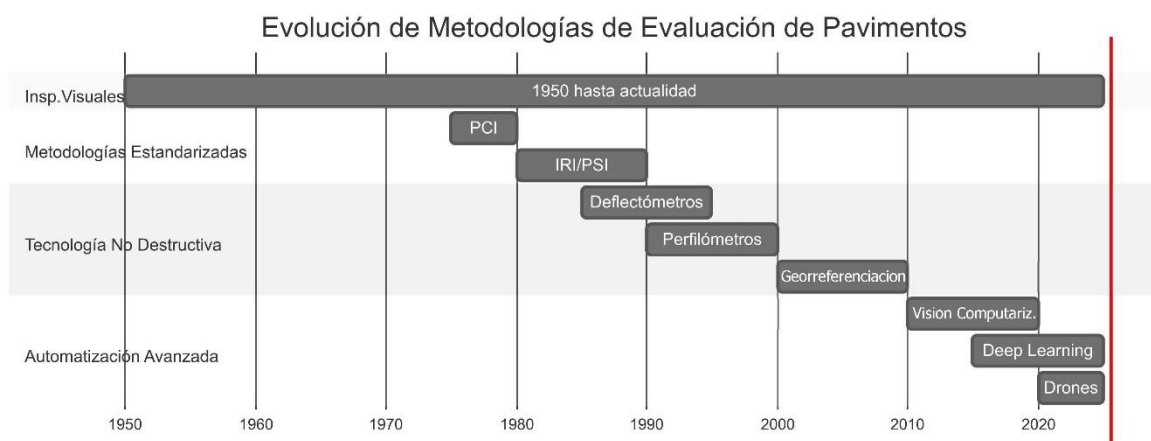


Figura 3: Línea temporal de los distintos enfoques evaluativos.

5 - MARCO TEORICO

La evaluación del estado del pavimento consiste en el relevamiento de las fallas más significativas que afectan al mismo, están agrupadas en 4 grandes grupos:

- Deformación longitudinal
- Deformación transversal
- Fisuración
- Desprendimiento



Este relevamiento se procesa de modo de llegar a un índice que “identifica” el estado de dicho pavimento a la fecha de evaluación; a este índice se lo denomina “Índice de Estado” y responde a la siguiente ecuación:

$$IE = 10 \times e^{-\sum a_i \times D_i}$$

El índice de estado combina la evaluación de cuatro tipos de fallas, debido a esto, puede utilizarse tanto como elemento de juicio para a evaluación general de un pavimento dado, o bien, para detectar la conveniencia y el grado de urgencia para profundizar el análisis. De acuerdo con esta expresión, el índice de estado (IE) alcanza valores comprendidos entre 1 y 10, correspondiendo los mayores valores a los mejores estados del pavimento.

La determinación en campaña de los coeficientes de deterioro (D_i), se complementa tomando en cuenta la existencia de otros elementos relacionados con el estado del pavimento, tales como: exudación, bacheos, drenajes y estados de las banquetas. Se suma a esta información la medición de otros importantes parámetros con equipos de auscultación de pavimentos que permiten determinar con mayor precisión el estado del mismo. La deflexión y el radio de curvatura que indican en forma no destructiva, la manera en la que trabaja la estructura y el coeficiente de fricción transversal que determina el grado de adherencia entre los neumáticos y la superficie de rodamiento.

Por último y más importante (en cuanto a el confort), se establece el Índice de Serviciabilidad Presente (I.S.P.) que tiene como objeto medir las condiciones de transitabilidad del pavimento. Se ha determinado en función a distintos estudios nacionales e internacionales, que el usuario de la vía es sensible a las deformaciones en el perfil longitudinal del pavimento, a las deformaciones trasversales del mismo y a los desprendimientos de materiales, fundamentalmente a baches.

En el caso de nuestro objeto de estudio (estado de pavimento con calzada de hormigón) el índice de estado se ve reducida a la siguiente expresión:

$$IE = 10 \times e^{-(0,05 D_1 + 0,09 D_3)}$$

Donde:

D1 = Deformación longitudinal.

D3 = fisuración

Coficiente D1: Deformación Longitudinal.

La determinación del coeficiente D1 se efectúa mediante la aplicación de un rugosímetro analizador del perfil longitudinal, equipo concebido para el registro de las deformaciones longitudinales de la calzada.

El equipo consiste básicamente en una rueda de ensayo que se encuentra montada dentro de un bastidor rectangular mediante dispositivos de suspensión y amortiguación adecuados, al ser remolcado el conjunto a lo largo del camino, la rueda de ensayo oscila verticalmente respecto el bastidor horizontal, en proporción a las deformaciones de la calzada, lo cual es medido y registrado en el aparato.

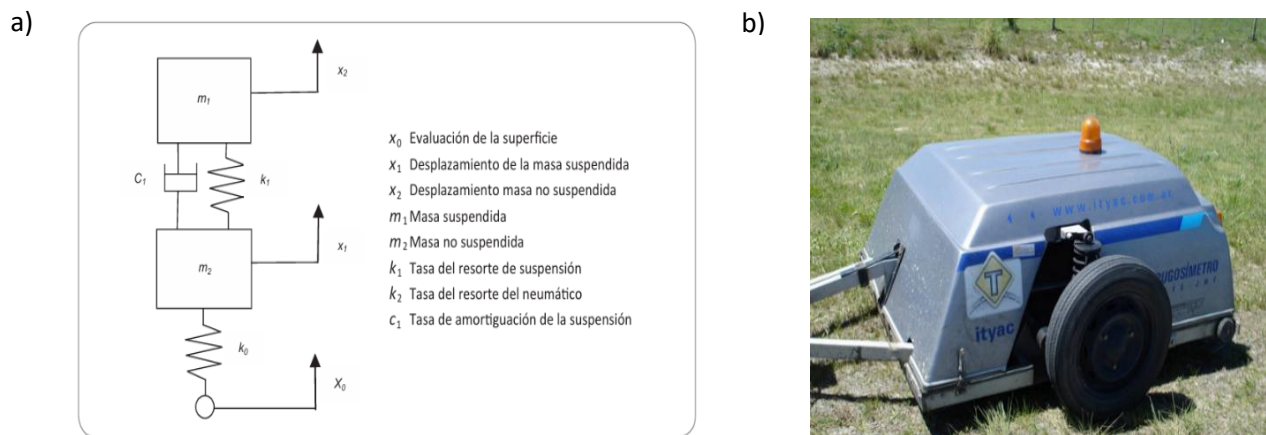


Figura 4: a) Modelo matemático de cuarto de carro. b) Modelo real.

Este número registrado, indica el total del movimiento vertical descendente efectuado por la rueda de ensayo en milímetros por kilómetros de camino. Con la rugosidad medida se define el coeficiente D1 en base a la siguiente tabla:

Rugosidad (m/km)	Coficiente D1 correspondiente
0 - 1.1	0
1.2 - 1.4	1
1.5 - 1.7	2
1.8 - 2.0	3
2.1 - 2.3	4
2.4 - 2.7	5
2.8 - 3.3	6
3.4 - 3.9	7
4.0 - 4.5	8
4.6 - 5.0	9
mayor a 5.0	10

Tabla 1: Correspondencia numérica entre rugosidad y coeficiente D1.

Coficiente D3: Fisuración

Para la determinación del coeficiente D3 el procedimiento a utilizar consiste en efectuar el relevamiento visual, comparando la clase de “fisuras” existente en el tramo evaluado con un catálogo de fotografías tipo que realizó la Dirección Nacional de Vialidad (DNV). En este catálogo tipo se indican valores absolutos 2, 4, 6, 8 y 10 del coeficiente D3 equivalentes a grados de fisuración característicos, reflejados en las fotografías. El operador de campaña deberá indicar el grado de fisuración observado en la sección, con alguno de los patrones exhibidos en las fotos.

DESCRIPCIÓN	D	FISURA TIPO
Sin fisuras.	0	
Fisuras finas, aisladas ubicadas al azar, que no forman celdas.	2	
Fisuras regulares (ancho menor a 2 mm) transversales, longitudinales o de esquina que subdividen a las losas en paños grandes.	4	
Agrietamientos importantes (abertura mayor a 2 mm) transversales, longitudinales, diagonales, que subdividen las losas en paños chicos, bordes con desprendimientos superficiales, y/o existencia de tareas de bacheo con mezcla asfáltica.	6	
Agrietamientos y desprendimientos profundos, movimiento relativo de panes de material, variación del perfil de la calzada y/o formación de baches aislados.	8	
Generalización de desprendimientos de panes de material y/o formación de baches, bloques hundidos o asentados.	10	

Figura 5: Catalogo de deterioros de pavimentos (DNV).

6 - FUENTES DE INFORMACION y METODOLOGÍA

En esta sección se describen las principales operaciones realizadas para el procesamiento de los datos utilizados, como así también, una descripción detallada de las características y origen de los mismos.

Para la etapa inicial de obtención de datos, se empleó un dispositivo móvil Motorola modelo ES6, junto con la aplicación IRI, Regularidad de carreteras, desarrollada por la firma española ABAKAL. Esta herramienta permite estimar el Índice de Regularidad Internacional (IRI), parámetro que cuantifica la deformación longitudinal del pavimento, mediante el uso de sensores de vibración integrados en el dispositivo. El cálculo se basa en la simulación del modelo matemático de un *cuarto carro*.

El relevamiento se llevó a cabo registrando la deformación longitudinal de la calzada derecha, en sentido ascendente (sur-norte), entre las localidades de Capitán Solari y Colonias Unidas. Posteriormente, se repitió el procedimiento sobre la calzada izquierda, en sentido descendente (norte-sur), uniendo nuevamente las mismas localidades. La aplicación almacena los datos obtenidos en formato *.csv*, estructurados en seis columnas.

Latitud	Longitud	Altitud	Velocidad	Desplazamiento	Valor IRI
-26.8054	-59.5524	81.00	67.69	0	0.530
-26.8046	-59.5530	83.20	61.04	100	0.770
-26.8037	-59.5536	83.90	57.22	200	0.200
-26.8029	-59.5541	85.00	62.93	300	0.410
-26.8021	-59.5546	82.70	69.35	400	0.750
-26.8012	-59.5552	82.30	68.15	500	0.880
-26.8003	-59.5558	81.20	56.50	600	0.640
-26.7996	-59.5563	80.70	67.49	700	0.520
-26.7988	-59.5568	79.50	76.17	800	1.250

Tabla 2: Formato de almacenamiento de registros de aplicación móvil.

La siguiente fase consistió en el relevamiento de baches presentes en el pavimento, tomando como punto de partida la localidad de Capitán Solari. Para ello, se utilizó el software "OSMTracker", el cual permite registrar no solo la traza recorrida, sino también puntos característicos o de interés, como en este caso, los desprendimientos de la capa de rodadura (baches). La identificación y digitalización de estos deterioros se realizó de forma manual mediante herramientas básicas del software QGIS.

Como resultado, se obtuvieron archivos vectoriales en formato Shapefile de ESRI (.shp), en los que cada polígono representa una unidad de superficie pavimentada deteriorada. El sistema de referencia adoptado para la proyección de las capas vectoriales fue POSGAR 2007, Faja 5.

Para el procesamiento de los datos se utilizó el software QGIS "Prizren", en el cual se ejecutaron diversos procedimientos asociados a la gestión de información vectorial: importación de capas generadas por los programas "IRI-calc" y "OSMTracker", edición de tablas de atributos, uso de la calculadora de campos y elaboración de resúmenes estadísticos.

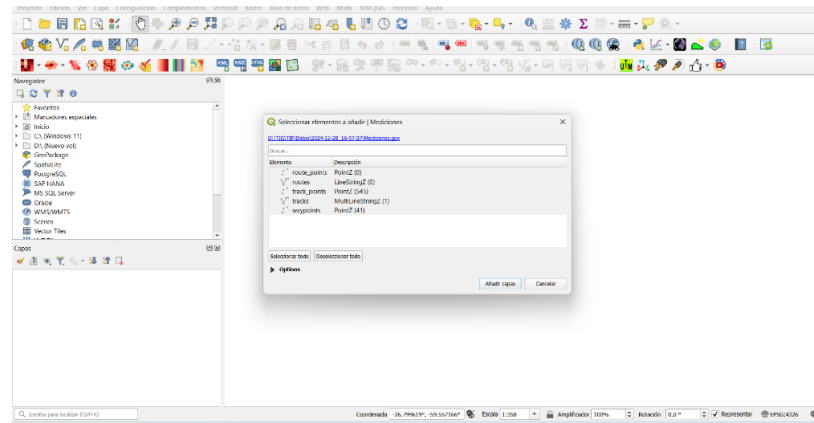


Figura 6: Proceso de importación archivo de extensión gpx generado por OSMTracker.

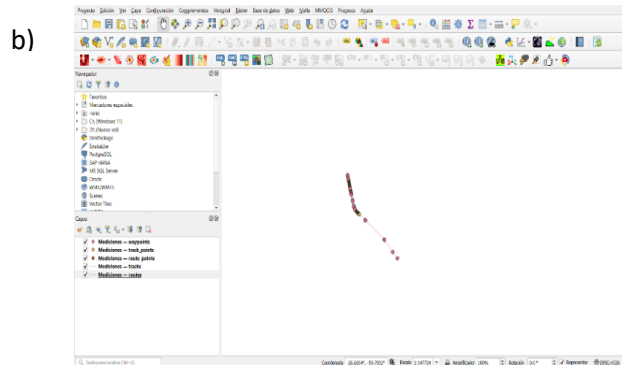
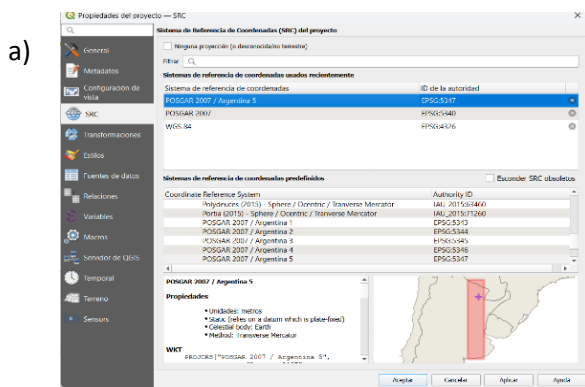


Figura 7: a) Selección de sistema de referencia (POSGAR 2007, Faja 5). b) Visualización de archivo generado.

En una segunda instancia, se procedió a la creación de una capa vectorial específica para los baches, con el objetivo de calcular sus respectivas superficies. A esta capa se le incorporaron campos adicionales que incluyen coordenadas y dimensiones de cada entidad.

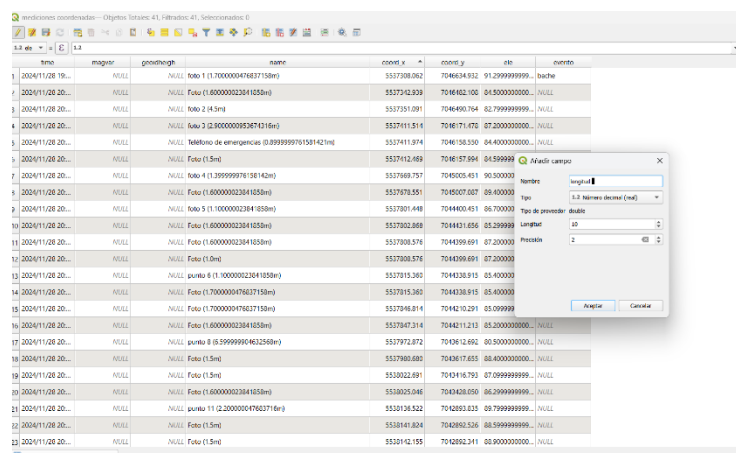


Figura 8: Creación de capa vectorial Baches.



Se utilizó la caja de herramientas para la unión atributos por valor de campo, entre las capas calzada derecha 1 y calzada derecha 2, luego se repitió el procedimiento con las capas calzada izquierda 1 y calzada izquierda 2, esta unión tuvo el objetivo de promediar los valores obtenidos en la obtención de los datos.

Se obtiene, de esta manera, dos capas vectoriales *IRI_derecha* y *IRI_izquierda* con los campos de los valores obtenidos del promedio descrito anteriormente y una tercera capa vectorial denominada baches y fisuras que contiene la información básica de los deterioros teniendo como referencia el manual de la DNV tal como se muestra en la Figura 5. Luego se obtuvo el promedio de IRI de ambas calzadas para representar una sola capa vectorial donde figura la progresiva (ubicación) y el valor correspondiente para cada ubicación, posteriormente se integran y procesan los datos geoespaciales y métricos obtenidos durante las fases anteriores, con el objetivo de generar productos visuales e interpretativos que faciliten la evaluación del estado superficial del pavimento.

A modo de síntesis, se presenta la Figura 9, donde se detallan a partir de un diagrama de flujos, los procesos realizados, la aplicación de técnicas empleadas y los resultados obtenidos.

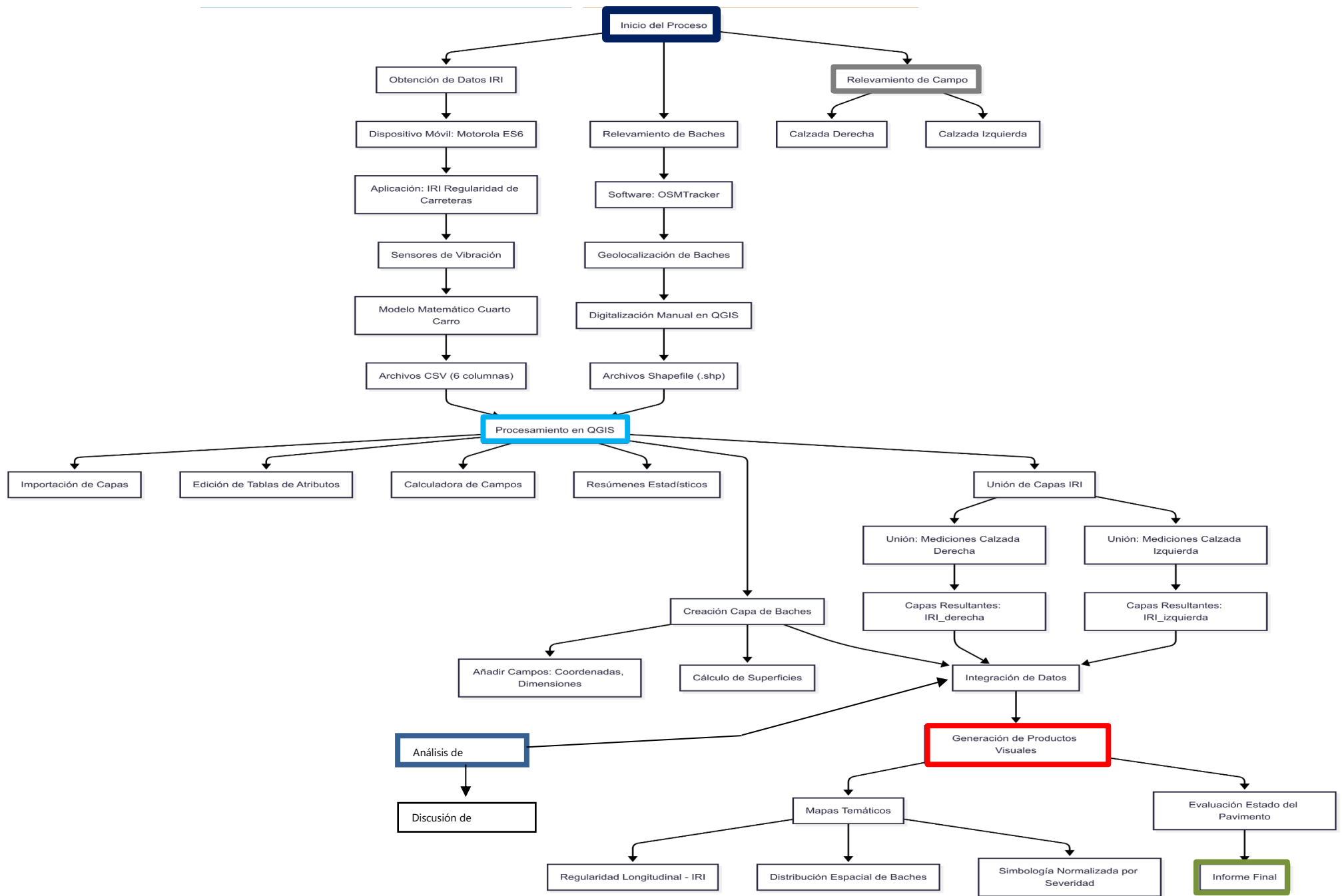


Figura 9: Diagrama resumen de metodología.

7 – RESULTADOS

7.1 Análisis descriptivo de las variables

Las variables obtenidas del relevamiento, se dividieron de la siguiente manera: 2 variables IRI (que contienen el valor del índice de regularidad de cada calzada por separada), luego otras 2 variables obtenidas de la medición de la capa “fisuras y baches” que contienen mediciones de superficies y tipo o grado de deterioro.

Campo analizado	IRI_izquierda	IRI_derecha
Recuento	123	120
Valores únicos	90	88
Valores NULOS (faltan)	3	0
Valor mínimo	0.630	0.240
Valor máximo	2.965	2.185
Intervalo	2.335	1.945
Suma	156.520	113.100
Valor medio	1.273	0.942
Mediana	1.250	0.893
Desviación estándar	0.352	0.359
Coefficiente de variación	0.277	0.381
Minoría (valor más raro presente)	0.630	0.240
Mayoría (valor presente con más frecuencia)	0.860	0.640
Primer cuartil	1.047	0.670
Tercer cuartil	1.453	1.123
Intervalo intercuartil (IQR)	0.405	0.453

Tabla 3: Estadísticas de campo de capa vectorial calzada izquierda y calzada derecha.

Puede distinguirse de las estadísticas básicas de las variables, que los valores de IRI_Izq e IRI_Der (correspondiente a cada calzada) no varían significativamente, adquiriendo valores comprendidos entre 0.24 y 2.96. Con esta misma capa vectorial se obtuvo el promedio general global de todo el trayecto relevado.

El resultado final de la capa vectorial compuesta por los relevamientos de ambas calzadas se analiza a continuación.

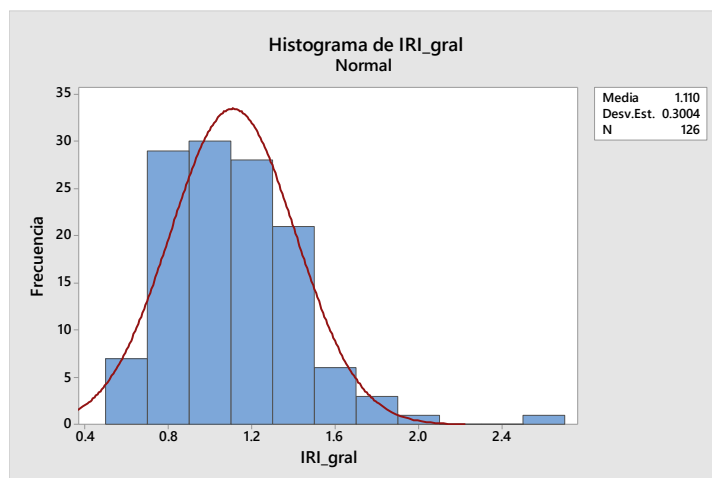


Figura 10: Histograma de distribución de frecuencias de la variable “IRI”.



La variable mencionada (IRI) está compuesta por 126 elementos con valores ubicados entre 0.573 y 2.575, tiene una desviación estándar de 0.3004 y la media es de 1.11, posee un intervalo de confianza del 95%. En la siguiente tabla pueden observarse los datos estadísticos descriptivos resumidos

Variable	tipo	N	N°	Media	Error est. de la media	Desv.Est.	Mínimo	Q1	Mediana	Q3	Máximo
IRI	0	87	0	1.1145	0.0303	0.2824	0.6550	0.8730	1.1050	1.3150	1.9280
	2	1	0	1.0500	0.0000	0.0000	1.0500	0.0000	1.0500	0.0000	1.0500
	4	9	0	0.9838	0.0788	0.2363	0.5730	0.7765	1.0150	1.2075	1.2280
	6	13	0	0.9703	0.0502	0.1809	0.7680	0.8355	0.9030	1.1300	1.3620
	8	10	0	1.2590	0.1570	0.4970	0.7780	0.9790	1.1640	1.3210	2.5750
	10	6	0	1.2900	0.1340	0.3290	0.9620	0.9820	1.2440	1.5920	1.7650

Tabla 4: Datos estadísticos descriptivos de la variable IRI.

La siguiente variable a analizar, de la segunda etapa de medición arroja valores comprendidos entre 0 y 379.38, tiene una desviación estándar de 56.976 y una media de, el intervalo de confianza es del.

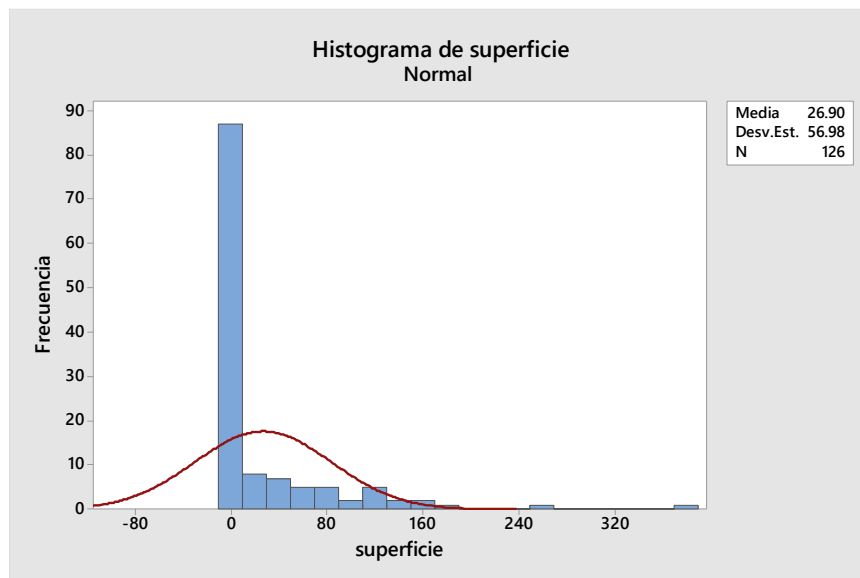


Figura 11: Histograma de distribución de frecuencias de la variable superficie.

Variable	tipo	N	N*	Media	Error est. de la media	Desv.Est.	Mínimo	Q1	Mediana	Q3	Máximo
superficie	0	87	0	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
	2	1	0	47.3900	0.0000	0.0000	47.3900	0.0000	47.3900	0.0000	47.3900
	4	9	0	103.3000	21.9000	65.6000	31.8000	58.9000	82.5000	129.1000	254.8000
	6	13	0	86.6000	27.5000	99.1000	20.5000	31.6000	34.2000	125.9000	379.4000
	8	10	0	84.9000	20.3000	64.1000	17.5000	22.1000	80.6000	134.0000	189.7000
	10	6	0	72.9000	16.4000	40.2000	22.8000	37.3000	70.9000	106.9000	131.9000

Tabla 5: Datos estadísticos descriptivos de la variable Superficie.

Por último, la tercera variable analizada es: “tipo”, una variable entera que adopta valores comprendidos entre 0, 2, 4, 6, 8 y 10, tiene una desviación estándar de 3.269 y una media de 2.

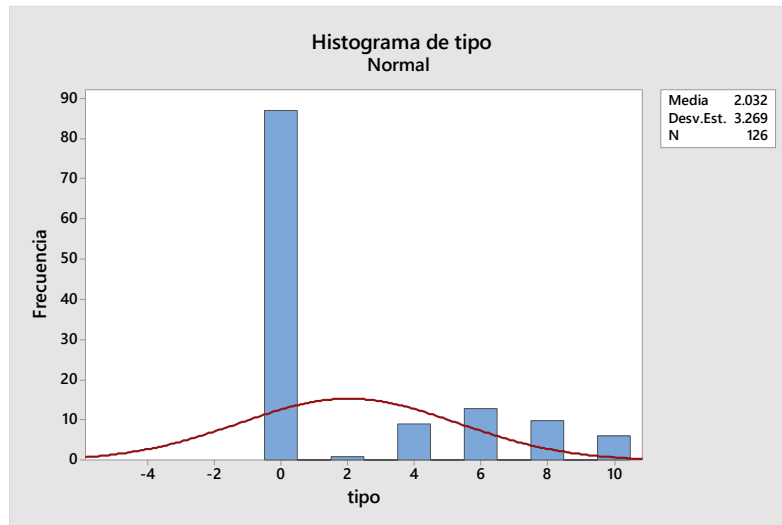


Figura 12: Histograma de distribución de frecuencias de la variable “Tipo”.

Variable	tipo	N	N*	Media	Error est.de la media	Desv.Est.	Mínimo	Q1	Mediana	Q3	Máximo
tipo	0	87	0	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
	2	1	0	2.0000	0.0000	0.0000	2.0000	0.0000	2.0000	0.0000	2.0000
	4	9	0	4.0000	0.0000	0.0000	4.0000	4.0000	4.0000	4.0000	4.0000
	6	13	0	6.0000	0.0000	0.0000	6.0000	6.0000	6.0000	6.0000	6.0000
	8	10	0	8.0000	0.0000	0.0000	8.0000	8.0000	8.0000	8.0000	8.0000
	10	6	0	10.0000	0.0000	0.0000	10.0000	10.0000	10.0000	10.0000	10.0000

Tabla 6: Datos estadísticos descriptivos de la variable “Tipo”.

7.2 Análisis del Índice de Regularidad Internacional (IRI)

La elaboración de productos cartográficos a partir de los datos vectoriales obtenidos permite representar visualmente distintos niveles de condición superficial del pavimento, como: el grado de regularidad longitudinal o la distribución espacial de los deterioros (baches), facilitando una lectura clara y rápida del estado de la infraestructura vial. La simbología utilizada fue normalizada según rangos de severidad.

El IRI es un indicador estandarizado que cuantifica la regularidad superficial de un pavimento. Valores elevados de IRI reflejan mayores irregularidades, lo que se correlaciona directamente con el deterioro de la calzada y afecta la comodidad y seguridad vial.

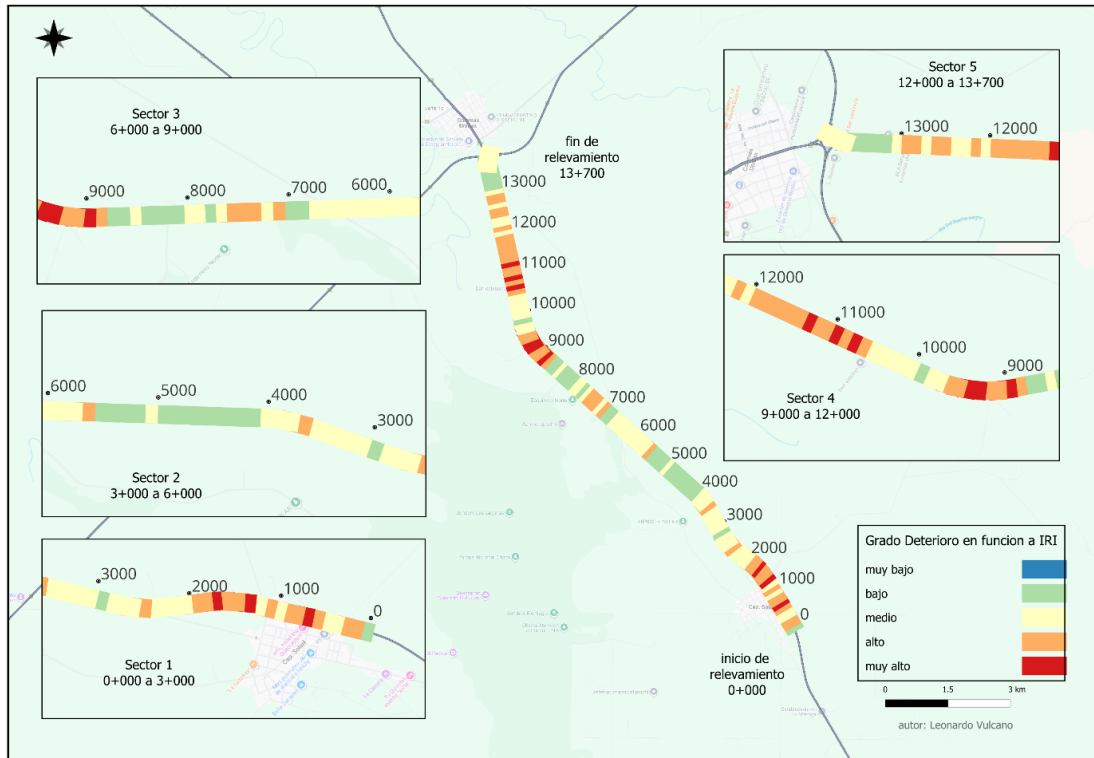


Figura 13: Producto cartográfico perteneciente a la calzada derecha, donde puede visualizarse el “grado de deterioro” dividido por sectores.

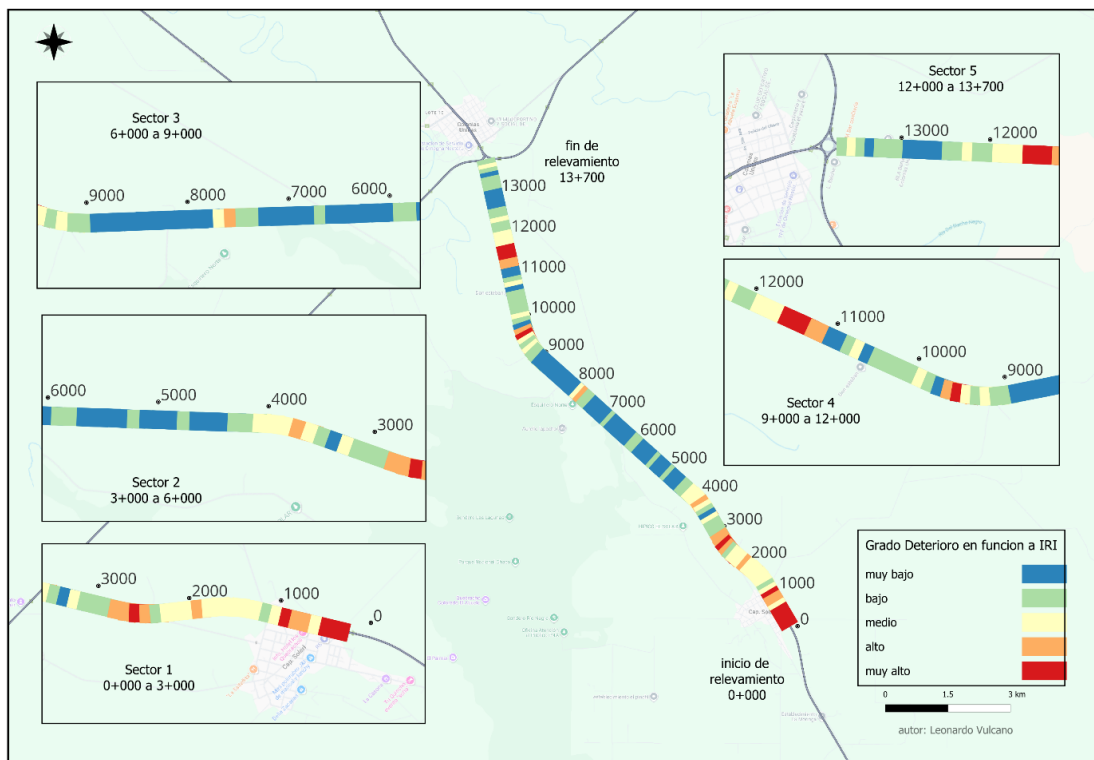


Figura 14: Producto cartográfico perteneciente a la calzada izquierda, dividido por sectores.

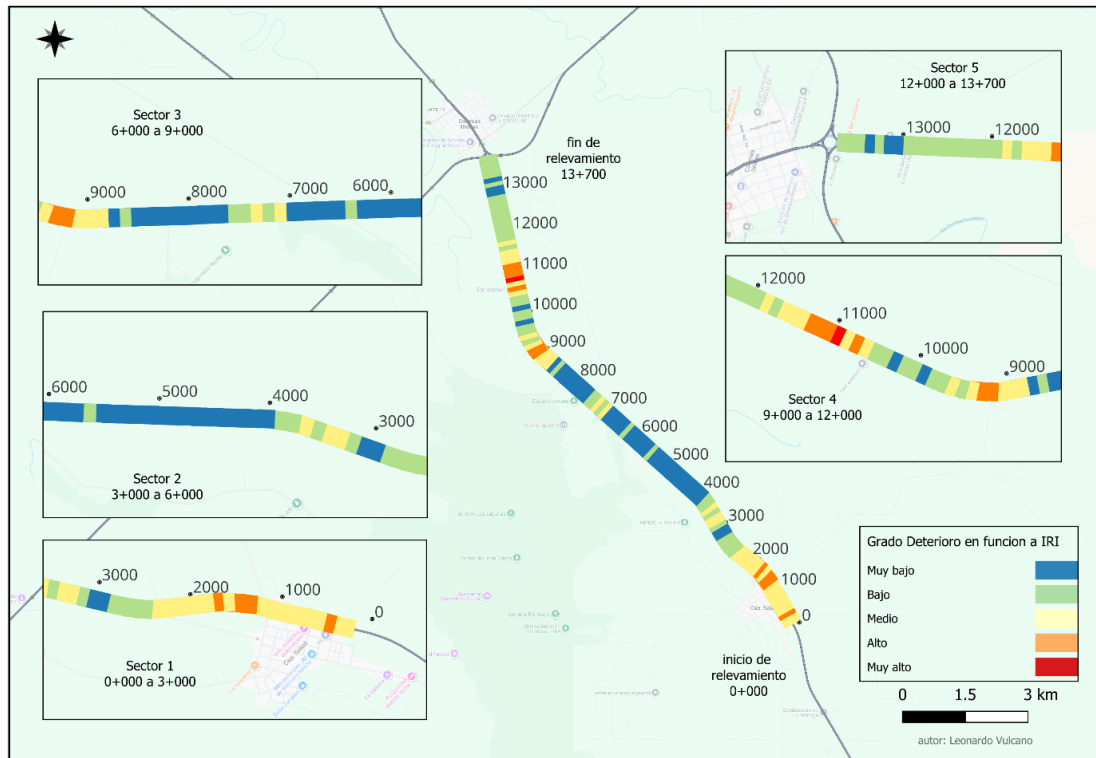


Figura 15: Producto cartográfico perteneciente a ambas calzadas (promedio) dividido por sectores.

Se realizó una división del tramo perteneciente a la calzada derecha, en sectores de 3000 m, los resultados por sectores evidencian:

- Sector 1 (0+000 a 3+000): Presenta un grado de deterioro de “Medio” a “Alto”
- Sector 2 (3+000 a 6+000): Presenta disparidad entre los distintos sectores, prevaleciendo valores “Medios” a “Bajos”. Interpretación: Superficie en buen estado, con regularidad aceptable.
- Sector 3 (6+000 a 9+000): Es el sector que presenta valores de IRI más bajos que los restantes, pero con valores crecientes hacia el final del mismo.
- Sector 4 (9+000 a 12+000): Presenta disparidad entre los distintos sectores, pero con valores puntualmente elevados particularmente entre las progresivas 11+000 a 11+500.
- Sector 5 (12+000 a 13+700): Al igual que el sector 3, posee valores de IRI bajos a “medios”, pero con picos pronunciados.

En cuanto a la calzada izquierda puede observarse:

- Sector 1 (0+000 a 3+000): Presenta un grado de deterioro de “Alto” a “Muy Alto”
- Sector 2 (3+000 a 6+000): Presenta disparidad entre los distintos sectores, prevaleciendo valores “Medios” a “Bajos”.
- Sector 3 (6+000 a 9+000): Es el sector que presenta valores de IRI más bajos que los restantes.
- Sector 4 (9+000 a 12+000): Presenta disparidad entre los distintos sectores, pero con valores puntualmente elevados particularmente en las progresivas 11+300 a 11+800
- Sector 5 (12+000 a 13+700): Al igual que el sector 3, posee valores de IRI bajos a “medios”, pero con picos pronunciados.

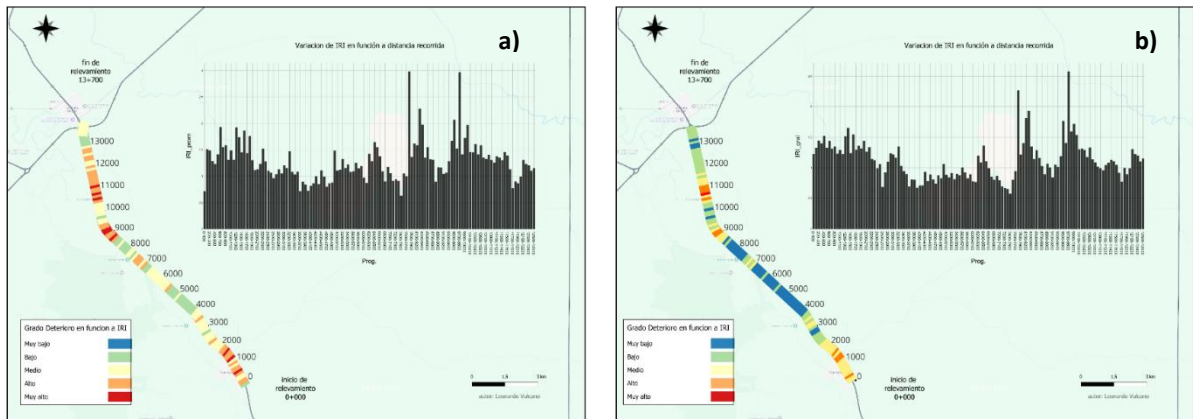


Figura 16: a) - Producto cartográfico, visualización de índice de deterioro correspondiente a la calzada izquierda. b)- Visualización correspondiente a calzada derecha.

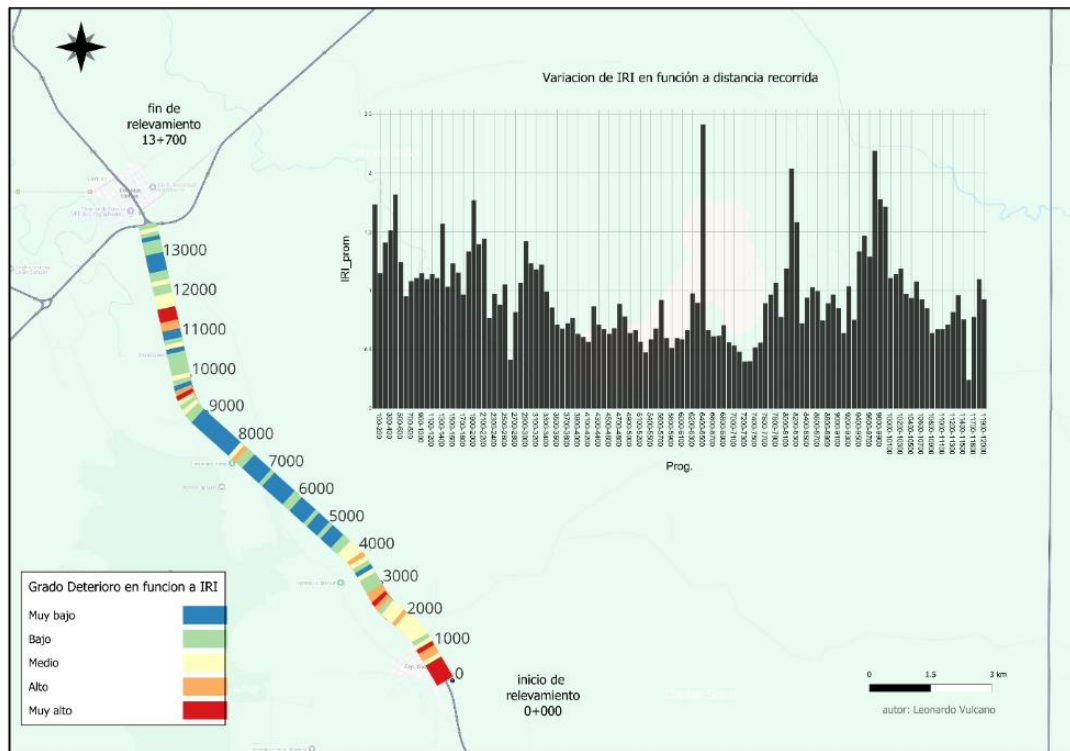


Figura 17: Visualización de índice de deterioro correspondiente al promedio de ambas calzadas (derecha e izquierda), y gráfico de barras de la variación de IRI en función a la distancia recorrida.

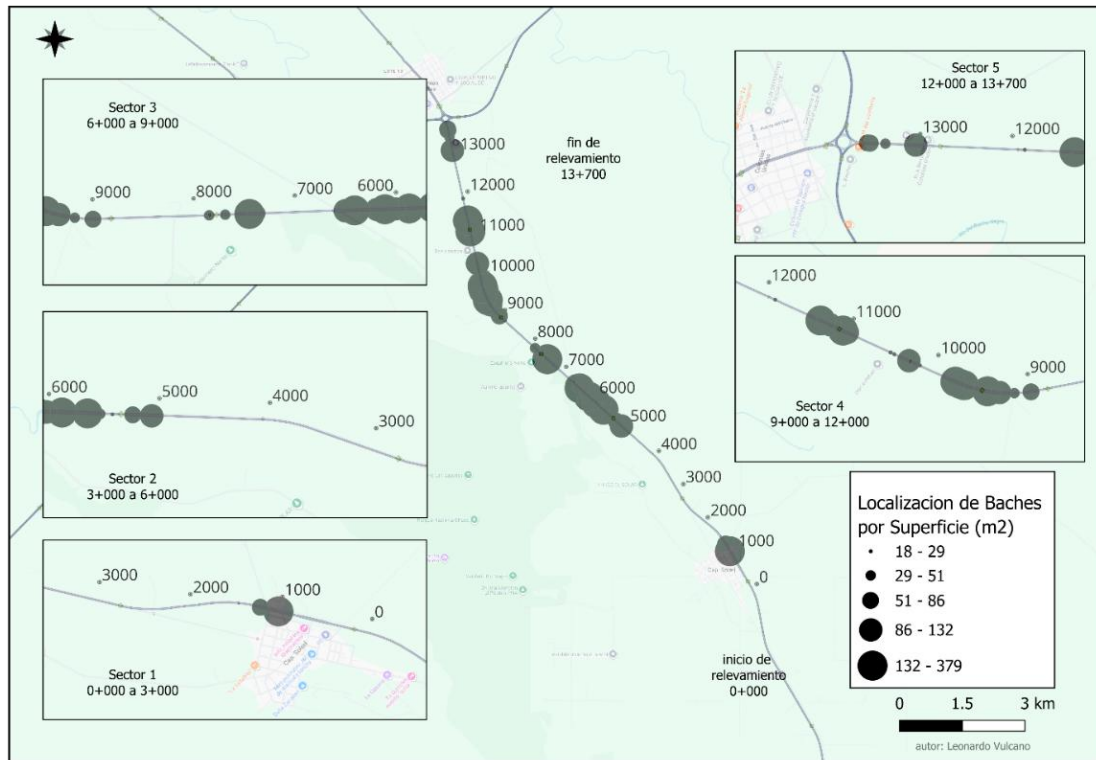


Figura 18: Visualización de las superficies de baches por localización.

7.3 Caracterización de la variable baches y tipo

En esta sección se realizó el análisis de la variable “superficie” de los deterioros sobre el pavimento, tal como se observa en la imagen, puede concluirse que la mayor cantidad de “superficie” deteriorada (expresada en m²) se ubica en los sectores 3 y 4, mientras que la menor cantidad se hallan en el sector 1 y el sector 5.

En cuanto al “tipo” de deterioro, es decir el grado de deformación de las fisuras, puede observarse tanto en el mapa de calor, como en el producto cartográfico anterior (Figura 19) que los deterioros más avanzados se localizan principalmente en el sector 4 y 5, mientras que los deterioros de menor magnitud se hallan en el resto de los sectores.

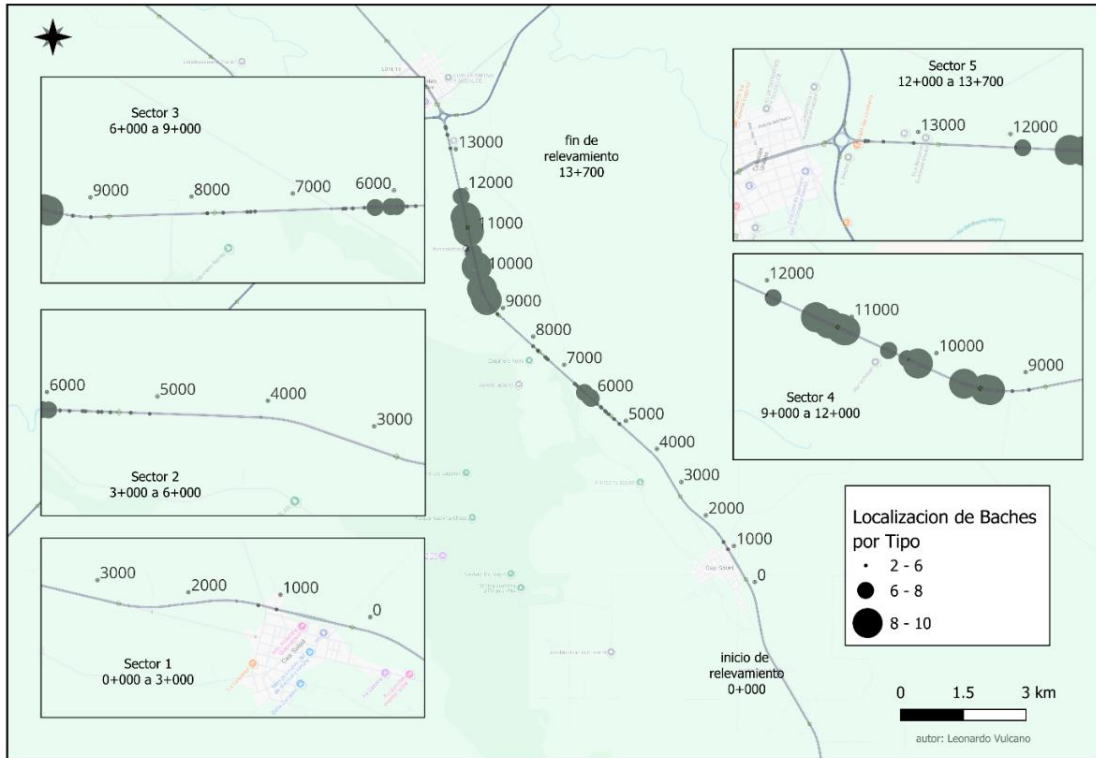


Figura 19: Producto cartográfico, perteneciente a la visualización de localización de baches por "Tipo" o grado de deterioro.

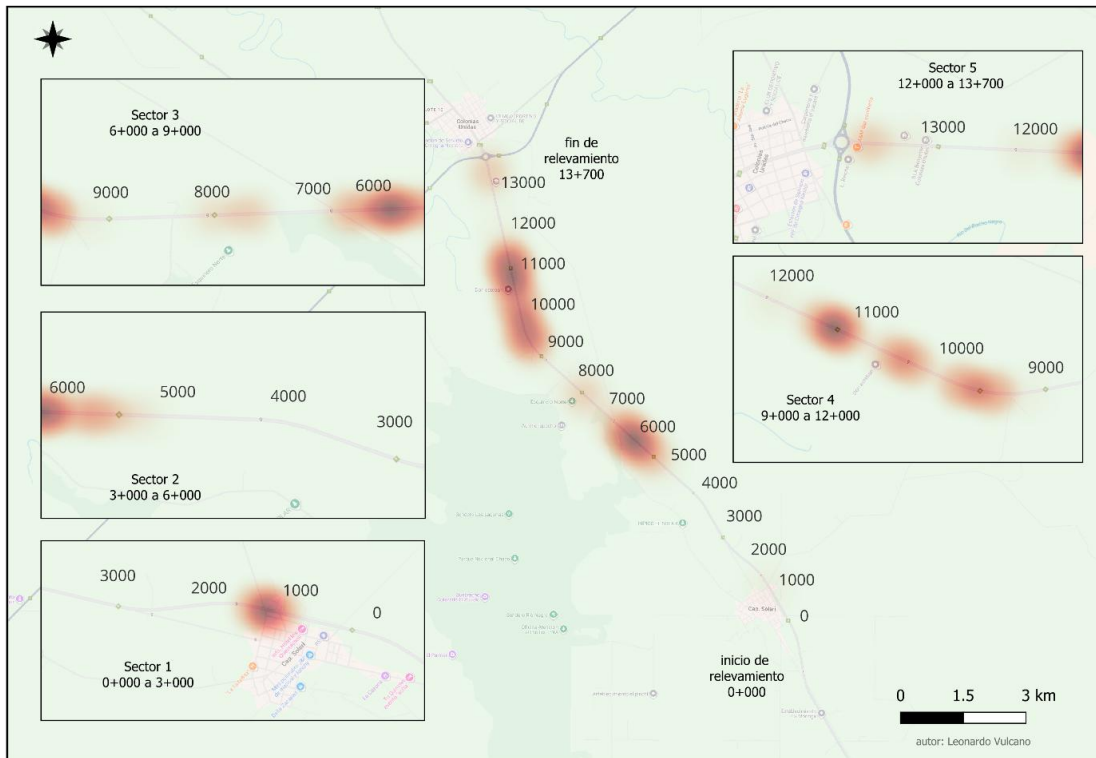


Figura 20: Producto cartográfico, visualización de mapa de calor de localización de baches por "Tipo".

7.4 Análisis de Regresión

El siguiente paso en la investigación consistió en llevar a cabo un análisis de regresión múltiple con el objetivo de cuantificar la relación entre la variable de respuesta, el IRI, y dos variables predictoras independientes: el Tipo de fisuración (que representa la severidad y naturaleza del deterioro) y la Superficie del pavimento (que podría referirse al tipo de material o acabado).

Este análisis se ejecutó utilizando el software estadístico especializado Minitab 18, reconocido por su robustez en el análisis de datos y modelado estadístico.

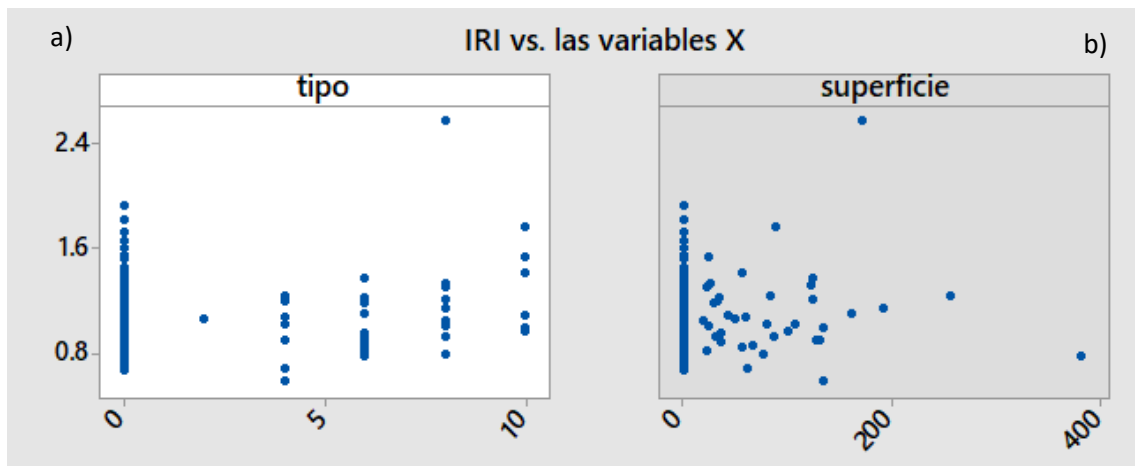


Figura 21: a) - Grafica de Análisis de regresión múltiple, variable dependiente = IRI, predictor = tipo. 21b)-Grafica IRI vs superficie

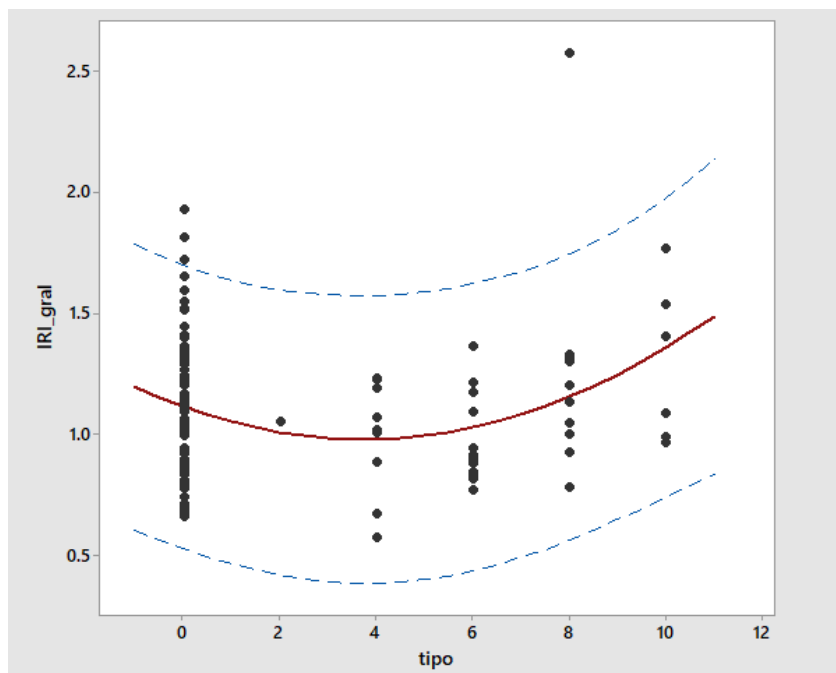


Figura 22: Visualización de la función cuadrática hallada.



El modelo de regresión exploró específicamente la posibilidad de una relación no lineal, incorporando un término cuadrático para la variable “Tipo” con el fin de capturar curvaturas en la tendencia de los datos que un modelo lineal simple podría pasar por alto.

Los resultados obtenidos del modelo de regresión fueron reveladores y proporcionaron información crucial:

- Coeficiente de Determinación (R-cuadrado = 5.63%): Este valor indica que el modelo construido, con las variables “Tipo” (y su término cuadrático) y “Superficie”, explica apenas el 5.63% de la variabilidad total observada en los valores del IRI. Esto significa que la gran mayoría de la variación en la regularidad superficial (aproximadamente el 94.37%) no es atribuible a estas dos variables en conjunto dentro del modelo propuesto.
- Valor p del Modelo ($p = 0.028$): A pesar del bajo R-cuadrado, el valor-p global del modelo es estadísticamente significativo ($p < 0.05$). Esto sugiere que la relación combinada de las variables incluidas es improbable que se deba al azar. Sin embargo, la significancia estadística no implica una fuerte predictividad; confirma que el modelo detectó un patrón real, aunque débil, en los datos.

El análisis de regresión múltiple entre el IRI y el Tipo de deterioro revela una relación estadísticamente significativa (*valor-p* = 0.028), pero con un poder explicativo muy bajo ($R^2 = 5.63\%$). Este hallazgo es crucial: si bien existe una asociación matemática detectable entre la severidad del deterioro (fisuración) y el aumento en el índice de regularidad, el modelo es insuficiente para predecir el comportamiento del IRI basándose únicamente en esta variable. La relación encontrada, descrita por la ecuación cuadrática y $= 1.114 - 0.07199x + 0.00963x^2$, sugiere que el IRI aumenta de forma no lineal a medida que el tipo de fisuración empeora (aumenta su valor numérico). Sin embargo, el bajo R^2 indica que el Tipo de deterioro por sí solo explica solamente una parte de la variabilidad del IRI, dejando la mayor parte de esta variabilidad atribuible a otros factores no considerados en este modelo. Esto refuerza la complejidad multifactorial de la evaluación de pavimentos, donde variables como la deflexión estructural, la calidad de los materiales o el drenaje podrían tener una influencia igual o mayor en la regularidad superficial.

En marcado contraste, el análisis entre el IRI y la Superficie de los baches arrojó resultados concluyentes: no se encontró ninguna relación lineal estadísticamente significativa (*valor-p* = 0.977) y el poder explicativo es nulo ($R^2 = 0\%$). Esto implica que, para el tramo de estudio y con la metodología empleada, el área total de la superficie afectada por baches no es un predictor de la regularidad medida por el IRI.

Esta aparente contradicción puede explicarse por varias razones técnicas:

- Naturaleza de la Medición del IRI: el IRI es un índice que cuantifica la deformación longitudinal (la regularidad del perfil a lo largo de la vía). Un bache, por su naturaleza, es una discontinuidad localizada y puntual. Su impacto en el perfil longitudinal general puede ser mínimo si está aislado, es superficial o si el vehículo de medición lo releva sin generar una oscilación significativa en la rueda del equipo simulado. El sensor del smartphone utilizado puede no ser lo suficientemente sensible para capturar el efecto de imperfecciones muy localizadas por debajo de un cierto umbral de profundidad o extensión.



- Resolución Espacial de los Datos: la capa de baches se digitalizó manualmente como polígonos, lo que provee un excelente registro cartográfico de su ubicación y extensión. Sin embargo, el IRI se midió como un valor puntual cada 100 metros. Esta disparidad en la resolución de los datos (áreas vs. puntos) puede dificultar la correlación estadística, ya que un valor de IRI representa un promedio de la rugosidad en un segmento que puede o no contener uno o varios baches.
- Características de los Deterioros: es posible que los baches presentes en la Ruta Provincial N°9, al ser de pavimento rígido, no presenten deformaciones pronunciadas en sus bordes, sino más bien fracturas y desprendimientos con bordes definidos. Este tipo de falla podría afectar más la comodidad al conducir de forma abrupta (impacto) que la regularidad longitudinal continua que mide el IRI.

El análisis de regresión múltiple (en el cual se incorpora) simultáneamente las variables Tipo y Superficie como predictores del IRI no mejoró significativamente el poder explicativo del modelo, confirmando que la Superficie no aporta información predictiva relevante en este contexto específico. Los resultados se mantuvieron idénticos a los del modelo simple con Tipo, reforzando la conclusión anterior.

En síntesis, los resultados indican que, para la gestión de este tipo de pavimentos, la severidad del deterioro (Tipo) es un indicador más relevante para la rugosidad (IRI) que su mera extensión. Esto tiene una implicación práctica directa: un gestor vial podría priorizar la reparación de unos pocos baches severos (Tipo 8 o 10) sobre la de una extensa área de deterioros leves (Tipo 2 o 4), ya que los primeros están estadísticamente más asociados a un deterioro de la calidad de manejo (confort) que percibe el usuario.

8 – CONSIDERACIONES FINALES

El presente trabajo demostró la viabilidad de utilizar tecnologías de bajo costo (dispositivos móviles y software SIG) para la evaluación del estado de pavimentos en un tramo de la Ruta Provincial N°9. La metodología implementada permitió obtener un indicador de regularidad superficial (IRI) y caracterizar deterioros como fisuras y baches, generando productos cartográficos que facilitan la identificación de sectores críticos.

Asimismo, se identifica que los índices y metodologías implementadas, favorecidas por el uso de un dispositivo móvil (como herramienta principal de obtención de datos), permiten la construcción de variables que caracterizan el estado de la red vial permitiendo además la identificación de patrones, tendencias y áreas prioritarias de intervención, transformando así datos crudos en información estratégica para la toma de decisiones. Estos resultados son integrados a plataformas SIG donde se visualizan en capas temáticas interactivas y brindan a los técnicos capacidad de actuación basado en información de campo.

Si bien, los indicadores y productos cartográficos constituyen resultados centrales del presente trabajo, es indispensable evaluar la relación existente entre el IRI y las variables que la componen, con el propósito de advertir la significancia de estos parámetros en los valores resultantes del IRI y los pasos a seguir en virtud de integrar



todas las características que fortalecen el análisis de la regularidad vial. En virtud de ello, se realizó un análisis de regresión para caracterizar estadísticamente los vínculos entre el IRI y las variables empleadas. En este sentido, el análisis de regresión mostró una relación estadísticamente significativa pero débil entre el IRI y el tipo de deterioro ($R^2 = 5.63\%$), lo que sugiere que otros factores no considerados (como variables estructurales, de drenaje o de materiales) influyen de manera importante en la regularidad del pavimento. Por otro lado, no se encontró relación entre el IRI y la superficie afectada por baches, lo que puede deberse a la naturaleza puntual de estos deterioros y la resolución espacial de los datos.

Se concluye que, si bien la metodología propuesta es accesible y útil para una evaluación preliminar, su aplicabilidad en la gestión vial requiere complementarse con mediciones estructurales y validación con equipos profesionales. Los resultados obtenidos representan un punto de partida para la implementación de sistemas de monitoreo continuo y low-cost, orientados a la priorización de mantenimiento en redes viales extensas.

9 – FUTURAS LINEAS DE INVESTIGACION

Como desarrollo futuro, se propone expandir este modelo mediante la integración de un módulo de procesamiento de imágenes capturadas por Vehículos Aéreos No Tripulados (VANTs), utilizando herramientas de Inteligencia Artificial (IA) para automatizar la detección y clasificación del estado de los pavimentos. Esta línea de investigación se centrará en automatizar el diagnóstico mediante el uso combinado de VANTs e IA.

La metodología propuesta surge como respuesta directa a las limitaciones de los métodos tradicionales de inspección visual, que suelen ser procesos extensos, repetitivos y altamente dependientes de la subjetividad del evaluador. Además, estas técnicas convencionales conllevan riesgos operativos para el personal, especialmente en vías de alto tránsito o de difícil acceso.

El empleo de VANTs permite la captura de imágenes aéreas de alta resolución en plazos reducidos, garantizando una cobertura exhaustiva de la red vial. La naturaleza remota de estos dispositivos reduce costos operativos, incrementa la frecuencia de las inspecciones y genera un registro visual más completo y detallado en comparación con las técnicas tradicionales.

El procesamiento posterior de la información se realizaría mediante algoritmos de IA, como modelos de aprendizaje profundo (deep learning), capaces de identificar, clasificar y cuantificar automáticamente diversos tipos de deterioros superficiales. Estos sistemas permiten extraer parámetros geométricos fundamentales (como longitud, ancho, área y severidad de cada deterioro) facilitando una caracterización integral y objetiva del estado del pavimento.

Todo este desarrollo se integraría en un complemento o plugin para QGIS, dotándolo de funcionalidades clave como la generación automática de reportes, dashboards interactivos y la priorización de sectores críticos, transformando así los datos brutos en información.

La relevancia de este enfoque radica en su capacidad para transformar grandes volúmenes de datos crudos en información estructurada, cuantificable y



georreferenciada. Esto permite a los responsables de la gestión vial priorizar intervenciones de mantenimiento de forma objetiva, optimizar la asignación de recursos y diseñar planes de conservación más eficientes. Asimismo, sienta las bases para el desarrollo de modelos predictivos que anticipen el comportamiento futuro de los pavimentos, promoviendo una gestión proactiva, sostenible y orientada a prolongar la vida útil de la infraestructura vial.

10 - DOCUMENTOS DE REFERENCIA

AASHTO. (1993). *Guide for design of pavement structures*. American Association of State Highway and Transportation Officials.

Anselin, L., & Rey, S. J. (2010). *Perspectives on spatial data analysis*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-01976-0>

ASTM International. (2020). *ASTM D6433-20: Standard practice for roads and parking lots pavement condition index surveys*. <https://www.astm.org/standards/d6433.htm>

Barrera, J. D. A. (2019). *Análisis de datos en la auscultación de pavimentos empleando equipos de prueba no destructiva* [Tesis de grado, Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia]. Repositorio Institucional UPTC. <http://repositorio.uptc.edu.co/handle/001/2653>

Caló, D., & Polzinetti, M. (2016). *Manual de pavimentos urbanos*. ICPA.

Dorafshan, S., Thomas, R. J., & Maguire, M. (2018). Fatigue crack detection using unmanned aerial systems in fracture critical inspection of steel bridges. *Journal of Bridge Engineering*, 23(10), 04018078. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)BE.1943-5592.0001284](https://doi.org/10.1061/(ASCE)BE.1943-5592.0001284)

Federal Highway Administration (FHWA). (2013). *Distress identification manual for the Long-Term Pavement Performance program* (4th ed., Report No. FHWA-HRT-13-092). U.S. Department of Transportation. <https://www.fhwa.dot.gov/publications/research/infrastructure/pavements/ltp/13092/13092.pdf>

Ferregut, C. M., Flintsch, G. W., & Zaniewski, J. P. (2011). Pavement management systems. En *Transportation infrastructure engineering: A multimodal integration* (pp. 127–149). Cengage Learning.

Huang, Y. H. (2004). *Pavement analysis and design* (2nd ed.). Prentice Hall.

Koch, C., Georgieva, K., Kasireddy, V., Akinci, B., & Fieguth, P. (2015). A review on computer vision based defect detection and condition assessment of concrete and asphalt civil infrastructure. *Advanced Engineering Informatics*, 29(2), 196–210. <https://doi.org/10.1016/j.aei.2015.01.008>

Ortiz, R., Arias, F., Da Silva, C., & Cardozo, O. (2015). Análisis espacial del precio del suelo con modelos de regresión lineal múltiple y sistemas de información geográfica [Spatial analysis of land prices with multiple linear regression models and geographic information systems]. *Revista de Geografía de Valparaíso*, (51), 57–74. <http://www.revistageografiavalparaiso.uchile.cl/index.php/RGVP/article/view/37600>

Rossi Martínez, G. (2008). *Evaluación de pavimentos*. Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Buenos Aires.



Sayers, M. W., Gillespie, T. D., & Queiroz, C. A. V. (1986). *The international road roughness experiment: Establishing correlation and a calibration standard for measurements* (World Bank Technical Paper No. 45). The World Bank. <http://documents.worldbank.org/curated/en/579251468739256202/pdf/multi-page.pdf>

Shahin, M. Y. (2005). *Pavement management for airports, roads, and parking lots* (2nd ed.). Springer. <https://doi.org/10.1007/b136376>

11 - LISTADO DE TABLAS Y FIGURAS

FIGURAS:

Figura 1- Ubicación Departamento Sgto. Cabral en provincia del Chaco.

Figura 2- Ubicación de la Zona de estudio (Tramo de RPN°9)

Figura 3- Línea temporal de los distintos enfoques evaluativos

Figura - 4 a) Modelo matemático de cuarto de carro. 4 b) Modelo real

Figura 5- Catalogo de deterioros de pavimentos (DNV)

Figura 6- Proceso de importación archivo de extensión gpx generado por OSMTracker.

Figura 7 a) Selección de sistema de referencia (POSGAR 2007 F5). 7b) Visualización de archivo generado

Figura 8 -Creación de capa vectorial Baches.

Figura 9-Diagrama resumen de metodología.

Figura 10-Histograma variable "IRI".

Figura 11-Histograma variable "superficie".

Figura 12-Histograma variable "Tipo".

Figura 13- -Producto cartográfico perteneciente a la calzada derecha, donde puede visualizarse el "grado de deterioro" dividido por sectores.

Figura 14-Producto cartográfico perteneciente a la calzada izquierda, dividido por sectores.

Figura 15-Producto cartográfico perteneciente a ambas calzadas (promedio) dividido por sectores.

Figura 16 a) - Producto cartográfico, visualización de índice de deterioro correspondiente a la calzada izquierda. 16 b)- Visualización correspondiente a calzada derecha.

Figura 17-Producto cartográfico, visualización de índice de deterioro correspondiente a la calzada derecha, puede observarse un gráfico de barras de la variación de IRI en función a la distancia recorrida.

Figura 18 - Producto cartográfico perteneciente a la visualización de las superficies de baches por localización.

Figura 19 - Producto cartográfico, perteneciente a la visualización de localización de baches por "Tipo" o grado de deterioro

Figura 20-Producto cartográfico, visualización de mapa de calor de localización de baches por "Tipo".

Figura 21a- Grafica de Análisis de regresión múltiple, variable dependiente = IRI, predictor = tipo. 21b- Grafica IRI vs superficie

Figura 22-Visualización de la función cuadrática hallada

TABLAS

Tabla 1- Correspondencia numérica entre rugosidad y coeficiente D1

Tabla 2 - Formato de almacenamiento de registros de aplicación móvil.

Tabla 3- Estadísticas de campo de capa vectorial calzada izquierda y calzada derecha.

Tabla 4 -Datos estadísticos descriptivos de la variable IRI

Tabla 5 - Datos estadísticos descriptivos de la variable Superficie

Tabla 6 -Datos estadísticos descriptivos de la variable Superficie

Tabla 7 -Datos estadísticos descriptivos de la variable "Tipo".