



**Universidad
Católica de
Santa María**

**Facultad de Arquitectura e Ingenierías Civil y del Ambiente
Escuela Profesional de Ingeniería Civil**

**Comparación de la metodología PCI de la forma convencional y asistido
con un RPAS para la evaluación superficial de las fallas del pavimento
flexible de la avenida Perú en el distrito de Cerro Colorado, Arequipa 2025**

Tesis presentada por:

Aguilar Guzman, Franco Alexander

ORCID: 0009-0007-9797-4037

Yañez Pino, Robert Renato

ORCID: 0009-0008-2207-4365

para optar el Título Profesional de Ingeniero Civil

Asesora:

Dra. Garcia Godos Peñaloza, Luz Matilde

ORCID: 0000-0003-0591-2191

Arequipa – Perú

2026

UCSM-ERP

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

INGENIERIA CIVIL

TITULACIÓN CON TESIS

DICTAMEN APROBACIÓN DE BORRADOR

Arequipa, 13 de Agosto del 2026

Dictamen: 016302-C-EPIC-2026

Visto el borrador del expediente 016302, presentado por:

2016700661 - YAÑEZ PINO ROBERT RENATO

2016242281 - AGUILAR GUZMAN FRANCO ALEXANDER

Titulado:

**COMPARACIÓN DE LA METODOLOGÍA PCI DE LA FORMA CONVENCIONAL Y ASISTIDO CON UN
RPAS PARA LA EVALUACIÓN SUPERFICIAL DE LAS FALLAS DEL PAVIMENTO FLEXIBLE DE LA
AVENIDA PERÚ EN EL DISTRITO DE CERRO COLORADO, AREQUIPA 2025**

Nuestro dictamen es:

APROBADO

Título Profesional/Título de Segunda Especialidad/Grado Académico a optar:

INGENIERO CIVIL

**29439333 - TICONA BALDARRAGO AGUSTO ISRAEL
DICTAMINADOR**



**41481170 - GAMARRA TUCO RUBEN FRANCISCO
DICTAMINADOR**



**46890195 - DE LA CRUZ MENDOZA FERNANDO ARON
DICTAMINADOR**



COMPARACIÓN DE LA METODOLOGÍA PCI DE LA FORMA CONVENCIONAL Y ASISTIDO CON UN RPAS PARA LA EVALUACIÓN SUPERFICIAL DE LAS FALLAS DEL PAVIMENTO FLEXIBLE DE LA AVENIDA PERÚ EN EL DISTRITO DE CERRO COLORAD

INFORME DE ORIGINALIDAD

18%

INDICE DE SIMILITUD

17%

FUENTES DE INTERNET

6%

PUBLICACIONES

9%

TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1	hdl.handle.net Fuente de Internet	2%
2	cybertesis.uni.edu.pe Fuente de Internet	1%
3	Nur, Arip Syaripudin. "Application of Susceptibility Framework for Geoengineering Problems Using Machine Learning, Remote Sensing, and GIS Techniques.", Lamar University - Beaumont Publicación	1%
4	Submitted to Universidad Andina Nestor Caceres Velasquez Trabajo del estudiante	1%
5	repositorio.ucv.edu.pe Fuente de Internet	1%
6	www.wireless1.com.au Fuente de Internet	1%
7	repositorio.unap.edu.pe Fuente de Internet	<1%
8	dspace.ups.edu.ec Fuente de Internet	<1%
9	www.uavis.sk Fuente de Internet	<1%
10	cda.gov.pk Fuente de Internet	<1%
11	repositorio.ucsm.edu.pe Fuente de Internet	<1%
12	Submitted to Universidad Católica de Santa María Trabajo del estudiante	<1%
13	Submitted to Universidad Nacional de Trujillo Trabajo del estudiante	<1%

DEDICATORIA

A mis padres, Elard y Jacqueline; a mi hermana, Alysson; y a toda mi familia, por ser el motor de mi vida y el refugio que siempre encontré en los momentos más difíciles. Gracias por su amor incondicional, su apoyo constante, sus consejos y por creer en mí. Este logro también les pertenece, porque cada paso que he dado ha sido posible gracias a ustedes.

A mi abuela paterna, Mery, quien desde el cielo guía mis pasos y permanece siempre en mi corazón. Su recuerdo y su amor serán siempre una fuente de fortaleza e inspiración.

A mi enamorada, Florencia, por su comprensión, paciencia y compañía incondicional durante este proceso. Gracias por alentarme a seguir adelante y por celebrar conmigo cada pequeño avance hasta alcanzar esta meta.

Aguilar Guzman, Franco Alexander.

A las personas que me acompañan desde el comienzo, mi madre, Hermelinda Pino, mi abuelita, Victoria Colque y mi tía, Estela Pino, quienes son el mayor ejemplo de perseverancia y responsabilidad que he conocido en mi vida y son la motivación para cada uno de mis logros, todo lo que soy y seré es por y para ustedes.

Al amor de mi vida, Karen Gonzales, quien me ha apoyado siempre sin importar lo que pasara y que siempre creyó en mí desde que nos conocemos.

A todos mis tíos, por ser cada uno un pilar diferente en mi formación y siempre apoyarme en todo lo que me he propuesto.

Yañez Pino, Robert Renato.

AGRADECIMIENTOS

A Dios, por darnos la fortaleza y perseverancia para culminar esta etapa de nuestra formación profesional.

A nuestros padres, por su apoyo incondicional, su sacrificio y su confianza en nosotros a lo largo de toda la carrera. Este logro es tan nuestro como de ellos.

A la Universidad Católica de Santa María, por darnos la formación académica y los valores que nos han convertido en profesionales comprometidos con el desarrollo de nuestra región.

A nuestra asesora, Dra. Garcia Godos Peñaloza, Luz Matilde, por su orientación, dedicación y exigencia durante el desarrollo de esta investigación.

Aguilar Guzman, Franco Alexander y Yañez Pino, Robert Renato

RESUMEN

La presente investigación tuvo como objetivo comparar la evaluación de la condición del pavimento flexible mediante el método convencional del Índice de Condición del Pavimento (PCI), conforme a la norma ASTM D6433-20, frente a una evaluación asistida por Sistemas de Aeronaves Pilotadas a Distancia (RPAS), aplicada en la Av. Perú, distrito de Cerro Colorado, Arequipa. El estudio abarcó 84 unidades de muestra, correspondientes a 42 tramos evaluados en ambos carriles, cada una de $45\text{ m} \times 7\text{ m}$. La evaluación convencional se realizó mediante inspección visual directa en campo, mientras que la evaluación asistida por RPAS empleó un dron DJI Mavic 3 Enterprise, procesamiento fotogramétrico en Pix4Dmapper con GSD de 1.5 cm/píxel, 8 puntos de control terrestre con corrección RTK ($\pm 2\text{ cm}$) y digitalización de fallas en AutoCAD. Los resultados mostraron un PCI promedio de 47 para el carril izquierdo y 45 para el derecho con el método convencional, frente a 55 y 52 respectivamente con el método RPAS, clasificando ambos carriles en condición Regular en los dos métodos. El análisis estadístico evidenció una correlación de rangos de Spearman muy fuerte ($r_s = 0.869$) y una diferencia media de -7.60 puntos según Bland-Altman, atribuible a las limitaciones de detección del RPAS: omisión del ahuellamiento, no detección de huecos de severidad baja y menor identificación de grietas finas. Se concluye que la evaluación asistida por RPAS resulta confiable para jerarquizar la condición del pavimento y priorizar intervenciones; sin embargo, no existe equivalencia numérica entre ambos métodos, pues el RPAS subestima los deterioros y sobreestima el PCI.

Palabras clave: Índice de Condición del Pavimento (PCI), RPAS, pavimento flexible.

ABSTRACT

This research aimed to compare the evaluation of flexible pavement condition using the conventional Pavement Condition Index (PCI) method, in accordance with ASTM D6433-20, against an evaluation assisted by Remotely Piloted Aircraft Systems (RPAS), applied on Av. Perú, Cerro Colorado district, Arequipa. The study covered 84 sample units, corresponding to 42 sections evaluated in both lanes, each measuring $45\text{ m} \times 7\text{ m}$. The conventional evaluation was performed through direct visual field inspection, while the RPAS-assisted evaluation employed a DJI Mavic 3 Enterprise drone, photogrammetric processing in Pix4Dmapper at a GSD of 1.5 cm/pixel, 8 ground control points with RTK correction ($\pm 2\text{ cm}$), and distress digitization in AutoCAD. The results showed an average PCI of 47 for the left lane and 45 for the right lane using the conventional method, compared to 55 and 52 respectively with the RPAS method, classifying both lanes in Fair condition under both approaches. Statistical analysis showed a very strong Spearman rank correlation ($r_s = 0.869$) and a mean difference of -7.60 points according to Bland-Altman, attributable to the detection limitations of the RPAS method: omission of rutting, non-detection of low-severity potholes, and reduced identification of fine cracks. It is concluded that the RPAS-assisted evaluation is reliable for ranking pavement condition and prioritizing interventions; however, there is no numerical equivalence between the two methods, as RPAS underestimates pavement distresses and consequently overestimates the PCI value.

Keywords: Pavement Condition Index (PCI), RPAS, flexible pavement.

ÍNDICE GENERAL

DEDICATORIA

AGRADECIMIENTOS

RESUMEN

ABSTRACT

INTRODUCCIÓN 1

CAPÍTULO I: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA 4

1.1. Problemática de la investigación..... 4

1.2. Justificación de la investigación..... 8

1.2.1. Justificación Tecnológica..... 8

1.2.2. Justificación Económica..... 8

1.2.3. Justificación Social..... 9

1.3. Formulación del problema 9

1.3.1. Problema general..... 9

1.3.2. Problemas específicos 10

1.4. Objetivos 10

1.4.1. Objetivo General 10

1.4.2. Objetivos Específicos..... 11

1.5. Hipótesis..... 11

1.5.1. Hipótesis General 11

1.5.2. Hipótesis Específicas..... 12

1.6. Alcances y Limitaciones 13

1.6.1. Alcances	13
1.6.2. Limitaciones	14
1.7. Viabilidad o presupuesto	15
1.7.1. Viabilidad Técnica y Tecnológica.....	15
1.7.2. Viabilidad Social	16
1.7.3. Viabilidad Económica	16
CAPÍTULO II: FUNDAMENTO TEÓRICO.....	17
2.1. Antecedentes de la investigación	17
2.1.1. Antecedentes internacionales	17
2.1.2. Antecedentes nacionales	22
2.2. Estado del Arte	24
2.3. Marco Legal	26
2.4. Bases teóricas	28
2.4.1. Carretera urbana	28
2.4.2. Pavimento flexible.....	28
2.4.3. Evaluación de fallas en pavimentos flexibles	29
2.4.4. RPAS (Remotely Piloted Aircraft System).....	49
2.4.5. Método PCI	61
2.5. Intervención según el estado del pavimento	68
CAPÍTULO III: METODOLOGÍA	71
3.1. Diseño, alcance y enfoque de la investigación.....	71

3.2. Variables.....	74
3.2.1. Independiente	74
3.2.2. Dependiente.....	74
3.3. Lugar de ejecución y materiales.....	78
3.3.1. Lugar de ejecución – Avenida Perú	78
3.3.2. Materiales e instrumentos utilizados	84
3.4. Población, muestra y muestreo.....	94
3.4.1. Población.....	94
3.4.2. Unidades de muestra	94
3.4.3. Tamaño de muestra	99
3.5. Método de evaluación PCI convencional.....	100
3.5.1. Personal de campo.....	100
3.5.2. Inspección de fallas en el campo.....	101
3.5.3. Tiempo de inspección.....	107
3.5.4. Rendimiento de inspección	107
3.5.5. Procedimiento de cálculo del PCI	108
3.6. Método de evaluación PCI asistido con RPAS	117
3.6.1. Planeación del vuelo.....	117
3.6.2. Ejecución del vuelo	123
3.6.3. Procesamiento de imágenes en Pix4Dmapper	129
3.6.4. Identificación y metrado de fallas en AutoCAD.....	142

3.7. Técnicas de análisis de datos.....	146
CAPÍTULO IV: RESULTADOS Y DISCUSIÓN	150
4.1. Descripción general de la vía evaluada	150
4.2. Valores del PCI por tramo – Convencional y RPAS	150
4.2.1. Carril izquierdo – Método convencional:.....	150
4.2.2. Carril derecho – Método convencional.	156
4.2.3. Condición global PCI convencional.....	160
4.2.4. Carril izquierdo – RPAS.	162
4.2.5. Carril derecho – RPAS.....	166
4.2.6. Condición global RPAS	171
4.3. Concordancia en la identificación y severidad de fallas	174
4.3.1. Tipos de fallas identificados por ambos métodos	174
4.3.2. Severidades asignadas	177
4.3.3. Diferencia de PCI por unidad de muestra	178
4.4. Eficiencia operativa – Tiempos y costos.....	183
4.4.1. Comparativo de tiempos.....	183
4.4.2. Análisis de costos	187
4.5. Cobertura, repetibilidad y seguridad operativa	188
4.5.1. Cobertura del levantamiento	188
4.5.2. Repetibilidad de las mediciones	188
4.5.3. Seguridad operativa del personal	189

4.6.	Equivalencia estadística y costo efectividad – Prueba SMART	190
4.6.1.	Prueba SMART	190
4.6.2.	Coeficiente de correlación de Spearman	196
4.6.3.	Prioridades de intervención.....	198
4.6.4.	Porcentaje de área por tipo de intervención	203
4.7.	DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS.....	206
4.7.1.	Equivalencia entre métodos	206
4.7.2.	Condición del pavimento evaluado	207
4.7.3.	Rendimiento operativo del método RPAS	209
4.7.4.	Precisión en la detección de fallas.....	210
4.7.5.	Perspectivas tecnológicas.....	212
	CAPÍTULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	213
5.1.	Conclusiones	213
5.2.	Recomendaciones.....	216
	REFERENCIAS.....	220

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Aplicaciones de los RPAS en inspección de pavimentos	51
Tabla 2. Tipo de intervención según el rango PCI.....	69
Tabla 3. Matriz de operacionalización de variables.....	75
Tabla 4. Características de la vía	80
Tabla 5. Equipos e instrumentos utilizados	84
Tabla 6. Especificaciones del RPAS DJI Mavic 3 Enterprise	86
Tabla 7. Carril izquierdo de la Av. Perú.	95
Tabla 8. Carril derecho de la Av. Perú.....	97
Tabla 9. Personal de campo	101
Tabla 10. Rendimiento de inspección	108
Tabla 11. Cuantificación de fallas y cálculo de densidad	110
Tabla 12. Valores deducidos obtenidos por falla.....	112
Tabla 13. Matriz iterativa de cálculo del Valor Deducido Corregido (VDC).....	114
Tabla 14. Rangos de clasificación del PCI según la condición del pavimento.....	115
Tabla 15. Área de estudio y polígono de vuelo.....	121
Tabla 16. Parámetros de vuelo configurados	122
Tabla 17. Puntos de control en tierra (GCP).....	123
Tabla 18. Personal de vuelo	126
Tabla 19. Equipos e instrumentos	127

Tabla 20. Condiciones meteorológicas del vuelo	128
Tabla 21. Rendimiento de ejecución de vuelo	128
Tabla 22. Configuración y productos de la Fase 2 – Nube de puntos densa en Pix4Dmapper	135
Tabla 23. Especificaciones técnicas de las ortofotos generadas por Pix4Dmapper.	137
Tabla 24. Sistema de codificación de las fallas del PCI en AutoCAD para la evaluación RPAS.....	146
Tabla 25. Carril izquierdo	151
Tabla 26. Carril derecho.....	156
Tabla 27. Resultados del PCI por unidad de muestra – Carril Izquierdo Método RPAS Av. Perú, Cerro Colorado, Arequipa 2025.....	163
Tabla 28. Resultados del PCI por unidad de muestra – Carril Derecho Método RPAS Av. Perú, Cerro Colorado, Arequipa 2025.....	167
Tabla 29. Resumen estadístico del PCI – Método RPAS Ambos carriles Av. Perú, Cerro Colorado, Arequipa 2025.....	171
Tabla 30. Deterioros de la norma ASTM D6433-20 no registrados en el tramo evaluado	175
Tabla 31. Comparación de metrados por tipo de deterioro Método Convencional vs. Método RPAS 	176
Tabla 30. Comparativo del PCI por unidad de muestra — Carril Izquierdo Método Convencional vs. Método RPAS Av. Perú, Cerro Colorado, Arequipa 2025	178

Tabla 31. Comparativo del PCI por unidad de muestra — Carril Derecho Método Convencional vs. Método RPAS Av. Perú, Cerro Colorado, Arequipa 2025	180
---	-----

Tabla 32. Comparativo de tiempos de ejecución en campo — Método Convencional vs. Método RPAS Av. Perú, Cerro Colorado, Arequipa 2025.....	184
--	-----

Tabla 33. Comparativo de tiempos de gabinete y totales del proceso — PCI Convencional vs. PCI RPAS.....	185
--	-----

Tabla 34. Coeficiente de correlación de Spearman entre PCI convencional y PCI RPAS.....	196
--	-----

Tabla 35. Prioridades de intervención según el PCI Convencional vs PCI RPAS – Carril izquierdo	199
---	-----

Tabla 36. Prioridades de intervención según el PCI Convencional vs PCI RPAS – Carril derecho.....	201
--	-----

Tabla 37. Porcentaje de área por tipo de intervención — Método Convencional vs. Método RPAS Ambos carriles.....	203
--	-----

Tabla 38. Porcentaje de área por tipo de intervención y por carril — Método Convencional	204
---	-----

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1	Diagrama del árbol de problemas.....	7
Figura 2.	Grietas por fatiga - severidad alta, según ASTM D6433	30
Figura 3.	Grietas de borde – severidad media, según ASTM D6433.	31
Figura 4.	Grietas longitudinales – severidad media, según ASTM D6433.	32
Figura 5	Grietas transversales – severidad alta, según ASTM D6433.	33
Figura 6.	Grietas en bloque – severidad media, según ASTM D6433.	34
Figura 7.	Grietas por deslizamiento – severidad media, según ASTM D6433.	35
Figura 8.	Grietas por reflexión de juntas – severidad media, según ASTM D6433..	36
Figura 9.	Ahuellamiento – severidad media, según ASTM D6433.....	37
Figura 10.	Depresiones – severidad alta, según ASTM D6433.....	38
Figura 11.	Abultamientos y ondulaciones – severidad media, según ASTM D6433.	39
Figura 12.	Ondulación – severidad media, según ASTM D6433.....	40
Figura 13.	Parcheos y cortes de servicios – severidad media, según ASTM D6433..	41
Figura 14.	Baches – severidad media, según ASTM D6433.....	42
Figura 15.	Desgaste y desintegración superficial – severidad media, según ASTM D6433.....	43
Figura 16.	Pulimiento de agregados, según ASTM D6433.....	44
Figura 17.	Caída del borde – severidad media, según ASTM D6433.	45

Figura 18. Exudación del ligante – severidad media, según ASTM D6433.....	46
Figura 19. Desplazamiento plástico – severidad media, según ASTM D6433.	47
Figura 20. Abultamiento o hinchamiento, según ASTM D6433.....	48
Figura 21. Clasificación del VANT	50
Figura 22. Aplicaciones de los RPAS en Ingeniería Civil.....	52
Figura 23. Partes del RPAS DJI Mavic 3 Enterprise	59
Figura 24. Escala de clasificación del PCI	62
Figura 25. Hoja de inspección PCI	63
Figura 26. Avenida de estudio	78
Figura 27. Vía de pavimento flexible	79
Figura 28. Plano de Localización de Av. Perú Cerro Colorado	81
Figura 29. Plano de Planimetría de Av. Perú – Cerro Colorado.....	82
Figura 30. Dron DJI Mavic 3.....	85
Figura 31. Detalles del sistema del computador tesista Aguilar Guzman	92
Figura 32. Detalles del sistema del computador tesista Yañez Pino	93
Figura 33. Inspección en campo	102
Figura 34. Parcheo de pavimento flexible	103
Figura 35. Inspección de grietas en pavimento flexible	104
Figura 36. Huecos en pavimento flexible	105
Figura 37. Hojas de inspección y catálogo de fallas.....	106

Figura 38. Curva de Valor deducido para falla de piel de cocodrilo en asfalto.....	110
Figura 39. Curva de Valor deducido para falla de grietas longitudinales y transversales en asfalto	111
Figura 40. Curva de Valor deducido para falla de desprendimiento de agregados en asfalto.....	111
Figura 41. Curva de corrección de Valores Deducidos — lectura del VDC en función de VDT y q.....	113
Figura 42. Hoja de inspección y registro de fallas muestra 01	116
Figura 43. Plan de vuelo de la avenida Perú.....	118
Figura 44. Medición de punto de control en tierra (GCP) con receptor GPS diferencial RTK sobre la Avenida Perú, Cerro Colorado	120
Figura 45 Ejecución del vuelo en la avenida Perú.....	124
Figura 46. Pantalla de monitoreo de vuelo	125
Figura 47 Configuración del proyecto en Pix4Dmapper para la evaluación del pavimento flexible	131
Figura 48 Quality Report – Procesamiento inicial de Pix4Dmapper.....	133
Figura 49. Ortofoto completa de la Avenida Peru	138
Figura 50. Modelo digital de Superficie (MDS).....	139
Figura 51. Ortofoto original con vehículo	141
Figura 52. Ortofoto limpia de interferencias	142
Figura 53. Identificación y metrado de fallas	145

Figura 54. Metodología a seguir en la investigación	149
Figura 55. PCI del carril izquierdo	153
Figura 56. Tendencia de PCI del carril izquierdo	154
Figura 57. PCI del carril derecho	158
Figura 58. Tendencia de PCI del carril derecho	159
Figura 59. Comparativo PCI carril izquierdo vs derecho	161
Figura 60. PCI promedio por carril.....	162
Figura 61. PCI carril izquierdo- Método RPAS	165
Figura 62. PCI carril derecho- Método RPAS	169
Figura 63. Tendencia PCI carril izquierdo vs derecho	172
Figura 64. PCI por UM izquierdo vs derecho.....	173
Figura 65. Diferencia absoluta $ \Delta PCI $ entre método convencional y RPAS por unidad de muestra	182
Figura 66. Comparativo de tiempos de ejecución entre métodos — Av. Perú, Cerro Colorado 2025.....	186
Figura 67. Diagrama de Bland-Altman - Diferencia entre PCI convencional y PCI RPAS por unidad de muestra Av. Perú, Cerro Colorado	194
Figura 68. Correlación PCI Convencional vs RPAS	197

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1. Ortofoto de la Av. Perú	227
Anexo 2. Fallas inspeccionadas en la Av. Perú mediante RPAS.....	228
Anexo 3. Hojas de inspección PCI diligenciadas en campo - Método Convencional	232
Anexo 4. Identificación de fallas de Carril izquierdo – Método PCI convencional vs RPAS.....	316
Anexo 5. Identificación de fallas de Carril derecho – Método PCI convencional vs RPAS.....	358
Anexo 6. Resumen de deterioros y cantidades por unidad de muestreo.....	400
Anexo 7. Plano PCI Convencional – Avenida Perú	411
Anexo 8. Plano PCI RPAS – Avenida Perú.....	422
Anexo 9. Reporte de calidad y precisión de puntos de control.....	433

INTRODUCCIÓN

Arequipa atraviesa un proceso acelerado de expansión urbana y crecimiento económico que ha puesto bajo presión la conservación de su red vial. El clima propio de la zona marcado por fuerte radiación solar, amplios cambios de temperatura y escasas lluvias acelera el deterioro de los pavimentos flexibles y obliga a intervenciones de mantenimiento más frecuentes y técnicamente sustentadas. Cerro Colorado, uno de los distritos con mayor expansión demográfica y comercial de la ciudad, no escapa a esta realidad. La Avenida Perú, corredor vial de gran relevancia dentro del distrito, articula el desplazamiento diario de miles de personas hacia zonas residenciales, comerciales y educativas al conectar distintas urbanizaciones. Sometida a un flujo vehicular constante y a las condiciones climáticas adversas mencionadas, esta vía muestra un deterioro progresivo que compromete tanto la seguridad de los usuarios como el funcionamiento adecuado del corredor.

Contar con una evaluación periódica del estado de esta infraestructura es indispensable para dirigir de manera oportuna y eficiente las labores de mantenimiento. Convencionalmente, esta labor se ejecuta mediante el método Pavement Condition Index (PCI), cuyo procedimiento consiste en una inspección visual directa en la que personal técnico identifica, clasifica y cuantifica los deterioros según su tipo, severidad y área afectada, siguiendo el procedimiento establecido en el estándar ASTM D6433-20. No obstante, este procedimiento convencional presenta limitaciones operativas relevantes: demanda tiempos de inspección prolongados en campo, expone al personal técnico a riesgos de seguridad vial y exige presencia física en una vía de tránsito constante, donde interrumpir la circulación sin afectar la movilidad urbana resulta complicado.

Frente a estas limitaciones, los Sistemas de Aeronaves Pilotadas Remotamente (RPAS) se han posicionado como una alternativa tecnológica capaz de capturar imágenes aéreas georreferenciadas del pavimento sin exponer al personal directamente al tráfico. Dichas imágenes pueden ser procesadas mediante técnicas fotogramétricas de Structure from Motion (SfM), generando ortomosaicos de alta resolución que facilitan identificar y medir las fallas superficiales, reduciendo así los tiempos de inspección en campo y mejorando las condiciones de seguridad del equipo evaluador.

El propósito de esta investigación es realizar una comparación integral entre la metodología PCI aplicada de manera convencional mediante inspección visual directa y el método PCI asistido con RPAS, para evaluar superficialmente las fallas del pavimento flexible en la Avenida Perú, distrito de Cerro Colorado, Arequipa 2025; dicha comparación trasciende el simple contraste de los valores numéricos del PCI obtenidos por cada método, pues abarca distintas dimensiones de análisis: la concordancia en la identificación y caracterización de las fallas, la eficiencia operativa en tiempo y costo, la cobertura espacial alcanzada, la repetibilidad de las mediciones, las condiciones de seguridad del personal técnico, y la equivalencia estadística de los resultados mediante la prueba SMART y el coeficiente de correlación de Spearman; con ello, se busca generar evidencia empírica que permita establecer la viabilidad técnica, operativa y económica de incorporar tecnología RPAS en la evaluación de pavimentos urbanos, aportando a la modernización de la gestión vial en Cerro Colorado y sirviendo de referencia para futuras aplicaciones en contextos similares.

Este trabajo se estructura en cinco capítulos: el Capítulo I aborda el planteamiento del problema, la justificación, los objetivos, la hipótesis y la viabilidad de la investigación; el Capítulo II desarrolla el sustento teórico antecedentes internacionales y nacionales, estado del arte, marco legal y bases teóricas sobre pavimento flexible, método PCI y sistemas RPAS; el Capítulo III detalla el diseño metodológico, el alcance, las variables, los materiales y el

procedimiento seguido en ambas metodologías de evaluación; el Capítulo IV presenta los resultados obtenidos con el método convencional y el asistido con RPAS para la Avenida Perú, Cerro Colorado, Arequipa 2025, junto con la discusión de los hallazgos frente a los antecedentes; y el Capítulo V recoge las conclusiones y recomendaciones del estudio.



CAPÍTULO I: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1. Problemática de la investigación

A escala mundial, la infraestructura vial constituye un eje central del desarrollo económico y la cohesión social, en la medida en que sostiene la movilidad de personas y bienes dentro de las ciudades. No obstante, el deterioro progresivo del pavimento resultado de la combinación de factores ambientales y operativos compromete de forma constante la durabilidad de las redes viales, ocasionando pérdidas económicas y un aumento de los siniestros de tránsito (Ibragimov et al., 2024), razón por la cual la evaluación periódica y sistemática del estado del pavimento se convierte en una tarea indispensable para garantizar la seguridad y eficiencia de los sistemas de transporte a nivel global.

Radwan et al. (2024) señalan que el Índice de Condición del Pavimento (PCI), concebido originalmente por el Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos, se ha convertido en el indicador de mayor reconocimiento internacional para cuantificar la condición funcional de los pavimentos, este índice se expresa en una escala de cero a cien, donde los valores más altos reflejan mejores condiciones de servicio; sin embargo, pese a su amplia implementación, su aplicación práctica enfrenta dificultades, especialmente en países en desarrollo donde los recursos técnicos y económicos son limitados.

La metodología tradicional para determinar el PCI se basa en inspecciones visuales minuciosas, que suponen identificar y clasificar los diecinueve tipos de fallas reconocidos en el pavimento según su severidad y magnitud. Este proceso demanda bastante tiempo, requiere personal técnico especializado, genera altos costos operativos y expone al equipo evaluador a posibles riesgos durante el trabajo de campo (Radwan et al., 2024).

A ello se suma que las agencias de transporte alrededor del mundo enfrentan fuertes restricciones presupuestarias para el mantenimiento de sus infraestructuras viales, en particular en zonas urbanas, donde las vías reciben menos atención que las carreteras interurbanas, lo que acelera su deterioro y exige intervenciones de rehabilitación más frecuentes.

Frente a estas limitaciones, los Sistemas de Aeronaves Pilotadas Remotamente (RPAS), comúnmente llamados drones o UAV, se perfilan como una alternativa tecnológica prometedora para evaluar el pavimento, diversos estudios han comprobado que los RPAS aportan ventajas significativas en eficiencia, seguridad y precisión frente a las inspecciones tradicionales; en particular, se indica que, al combinarse con algoritmos de aprendizaje profundo e inteligencia artificial, los drones logran precisiones de entre 95 % y 98 % en la identificación de fallas superficiales (Ibragimov et al., 2024).

Estas tecnologías emergentes, sustentadas en visión por computadora y redes neuronales convolucionales, hacen posible procesar ortofotos aéreas de alta resolución para detectar grietas y defectos del pavimento de manera automática, eliminando así los sesgos subjetivos del observador y reduciendo notablemente el tiempo de evaluación (Ibragimov et al., 2024), además la combinación de vehículos terrestres y drones ha arrojado resultados muy efectivos para inspeccionar grandes extensiones viales a menor costo y en menos tiempo.

En Latinoamérica, el deterioro prematuro de los pavimentos flexibles representa un desafío crítico, agravado por restricciones presupuestarias, deficiencias en la gestión vial y la falta de sistemas adecuados de registro del estado de las carreteras. Estas condiciones dificultan la detección temprana de daños y retrasan las gestiones de mantenimiento o rehabilitación, pese a que una gestión eficiente podría reducir de forma considerable la tasa de deterioro.

De acuerdo con Ministerio de Transportes y Comunicaciones del Perú (MTC, 2021), la infraestructura vial peruana atraviesa una situación particularmente preocupante: cerca del 33% de la red vial nacional se encuentra en condiciones regulares o deficientes; el Instituto Peruano de Economía atribuye esta situación principalmente a un mantenimiento inadecuado, lo que se traduce en elevados costos económicos para el país; además, señala que el tránsito de vehículos pesados y livianos se incrementó en 2,4 %, generando mayor congestión y acelerando el desgaste del pavimento ante la falta de control vehicular.

El deterioro de los pavimentos flexibles en las ciudades peruanas se ve agravado también por factores climáticos propios de cada región: heladas, radiación solar intensa y variaciones térmicas diarias favorecen el envejecimiento prematuro del asfalto, dando lugar a baches y grietas, estas condiciones ambientales, sumadas a la sobrecarga vehicular y al mantenimiento deficiente, generan un ciclo continuo de deterioro que compromete la sostenibilidad de la infraestructura vial del país.

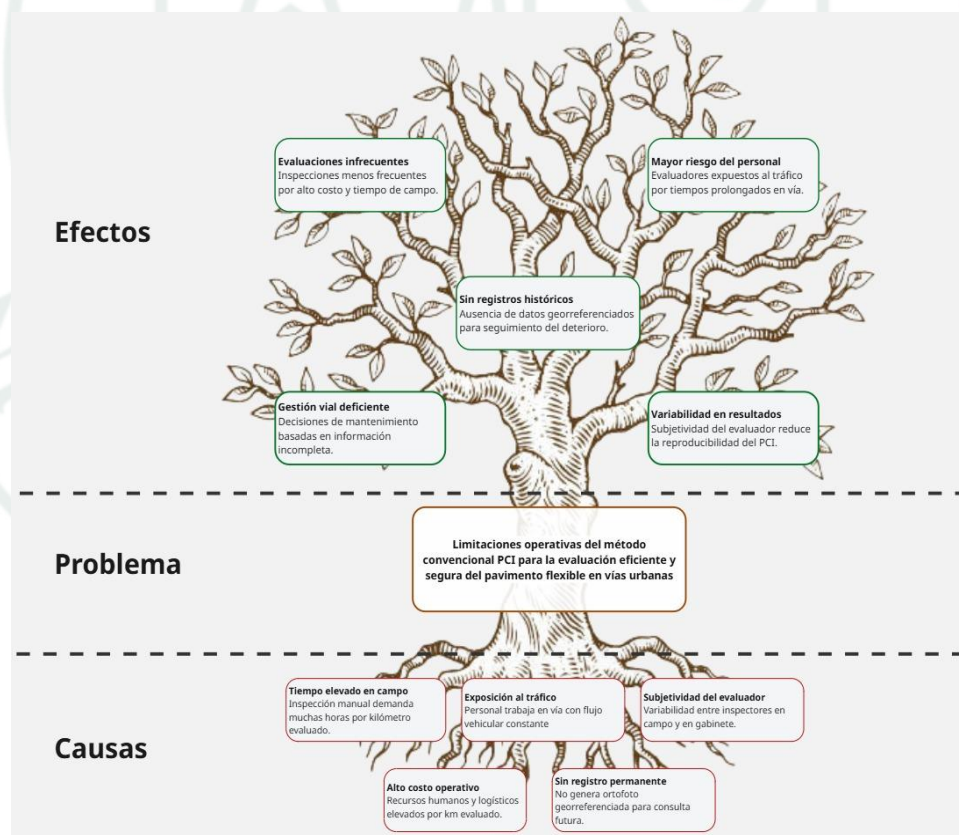
A pesar de la necesidad de modernizar la gestión del mantenimiento vial en el Perú, el empleo de tecnologías avanzadas continúa siendo limitado, pues la mayoría de las evaluaciones se sigue realizando mediante inspecciones manuales, lo que implica un alto consumo de recursos, resultados subjetivos y riesgos para el personal técnico, a esto se suma que los equipos automatizados especializados tienen costos que superan los quinientos mil dólares, cifra que resulta inalcanzable para la mayoría de los programas de gestión vial del país.

A nivel local, Arequipa enfrenta una problemática similar, en particular el distrito de Cerro Colorado, uno de los de mayor crecimiento urbano, donde el notable aumento del tránsito vehicular ha afectado negativamente el estado de sus vías, la Avenida Perú, arteria fundamental para la conectividad distrital, refleja con claridad esta situación.

El clima árido característico de Arequipa con alta radiación solar, variaciones térmicas extremas y precipitaciones mínimas acelera de forma significativa la degradación del pavimento flexible, panorama que se agrava por el tránsito continuo de vehículos de gran tonelaje vinculados a las actividades industriales y comerciales del distrito. Ante esta situación, resulta necesario realizar una evaluación técnica rigurosa del estado superficial del pavimento mediante metodologías normalizadas que permitan planificar de forma eficaz las estrategias de mantenimiento y rehabilitación vial. Por ello, este estudio busca identificar las distintas causas de las fallas presentes en la Avenida Perú, así como los efectos que estas generan sobre la población, como se aprecia en la Figura 1.

Figura 1

Diagrama del árbol de problemas



Nota. A partir de lo evaluado por el método PCI, se establece la conexión de los factores que originan la problemática y las consecuencias que se generan. Elaboración propia.

1.2. Justificación de la investigación

Para comprender los motivos que sustentan la realización de este trabajo de investigación, es necesario conocer las distintas variables que la justifican, las cuales se desarrollan a continuación.

1.2.1. Justificación Tecnológica

Incorporar ortofotos georreferenciadas obtenidas mediante RPAS supone un avance cualitativo respecto de la inspección convencional, ya que posibilita revisar y medir cada unidad de muestra desde gabinete con herramientas de medición precisas, disminuyendo la subjetividad propia de la identificación visual en campo.

Aplicar técnicas de procesamiento de ortofotos sobre datos capturados por RPAS permite detectar patrones de deterioro, identificar anomalías y analizar la condición del pavimento con mayor objetividad que la inspección manual, tal como señalan Zhou et al. (2023, p. 115).

Esta ventaja resulta particularmente valiosa para la Avenida Perú, donde la variabilidad en el tipo y distribución de las fallas entre carriles vuelve determinante la precisión de la medición para la confiabilidad del PCI calculado. A la vez, emplear el RPAS evita que el personal evaluador deba permanecer en la calzada durante la inspección, reduciendo considerablemente el riesgo de accidentes en una vía con tráfico urbano activo.

1.2.2. Justificación Económica

Identificar y evaluar tempranamente las fallas del pavimento permite plantear alternativas de intervención oportunas y adecuadas, evitando que fallas menores se conviertan en problemas mayores que exijan intervenciones costosas y prolongadas; en consecuencia, se logra un ahorro significativo en los costos de mantenimiento a lo largo del tiempo.

El empleo de metodologías de evaluación como el PCI (Índice de Condición del Pavimento), apoyadas en tecnología reciente como las ortofotos captadas por RPAS, permite optimizar la distribución de los recursos destinados a la conservación de la infraestructura vial, pues posibilita identificar con precisión las secciones más deterioradas de la Av. Perú y priorizar su intervención, evitando gastos innecesarios en zonas que no requieren atención inmediata.

1.2.3. Justificación Social

La evaluación de fallas tempranas en el pavimento flexible es crucial para asegurar la seguridad de la población y la totalidad de los bienes públicos y privados de quienes hacen uso de las vías terrestres (Mallick y El-Korchi, 2008); en esa línea, los autores sostienen que inspeccionar los pavimentos de forma rutinaria resulta clave para detectar y corregir oportunamente las fallas, reduciendo el riesgo de accidentes y los costos asociados a reparaciones de mayor envergadura.

Emplear tecnologías de vanguardia, como los drones aplicados al método PCI, puede elevar de forma considerable la precisión y eficiencia de las evaluaciones de fallas del pavimento. Según Astor et al. (2023), los drones son capaces de recopilar información detallada de la superficie del pavimento en tiempo real, lo que facilita una evaluación más específica y ágil de su condición.

1.3. Formulación del problema

1.3.1. Problema general

¿Cómo se comparan los valores del PCI obtenidos mediante el método convencional y el método asistido con RPAS al evaluar superficialmente las fallas del pavimento flexible de la avenida Perú, distrito de Cerro Colorado, Arequipa 2025?

1.3.2. Problemas específicos

- a) ¿Cuáles son las diferencias en los valores del PCI por tramo obtenidos mediante la inspección convencional y la asistida con RPAS para la evaluación superficial de las fallas del pavimento flexible de la avenida Perú, distrito de Cerro Colorado, Arequipa 2025?
- b) ¿Qué grado de concordancia existe entre la inspección convencional y la asistida con RPAS en la identificación, tipificación y severidad de las fallas del pavimento flexible de la avenida Perú, Cerro Colorado, Arequipa 2025?
- c) ¿Cuál es la eficiencia operativa de cada método (en términos de tiempo y costo) en la evaluación superficial de las fallas del pavimento flexible de la avenida Perú, Cerro Colorado, Arequipa 2025?
- d) ¿Qué diferencias existen entre ambos métodos en cuanto a la cobertura del levantamiento, la repetibilidad y la seguridad operativa del personal durante la evaluación superficial del pavimento flexible de la avenida Perú, Cerro Colorado, Arequipa 2025?
- e) ¿Existe equivalencia práctica y económica entre los valores de PCI obtenidos mediante inspección convencional y asistida con RPAS, considerando la evaluación estadística (SMART), para la avenida Perú, Cerro Colorado, Arequipa 2025?

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo General

Comparar el método PCI aplicado de forma convencional y el asistido con RPAS en la evaluación superficial de las fallas del pavimento flexible de la avenida Perú, distrito de Cerro Colorado, Arequipa 2025.

1.4.2. Objetivos Específicos

- a) Determinar las diferencias en los valores del PCI por tramo obtenidos mediante inspección convencional y asistida con RPAS para la evaluación superficial de las fallas del pavimento flexible de la avenida Perú, distrito de Cerro Colorado, Arequipa 2025.
- b) Evaluar el grado de concordancia que existe entre la inspección convencional y la asistida con RPAS en la identificación, tipificación y severidad de las fallas del pavimento flexible de la avenida Perú, Cerro Colorado, Arequipa 2025.
- c) Determinar la eficiencia operativa de cada método en términos de tiempos y costos para la evaluación superficial de las fallas del pavimento flexible de la avenida Perú, Cerro Colorado, Arequipa 2025.
- d) Determinar las diferencias entre ambos métodos en cuanto a la cobertura del levantamiento, la repetibilidad y la seguridad operativa del personal durante la evaluación superficial del pavimento flexible de la avenida Perú, Cerro Colorado, Arequipa 2025.
- e) Determinar la equivalencia práctica y económica entre los valores de PCI obtenidos mediante inspección convencional y asistida con RPAS, mediante la evaluación estadística SMART, para la evaluación superficial del pavimento flexible de la Avenida Perú, Cerro Colorado, Arequipa 2025.

1.5. Hipótesis

1.5.1. Hipótesis General

Al comparar el método PCI convencional con el asistido por RPAS para evaluar superficialmente las fallas del pavimento flexible de la avenida Perú, distrito de Cerro Colorado, Arequipa 2025, se evidencian diferencias operativas y técnicas en tiempos y costos, además de una mayor cobertura del levantamiento y una menor exposición al riesgo por parte del personal.

1.5.2. Hipótesis Específicas

- a) Los valores de PCI por tramo obtenidos mediante inspección convencional y asistida con RPAS no presentan diferencias estadísticamente significativas en la evaluación superficial de las fallas del pavimento flexible de la avenida Perú, distrito de Cerro Colorado, Arequipa 2025.
- b) Existe concordancia significativa entre el método convencional y el asistido con RPAS en la identificación, tipificación y severidad de las fallas del pavimento flexible de la avenida Perú, Cerro Colorado, Arequipa 2025.
- c) El método asistido con RPAS presenta mayor eficiencia operativa en términos de tiempos y costos comparado con el método convencional para la evaluación superficial de las fallas del pavimento flexible de la avenida Perú, Cerro Colorado, Arequipa 2025.
- d) El método asistido con RPAS presenta mayor cobertura del levantamiento, mejor repetibilidad de las mediciones y menor tiempo de exposición al tráfico vehicular comparado con el método convencional, para la evaluación superficial del pavimento flexible de la Avenida Perú, Cerro Colorado, Arequipa 2025.
- e) Los valores de PCI obtenidos mediante inspección convencional y asistida con RPAS presentan equivalencia práctica y económica, verificada mediante la evaluación estadística SMART, para la evaluación superficial del pavimento flexible de la Avenida Perú, Cerro Colorado, Arequipa 2025.

1.6. Alcances y Limitaciones

1.6.1. Alcances

Esta investigación plantea una evaluación comparativa entre dos metodologías empleadas para determinar el Índice de Condición del Pavimento (PCI): el método convencional, sustentado en el reconocimiento visual in situ, y el método asistido mediante RPAS. Ambas se aplican sobre pavimentos flexibles en un entorno urbano, específicamente en la Avenida Perú, ubicada en Cerro Colorado, provincia y departamento de Arequipa, vía que constituye un corredor urbano principal con tránsito vehicular constante y características representativas de la infraestructura vial local.

Se toman en cuenta aspectos como la comparación de los valores de PCI por tramo, la capacidad de identificación y clasificación de fallas, el análisis de los niveles de severidad, la eficiencia operativa en tiempo y costo, la cobertura espacial lograda, la repetibilidad de las mediciones, la seguridad del personal durante el trabajo de campo y la equivalencia estadística de los resultados mediante la prueba SMART.

Este enfoque busca generar evidencia técnica que respalde la viabilidad de emplear RPAS como una alternativa eficiente, segura y económicamente conveniente frente al procedimiento tradicional definido en la norma ASTM D6433-20 para evaluar el pavimento flexible.

El análisis comprende las diecinueve categorías de fallas superficiales definidas en la metodología PCI para pavimentos asfálticos y se centra en comparar los resultados técnicos y operativos de ambos métodos, sin que esto suponga desarrollar un nuevo protocolo de evaluación ni crear un software específico para el procesamiento automatizado de fallas.

1.6.2. Limitaciones

Una de las principales limitaciones del estudio fue la ausencia de una normativa específica que regule el uso de RPAS en la evaluación de pavimentos, lo que hizo necesario adaptar los criterios técnicos de vuelo, captura y procesamiento fotogramétrico a las condiciones locales. No obstante, dichas adaptaciones se realizaron conforme a estándares internacionales y procedimientos de control de calidad que garantizan la confiabilidad de los resultados.

Desde el punto de vista técnico, el método PCI conforme a la norma ASTM D6433-20 exige registrar, para cada falla, su tipo, nivel de severidad y magnitud o extensión. El método asistido con RPAS empleado en esta investigación permite registrar de forma confiable el tipo de falla y su magnitud superficial mediante la medición sobre el ortomosaico, con un GSD de 1.5 cm/píxel. Sin embargo, en fallas cuya severidad depende de mediciones de profundidad — como el ahuellamiento, las depresiones y los baches—, el registro mediante imagen aérea con sensor RGB presenta limitaciones, dado que la cámara no captura información tridimensional con la precisión necesaria para cuantificar profundidades milimétricas.

En estos casos, la clasificación de severidad se determinó mediante criterios visuales sobre la ortofoto, complementados con verificación en campo durante la fase de inspección convencional; se trata de una limitación reconocida que no afectó los resultados, dados los tipos de falla predominantes registrados en la Avenida Perú. En cuanto al método convencional, las inspecciones se realizaron en horarios de baja afluencia vehicular, con el fin de minimizar riesgos y garantizar la continuidad del levantamiento, manteniendo condiciones aceptables de seguridad y visibilidad.

Finalmente, los resultados obtenidos corresponden a las condiciones particulares del pavimento flexible de la Avenida Perú, distrito de Cerro Colorado, durante el año 2025, por lo que su aplicación a otros contextos debe considerar las diferencias en características geométricas, tráfico y clima.; sin embargo, la metodología aplicada y los criterios comparativos utilizados constituyen una base sólida para futuras investigaciones en escenarios similares.

1.7. Viabilidad o presupuesto

La ejecución de esta investigación resultó plenamente viable, logrando cumplir con todos los objetivos planteados mediante la aplicación exitosa de ambas metodologías para la evaluación del PCI. Tanto el método convencional como el asistido con RPAS se implementaron satisfactoriamente en la Avenida Perú, distrito de Cerro Colorado, obteniéndose los datos necesarios para efectuar la comparación propuesta. A continuación, se detalla la viabilidad del proyecto en sus dimensiones técnica, social y económica:

1.7.1. Viabilidad Técnica y Tecnológica

Esta investigación es técnicamente factible gracias a la disponibilidad y accesibilidad de la tecnología RPAS, fundamental para la captura de ortofotos aéreas de alta resolución., durante el trabajo de campo, el vuelo a 20 metros de altura permitió obtener ortofotos de excelente calidad, sin interferencias por cables u otros elementos urbanos; las condiciones de iluminación favorables y la ausencia de sombras garantizaron capturas nítidas y precisas para identificar las fallas superficiales; en tanto que la metodología convencional demostró ser igualmente ejecutable, aportando datos de referencia confiables mediante inspección visual directa.

1.7.2. Viabilidad Social

La investigación resulta factible en el ámbito social, ya que minimiza las interrupciones al tráfico vehicular y reduce los riesgos para el personal técnico, comenzando por la metodología asistida con RPAS, que permite realizar inspecciones sin cerrar carriles ni exponer a los evaluadores a la circulación vehicular, beneficiando directamente a los usuarios de la Avenida Perú al evitar congestiones.

1.7.3. Viabilidad Económica

Para aplicar el método PCI asistido por RPAS se requirió de un dron; obtener este equipo resultó viable dado que actualmente existen distintas empresas que ofrecen servicios de alquiler, y los investigadores pudieron cubrir de manera adecuada los gastos necesarios para la obtención de las ortofotos presentadas en este trabajo.

CAPÍTULO II: FUNDAMENTO TEÓRICO

2.1. Antecedentes de la investigación

2.1.1. Antecedentes internacionales

En los últimos años, la búsqueda de alternativas tecnológicas para la evaluación de pavimentos ha impulsado diversas investigaciones que exploran el uso de RPAS como herramienta complementaria o sustituta de la inspección visual convencional, aunque el campo aún se encuentra en consolidación, los estudios disponibles ofrecen evidencia suficiente para sustentar la viabilidad de la metodología empleada en el presente estudio.

Berríos O. et al. (2020), en su estudio realizado en El Salvador, compararon la evaluación superficial del pavimento mediante VANT frente al método PCI convencional, abordando uno de los problemas más persistentes de la inspección tradicional: la variabilidad entre inspectores y la subjetividad al clasificar severidades. Los autores comprobaron que emplear imágenes aéreas procesadas fotogramétricamente reduce esta variabilidad, al aportar una fuente de datos objetiva y reproducible; los resultados obtenidos fueron equivalentes entre ambos métodos, lo que constituye un precedente directo para la hipótesis de equivalencia verificada en esta investigación.

Pucha y Zárate (2020) evaluaron un tramo de la carretera Catamayo - San Pedro de la Bendita, en Ecuador, empleando ortofotos generadas por VANT junto con la metodología PCI, sobre una vía de pavimento rígido. Analizaron 17 unidades de muestra e identificaron 185 losas con algún nivel de deterioro de un total de 340, siendo las grietas lineales la falla predominante; al comparar las mediciones obtenidas desde la ortofoto con las mediciones manuales en campo se observaron diferencias mínimas, y el software Pix4Dmapper demostró precisión en la georreferenciación a partir de los puntos de control. Si bien el estudio se desarrolló sobre pavimento rígido, su aporte a esta investigación radica en que confirma la aplicabilidad del

flujo fotogramétrico RPAS-Pix4D como metodología de medición de fallas, independientemente del tipo de pavimento evaluado.

Astor et al. (2023), en un artículo publicado en la revista *Transportation Engineering*, evaluaron 69 deterioros mediante el método PCI y 15 mediante el índice SDI sobre un mismo tramo vial. La diferencia en el número de deterioros detectados entre ambos métodos se atribuyó principalmente a la oclusión de fallas por vegetación y vehículos en circulación durante el vuelo, limitación operativa que también se presentó en la presente investigación y que fue gestionada mediante verificación complementaria en campo; la precisión del modelo fotogramétrico respecto de las mediciones manuales osciló entre 75% y 98%, rango que respalda la confiabilidad del método RPAS para inspecciones de pavimento.

Peddinti et al. (2023) abordaron el problema del monitoreo ineficiente de pavimentos mediante métodos tradicionales, señalando que su lentitud y propensión al error los vuelve inadecuados para una gestión vial moderna. Propusieron el empleo de UAV equipados con distintos sensores como solución para capturar datos del estado del pavimento de forma rápida y sistemática, con capacidad de detectar tempranamente baches y grietas antes de que se conviertan en deterioros estructurales mayores, el estudio concluye que los UAV representan una herramienta prometedora para la gestión de infraestructura vial, gracias a su capacidad de cubrir grandes superficies en poco tiempo, argumento que coincide con los resultados de rendimiento operativo obtenidos en la Avenida Perú.

Fernández D. et al. (2021) realizaron una comparación directa entre Agisoft PhotoScan y Pix4Dmapper para generar ortomosaicos y detectar fallas en pavimento flexible mediante VANT, aporte especialmente relevante para esta investigación dado que Pix4Dmapper fue el software utilizado en el procesamiento fotogramétrico. Los autores encontraron que Pix4Dmapper ofrece mayor eficiencia en el procesamiento de imágenes, con menores tiempos y archivos de menor tamaño, además de una superposición de alta calidad, aunque con algunas diferencias de traslape en los márgenes que no afectan la detección de defectos, los resultados no mostraron variaciones estadísticamente relevantes en los errores de medición entre ambos programas, lo que respalda la elección de Pix4Dmapper como herramienta de procesamiento en la metodología RPAS de esta investigación.

Ortega Rengifo et al. (2024) plantearon el uso de sistemas VANT equipados con sensores avanzados para superar las limitaciones de eficiencia y precisión de métodos convencionales como el PCI y el VIZIR. Su investigación demostró que los datos obtenidos mediante UAV permiten una evaluación más objetiva de los indicadores de condición del pavimento, incrementando el rendimiento operativo y reduciendo los gastos de ejecución, la conclusión de que el uso de UAS optimiza los recursos destinados a la evaluación vial respalda la justificación económica de la metodología comparativa desarrollada en esta investigación.

Roberts et al. (2020) exploraron el modelado 3D mediante UAV para el monitoreo continuo de pavimentos, destacando que estos modelos tridimensionales, generados a partir de imágenes aéreas, facilitan identificar con alta precisión grietas, baches y deformaciones desde múltiples ángulos, algo que la inspección visual directa no permite, este enfoque evidencia que la fotogrametría RPAS no solo replica la información obtenida mediante el método convencional, sino que la complementa con datos tridimensionales que amplían las posibilidades de análisis del estado estructural del pavimento.

Pietersen et al. (2022) desarrollaron una herramienta autónoma de evaluación PCI para aeródromos montada sobre un dron, demostrando que es técnicamente posible automatizar la recopilación de imágenes y el cálculo del índice de condición sin intervención humana directa en campo. Si bien el contexto de aplicación difiere del de una vía urbana, esta investigación aporta evidencia sobre la escalabilidad del método fotogramétrico para distintos tipos de infraestructura vial y anticipa una evolución hacia sistemas de inspección automatizada que combinan UAV con software de procesamiento especializado.

Chen et al. (2024) presentaron un marco integral para evaluar grietas en pavimentos mediante UAV que combina la adquisición aérea de imágenes, el procesamiento con aprendizaje profundo y el cálculo del PCI. El estudio se llevó a cabo en una carretera de ocho carriles en China, empleando un dron DJI Mini 2 a 22.5 metros de altura y procesando 1,388 imágenes clasificadas en cuatro tipos de grietas. El modelo Faster R-CNN alcanzó una precisión de 79.3% de mAP, con un PCI calculado de 61.28 para la sección evaluada. Los autores resaltaron que la altura de vuelo, la velocidad y el GSD son parámetros determinantes para la calidad de las ortofotos y la precisión de los algoritmos, hallazgo que respalda los parámetros de vuelo configurados en esta investigación para garantizar un GSD de 1.5 cm/píxel.

Samadzadegan et al. (2023), según lo citado en Chen et al. (2024), estudiaron el reconocimiento automático de grietas en carreteras mediante la red YOLOv4 aplicada a imágenes UAV, obteniendo resultados aceptables bajo distintas condiciones de iluminación y altitud. Sus hallazgos posicionan la combinación de redes de aprendizaje profundo con imágenes UAV como una metodología prometedora para la inspección automatizada, que a futuro podría reducir de forma significativa el tiempo de digitalización manual, actualmente una de las principales limitaciones del método RPAS empleado en esta investigación.

Zhu et al. (2022), citados igualmente en Chen et al. (2024), compararon tres algoritmos de redes neuronales convolucionales Faster R-CNN, YOLOv3 y YOLOv4 para la detección automática de deterioros superficiales mediante imágenes capturadas con UAV, determinando que YOLOv3 resultó el más eficiente, con un 56.6% de mAP (mean Average Precision), superando a los otros dos modelos tanto en precisión de detección como en velocidad de procesamiento, lo que resulta especialmente relevante cuando se busca automatizar la evaluación de grandes longitudes de vía. Los autores destacaron que esta ventaja no solo respondía a la arquitectura del modelo, sino también a la calidad de los datos de entrada, señalando que variables operativas del vuelo —como la altura y la velocidad de captura inciden directamente en la nitidez, resolución y nivel de detalle de las ortofotos generadas, y por tanto en la capacidad del algoritmo para identificar correctamente patologías de menor escala, como fisuras finas o pérdidas puntuales de agregado. Este hallazgo refuerza la importancia del protocolo de planificación de vuelo adoptado en la presente investigación, en la que se seleccionaron una altitud de 30 m y un traslape del 80% con el propósito de optimizar la resolución espacial del ortomosaico y minimizar la pérdida de información en las etapas posteriores de procesamiento fotogramétrico.

Jiang et al. (2023), citados en Chen et al. (2024), desarrollaron el algoritmo RDD-YOLOv5, que incorpora mecanismos de autoatención al modelo YOLOv5 base, alcanzando una precisión de 91.48% de mAP en la detección de defectos viales mediante imágenes UAV. Esta mejora resulta especialmente relevante para detectar grietas pequeñas en condiciones de iluminación variable, situaciones frecuentes en vías urbanas como la Avenida Perú. Sus resultados anticipan que la digitalización manual actualmente realizada en AutoCAD podría automatizarse con algoritmos de este tipo, reduciendo el tiempo total del proceso RPAS por debajo del requerido por el método convencional.

2.1.2. Antecedentes nacionales

En el ámbito nacional, el análisis del estado superficial de los pavimentos asistido por RPAS ha comenzado a abrirse paso en investigaciones universitarias de distintas regiones del país, conformando un conjunto de antecedentes directamente comparables con las condiciones de la Avenida Perú.

Cárdenas Resines et al. (2023) realizaron un análisis bibliométrico exhaustivo de 31 publicaciones científicas publicadas entre 2007 y 2023, orientadas a la detección y caracterización de deterioros en pavimentos flexibles. Sus hallazgos establecieron que integrar técnicas fotogramétricas con algoritmos de redes neuronales constituye la alternativa tecnológica de mayor precisión y eficiencia, por su capacidad de detección y clasificación detallada de fallas con bajo costo de procesamiento y alta velocidad. Este estudio resulta especialmente relevante para la presente investigación porque delimita el estado del arte de las metodologías disponibles en el periodo en que fue concebida, confirmando que el enfoque fotogramétrico con RPAS se ubica en la frontera del conocimiento técnico aplicado en el país.

Paredes Asalde y Torres Alcántara (2022 como se citaron en Rodríguez Triviño et al., 2024), evaluaron el pavimento de un tramo de la carretera Reposo - Saramiriza, en Bagua, Amazonas, combinando PCI y VIZIR con captura fotogramétrica mediante drones en una vía de difícil acceso. Los resultados confirmaron que la evaluación con RPAS complementa de forma efectiva los métodos tradicionales, permitiendo una representación más completa del estado del pavimento en zonas donde la inspección presencial implica riesgos para el personal. La conclusión de que una documentación fotogramétrica precisa optimiza los tiempos de inspección y mejora la seguridad de los evaluadores frente al tráfico coincide con las condiciones operativas que motivaron el uso del RPAS en la avenida Perú.

Arroyo y Cervantes (2023) evaluaron el pavimento flexible de un tramo entre el Empalme PE-1S y el Empalme PE-28, en Paracas, Pisco, aplicando PCI y VIZIR con drones sobre una vía costera de características climáticas distintas a las de Arequipa. Lo más relevante para esta investigación es que los autores comprobaron que los índices calculados a partir de imágenes georreferenciadas resultan confiables para sustentar acciones de conservación vial, y que la metodología UAV permite documentar en detalle las condiciones para análisis comparativos futuros. Este último punto coincide con una de las ventajas diferenciales identificadas en la presente investigación: la ortofoto georreferenciada constituye un registro permanente que el método convencional no permite obtener.

Espinoza Cordova (2023) aplicó el método PCI asistido por drones en la Avenida Huancavelica, en Huancayo, vía urbana con características de tráfico mixto comparables a las de la Avenida Perú. Los resultados mostraron valores de PCI distribuidos en múltiples categorías a lo largo de la vía, con predominio de fallas tipo piel de cocodrilo, grietas y baches; el autor concluyó que la evaluación con RPAS resulta eficaz para vías urbanas peruanas, al aportar datos objetivos y reducir el tiempo de ejecución respecto de la metodología manual. La similitud entre el contexto de ese estudio y el de la presente investigación permite establecer una comparación directa que fortalece la pertinencia del planteamiento metodológico seleccionado.

Fiestas León y Merino Rodríguez (2020) calcularon el PCI del pavimento flexible de la avenida Don Bosco, en Piura, mediante drones, con el fin de agilizar los procesos de inspección en una vía urbana con deterioros superficiales variados. Sus resultados confirmaron que las imágenes aéreas facilitan el análisis posterior y el seguimiento de la evolución del deterioro, y que la metodología mejora la seguridad de los evaluadores al reducir su exposición directa al tráfico, esta disminución del riesgo operativo constituye uno de los argumentos

centrales que justifican el uso del método RPAS en la Avenida Perú, donde el tráfico vehicular constante representa una amenaza concreta para los evaluadores de campo.

Lizana Yarlequé (2021) evaluó el pavimento flexible de la avenida Grau, en el distrito de Castilla, Piura, aplicando el método PCI convencional según la norma ASTM D6433 en aproximadamente 2,800 metros de vía, sin apoyo de RPAS. Aunque su metodología es exclusivamente convencional, este antecedente aporta a la presente investigación al documentar el procedimiento estándar de inspección visual en vías urbanas peruanas, confirmando que los tiempos de ejecución, el tipo de fallas identificadas y la variabilidad de los resultados por tramo son consistentes con los obtenidos en la Avenida Perú mediante el método convencional.

2.2. Estado del Arte

El avance de las tecnologías de captura y procesamiento de imágenes ha impulsado en los últimos años una línea de investigación orientada a modernizar la evaluación de pavimentos, superando las limitaciones operativas de la inspección ocular in situ. En este contexto, diversas investigaciones han explorado la aplicación del Índice de Condición del Pavimento mediante metodologías asistidas tecnológicamente, con resultados que respaldan su viabilidad técnica.

Desde la perspectiva de la gestión vial, los estudios centrados en adaptar el PCI a carreteras locales han demostrado que es posible ajustar la metodología estándar a contextos específicos sin perder precisión, siempre que los criterios de clasificación y cuantificación de fallas se mantengan alineados con la norma ASTM D6433. En esa misma línea, investigaciones sobre mantenimiento de pavimentos flexibles han establecido correlaciones entre los valores del PCI y la vida útil residual del pavimento, aportando criterios técnicos para priorizar intervenciones según el nivel de deterioro de cada tramo.

La comparación entre distintos métodos de cálculo del PCI ha mostrado, además, que la coherencia de los resultados depende más del rigor del protocolo de inspección que del método de cálculo empleado.

La incorporación de aeronaves no tripuladas en los procesos de reconocimiento vial ha ganado terreno como alternativa concreta frente a la evaluación presencial. Investigaciones que combinan el PCI con visión artificial y redes neuronales han demostrado que el análisis automatizado de imágenes captadas por RPAS permite detectar patrones de deterioro con alta precisión y en menor tiempo que la inspección manual. Estudios específicos sobre fotogrametría basada en RPAS aplicada a la ingeniería civil han validado la generación de ortomosaicos georreferenciados como insumo confiable para medir fallas superficiales, señalando que un GSD inferior a 2 cm/píxel es condición necesaria para identificar fisuras relevantes para el cálculo del PCI, estándar que la presente investigación cumple con el GSD de 1.5 cm/píxel obtenido en ambos carriles de la Avenida Perú.

La inspección de infraestructuras mediante RPAS ha demostrado, además, ventajas concretas para analizar estructuras de difícil acceso, como puentes, muros de contención y taludes, donde la cobertura aérea permite obtener datos que la inspección presencial no lograría captar con seguridad ni eficiencia. Si bien la Avenida Perú no presenta este tipo de restricciones de acceso, sí exhibe una condición crítica de exposición al tráfico que convierte a la evaluación aérea en una alternativa con ventajas reales de seguridad operativa para el personal evaluador. En conjunto, este cuerpo de investigaciones configura el sustento técnico sobre el cual se basa la metodología comparativa desarrollada en el presente estudio.

2.3. Marco Legal

Esta investigación se enmarca dentro de un contexto normativo que regula tanto la infraestructura vial como el uso del espacio aéreo en el Perú, por lo que resulta necesario identificar los instrumentos legales y técnicos que le otorgan sustento jurídico y metodológico.

- La Constitución Política del Perú establece el derecho de los ciudadanos a contar con infraestructura pública adecuada y segura, estableciendo la obligación del Estado de mantener en condiciones operativas las vías de uso público. Esto fundamenta jurídicamente la necesidad de realizar evaluaciones técnicas periódicas de vías urbanas como la Avenida Perú, cuyo estado afecta directamente la movilidad y seguridad de los habitantes del distrito de Cerro Colorado.
- La Ley General de Transporte y Tránsito Terrestre (Ley N° 27181) define los lineamientos que orientan la administración de la red vial y la obligación de las autoridades municipales de conservar las vías comprendidas en su ámbito territorial. Bajo este marco normativo, los valores del PCI determinados en este estudio representan un insumo técnico de aplicación directa para que la Municipalidad Distrital de Cerro Colorado respalde sus decisiones de intervención en la Avenida Perú mediante parámetros objetivos y medibles.
- La Ley de Contrataciones del Estado (Ley N° 30225) resulta aplicable en la medida en que los resultados de este estudio pueden emplearse como sustento técnico en procesos de contratación de obras de conservación vial, al ofrecer una descripción pormenorizada de las condiciones actuales del pavimento y una jerarquización de intervenciones sustentada en los valores del PCI por segmento evaluado. Asimismo, la normativa ambiental vigente (Ley N° 28611) resulta aplicable a las operaciones aéreas del RPAS, las cuales deben ajustarse a las

regulaciones sobre ruido, emisiones y privacidad establecidas para el espacio aéreo urbano, condición que fue atendida durante la planificación y ejecución del vuelo conforme a la normativa peruana RG 09-2015 de la DGAC.

- El Reglamento Nacional de Tránsito regula las condiciones bajo las cuales se puede operar en vías públicas con fines de inspección técnica, incluyendo los protocolos de señalización y control de tráfico requeridos durante el trabajo de campo, que fueron implementados en ambas jornadas de inspección convencional para asegurar la seguridad del equipo evaluador y del usuario de la vía.
- El Manual de Carreteras: Suelos, Geología, Geotecnia y Pavimentos – Sección Suelos y Pavimentos, aprobado por el Ministerio de Transportes y Comunicaciones (MTC), constituye un documento técnico normativo de aplicación obligatoria para la gestión de la infraestructura vial en el Perú; su finalidad es proporcionar criterios y lineamientos técnicos homogéneos para el estudio, diseño, construcción, rehabilitación y conservación de pavimentos, considerando aspectos relacionados con los suelos, materiales, tránsito, clima y drenaje. Asimismo, establece procedimientos y metodologías que permiten garantizar la estabilidad estructural, funcionalidad y desempeño de los pavimentos, contribuyendo a una adecuada planificación y gestión de la infraestructura vial del país.

2.4. Bases teóricas

2.4.1. Carretera urbana

- Las carreteras urbanas se encuentran dentro de las ciudades y áreas urbanas de Perú, estas vías de tránsito incluyen calles, avenidas y bulevares, y están diseñadas para facilitar el tráfico urbano, el acceso a los servicios y el transporte público. (Ministerio de Transportes y Comunicaciones del Perú (MTC), 2021)

La planificación, construcción y mantenimiento de las carreteras urbanas corresponde a los gobiernos locales y municipios, las cuales pueden presentar diferentes características carriles múltiples, carriles exclusivos para transporte público, ciclovías y aceras peatonales según las necesidades de movilidad de cada ciudad. (Gobierno Regional de Arequipa, s/f)

2.4.2. Pavimento flexible

El pavimento de tipo flexible constituye una estructura vial conformada por estratos de materiales de comportamiento deformable, diseñados para absorber y distribuir las solicitudes provenientes del tránsito vehicular; capas sucesivas que incluyen:

- Capa de rodadura: Siendo la capa superior del pavimento y está diseñada para proporcionar una superficie de rodamiento lisa y resistente al desgaste. Generalmente está compuesta por una mezcla asfáltica.
- Capa base: Otorga soporte estructural para el pavimento y distribuye cargas del tráfico a las capas inferiores. Normalmente está compuesta por material granular o estabilizado.
- Capa sub-base: Se halla debajo de la capa base y proporciona una base sólida para el pavimento. Puede ser de material estabilizado o granular.
- Subrasante: Es el suelo o la capa de suelo natural sobre la cual se construye el pavimento.

2.4.3. Evaluación de fallas en pavimentos flexibles

El monitoreo periódico de los pavimentos flexibles constituye uno de los pilares fundamentales dentro de los sistemas de gestión vial, pues permite determinar de manera objetiva el estado actual de la estructura, anticipar su evolución en el tiempo y definir con criterio técnico las estrategias de mantenimiento o rehabilitación más adecuadas. Sin un proceso de evaluación sistemático, las decisiones de intervención tienden a basarse en criterios subjetivos o reactivos, lo que a mediano plazo eleva los costos de conservación y acelera la pérdida de vida útil del pavimento; por ello, reconocer, tipificar y cuantificar los distintos modos de deterioro superficial constituye el punto de partida de un diagnóstico técnico confiable, que sustenta la toma de decisiones dentro de cualquier sistema de gestión vial (Chu et al., 2022).

Los pavimentos flexibles, conformados típicamente por una carpeta asfáltica que descansa sobre capas granulares y la subrasante, experimentan fallas que pueden clasificarse en dos grandes grupos según su origen, por un lado, están las fallas estructurales, originadas generalmente por deficiencias de diseño, de materiales o por cargas superiores a las previstas, que comprometen la capacidad portante del sistema y la integridad interna de sus capas constitutivas; al afectar la estructura en su conjunto, suelen ser las más críticas si no se interviene oportunamente. Por otro lado, están las fallas de tipo funcional, las cuales, sin comprometer necesariamente la capacidad estructural del pavimento, inciden directamente en las condiciones de la superficie de rodadura; este grupo de deterioros afecta la calidad del contacto entre el pavimento y los vehículos, disminuye el confort de los usuarios durante la circulación y puede llegar a comprometer la seguridad vial, especialmente cuando se combinan con otros factores como la pérdida de textura superficial o la presencia de irregularidades en la rasante. (Islam y Gassman, 2023).

A continuación, se describen las diecinueve fallas reconocidas por el método, conforme a la norma (ASTM International, 2020).

- **Grietas por fatiga (Alligator Cracking):** Son grietas interconectadas que forman una configuración semejante al cuarteamiento de la piel de un reptil las cuales indican fatiga del asfalto y pérdida de soporte estructural en las capas inferiores debido a cargas repetidas de tráfico; es una de las fallas más críticas porque representa el colapso progresivo de la estructura.

Figura 2.

Grietas por fatiga - severidad alta, según ASTM D6433

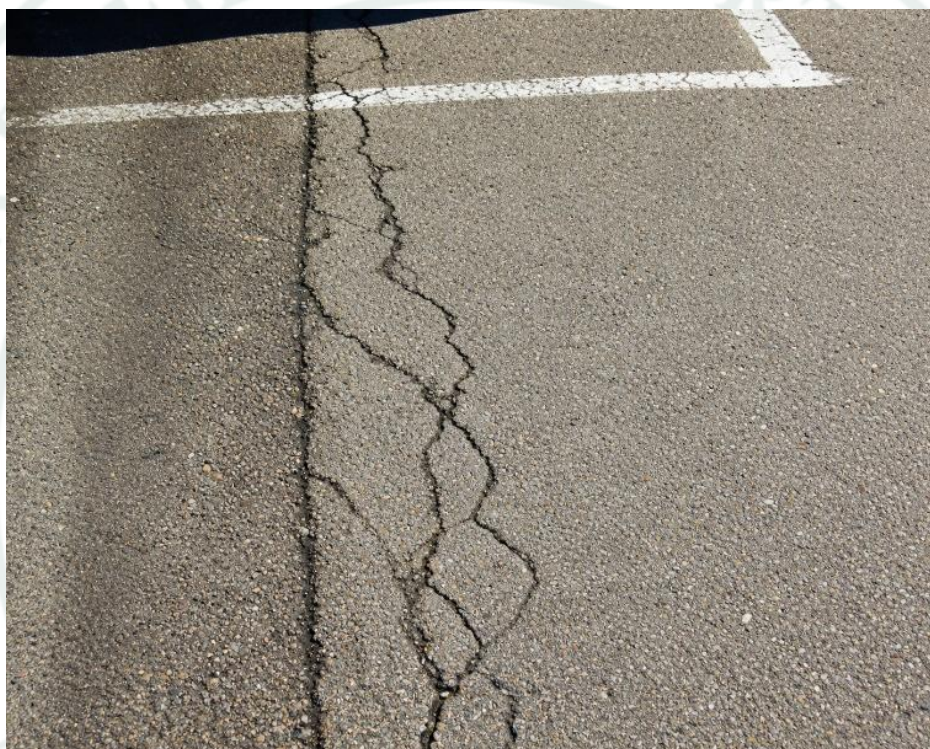


Nota. Adaptado de Standard Practice for Roads and Parking Lots Pavement Condition Index Surveys (ASTM D6433-20), por ASTM International, 2020 (<https://doi.org/10.1520/D6433-20>).

- **Grietas de borde (Edge Cracking):** Se desarrollan de forma longitudinal en la zona marginal de la calzada, habitualmente dentro de una franja aproximada de 60 cm desde el límite del pavimento; su origen se asocia a falta de confinamiento lateral, erosión o asentamientos del hombro.

Figura 3.

Grietas de borde – severidad media, según ASTM D6433.



Nota. Adaptado de Standard Practice for Roads and Parking Lots Pavement Condition Index Surveys (ASTM D6433-20), por ASTM International, 2020 (<https://doi.org/10.1520/D6433-20>).

- **Grietas longitudinales (Longitudinal Cracking):** Fisuras que se desarrollan paralelas al eje de la vía o en la zona de las huellas de rodadura. Pueden deberse a retracción térmica, debilidad en la capa de rodadura o esfuerzos de tracción por carga.

Figura 4.

Grietas longitudinales – severidad media, según ASTM D6433.



Nota. Adaptado de Standard Practice for Roads and Parking Lots Pavement Condition Index Surveys (ASTM D6433-20), por ASTM International, 2020 (<https://doi.org/10.1520/D6433-20>).

- **Grietas transversales (Transverse Cracking):** Fisuras perpendiculares al eje del pavimento. Surgen principalmente por contracción térmica del ligante asfáltico o movimientos diferenciales en la base.

Figura 5

Grietas transversales – severidad alta, según ASTM D6433.



Nota. Adaptado de Standard Practice for Roads and Parking Lots Pavement Condition Index Surveys (ASTM D6433-20), por ASTM International, 2020 (<https://doi.org/10.1520/D6433-20>).

- **Grietas en bloque (Block Cracking):** Dividen el pavimento en bloques o paneles casi rectangulares. Indican envejecimiento del ligante y pérdida de flexibilidad de la mezcla asfáltica, sin relación directa con el tráfico.

Figura 6.

Grietas en bloque – severidad media, según ASTM D6433.



FIG. X1.8 Medium-Severity Block Cracking

Nota. Adaptado de Standard Practice for Roads and Parking Lots Pavement Condition Index Surveys (ASTM D6433-20), por ASTM International, 2020 (<https://doi.org/10.1520/D6433-20>).

- **Grietas por deslizamiento (Slippage Cracking):** Grietas semicirculares o en forma de media luna, generadas cuando la capa superficial se desplaza sobre la inferior debido a esfuerzos de frenado o aceleración. Reflejan deficiente adherencia entre capas.

Figura 7.

Grietas por deslizamiento – severidad media, según ASTM D6433.



FIG. X1.48 Medium-Severity Slippage Cracking

Nota. Adaptado de Standard Practice for Roads and Parking Lots Pavement Condition Index Surveys (ASTM D6433-20), por ASTM International, 2020 (<https://doi.org/10.1520/D6433-20>).

- **Grietas de reflejo de juntas (Join Reflection Cracking):** Fisuras que se forman en la capa asfáltica sobre las juntas o grietas existentes del pavimento subyacente. Son típicas en sobrecarpetas y reflejan movimientos estructurales de las capas inferiores.

Figura 8.

Grietas por reflexión de juntas – severidad media, según ASTM D6433.

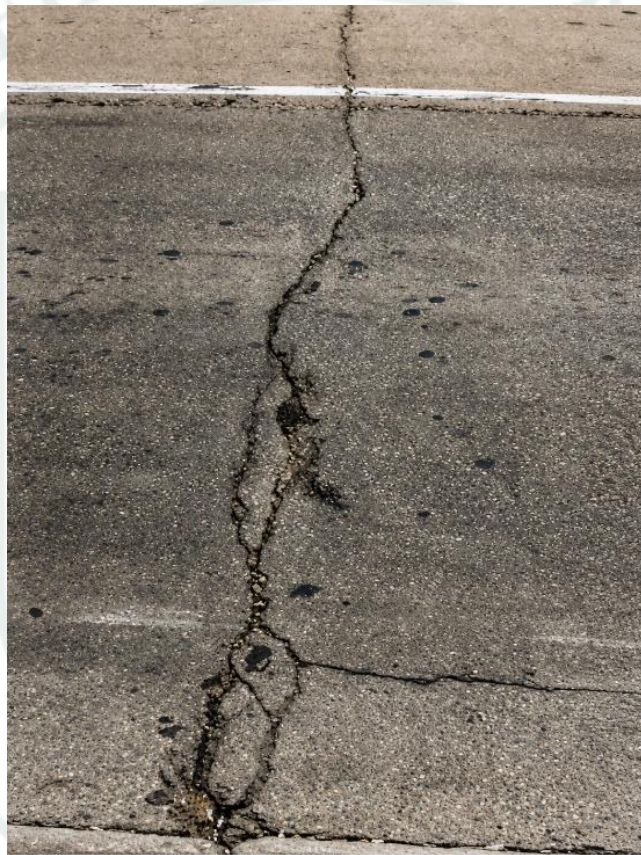


FIG. X1.23 Medium-Severity Joint Reflection Cracking

Nota. Adaptado de Standard Practice for Roads and Parking Lots Pavement Condition Index Surveys (ASTM D6433-20), por ASTM International, 2020 (<https://doi.org/10.1520/D6433-20>).

- **Ahuellamiento (Rutting):** Deformación longitudinal en la trayectoria de los neumáticos, generada por la compactación o deformación plástica de las capas inferiores. Reduce el confort de conducción y facilita el encharcamiento.

Figura 9.

Ahuellamiento – severidad media, según ASTM D6433.



FIG. X1.42 Medium-Severity Rutting

Nota. Adaptado de Standard Practice for Roads and Parking Lots Pavement Condition Index Surveys (ASTM D6433-20), por ASTM International, 2020 (<https://doi.org/10.1520/D6433-20>).

- **Depresiones (Depressions):** Zonas localizadas más bajas que el resto de la superficie. Son producto de asentamiento de los estratos subyacentes o de fallas localizadas en la subrasante.

Figura 10.

Depresiones – severidad alta, según ASTM D6433.



FIG. X1.18 High-Severity Depression

Nota. Adaptado de Standard Practice for Roads and Parking Lots Pavement Condition Index Surveys (ASTM D6433-20), por ASTM International, 2020 (<https://doi.org/10.1520/D6433-20>).

- **Abultamientos y ondulaciones (Bumps and Corrugations):** Deformaciones periódicas o protuberancias en la superficie, que provocan vibraciones al paso del vehículo. Se asocian con mezclas inestables, exceso de ligante o problemas de compactación.

Figura 11.

Abultamientos y ondulaciones – severidad media, según ASTM D6433.



FIG. X1.11 Medium-Severity Bumps and Sags

Nota. Adaptado de Standard Practice for Roads and Parking Lots Pavement Condition Index Surveys (ASTM D6433-20), por ASTM International, 2020 (<https://doi.org/10.1520/D6433-20>).

Figura 12.

Ondulación – severidad media, según ASTM D6433.



FIG. X1.14 Medium-Severity Corrugation

Nota. Adaptado de Standard Practice for Roads and Parking Lots Pavement Condition Index Surveys (ASTM D6433-20), por ASTM International, 2020 (<https://doi.org/10.1520/D6433-20>).

- **Parcheos y cortes de servicios (Patching and Utility Cuts):** Áreas donde se ha reemplazado el material del pavimento por reparaciones o instalaciones subterráneas. A menudo presentan diferencias de nivel o textura con el pavimento original.

Figura 13.

Parcheos y cortes de servicios – severidad media, según ASTM D6433.



Nota. Adaptado de Standard Practice for Roads and Parking Lots Pavement Condition Index Surveys (ASTM D6433-20), por ASTM International, 2020 (<https://doi.org/10.1520/D6433-20>).

- **Baches (Potholes):** Cavidades profundas con bordes irregulares producidas por el desprendimiento gradual del material constitutivo. Son la etapa final del deterioro iniciado por grietas o desprendimientos.

Figura 14.

Baches – severidad media, según ASTM D6433.



FIG. X1.36 Medium-Severity Pothole

Nota. Adaptado de Standard Practice for Roads and Parking Lots Pavement Condition Index Surveys (ASTM D6433-20), por ASTM International, 2020 (<https://doi.org/10.1520/D6433-20>).

- **Desgaste y desintegración superficial (Raveling / Weathering):** Pérdida gradual de agregados finos y gruesos debido a envejecimiento del ligante, oxidación o abrasión por tráfico. Provoca textura rugosa y disminución del coeficiente de fricción.

Figura 15.

Desgaste y desintegración superficial – severidad media, según ASTM D6433.



FIG. X1.52 Medium-Severity Weathering and Raveling

Nota. Adaptado de Standard Practice for Roads and Parking Lots Pavement Condition Index Surveys (ASTM D6433-20), por ASTM International, 2020 (<https://doi.org/10.1520/D6433-20>).

- **Pulimiento de agregados (Polished Aggregate):** Superficie brillante y lisa por desgaste de los elementos granulares del pavimento, disminuyendo la adherencia superficial e incrementando la probabilidad de deslizamiento.

Figura 16.

Pulimiento de agregados, según ASTM D6433.



FIG. X1.34 Polished Aggregate

Nota. Adaptado de Standard Practice for Roads and Parking Lots Pavement Condition Index Surveys (ASTM D6433-20), por ASTM International, 2020 (<https://doi.org/10.1520/D6433-20>).

- **Caída del borde (Lane/Shoulder Drop-off):** Diferencia de nivel entre el pavimento y el terreno o bermas adyacentes. Se origina por erosión, asentamientos o falta de material de relleno lateral.

Figura 17.

Caída del borde – severidad media, según ASTM D6433.



FIG. X1.26 Medium-Severity Lane/Shoulder Drop-Off

Nota. Adaptado de Standard Practice for Roads and Parking Lots Pavement Condition Index Surveys (ASTM D6433-20), por ASTM International, 2020 (<https://doi.org/10.1520/D6433-20>).

- **Exudación del ligante (Bleeding):** Acumulación de asfalto en la capa de rodadura que genera una lámina lustrosa y con escasa resistencia al deslizamiento. Se vincula con una proporción excesiva de material bituminoso o con temperaturas elevadas.

Figura 18.

Exudación del ligante – severidad media, según ASTM D6433.



FIG. X1.5 Medium-Severity Bleeding

Nota. Adaptado de Standard Practice for Roads and Parking Lots Pavement Condition Index Surveys (ASTM D6433-20), por ASTM International, 2020 (<https://doi.org/10.1520/D6433-20>).

- **Desplazamiento plástico (“Shoving”):** Deformación en relieve localizada, frecuentemente en intersecciones o pendientes. Se debe a mezclas asfálticas inestables sometidas a esfuerzos de frenado.

Figura 19.

Desplazamiento plástico – severidad media, según ASTM D6433.



FIG. X1.45 Medium-Severity Shoving

Nota. Adaptado de Standard Practice for Roads and Parking Lots Pavement Condition Index Surveys (ASTM D6433-20), por ASTM International, 2020 (<https://doi.org/10.1520/D6433-20>).

- **Abultamiento o hinchamiento (“Swelling”):** Elevación localizada del pavimento causada por expansión de suelos o acumulación de humedad bajo la superficie.

Figura 20.

Abultamiento o hinchamiento, según ASTM D6433.



Nota. Adaptado de Standard Practice for Roads and Parking Lots Pavement Condition Index Surveys (ASTM D6433-20), por ASTM International, 2020 (<https://doi.org/10.1520/D6433-20>).

2.4.4. RPAS (Remotely Piloted Aircraft System)

Un RPAS (siglas en inglés de Remotely Piloted Aircraft System) se define como una aeronave que opera sin tripulante a bordo, la cual puede ser dirigida por un piloto desde un puesto de mando en tierra o ejecutar vuelos de forma autónoma, siguiendo rutas y parámetros previamente configurados para cumplir una misión determinada (Greenwood et al., 2019)

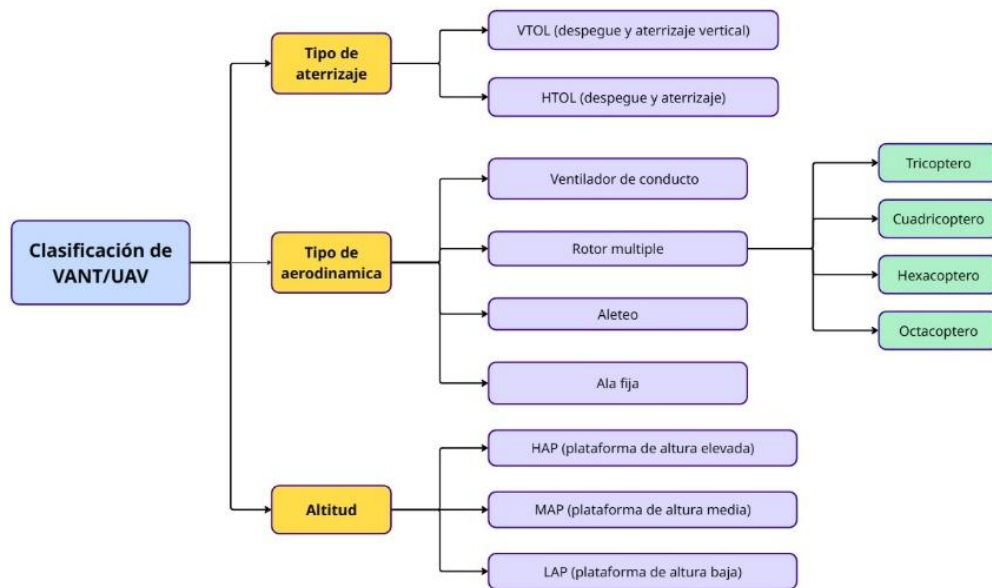
Las características técnicas de los drones —como la tecnología empleada, el nivel de autonomía, el tamaño, el peso y los recursos energéticos— resultan determinantes para su categorización. Estos vehículos suelen incorporar diversos sensores, entre ellos radares, cámaras de televisión, comunicaciones satelitales del sistema de posicionamiento global (GPS), intensificadores de imagen y tecnología de imágenes infrarrojas (Shakhatreh et al., 2019)

A nivel mundial, los organismos encargados de regular y supervisar el tráfico aéreo en zonas de espacio aéreo controlado emplean distintas denominaciones para referirse a las aeronaves no tripuladas, como puede observarse en la Figura 21:

- UAV (Unmanned Aerial Vehicle)
- RPAS (Vehículos Aéreos No Tripulado)
- SANT (Sistemas de Aeronaves No Tripuladas)
- RPAS (Remotely Piloted Aircraft System)
- UAS (Unmanned Aerial System)

Figura 21.

Clasificación del VANT



Nota. Adaptado de *Unmanned Aircraft Systems (UAS) Classification* (p. 14), por Federal Aviation Administration [FAA], 2020 (<https://www.faa.gov/uas>).

2.4.4.1. Aplicaciones de los RPAS en la Ingeniería Civil:

El empleo de los RPAS en la Ingeniería Civil, particularmente en infraestructura vial, es amplio debido a las múltiples aplicaciones que pueden ejecutarse a lo largo de un proyecto o en alguna de sus etapas específicas. Entre las aplicaciones más solicitadas se encuentran la obtención de representaciones digitales del terreno y las líneas de igual cota para levantamientos altimétricos. Asimismo, esta tecnología se emplea para el reconocimiento y evaluación de obras civiles como puentes, estructuras de contención, laderas, sistemas de drenaje y superficies de rodadura (Cruz Toribio, 2022)

Centrándose específicamente en los pavimentos, tanto flexibles como rígidos, se han desarrollado diversos estudios sobre el uso de RPAS como herramienta para la inspección de fallas, empleando distintos sensores, como se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1.

Aplicaciones de los RPAS en inspección de pavimentos

Referencia	Tipos de sensor	Resumen
ZHUE ET AL 2021	RGB	Se evalúan tres modelos de detección de objetos de alto desempeño computacional: Faster R-CNN, YOLOv3 y YOLOv4, con el fin de entrenar redes de reconocimiento orientadas a la clasificación de deterioros superficiales en pavimentos.
SAAD TAHAR	Y RGB	El sistema desarrollado ofrece una cuantificación pormenorizada y exacta de los daños identificados mediante imágenes aéreas, optimizando los procedimientos de seguimiento del estado de la red vial.
Al Qurishee	RGB	Se plantea una solución de bajo presupuesto y procesamiento en tiempo real para la valoración del estado del pavimento empleando aprendizaje automático y arquitecturas de redes neuronales, con lo cual se favorece una gestión más ágil y rentable.
Li et al	LIDAR	En esta investigación se examina la factibilidad de detectar deterioros en pavimentos mediante aeronaves no tripuladas operadas a escasa altura y equipadas con sensores LIDAR.
Tann y Li	RGB	Se emplean capturas aéreas para reconstruir representaciones tridimensionales de tramos viales, a partir de las cuales se realiza la identificación automatizada de fallas superficiales mediante el algoritmo propuesto
Zhang et al	RGB	Se verifican modelos computacionales orientados al reconocimiento de tipologías de fisuras, incluyendo grietas longitudinales, transversales y de fatiga por carga, a partir del análisis de imágenes obtenidas con aeronave no tripulada.

Nota. Elaboración propia, basada en la revisión sistemática de literatura sobre aplicaciones de RPAS en inspección de pavimentos flexibles. Las referencias corresponden a estudios publicados entre 2020 y 2025.

Figura 22.

Aplicaciones de los RPAS en Ingeniería Civil



Nota. Elaboración propia, basada en Cruz Toribio (2022) y en la revisión de literatura sobre aplicaciones de RPAS en ingeniería civil.

- **Inspección y evaluación de infraestructuras:**

Los RPAS se utilizan para inspeccionar y evaluar la condición de infraestructuras como puentes, edificios, carreteras y presas. Los drones están equipados con cámaras y sensores que capturan imágenes y datos precisos, permitiendo una inspección visual detallada y la detección de posibles daños, desgaste, grietas u otros problemas estructurales. Esto facilita el mantenimiento preventivo y el análisis de la integridad estructural (Fan y Saadeghvaziri, 2019).

- **Cartografía y topografía:**

Como se ha señalado previamente, los sistemas aéreos no tripulados encuentran aplicación en la supervisión de obras civiles, el control de materiales en sitio y la captura de imágenes aéreas panorámicas; siendo su uso principal la obtención de información topográfica mediante procedimientos fotogramétricos.

A través de esta tecnología es posible analizar proyectos en etapa de contratación, efectuar cálculos de volúmenes y áreas en zonas de acopio, verificar avances de obra, examinar patologías como inestabilidad de taludes y llevar a cabo seguimientos periódicos del estado de las obras.

El sector constructor ha orientado sus esfuerzos hacia la reducción de costos operativos como estrategia competitiva en procesos de contratación pública; este contexto ha propiciado la incorporación de tecnologías emergentes como los sistemas aéreos no tripulados, cuya aplicación en la recopilación sistemática de datos para el control y monitoreo de obras de ingeniería civil, tales como carreteras e infraestructura ferroviaria, ha sido objeto de estudio y desarrollo (Rakha y Gorodetsky, 2018).

- **Nube de puntos georreferenciados y datos de referencia:**

La nube de puntos generada por UAV-MVS generalmente se encuentra en un marco de referencia arbitrario y debe registrarse en un sistema de coordenadas del mundo real. Esto se logra mediante la identificación de características clave en la nube de puntos que pueden coincidir con coordenadas conocidas del mundo real.

En entornos naturales, los GCP que se destacan a menudo no están disponibles. Las nubes de puntos georreferenciadas producidas deben compararse con los datos de referencia (Harwin y Lucieer, 2012).

- **Monitoreo del impacto ambiental:**

De acuerdo con Morgenthal y Hallermann (2014) la aplicación de vehículos aéreos no tripulados (UAV) para la inspección visual y detección de daños en estructuras civiles junto con la calidad de las fotos y los videos tomados con dichos vehículos aéreos está fuertemente influenciada por numerosos parámetros, como las condiciones de iluminación, la distancia al objeto y el movimiento del vehículo inducido por los efectos ambientales. Si bien estos dispositivos cuentan con sensores y algoritmos de control altamente sofisticados, específicamente los efectos de las velocidades y direcciones fluctuantes del viento afectan el movimiento del vehículo.

La naturaleza de los movimientos de los vehículos durante la adquisición de fotografías y videos, a su vez, afecta la calidad de los datos y, por lo tanto, el grado en que se pueden identificar los daños. Este documento analiza las propiedades de tales sistemas de vuelo, los factores que influyen en sus movimientos y la calidad fotográfica resultante.

Sobre la base de los datos procesados registrados por los sensores de alta precisión en el UAV, se estudian las influencias y se muestra un método mediante el cual se puede cuantificar la calidad de la evaluación de daños.

2.4.4.2. Beneficios y desafíos de los RPAS en la Ingeniería Civil:

i. Beneficios:

Las diferentes aplicaciones de los drones a lo largo del ciclo de vida de un proyecto de construcción resaltan importantes beneficios sociales, económicos y medioambientales.

Desde una perspectiva social, la capacidad del dron para maniobrar sobre áreas y alturas peligrosas para tareas importantes como inspección o levantamiento hace que la tecnología sea una alternativa más segura que el trabajo humano, los topógrafos e inspectores de terrenos pueden volar drones sobre las áreas de interés en lugar de realizar tareas de levantamiento o inspección físicamente y exponerse a riesgos. Los drones también pueden agregar una capa adicional de seguridad al lugar de trabajo al identificar violaciones de parámetros o entradas a zonas restringidas más rápidamente; esto es especialmente importante para visitantes del sitio y peatones que transitan alrededor del lugar de trabajo, además el uso de drones para inspeccionar infraestructuras viales como puentes, carreteras y túneles puede disminuir las dificultades del control de tráfico.

Desde una perspectiva económica, los diferentes casos de uso de los drones muestran que pueden simplificar la generación de informes al capturar imágenes y videos en tiempo real para los interesados del proyecto dentro y fuera del lugar de trabajo, mejorar la toma de decisiones mediante acceso remoto al sitio, realizar cálculos precisos como volúmenes de movimiento de tierras, realizar un seguimiento preciso del progreso en el sitio de construcción y compararlo con el diseño para desarrollar estados construidos, rastrear el movimiento de materiales y recursos en cualquier lugar del lugar de trabajo, reemplazar la necesidad de equipos pesados y

grúas de camión o plataformas elevadoras para inspeccionar áreas peligrosas y reducir la responsabilidad mediante la resolución más rápida de disputas.

Todos estos beneficios se traducen en lugares de trabajo productivos con una comunicación y colaboración eficientes entre las partes interesadas, y ahorros significativos de tiempo y costos en un proyecto de construcción. Además, el uso de drones permite a las empresas obtener una ventaja competitiva tanto al licitar proyectos como al buscar nuevos clientes.

Desde una perspectiva medioambiental, los drones no dependen de combustibles fósiles, pues funcionan principalmente con motores eléctricos, por lo que emiten niveles considerablemente menores de dióxido de carbono en comparación con los equipos de construcción convencionales, convirtiéndose en una alternativa más respetuosa con el medio ambiente para trabajos aéreos como el mapeo de terrenos, la fotografía y el levantamiento topográfico.

Adicionalmente, se identifican beneficios medioambientales asociados a la reducción de la congestión, en la medida en que los drones disminuyen la cantidad de trabajo humano y equipos necesarios para ejecutar tareas críticas. Su uso también puede contribuir al desarrollo y la construcción sostenible al permitir el monitoreo de proyectos energéticos, como oleoductos, aerogeneradores o granjas solares (Bou H. y Nassereddine, 2022).

ii. Desafíos:

La operación de RPAS en entornos urbanos conlleva restricciones técnicas y operativas que condicionan tanto la calidad de los datos obtenidos como la seguridad del procedimiento. Desde el punto de vista técnico, la autonomía de vuelo depende de la capacidad de la batería; en el caso del DJI Mavic 3 Enterprise, fue necesario emplear tres baterías por carril para garantizar la cobertura completa del tramo sin interrupciones en la captura de imágenes. Las condiciones meteorológicas también resultan determinantes, ya que el viento, la lluvia o la baja visibilidad pueden impedir el vuelo o afectar la calidad de las imágenes; por ello, la planificación de las jornadas de campo consideró un horario de mínima perturbación climática, entre las 8:00 y las 11:00 de la mañana. Adicionalmente, la presencia de estructuras metálicas y edificaciones de concreto en el entorno urbano de Cerro Colorado puede interferir con los sensores de navegación del equipo, lo que exigió una calibración cuidadosa antes de cada vuelo.

En el plano operativo, la circulación vehicular activa durante el vuelo constituyó el principal factor de riesgo tanto para la seguridad del personal evaluador como para la preservación del equipo. La normativa peruana RG 09-2015 de la DGAC exige mantener en todo momento la línea de visión directa entre el piloto y la aeronave durante las operaciones en modo VLOS, condición que se cumplió en todas las jornadas de vuelo. La oclusión de fallas por vehículos estacionados durante el vuelo fue la limitación específica más frecuente; al no poder resolverse completamente en gabinete, requirió verificación visual complementaria en las zonas afectadas, lo que añadió tiempo al proceso de digitalización en AutoCAD (Bou H. y Nassereddine, 2022)

2.4.4.3. Partes del UAV(RPAS)

- **Plataforma UAV:** Se refiere al dron o vehículo utilizado para realizar tareas específicas. Puede variar en tamaño, forma y capacidad de carga útil, y está equipado con sistemas de propulsión, como motores y hélices, así como sistemas de control y navegación.
- **Carga útil (Payload):** Es la parte del UAV que incluye los instrumentos, sensores o cámaras utilizados para recopilar datos o realizar tareas específicas. Puede incluir cámaras de alta resolución, sensores de medición (como sensores infrarrojos o sensores de gases), escáneres láser (LiDAR) u otros dispositivos especializados.
- **GNSS:** Sistema Global de Navegación por Satélite se refiere a sistemas como el GPS (Sistema de Posicionamiento Global). Estos sistemas utilizan una constelación de satélites para suministrar datos exactos acerca de la ubicación y la trayectoria de vuelo del UAV. El GNSS permite el posicionamiento y la navegación precisos durante las operaciones de vuelo.
- **UAV Camera:** también conocida como cámara de vehículo aéreo no tripulado o dron, es un tipo de cámara diseñada específicamente e integrada en vehículos aéreos no tripulados (UAV) o drones. Estas cámaras suelen ser pequeñas, ligeras y están equipadas con capacidades avanzadas de imagen para capturar fotografías y videos aéreos de alta calidad.

Figura 23.

Partes del RPAS DJI Mavic 3 Enterprise



Nota. Adaptado de DJI Mavic 3 Enterprise – Product Page, por DJI, 2023

2.4.4.4. Funciones del RPAS

- **Fotografía aérea:** Se refiere a las imágenes capturadas por el UAV desde una perspectiva elevada. Estas fotografías aéreas son utilizadas para inspecciones, mapeo, monitoreo y evaluaciones en la Ingeniería Civil. Pueden proporcionar información visual detallada sobre áreas extensas y facilitar la identificación de características y problemas específicos.
- **LiDAR: Light Detection and Ranging:** Constituye una tecnología embarcada en aeronaves no tripuladas orientada a la medición de distancias y la generación de nubes de puntos en tres dimensiones. Su principio de funcionamiento se basa en la emisión de pulsos láser y el registro del intervalo de tiempo que transcurre hasta reflejarse en la superficie.

- **Nube de puntos:** Es un conjunto de puntos tridimensionales capturados por el UAV utilizando sensores LiDAR o fotogramétricos. Cada punto en la nube representa una ubicación precisa en el espacio y contiene información sobre la elevación o características específicas del terreno. Estos datos se utilizan para generar modelos digitales del terreno, modelos 3D y evaluaciones topográficas.
- **Ortofoto:** Es una imagen aérea geométricamente corregida y rectificada. Se corrigen las distorsiones causadas por la perspectiva y la inclinación de la cámara, lo que permite una representación precisa de la superficie terrestre con una perspectiva ortogonal. Las ortofotos son utilizadas en el mapeo y la cartografía para obtener información precisa sobre características del terreno y estructuras.
- **Vuelo autónomo:** Alude a la facultad de captura del UAV para volar de forma independiente y seguir una ruta preprogramada sin intervención humana durante el vuelo. Utiliza sistemas de control y navegación avanzados, como sensores de proximidad y algoritmos de evitación de obstáculos, para realizar vuelos seguros y autónomos.
- **Telemetría:** Es el proceso de envío de información de manera simultánea desde el UAV al operador o centro de control. Estos datos pueden incluir información sobre la altitud, velocidad, posición, estado de la batería, señal GPS y otros parámetros relevantes para monitorear y controlar el vuelo del UAV.

2.4.5. Método PCI

El método PCI (Pavement Condition Index) es un índice numérico (normalmente entre 0 y 100) utilizado para evaluar de forma objetiva el estado superficial de una vía pavimentada, independientemente de si es de tipo flexible o rígido; su valor se obtiene tras mediante un reconocimiento ocular que permite detectar y clasificar distintas modalidades de deterioro (como grietas, ahuellamiento, desprendimientos, etc.), cuantifica su severidad y extensión, y aplica valores de deducción para cada combinación tipo/severidad.

Este índice permite obtener una calificación global que refleja tanto el estado estructural como el funcional de la superficie de rodadura, con el fin de facilitar la priorización de intervenciones de mantenimiento o rehabilitación (Pérez et al., 2024).

Para la organización ASTM International (2020), el proceso de cálculo del PCI implica los siguientes pasos:

- a) Inspección visual del pavimento: Se lleva a cabo un reconocimiento exhaustivo de la superficie del pavimento con el propósito de detectar y documentar las distintas manifestaciones de deterioro existentes.
- b) Clasificación de los defectos: Cada defecto identificado se clasifica según su gravedad, utilizando escalas de clasificación predefinidas.
- c) Asignación de puntajes: A cada defecto se le asigna un puntaje en función de su gravedad. Los puntajes suelen ser determinados por manuales o guías específicas.
- d) Cálculo del PCI: Los puntajes individuales se promedian para calcular el PCI general del pavimento.

2.4.5.1. Clasificación del Índice de Condición del Pavimento

El PCI es un indicador numérico que representa el estado superficial del pavimento en una escala de (0), correspondiente a una vía en condición de falla total, a (100), que representa una superficie en óptimas condiciones, tal como se ilustra en la Figura 24.

Figura 24.

Escala de clasificación del PCI

PCI	Escala de Clasificación	Colores Sugeridos
100	Bueno	Verde Oscuro
85	Satisfactorio	Verde Claro
70	Regular	Amarillo
55	Malo	Rojo Claro
40	Muy Malo	Rojo Mediano
25	Grave	Rojo Oscuro
10	Colapsado	Gris Oscuro
0		

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS (ASTM D 6433)

Nota. Adaptado de Standard Practice for Roads and Parking Lots Pavement Condition Index Surveys (ASTM D6433-20), por ASTM International, 2020).

El PCI no permite determinar de forma directa la resistencia estructural del pavimento ni brinda información sobre el coeficiente general de resistencia a la fricción; sin embargo, sí puede integrar y procesar los datos disponibles dentro de un sistema de análisis para la rehabilitación de pavimentos.

Hoja de inspección PCI

Nota. Adaptado de Standard Practice for Roads and Parking Lots Pavement Condition Index Surveys (ASTM D6433-20), por ASTM International, 2020 (<https://doi.org/10.1520/D6433-20>).

2.4.5.2. Unidades de muestra

Conforme a los criterios de la norma ASTM D6433-20, cada segmento de inspección debe tener un área comprendida entre $225 \pm 90 \text{ m}^2$; por ello, se delimitaron 42 unidades de evaluación de 45 m de longitud y 07 m de ancho por vía, lo que arroja un área de 315 m^2 por unidad.

Asimismo, el procedimiento normativo establece una cantidad mínima de segmentos a inspeccionar para alcanzar un nivel de confianza estadística del 95% en el cálculo del PCI, determinada mediante la siguiente expresión:

$$n = \frac{N * \sigma^2}{\frac{e^2}{4} * (N - 1) + \sigma^2}$$

Donde:

n: Número de unidades de muestra a evaluar

N: Número total de unidades de muestra en la sección (mín. 5 unidades)

e: Error admisible en el estimado del PCI de la sección ($e = \pm 5$ puntos del PCI)

σ : Desviación estándar del PCI entre las unidades.

ASTM International (2020) establece que, en la inspección inicial, se adopta una desviación estándar (σ) del PCI de 10 puntos para superficies asfálticas y de 15 para superficies de concreto hidráulico. Este valor asumido debe contrastarse posteriormente, una vez obtenidos los resultados del PCI, calculando la desviación estándar efectiva de los datos.

Seguidamente, se determina la cantidad de segmentos a inspeccionar; si dicha cantidad supera el número de unidades ya evaluadas, se procede a seleccionar e inspeccionar aleatoriamente las unidades adicionales necesarias.

En evaluaciones posteriores, el valor de la desviación estándar obtenido en la inspección previa se utiliza como parámetro de entrada para el cálculo de n .

Definida la cantidad de unidades a evaluar, se establece el intervalo de separación entre segmentos mediante un muestreo sistemático aleatorio. Las unidades seleccionadas deben distribuirse uniformemente a lo largo de toda la sección, eligiendo el primer segmento de forma aleatoria.

2.4.5.3. Cálculo del PCI de la unidad de muestra

Una vez concluido el levantamiento de campo, se procede a determinar el PCI a partir de la información registrada, empleando los denominados "Valores Deducidos" correspondientes a cada combinación de tipo de daño y nivel de severidad identificada. El proceso de cálculo comprende las siguientes etapas:

Etapas 1. Cálculo de los Valores Deducidos (VD)

- Se consolidan todos los tipos de deterioro y sus respectivos niveles de severidad en la columna de totales del formato de registro PCI. Cada tipo de falla puede expresarse en unidades de área, longitud o conteo según corresponda.
- Se divide la cantidad registrada de cada deterioro por nivel de severidad entre el área total de la unidad de análisis, expresando el cociente en términos porcentuales. Este valor constituye la densidad del deterioro para el nivel de severidad considerado.
- Se obtiene el valor deducido para cada tipo de falla y su nivel de severidad correspondiente, mediante la consulta de las curvas gráficas denominadas "Valor Deducido del Daño"

Etapla 2. Cálculo del Número admisible de valores deducidos (m)

En caso de que ninguno o únicamente uno de los Valores Deducidos supere el umbral de 2, se emplea directamente el Valor Deducido Total en sustitución del mayor Valor Deducido Corregido obtenido en la Etapa 4. En caso contrario, se procede con los pasos b. y c.

- b. Liste los valores deducidos individuales deducidos de mayor a menor.
- c. Determine el “Número Máximo Admisible de Valores Deducidos” (m), utilizando:

$$m_i = 1 + \frac{9}{98} * (100 - \text{MaxVD}_i)$$

Donde:

m_i : Número máximo admisible de valores deducidos, incluyendo fracción, para muestreo i.

MaxVD_i : El mayor valor deducido individual para la unidad de muestreo i.

El número de valores individuales deducidos se reduce a m, inclusive la parte fraccionaria. Si se dispone de menos valores deducidos que m se utilizan todos los que se tengan.

Etapla 3. Cálculo del máximo valor corregido (VDC)

El máximo CDV se determina mediante el siguiente proceso iterativo

- a. Determine el número de valores deducidos, q, mayores que 2.0.
- b. Determine el “Valor Deducido Total” sumando TODOS los valores deducidos individuales.
- c. Determine el CDV con q y el “Valor Deducido Total” en la curva de corrección pertinente al tipo de pavimento.
- d. Reduzca a 2.0 el menor de los “Valores Deducidos” individuales que sea mayor que 2.0 y repita las etapas a. a c. hasta que q sea igual a 1.
- e. El máximo CDV es el mayor de los CDV obtenidos en este proceso.

Etapla 4. Cálculo del PCI

El PCI de la unidad se obtiene restando de 100 el valor máximo de CDV determinado en la Etapa 3.

$$PCI = 100 - \max VDC$$

2.4.5.4. Cálculo del PCI de una sección del pavimento

Un tramo de pavimento agrupa múltiples unidades de análisis. Cuando se evalúan todas las unidades, el PCI del tramo corresponde al promedio de los valores individuales obtenidos. Si, en cambio, se aplicó una técnica de muestreo, el procedimiento es distinto.

Cuando la selección de unidades se realiza mediante muestreo sistemático aleatorio o en función de la representatividad del tramo, el PCI resultante equivale al promedio de los valores obtenidos en las unidades inspeccionadas. Si se incorporaron unidades adicionales al proceso, el PCI se calcula mediante un promedio ponderado, de la siguiente manera:

$$PCI = \frac{PCI_r * (A - \sum_1^n A_{ai}) + PCI_a * (\sum_1^n A_{ai})}{A}$$

Donde:

PCIS: PCI de la sección del pavimento.

PCIR: PCI promedio de las unidades de muestreo aleatorias o representativas.

PCIA: PCI promedio de las unidades de muestreo adicionales.

N: Número total de unidades de muestreo en la sección.

A: Número adicional de unidades de muestreo inspeccionadas.

2.5. Intervención según el estado del pavimento

La determinación del PCI no constituye un fin en sí mismo, sino un insumo técnico para la toma de decisiones sobre conservación vial. A partir de la clasificación cualitativa del pavimento derivada del método (Excelente, Muy Bueno, Bueno, Regular, Malo, Muy Malo y Fallado), es posible asociar a cada nivel de condición un tipo de intervención.

En el contexto peruano, el Manual de Carreteras: Mantenimiento o Conservación Vial del MTC (2014) clasifica estas intervenciones en conservación rutinaria y periódica; para precisar el alcance técnico de cada categoría, incluyendo la rehabilitación y la reconstrucción, se toma como referencia complementaria la documentación del Instituto Nacional de Vías (INVIAS) de Colombia, reconocida por su precisión conceptual en la materia.

El mantenimiento rutinario agrupa el conjunto de actividades permanentes ejecutadas durante el año con el fin de preservar los elementos de la vía, prevenir daños y mantener las condiciones logradas tras su construcción o rehabilitación (INVIAS, 2007). El mantenimiento periódico, en cambio, se define como el tratamiento de la superficie ejecutado en periodos generalmente mayores a un año, orientado a evitar la aparición o el agravamiento de defectos mayores, preservar las características superficiales, conservar la integridad estructural de la vía y corregir defectos puntuales mayores (INVIAS, 2007).

Las categorías de mayor alcance se establecen en la Guía Metodológica para el Diseño de Obras de Rehabilitación de Pavimentos Asfálticos de Carreteras (INVIAS, 2008), la cual señala que, el mantenimiento y la rehabilitación de un pavimento cubren un rango muy amplio de actuaciones, las cuales varían desde la simple corrección de defectos superficiales para mejorar la calidad de la circulación vehicular, hasta las operaciones de reconstrucción, destinadas a recuperar totalmente la capacidad estructural de la calzada” (INVIAS, 2008, p. 4).

La misma guía precisa que resulta de particular interés determinar el momento oportuno para aplicar un tratamiento de mantenimiento o rehabilitación en función de la condición del pavimento (INVIAS, 2008).

A partir de ello, la Tabla 2 presenta la asociación entre el estado del pavimento, el rango de PCI y el tipo de intervención recomendado.

Tabla 2.

Tipo de intervención según el rango PCI

Estado del pavimento	Rango PCI	Tipo de intervención
Excelente / Muy Bueno	$70 < \text{PCI} \leq 100$	Mantenimiento rutinario
Bueno/Regular	$40 < \text{PCI} \leq 70$	Mantenimiento periódico
Malo/Muy Malo	$10 < \text{PCI} \leq 40$	Rehabilitación
Fallado	$0 \leq \text{PCI} \leq 10$	Reconstrucción

Nota. Elaboración propia a partir de ASTM D6433-20, INVIAS (2007) e INVIAS (2008). La asociación entre el rango de PCI y la categoría de intervención constituye un criterio metodológico propio del autor, en concordancia con las categorías de conservación del MTC (2014).

La asignación de los valores frontera se establece con el límite superior cerrado: una unidad de muestra con PCI igual a 40 se asigna a rehabilitación y una con PCI igual a 70 a mantenimiento periódico. Esta convención se adopta por criterio conservador, de modo que ante un valor de frontera la unidad recibe la intervención de mayor alcance, y se aplica de forma uniforme a los dos métodos comparados y a todas las tablas de resultados de la presente investigación.

Cabe precisar que el PCI evalúa la condición superficial del pavimento y no su capacidad estructural; por ello, en los niveles Malo, Muy Malo y Fallado, la decisión final entre rehabilitación y reconstrucción debe sustentarse con un análisis estructural complementario,

como la deflectometría de impacto (FWD) o el número estructural efectivo (SNE), conforme lo recomiendan la guía INVIAS (2008) y los lineamientos del MTC

En consecuencia, el criterio de intervención adoptado en la presente investigación incorpora un segundo nivel de decisión basado en el tipo de deterioro predominante: una unidad de muestra se asigna a rehabilitación cuando su PCI es igual o menor a 40 o cuando, presentando un PCI superior a 40, registra deterioros asociados a carga en densidad significativa —entendida como la concurrencia de piel de cocodrilo, ahuellamiento y abultamientos o hundimientos en una extensión igual o mayor al 10% del área de la unidad, o un conteo de huecos igual o mayor a cinco por unidad de 315 m²—, por cuanto estos deterioros evidencian pérdida de integridad estructural que un tratamiento superficial no restituye.

CAPÍTULO III: METODOLOGÍA

3.1. Diseño, alcance y enfoque de la investigación

Este estudio se enmarca en un enfoque cuantitativo, con un diseño no experimental de corte transversal, nivel de investigación relacional y alcance correlacional. Este diseño resulta pertinente en la medida en que las variables no son manipuladas deliberadamente, sino registradas y medidas en las condiciones propias de su entorno natural, para posteriormente comparar los resultados obtenidos mediante dos metodologías de evaluación distintas.

Según Creswell y Creswell (2017), el diseño no experimental se centra en levantar y procesar información a partir de la observación directa, sin intervenir sobre las variables, siendo apropiado cuando el propósito es caracterizar y explicar un fenómeno en las condiciones reales en que ocurre. En este tipo de estudio, el investigador recoge datos de manera sistemática mediante observación y medición directas, para luego analizarlos e identificar diferencias, patrones o asociaciones entre las variables de interés, asegurando la validez y fiabilidad de los datos a través de técnicas de muestreo adecuadas y métodos de análisis estadístico apropiados.

El carácter transversal del diseño metodológico implica que la recolección de datos se realizó en un momento determinado, sin continuidad temporal, lo cual resulta coherente con el propósito de contrastar los valores del Índice de Condición del Pavimento (PCI) obtenidos mediante la inspección convencional y la asistida por RPAS sobre los mismos tramos de la Avenida Perú.

Esta investigación se ubica en un nivel relacional con alcance correlacional, en la medida en que busca determinar el grado de correspondencia y equivalencia entre los resultados obtenidos mediante dos metodologías que evalúan un mismo fenómeno sobre las mismas unidades de análisis; este tipo de estudio, conocido en la literatura científica como estudio de comparación de métodos de medición, busca cuantificar el nivel de acuerdo entre

dos procedimientos aplicados al mismo objeto de medición (Bland y Altman, 1986). Para ello, se emplean estadísticos de correlación y concordancia como el coeficiente de correlación de Spearman, el porcentaje de acuerdo y el diagrama de Bland-Altman (Bland y Altman, 1986), sin establecer relaciones causales entre variables ni inferencia estadística hacia contextos viales distintos al tramo evaluado (Arias-Odón, 2012)

La investigación se desarrolla bajo un enfoque cuantitativo, entendido como aquel orientado a obtener un conocimiento objetivo de la realidad a partir de aspectos observables, medibles y cuantificables, empleando la matemática y la estadística como herramientas fundamentales de análisis (Castañeda Mota, 2022).

En este caso, se efectuaron mediciones y evaluaciones cuantitativas empleando ambas metodologías, con el fin de obtener datos numéricos sobre la condición del pavimento. Los valores del PCI oscilan entre 0, para un pavimento en condición fallada, y 100, para un pavimento en condición excelente, lo que permite clasificar el estado de cada unidad de muestra según las categorías establecidas en la norma ASTM D6433-20: fallado, muy malo, malo, regular, bueno, muy bueno y excelente

Dentro del diseño no experimental adoptado, se aplicó un procedimiento de registro sistemático y cuantificación de variables con el fin de examinar las concordancias entre ambas metodologías de evaluación del pavimento flexible en la Avenida Perú. Este enfoque se sustenta en los principios del diseño cuantitativo no experimental, en el cual el investigador mide con precisión las variables en condiciones naturales, con el propósito de establecer el grado de acuerdo o equivalencia entre distintos métodos de medición (Bland y Altman, 1986).

Para desarrollar esta investigación se ejecutó un protocolo de reconocimiento estructurado sobre segmentos seleccionados del pavimento flexible, aplicando tanto el método de cálculo del PCI de forma convencional como el asistido por RPAS. Kerlinger et al. (2002) sustentan el uso del enfoque cuantitativo en la investigación científica, resaltando el papel central de la observación y la medición de variables para obtener datos objetivos y reproducibles.

La información recopilada en campo se procesó mediante análisis estadístico, empleando métodos apropiados para estudios comparativos, entre ellos la prueba SMART, con el fin de verificar la equivalencia práctica entre los valores de PCI obtenidos por ambas metodologías.; para evaluar la concordancia entre métodos se utilizó el coeficiente de correlación de rangos de Spearman, adecuado para comparar resultados de distintas metodologías de medición al no requerir que los datos sigan una distribución normal (de Winter et al., 2016). Cabe precisar que el coeficiente de Spearman se emplea en esta investigación no como estadístico de asociación entre variables independientes, sino como medida de concordancia entre dos métodos que miden el mismo fenómeno, uso coherente con un nivel de investigación relacional. Su inclusión no establece relación causal ni de dependencia entre variables, sino que permite verificar el grado de acuerdo entre los resultados obtenidos por ambas metodologías de evaluación.

El nivel de la investigación es relacional, en la medida en que busca determinar el grado de correspondencia y equivalencia entre los resultados obtenidos mediante dos metodologías de medición de un mismo fenómeno, sin manipulación de variables ni inferencia hacia una población mayor, siendo la Avenida Perú el universo completo de análisis; la verificación de las hipótesis específicas se realizó de la siguiente manera: las hipótesis a, b y c se verifican mediante comparación directa de los valores numéricos obtenidos con cada método.

La hipótesis específica d se verificó mediante estadística descriptiva comparativa, empleando el porcentaje de área cubierta como medida de cobertura, la disponibilidad del registro digital georreferenciado permanente como indicador de repetibilidad, y el tiempo de exposición al tráfico vehicular en horas como medida de seguridad operativa del personal. La hipótesis específica e se verificó mediante el marco SMART de control de calidad de datos PCI, que comprende tres criterios: el Porcentaje de Acuerdo entre categorías de condición, el coeficiente de correlación de Spearman y el análisis de límites de concordancia mediante el diagrama de Bland-Altman, aplicando los límites de equivalencia adoptados como criterio metodológico propio de esta investigación: ± 10 puntos PCI para la decisión de intervención y ± 5 puntos PCI para la equivalencia numérica estricta.

3.2. Variables

3.2.1. Independiente

- Metodología PCI — Convencional y asistida con RPAS: variable que representa el procedimiento técnico estandarizado empleado para evaluar las fallas en el pavimento flexible de la Av. Perú, con dos dimensiones: Método convencional, basado en inspección visual directa en campo, y Método asistido con RPAS, basado en fotogrametría aérea con procesamiento en Pix4Dmapper y digitalización en AutoCAD.

3.2.2. Dependiente

- Evaluación superficial de las fallas del pavimento flexible de la Av. Perú.

Tabla 3.

Matriz de operacionalización de variables

Variable	Definición conceptual	Dimensión	Indicadores	Unidad de medida	Escala de medición
V.I. Metodología conventional y asistida con RPAS	PCI para evaluar las fallas del pavimento flexible de la Av. Perú mediante dos modalidades diferenciadas por su forma de captura y registro de datos.	Método convencional (Inspección visual directa en campo)	Cumplimiento del protocolo de inspección visual ASTM D6433-20	Porcentaje de cumplimiento (%)	Razón
			Instrumentos de medición empleados durante la inspección	Número de instrumentos utilizados (n)	Razón
			Unidades de muestra inspeccionadas mediante hoja PCI	Número de unidades de muestra (n)	Razón
		Método asistido con RPAS (Fotogrametría aérea y digitalización)	Altitud de vuelo fotogramétrico	Metros (m)	Razón
			Resolución espacial del ortomosaico (GSD)	cm/píxel	Razón
V.D. Evaluación superficial de las fallas del pavimento flexible de la Av. Perú		Valores del PCI por tramo (Objetivo específico a)	Fallas identificadas y digitalizadas en AutoCAD 2024	Número de fallas digitalizadas (n)	Razón
			Valor numérico del PCI por unidad de muestra obtenido con cada método	Puntos PCI (0–100)	Razón
			Categoría de condición del pavimento asignada según norma ASTM D6433-20	Categoría (Fallado a Excelente)	Ordinal
			Diferencia absoluta $ \Delta PCI $ entre métodos por unidad de muestra	Puntos PCI	Razón

Variable	Definición conceptual	Dimensión	Indicadores	Unidad de medida	Escala de medición
Proceso de identificación, clasificación y cuantificación de fallas superficiales del pavimento flexible de la Av. Perú mediante el cálculo del PCI, conforme a la norma ASTM D6433-20, evaluado en sus dimensiones de valor numérico, concordancia, eficiencia operativa, características operacionales y equivalencia estadística.		Concordancia en identificación de fallas (Objetivo específico b)	Porcentaje de coincidencia en tipificación de fallas entre ambos métodos	%	Razón
			Concordancia en clasificación de severidad por tipo de falla identificada	Nivel (Bajo / Medio / Alto)	Ordinal
			Diferencia en área o longitud de fallas medidas por ambos métodos	m ² o m	Razón
			Tiempo de inspección en campo requerido por cada método	Horas (h)	Razón
		Eficiencia operativa (Objetivo específico c)	Tiempo total del ciclo completo de evaluación incluyendo gabinete	Horas (h)	Razón
			Rendimiento de cobertura del levantamiento por método	m/hora	Razón
			Costo de mano de obra por kilómetro evaluado con cada método	S./km	Razón
			Porcentaje del área total del tramo efectivamente cubierta por cada método	%	Razón
		Características operacionales (Objetivo específico d)	Disponibilidad de registro digital georreferenciado permanente para consulta	Sí / No	Nominal
			Tiempo de exposición del personal al tráfico vehicular durante la evaluación	Horas (h)	Razón
			Porcentaje de Acuerdo (PA%) entre categorías de condición asignadas	%	Razón

Variable	Definición conceptual	Dimensión	Indicadores	Unidad de medida	Escala de medición
			Coeficiente de correlación de Spearman (rs) entre los valores de PCI de ambos métodos	Adimensional (0–1)	Razón
		Equivalencia estadística y económica (Objetivo específico e)	Diferencia media entre métodos en el diagrama de Bland-Altman	Puntos PCI	Razón
			Relación costo-resultado por kilómetro evaluado con cada método	S./km	Razón

• Codificación de la condición del pavimento:

Código	Condición
1	Fallado
2	Muy malo
3	Malo
4	Regular
5	Bueno
6	Muy bueno
7	Excelente

Nota. Elaboración Propia

3.3. Lugar de ejecución y materiales

La investigación se desarrolló en la Avenida Perú, distrito de Cerro Colorado, provincia y región de Arequipa, empleando los equipos, instrumentos y software que se describen en los apartados siguientes, seleccionado en función de los requerimientos técnicos de cada metodología de evaluación.

3.3.1. Lugar de ejecución – Avenida Perú

3.3.1.1. Ubicación

La ejecución del tramo de prueba se encuentra en la Av. Perú ubicada desde el reservorio de la calle José Olaya hasta la vía de evitamiento, en el distrito de Cerro Colorado, en la ciudad de Arequipa, Perú, ubicada geográficamente a una altura 2370 m.s.n.m, como se observa en la figura

Figura 26.

Avenida de estudio



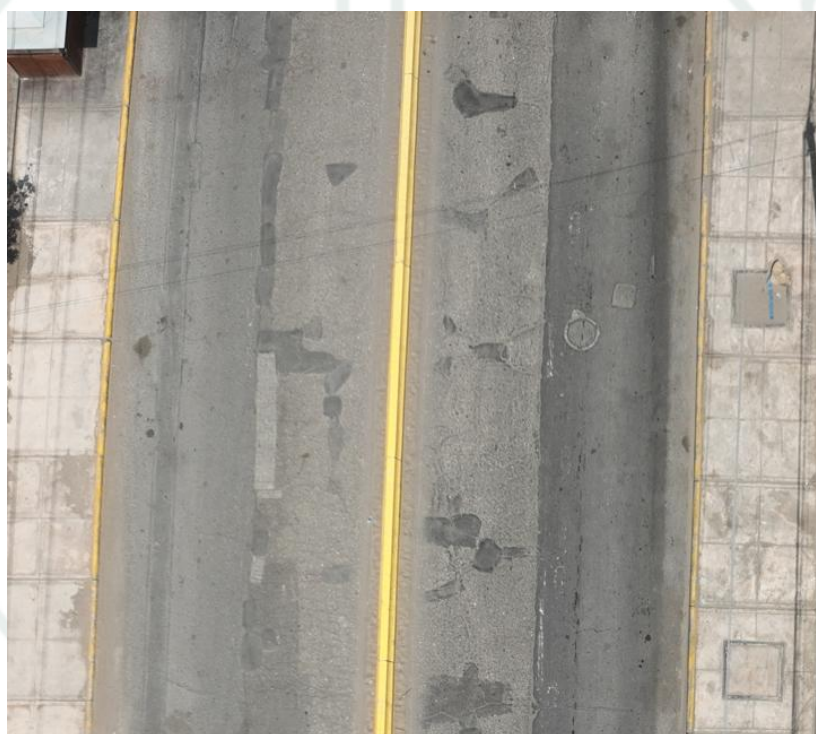
Nota. Adaptado de Google Maps, 2025 vista satelital de la Av. Perú, desde el reservorio de la calle José Olaya hasta la vía de evitamiento, distrito de Cerro Colorado, Arequipa.

3.3.1.2. Características de la vía

La Avenida Perú cuenta con una superficie de rodadura conformada por carpeta asfáltica de comportamiento flexible, con carriles habilitados en ambas direcciones de tránsito y una sección transversal de 7 m de calzada con fajas de separación; la vía tiene una longitud total de 1,890 m y un área de 26,460 m², distribuida en 84 unidades de muestra de 315 m² cada una (45 m × 7 m), conforme a lo establecido en la norma ASTM D6433-20.

Figura 27.

Vía de pavimento flexible



Nota. Elaboración propia. Vista del pavimento flexible de la Av. Perú, distrito de Cerro Colorado, Arequipa 2025. La vía presenta dos carriles en ambos sentidos, ancho de calzada de 7 m, longitud de 1,890 m y área total de 26,460 m².

Tabla 4.

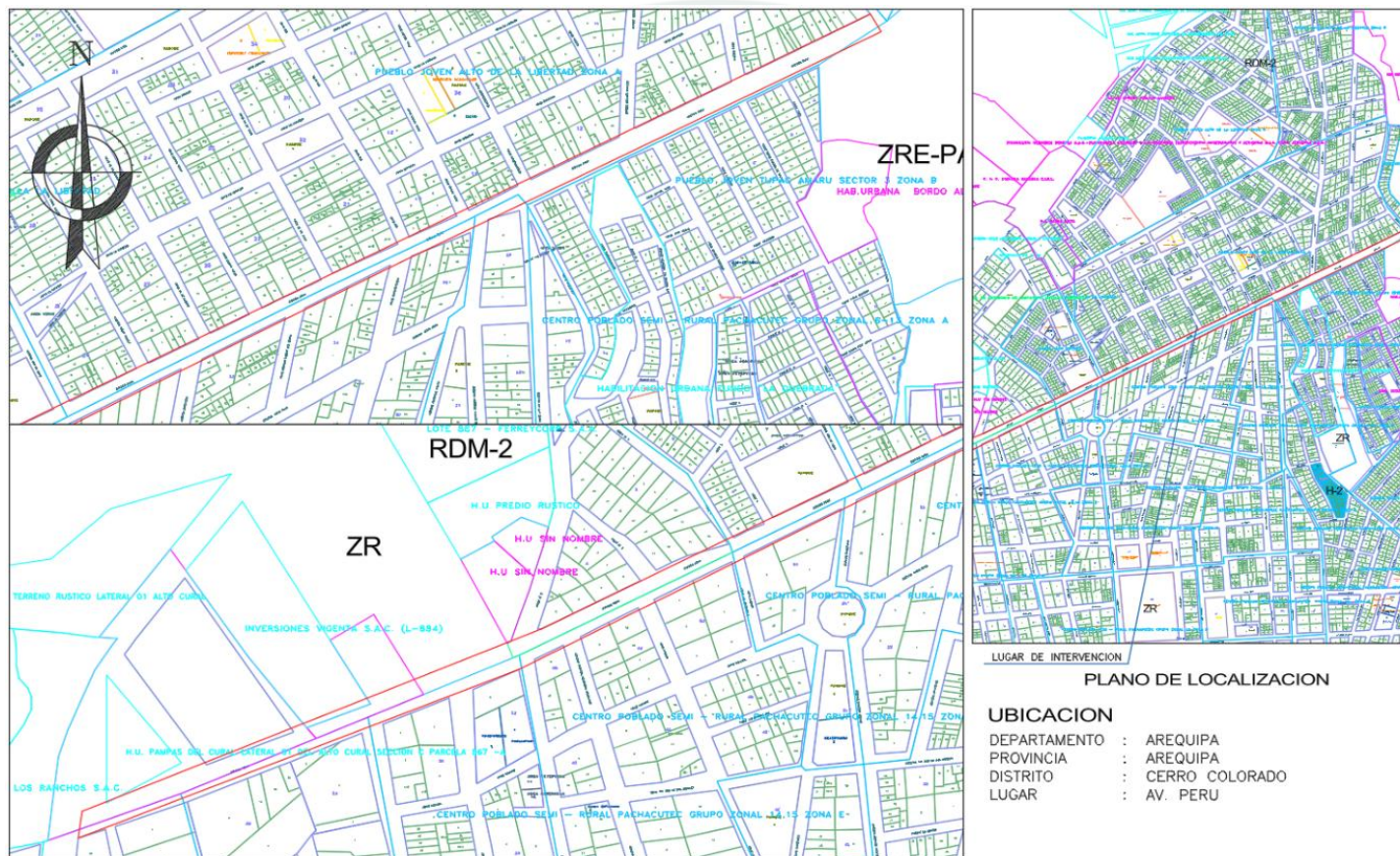
Características de la vía

Descripción	Valor
Longitud total evaluada	1,840 m
Número de carriles	2 (izquierdo y derecho)
Ancho de carril	7.00 m
Longitud por unidad de muestra	45 m
Número de unidades de muestra por carril	42
Total, de unidades de muestra evaluadas	84
Área total evaluada	26,460 m ²

Nota. Elaboración propia. Características geométricas y de muestreo de la Av. Perú, Cerro Colorado, Arequipa 2025. El área total evaluada corresponde a las 84 unidades de muestra de 45 m × 7 m (315 m²) cada una, distribuidas en dos carriles, conforme a ASTM D6433-20.

Figura 28.

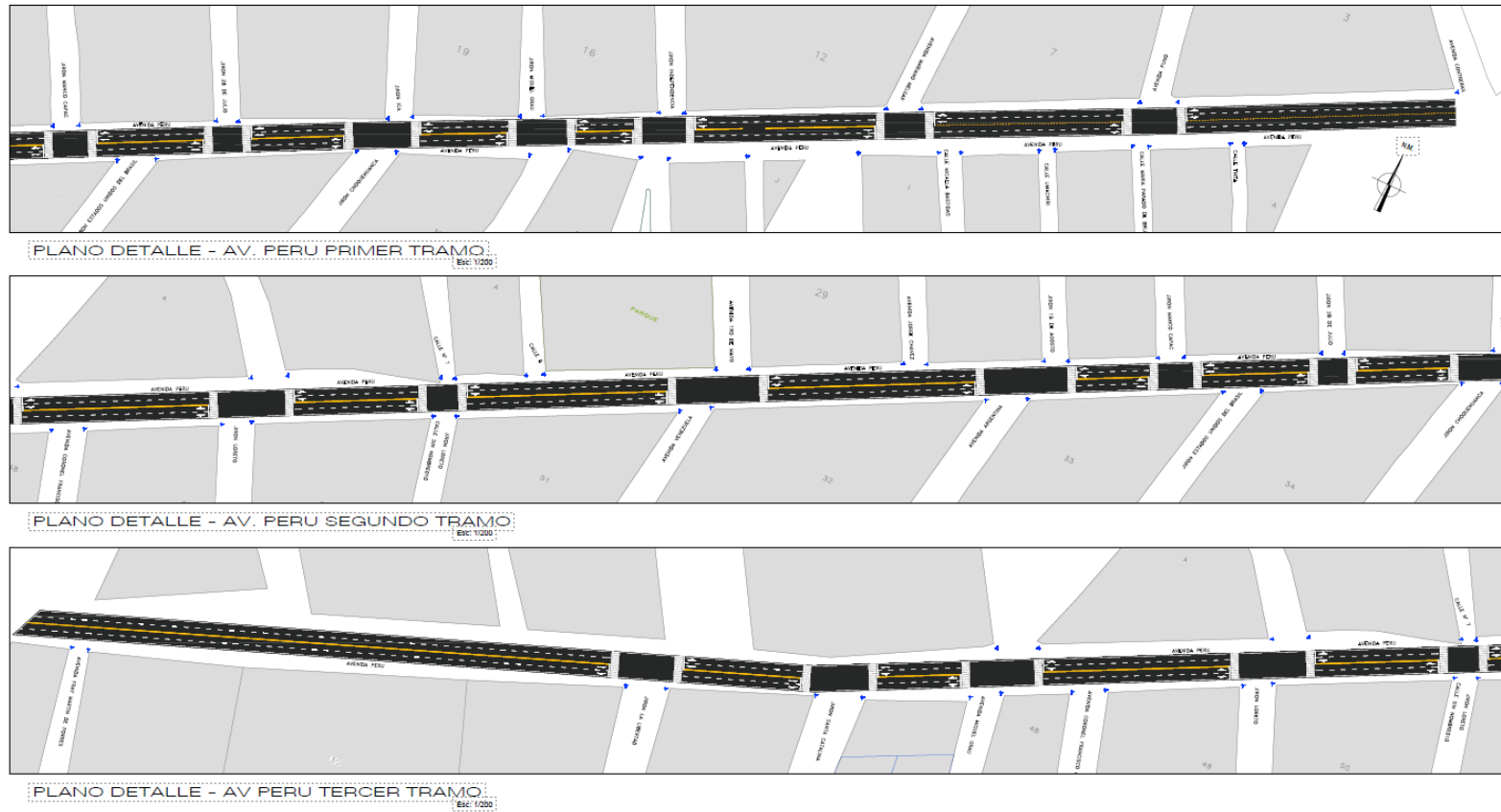
Plano de Localización de Av. Perú Cerro Colorado



Nota. Elaboración propia. Plano de localización de la Avenida Perú, distrito de Cerro Colorado, provincia y región Arequipa, Perú. Sistema de coordenadas: WGS84 / UTM Zona 19S (EPSG: 32719). Escala referencial.

Figura 29.

Plano de Planimetría de Av. Perú – Cerro Colorado



Nota. Elaboración propia. Plano planimétrico de la Avenida Perú, Cerro Colorado, Arequipa, mostrando la distribución de las 84 unidades de muestra evaluadas (42 carril izquierdo + 42 carril derecho), cada una de 45 m × 7 m (315 m²). Sistema de coordenadas: WGS84 / UTM Zona 19S

3.3.1.3. Características de la zona

Zona urbana consolidada, con presencia de múltiples urbanizaciones: Alto Libertad, Mariscal Castilla, Sudamericana, José Santos Atahualpa, entre otras, predominan viviendas unifamiliares y edificaciones de baja altura (1 a 3 pisos); además de eso existen espacios comerciales menores: bodegas, farmacias, restaurantes, ferreterías, panaderías y pequeñas tiendas.

La zona tiene infraestructura básica completa: redes de agua potable, desagüe, energía eléctrica y telefonía.

3.3.1.4. Características del tránsito

La Avenida Perú presenta un tránsito de tipo urbano local-intermedio, caracterizado por una circulación vehicular constante a lo largo del día, con niveles de congestión moderados a altos durante las horas punta (entre las 7:00–9:00 a.m. y las 5:00–7:30 p.m.), en esta vía se observa una alta presencia de unidades de transporte público, como minibuses, combis y taxis colectivos, los cuales operan con paraderos no formalizados distribuidos de manera irregular a lo largo del eje vial. El flujo vehicular está compuesto mayoritariamente por vehículos livianos, transporte público urbano, es importante señalar que, debido al perfil urbano de la zona, el tránsito se ve influenciado por la actividad comercial y residencial que se desarrolla en las inmediaciones, lo cual incrementa la interacción entre peatones y vehículos, generando puntos críticos de congestión y potencial riesgo vial.

Finalmente, se observa una baja implementación de infraestructura para el peatón, como veredas amplias, rampas accesibles o pasos peatonales debidamente señalizados, lo que obliga a los transeúntes a compartir espacio con los vehículos en algunos sectores, especialmente donde las veredas están deterioradas o interrumpidas por obstáculos.

3.3.2. Materiales e instrumentos utilizados

En el desarrollo de este estudio se utilizaron los equipos e instrumentos que se detallan a continuación, clasificados según la metodología a la que corresponden.

3.3.2.1. Instrumentos para el método convencional PCI

La inspección convencional empleó los siguientes instrumentos de medición y registro, seleccionados conforme a los requerimientos de la norma ASTM D6433-20 y mostrados en la Tabla 5.

Tabla 5.

Equipos e instrumentos utilizados

N°	Instrumento	Uso
01	Wincha métrica (50 m)	Medición de longitud de fallas y delimitación de unidades de muestra
02	Cinta métrica (5 m)	Medición de ancho y extensión de fallas puntuales
03	Regla rígida (1.2 m)	Medición de profundidad y ancho de fisuras y huecos
04	Hojas de registro PCI	Formato estandarizado para registro de tipo, severidad y dimensiones
05	Tablero de campo	Soporte para el llenado de hojas de registro en campo
06	Cámara fotográfica	Registro fotográfico de fallas representativas por unidad de muestra
07	Equipo de protección personal (EPP)	Chalecos reflectivos, cascos y conos de seguridad vial

Nota. Elaboración propia. Relación de equipos e instrumentos empleados durante la inspección convencional PCI de la Av. Perú, Cerro Colorado, Arequipa 2025. La selección de instrumentos responde a los requerimientos de medición establecidos en la norma ASTM D6433-20.

3.3.2.2. Equipos para el método asistido con RPAS

En el presente trabajo de investigación, se ha empleado un RPAS en la marca DJI, modelo DJI Mavic 3 Enterprise, el cual se muestra en la figura 30, este dron presenta una cámara de alta resolución y un módulo RTK (Real-Time Kinematic) este facilita la creación de ortomosaicos y modelos 3D altamente precisos del pavimento, permitiendo identificar y analizar defectos, deformaciones y grietas con gran exactitud, reduciendo los errores comunes en los sistemas de posicionamiento estándar (GNSS). Estas características hacen del Mavic 3 Enterprise una herramienta ideal para inspecciones precisas y eficientes del estado del pavimento en avenidas.

Figura 30.

Dron DJI Mavic 3



Nota. Adaptado de DJI Mavic 3 Enterprise – Product Page, por DJI, 2023

Entre sus características principales destacamos los siguientes:

- Peso: 1050gr.
- Cámara: sensor CMOS de 4/3" y resolución de 20 Megapíxeles
- Autonomía: 45 minutos sin viento
- Precisión: Vertical y Horizontal $\pm 0,1$ m
- GPS: GLONASS con modulo RTK
- Velocidad máxima: 75.6 km/h (con RTK)
- Altitud máxima: 6000m

Tabla 6.

Especificaciones del RPAS DJI Mavic 3 Enterprise

Aircraft	
Weight	DJI Mavic 3E: 915 g
Max Takeoff Weight	DJI Mavic 3E: 1,050 g
Dimensions	Folded (without propellers): 221×96.3×90.3 mm (L×W×H)
	Unfolded (without propellers): 347.5×283×107.7 mm (L×W×H)
Diagonal Distance	380.1 mm
Max Ascent Speed	6 m/s (Normal Mode)
	8 m/s (Sport Mode)
Max Descent Speed	6 m/s (Normal Mode)
	6 m/s (Sport Mode)
Max Flight Speed (at sea level, no wind)	15 m/s (Normal Mode)
	Forward: 21 m/s, Side: 20 m/s,
	Backward: 19 m/s (Sport Mode)
Max Wind Speed	12 m/s
Resistance	
Max Take-off Altitude Above Sea Level	6000 m (without payload)
Max Flight Time (no wind)	45 mins
Max Hover Time (no wind)	38 mins

Max Flight Distance	32 km
Max Pitch Angle	30° (Normal Mode) 35° (Sport Mode)
Max Angular Velocity	200°/s
GNSS	GPS+Galileo+BeiDou+GLONASS (GLONASS is supported only when the RTK module is enabled)
Hovering Accuracy	Vertical: ±0.1 m (with Vision System); ±0.5 m (with GNSS); ±0.1 m (with RTK) Horizontal: ±0.3 m (with Vision System); ±0.5 m (with High-Precision Positioning System); ±0.1 m (with RTK)
Operating Temperature Range	.- 10° to 40° C (14° to 104° F)
Internal Storage	N/A
Motor Model	2008
Propeller Model	9453F Propellers for Enterprise
Beacon	Built into the aircraft
Wide Camera	
Sensor	DJI Mavic 3E: 4/3 CMOS, Effective pixels: 20 MP
Lens	DJI Mavic 3E: FOV: 84° Format Equivalent: 24 mm Aperture: f/2.8-f/11 Focus: 1 m to ∞
ISO Range	DJI Mavic 3E: 100-6400 DJI Mavic 3E:
Shutter Speed	Electronic Shutter: 8-1/8000 s Mechanical Shutter: 8-1/2000 s
Max Image Size	DJI Mavic 3E: 5280×3956 DJI Mavic 3E: Single: 20 MP Timed: 20 MP
Still Photography Modes	JPEG: 0.7/1/2/3/5/7/10/15/20/30/60 s JPEG+RAW: 3/5/7/10/15/20/30/60 s Smart Low-light Shooting: 20 MP Panorama: 20 MP (raw image)

	H.264
Video Resolution	4K: 3840×2160@30fps FHD: 1920×1080@30fps
	DJI Mavic 3E:
Bitrate	4K: 130 Mbps FHD: 70 Mbps
Supported File Formats	exFAT
Photo Format	DJI Mavic 3E: JPEG/DNG (RAW)
Video Format	MP4 (MPEG-4 AVC/H.264)
Tele Camera	
Sensor	1/2-inch CMOS, Effective pixels: 12 MP FOV: 15°
Lens	Format Equivalent: 162 mm Aperture: f/4.4 Focus: 3 m to ∞
ISO Range	DJI Mavic 3E: 100-6400
Shutter Speed	Electronic Shutter: 8-1/8000 s
Max Image Size	4000×3000
Photo Format	JPEG
Video Format	MP4 (MPEG-4 AVC/H.264)
	DJI Mavic 3E:
	Single: 12 MP
Still Photography Modes	Timed: 12 MP JPEG: 0.7/1/2/3/5/7/10/15/20/30/60 s Smart Low-light Shooting: 12 MP
	H.264
Video Resolution	4K: 3840×2160@30fps FHD: 1920×1080@30fps
	DJI Mavic 3E:
Bitrate	4K: 130 Mbps FHD: 70 Mbps
Digital Zoom	8x (56x hybrid zoom)
Thermal Camera	
Thermal Imager	Uncooled VOx Microbolometer
Pixel Pitch	12 μm
Frame Rate	30 Hz

	DFOV: 61°
Lens	Format Equivalent: 40 mm Aperture: f/1.0 Focus: 5 m to ∞
Noise Equivalent	
Temperature Difference (NETD)	≤50 mK@F1.0
Temperature Measurement Method	Spot Meter, Area Measurement
Temperature Measurement Range	.-20° to 150° C (-4° to 302° F, High Gain Mode) 0° to 500° C (32° to 932° F, Low Gain Mode)
Palette	White Hot/Black Hot/Tint/Iron Red/Hot Iron/Arctic/Medical/Fulgurite/Rainbow 1/Rainbow 2
Photo Format	JPEG (8-bit) R-JPEG (16-bit)
Video Resolution	640×512@30fps
Bitrate	6 Mbps
Video Format	MP4 (MPEG-4 AVC/H.264)
Digital Zoom	28x
Infrared Wavelength	8-14 μm
Infrared Temperature Measurement Accuracy	±2° C or ±2% (using the larger value)
Gimbal	
Stabilization	3-axis (tilt, roll, pan) DJI Mavic 3E:
Mechanical Range	Tilt: -135° to 100° Roll: -45° to 45° Pan: -27° to 27°
Controllable Range	Tilt: -90° to 35° Pan: Not controllable
Max Control Speed (tilt)	100°/s
Angular Vibration Range	±0.007°
Sensing	
Type	Omnidirectional binocular vision system, supplemented with an infrared sensor at the bottom of the aircraft.

	Measurement Range: 0.5-20 m
Forward	Detection Range: 0.5-200 m Effective Sensing Speed: Flight Speed ≤ 15 m/s FOV: Horizontal 90°, Vertical 103°
Backward	Measurement Range: 0.5-16 m Effective Sensing Speed: Flight Speed ≤ 12 m/s FOV: Horizontal 90°, Vertical 103°
Lateral	Measurement Range: 0.5-25 m Effective Sensing Speed: Flight Speed ≤ 15 m/s FOV: Horizontal 90°, Vertical 85°
Upward	Measurement Range: 0.2-10 m Effective Sensing Speed: Flight Speed ≤ 6 m/s FOV: Front and Back 100°, Left and Right 90°
Downward	Measurement Range: 0.3-18 m Effective Sensing Speed: Flight Speed ≤ 6 m/s FOV: Front and Back 130°, Left and Right 160°
Operating Environment	Forward, Backward, Lateral, and Upward: Surface with a clear pattern and adequate lighting (lux >15) Downward: Diffuse reflective surface with diffuse reflectivity >20% (e.g. walls, trees, people) and adequate lighting (lux >15)
Video Transmission	
Video Transmission System	DJI O3 Enterprise Transmission
Live View Quality	Remote Controller: 1080p/30fps
Operating Frequency	2.400-2.4835 GHz
	5.725-5.850 GHz
Max Transmission Distance (unobstructed, free of interference)	DJI Mavic 3E:
	FCC: 15 km
	CE: 8 km
	SRRC: 8 km
	MIC: 8 km
Max Transmission Distance (Obstructed)	Strong Interference (dense buildings, residential areas, etc.): 1.5-3 km (FCC/CE/SRRC/MIC)
	Medium Interference (suburban areas, city parks, etc.): 3-9 km (FCC), 3-6 km (CE/SRRC/MIC)

Low Interference (open spaces, remote areas, etc.): 9-15 km
(FCC), 6-8 km (CE/SRRC/MIC)

Max Download Speed	15 MB/s (with DJI RC Pro Enterprise)
Latency (depending on environmental conditions and mobile device)	Approx. 200 ms
Antenna	4 Antennas, 2T4R
Transmission Power (EIRP)	2.4 GHz: <33 dBm (FCC), <20 dBm (CE/SRRC/MIC) 5.8 GHz: <33 dBm (FCC), <30 dBm (SRRC), <14 dBm (CE)

Nota. Adaptado de DJI Mavic 3 Enterprise – Especificaciones técnicas, por DJI, 2023 (<https://enterprise.dji.com/mavic-3-enterprise/specs>).

3.3.2.3. Software de procesamiento y cálculo

Para procesar la información levantada mediante ambas metodologías se utilizaron tres programas informáticos; el procesamiento fotogramétrico de las imágenes capturadas por el RPAS se realizó en Pix4Dmapper versión 4.8, software especializado en fotogrametría aérea que aplica el algoritmo Structure from Motion (SfM) combinado con reconstrucción Multi-View Stereo (MVS) para la producción de nubes de puntos de alta densidad, representaciones digitales del relieve y ortomosaicos georreferenciados de alta resolución.

La digitalización y metrado de fallas sobre la ortofoto generada se ejecutó en AutoCAD 2024, donde se importó el ortomosaico a escala real 1:1 en metros y se delimitaron las fallas mediante polígonos con hatch diagonal clasificados por color según el tipo de daño. Finalmente, el cálculo del Índice de Condición del Pavimento para las 84 unidades de muestra evaluadas se realizó en Microsoft Excel, mediante hojas de cálculo con fórmulas que reproducen el procedimiento iterativo del Valor Deducido Corregido (VDC) establecido en la norma ASTM D6433-20, incluyendo las curvas de valor deducido por tipo y severidad de falla.

3.3.2.4. Equipo de cómputo

Las características de los equipos de cómputo que se utilizaron para el desarrollo de esta investigación se detallan en las siguientes Figuras 31 y 32.

Figura 31.

Detalles del sistema del computador tesista Aguilar Guzman

The screenshot displays the Windows 'System' information window. At the top, it shows four key specifications: Processor (12th Gen Intel(R) Core(TM) i5-12450HX, 2.40 GHz), RAM (24.0 GB, 4800 MT/s), Graphics (6 GB, Various GPU installed), and Storage (477 GB, 409 GB used). Below this, the device name 'FRANCO' is shown with a button to change it. The 'Device Information' section provides a detailed list of system components and their specifications.

Información del dispositivo	
Nombre del dispositivo	FRANCO
Procesador	12th Gen Intel(R) Core(TM) i5-12450HX (2.40 GHz)
RAM instalada	24.0 GB (23.7 GB utilizable)
Tarjeta gráfica	NVIDIA GeForce RTX 3050 6GB Laptop GPU (6 GB) Intel(R) UHD Graphics (128 MB)
Almacenamiento	409 GB de 477 GB usado
Id. del dispositivo	58462735-70F6-45CE-B39B-E1DD24001ACE
Id. del producto	00330-80000-00000-AA862
Tipo de sistema	Sistema operativo de 64 bits, procesador x64
Lápiz y entrada táctil	La entrada táctil o manuscrita no está disponible para esta pantalla

Nota. Elaboración propia

Figura 32.

Detalles del sistema del computador tesista Yañez Pino

System > About

Processor
**Intel(R) Core(TM)
i5-10400 CPU @
2.90GHz**
2.90 GHz

Installed RAM
16.0 GB
Speed: 2133 MT/s

Graphics card
4 GB
NVIDIA GeForce GTX 1650

Storage
466 GB
251 GB of 466 GB used

RenatoPino
System Product Name [Rename this PC](#)

Device info [Copy](#) [^](#)

Device name	RenatoPino
Processor	Intel(R) Core(TM) i5-10400 CPU @ 2.90GHz (2.90 GHz)
Installed RAM	16.0 GB
Graphics card	NVIDIA GeForce GTX 1650 (4 GB)
Storage	251 GB of 466 GB used
Device ID	5A5317BC-4B9E-4821-97CF-C48BB78F09C8
Product ID	00326-10000-00000-AA570
System type	64-bit operating system, x64-based processor
Pen and touch	Pen and touch support with 20 touch points

Nota. Elaboración propia

3.4. Población, muestra y muestreo

3.4.1. Población

El universo de análisis de este estudio comprende la totalidad de la superficie de pavimento flexible de la Avenida Perú, emplazada en el distrito de Cerro Colorado, provincia y región Arequipa. El segmento objeto de evaluación abarca una extensión de 1,890 m repartida en dos franjas de circulación izquierda y derecha de 7 m de ancho cada una, con una superficie total de 26,460 m². Tomando como referencia la longitud unitaria de 45 m por segmento de análisis estipulada en la norma ASTM D6433-20, el total de unidades posibles asciende a 42 por carril, constituyendo un universo de 84 unidades de muestra para el conjunto de la vía.

3.4.2. Unidades de muestra

Para la presente investigación se consideró evaluar la totalidad del tramo comprendido entre las progresivas KM 0+000 y KM 1+912 de la Avenida Perú, dividiendo la vía en segmentos de cuarenta y cinco metros (45 m) de longitud y considerando el ancho de siete metros (7 m) por carril, lo que resulta en unidades de muestra de 315 m² cada una, conforme a lo establecido en la norma ASTM D6433-20.

Tabla 7.

Carril izquierdo de la Av. Perú.

N°	AREA (m2)	ANCHO(m)	LARGO(m)	PROGRESIVA
				INICIAL - FINAL
1	315	7	45	00+000 - 00+045
2	315	7	45	00+045 - 00+090
3	315	7	45	00+090 - 00+135
4	315	7	45	00+135 - 00+180
5	315	7	45	00+180 - 00+225
6	315	7	45	00+225 - 00+270
7	315	7	45	00+270 - 00+315
8	315	7	45	00+315 - 00+360
9	315	7	45	00+360 - 00+405
10	315	7	45	00+405 - 00+450
11	315	7	45	00+450 - 00+495
12	315	7	45	00+495 - 00+540
13	315	7	45	00+540 - 00+585
14	315	7	45	00+585 - 00+630
15	315	7	45	00+630 - 00+675
16	315	7	45	00+675 - 00+720
17	315	7	45	00+720 - 00+765
18	315	7	45	00+765 - 00+ 810
19	315	7	45	00+ 810 - 00+855
20	315	7	45	00+855 - 00+900
21	315	7	45	00+900 - 00+945
22	315	7	45	00+945 - 00+990
23	315	7	45	00+990 - 01+035

24	315	7	45	01+035 – 01+ 080
25	315	7	45	01+080 – 01+125
26	315	7	45	01+125 – 01+170
27	315	7	45	01+170 – 01+215
28	315	7	45	01+215 – 01+260
29	315	7	45	01+260 – 01+305
30	315	7	45	01+305 – 01+350
31	315	7	45	01+350 – 01+395
32	315	7	45	01+395 – 01+440
33	315	7	45	01+440 – 01+485
34	315	7	45	01+485 – 01+530
35	315	7	45	01+530 – 01+575
36	315	7	45	01+575 – 01+620
37	315	7	45	01+620 – 01+665
38	315	7	45	01+665 – 01+710
39	315	7	45	01+710 – 01+755
40	315	7	45	01+755 – 01+800
41	315	7	45	01+800 – 01+845
42	315	7	45	01+845 – 01+890

Nota. Elaboración propia. Distribución de las 42 unidades de muestra del carril izquierdo de la Av. Perú, Cerro Colorado, Arequipa 2025.

Tabla 8.

Carril derecho de la Av. Perú

N°	AREA (m2)	ANCHO(m)	LARGO(m)	PROGRESIVA
				INICIAL - FINAL
1	315	7	45	00+000 - 00+045
2	315	7	45	00+045 - 00+090
3	315	7	45	00+090 - 00+135
4	315	7	45	00+135 - 00+180
5	315	7	45	00+180 - 00+225
6	315	7	45	00+225 - 00+270
7	315	7	45	00+270 - 00+315
8	315	7	45	00+315 - 00+360
9	315	7	45	00+360 - 00+405
10	315	7	45	00+405 - 00+450
11	315	7	45	00+450 - 00+495
12	315	7	45	00+495 - 00+540
13	315	7	45	00+540 - 00+585
14	315	7	45	00+585 - 00+630
15	315	7	45	00+630 - 00+675
16	315	7	45	00+675 - 00+720
17	315	7	45	00+720 - 00+765
18	315	7	45	00+765 - 00+ 810
19	315	7	45	00+ 810 - 00+855
20	315	7	45	00+855 - 00+900
21	315	7	45	00+900 - 00+945
22	315	7	45	00+945 - 00+990
23	315	7	45	00+990 - 01+035

24	315	7	45	01+035 – 01+ 080
25	315	7	45	01+080 – 01+125
26	315	7	45	01+125 – 01+170
27	315	7	45	01+170 – 01+215
28	315	7	45	01+215 – 01+260
29	315	7	45	01+260 – 01+305
30	315	7	45	01+305 – 01+350
31	315	7	45	01+350 – 01+395
32	315	7	45	01+395 – 01+440
33	315	7	45	01+440 – 01+485
34	315	7	45	01+485 – 01+530
35	315	7	45	01+530 – 01+575
36	315	7	45	01+575 – 01+620
37	315	7	45	01+620 – 01+665
38	315	7	45	01+665 – 01+710
39	315	7	45	01+710 – 01+755
40	315	7	45	01+755 – 01+800
41	315	7	45	01+800 – 01+845
42	315	7	45	01+845 – 01+890

Nota. Elaboración propia. Distribución de las 42 unidades de muestra del carril derecho de la Av. Perú, Cerro Colorado, Arequipa 2025.

3.4.3. Tamaño de muestra

De acuerdo a la sección 7.5.2 de la norma ASTM D6433, nos indica que hay una fórmula para el número mínimo de unidades de muestra (n) que deben ser encuestadas dentro de una sección determinada para obtener una estimación estadísticamente adecuada (con un 95% de confianza) del PCI de la sección se calcula utilizando la siguiente fórmula y redondeando n al siguiente número entero superior

$$n = \frac{N * \sigma^2}{\frac{e^2}{4} * (N - 1) + \sigma^2}$$

Donde:

n: número mínimo de unidades de muestra a inspeccionar.

N: Número total de unidades de muestra en la sección.

e: error admisible en la estimación del PCI de la sección (comúnmente $e = \pm 5$ puntos PCI)

σ : desviación estándar del PCI de una unidad a otra dentro de la sección. Para la inspección inicial se asume $s = 10$ para pavimentos de concreto asfáltico (AC) y 15 para PCC. Para inspecciones posteriores se usa la desviación estándar de la inspección anterior.

Aplicando la fórmula para determinar el número mínimo de unidades de muestreo con un nivel de confianza del 95%, donde $N = 42$ corresponde al número total de unidades por carril, $\sigma = 10$ representa la desviación estándar estimada del PCI y $e = 5$ el error admisible, se obtuvo un tamaño mínimo de muestra de doce (12) unidades por carril.

Reemplazando:

$$n = \frac{42 * 10^2}{\frac{5^2}{4} * (42 - 1) + 10^2} = 12$$

Sin embargo, con la finalidad de fortalecer la representatividad estadística y disminuir la variabilidad de los resultados, se determinó evaluar cuarenta y dos (42) unidades por carril, alcanzando un total de ochenta y cuatro (84) unidades de muestra para toda la vía.

Esta decisión metodológica permite una precisión completa en la caracterización del estado superficial del pavimento flexible a lo largo de toda la extensión de la Avenida Perú.

3.5. Método de evaluación PCI convencional

La evaluación del pavimento flexible de la Avenida Perú mediante el método PCI convencional se ejecutó conforme al procedimiento establecido en la norma ASTM D6433-20, abarcando las etapas de organización del personal, inspección visual de fallas en campo, medición de dimensiones con instrumentos métricos y registro de datos en hojas de campo estandarizadas. A continuación, se describe cada etapa del proceso aplicado sobre las 84 unidades de muestra evaluadas.

3.5.1. Personal de campo

La inspección convencional mediante el método PCI se llevó a cabo por un equipo de dos evaluadores, quienes realizaron el levantamiento de fallas de forma simultánea sobre cada unidad de muestra; uno de los evaluadores se encargó de la identificación visual, tipificación y clasificación de las fallas según la norma ASTM D6433-20, mientras que el segundo realizó las mediciones de extensión con los instrumentos de medición, el registro fotográfico y el registro de datos en las hojas de campo estandarizadas.

Tabla 9.

Personal de campo

N°	Rol	Responsabilidad
01	Evaluador principal	Identificación, tipificación y clasificación de severidad de fallas
02	Evaluador auxiliar	Medición de dimensiones, registro en hojas de campo y control de progresivas

Nota. Elaboración propia. Conformación del equipo de inspección para el levantamiento de fallas mediante el método PCI convencional en la Av. Perú, Cerro Colorado, Arequipa 2025. Funciones asignadas conforme al procedimiento establecido en la norma ASTM D6433-20.

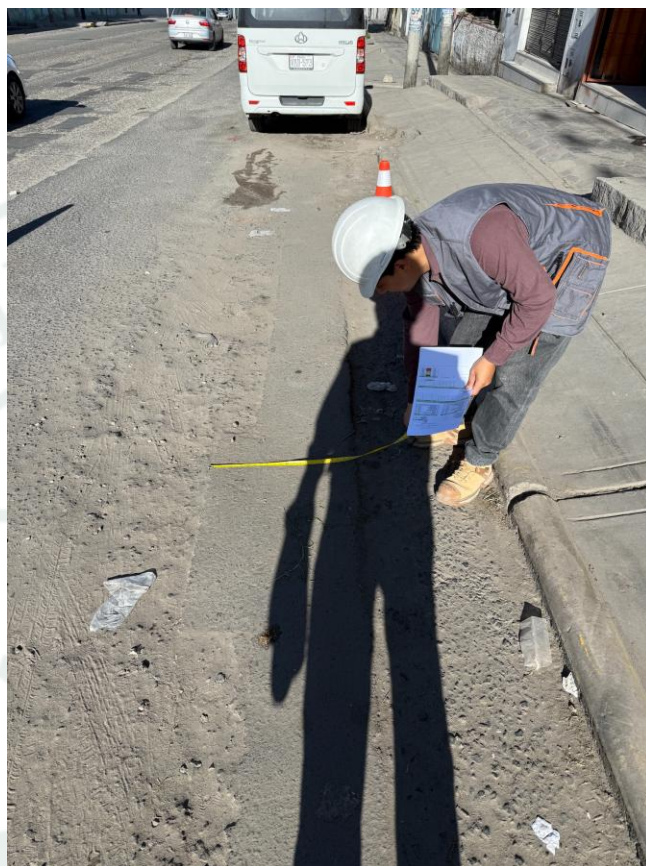
3.5.2. Inspección de fallas en el campo

La inspección de fallas se ejecutó conforme a los procedimientos establecidos en la norma ASTM D6433-20, evaluando un total de 84 unidades de muestra distribuidas en dos carriles de la Avenida Perú, distrito de Cerro Colorado, Arequipa, identificando visualmente el tipo y severidad de cada falla superficial y registrando sus dimensiones mediante wincha métrica de 50 m y cinta métrica de 5 m.

La información fue consignada en los formatos de campo del PCI durante la inspección, registrando la tipología de cada deterioro conforme a la codificación establecida por la norma ASTM, el grado de severidad (L/M/H) y las dimensiones medidas, como se mostrará a continuación en las figuras.

Figura 33.

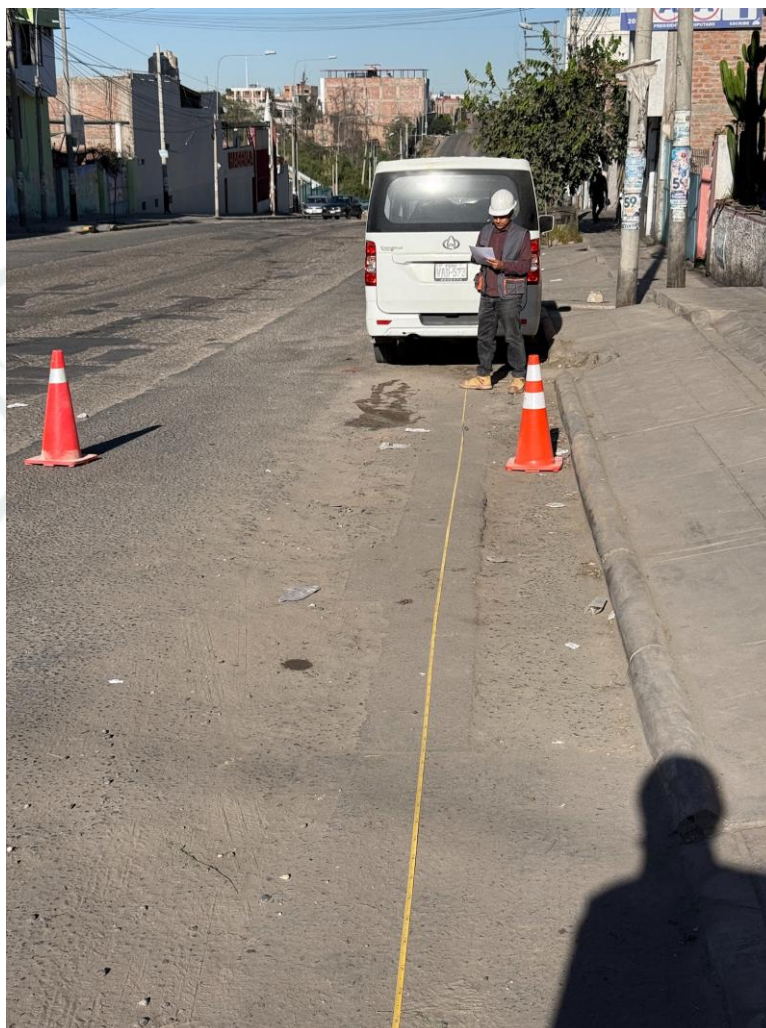
Inspección en campo



Nota. Elaboración propia. Registro fotográfico de la inspección superficial del pavimento flexible de la Av. Perú, distrito de Cerro Colorado, Arequipa 2025, realizada conforme a la norma ASTM D6433-20.

Figura 34.

Parcheo de pavimento flexible



Nota. Elaboración propia. Falla tipo Parcheo (daño N° 11) de severidad media identificada durante la inspección en campo de la Av. Perú, Cerro Colorado, Arequipa 2025. Evaluada conforme a ASTM D6433-20.

Figura 35.

Inspección de grietas en pavimento flexible



Nota. Elaboración propia. Registro fotográfico de la medición de Grietas Longitudinales y Transversales (daño N° 10) con wincha métrica durante la inspección convencional en la Av. Perú, Cerro Colorado, Arequipa 2025.

Figura 36.

Huecos en pavimento flexible



Nota. Elaboración propia. Falla tipo Huevo (daño N° 13) de severidad alta identificada durante la inspección en campo de la Av. Perú, Cerro Colorado, Arequipa 2025. Evaluada conforme a ASTM D6433-20.

Figura 37.

Hojas de inspección y catálogo de fallas

The image displays two documents related to pavement inspection. The left document is a standardized form for recording inspection data, titled 'MÉTODO PAVEMENT CONDITION INDEX (PCI)'. It includes fields for project name, location, date, and inspector. The form also contains two tables for recording types of pavement failures (e.g., potholes, cracks, surface defects) and a section for calculating the Pavement Condition Index (PCI) based on the severity and density of these failures. The right document is a catalog of pavement failures, titled 'ingepav' and 'Luis Ricardo Vázquez Varela, Ingeniero Civil, Especialista en Vías y Transporte, Universidad Nacional de Colombia'. It features three photographs of pavement failures: a pothole (Figura A11-a), a crack (Figura A11-b), and a surface defect (Figura A11-c). The catalog also includes a color-coded scale for the severity of the failures, ranging from 'Excelente' (green) to 'Faltado' (red).

Nota. Elaboración propia. Materiales de campo empleados durante la inspección PCI convencional: hojas de registro estandarizadas ASTM D6433-20 y catálogo de fallas de referencia. Av. Perú, Cerro Colorado, Arequipa 2025

3.5.3. Tiempo de inspección

El levantamiento de las 84 unidades de muestra (tanto para carril izquierdo y derecho) se realizó en tres jornadas de campo consecutivas, con un horario de 8:00 a.m. a 1:30 p.m., lo que representa una duración efectiva de cinco horas y treinta minutos por jornada. En total, el proceso de inspección demandó 16 horas y 30 minutos de trabajo en campo.

La variación en los tiempos de inspección estuvo determinada principalmente por la densidad y tipo de fallas halladas en cada unidad, así como por las interrupciones ocasionadas por el tránsito vehicular propio de una vía urbana en operación

3.5.4. Rendimiento de inspección

El rendimiento obtenido fue de aproximadamente 180 m/hora por equipo de dos personas, con un promedio de 33 minutos por segmento inspeccionado, valor que se encuentra dentro de los márgenes reportados en la bibliografía especializada para inspecciones PCI convencionales en vías urbanas de dos carriles (ASTM International, 2020).

Tal como se detalla en la Tabla 10.

Tabla 10.

Rendimiento de inspección

Actividad	Tiempo estimado
Desplazamiento y reconocimiento de la zona	30 min/día
Delimitación de unidades de muestra	15 min/día
Inspección por unidad de muestra (promedio)	30 min/unidad
Tiempo total de inspección por carril (42 UM)	24.10 horas
Tiempo total de inspección ambos carriles	48.20 horas
Jornadas de campo requeridas	09 días

Nota. Elaboración propia. Tiempos estimados de inspección registrados durante el trabajo de campo en la Av. Perú, Cerro Colorado, Arequipa 2025. Los tiempos consignados corresponden al trabajo efectivo en campo y no incluyen el tiempo de procesamiento y cálculo del PCI en gabinete.

3.5.5. Procedimiento de cálculo del PCI

A efectos de ilustrar el procedimiento de determinación del PCI, se tomó como caso de referencia la unidad de muestra UM01- carril derecho, sobre la cual se desarrolla de forma secuencial el cálculo de su estado superficial actual.; el procedimiento se presenta en cinco pasos secuenciales, de modo que el cálculo resulte verificable y auditable.

El desarrollo total de las 84 unidades de muestra se presenta en el Anexo 03

1. Para cada tipo de falla y nivel de severidad registrado, se calcula la densidad como la relación entre la cantidad de la falla (área en m²) y el área total de la unidad de muestra, el área total mencionada anteriormente es de 315 m² producto de la multiplicación del largo de la vía que es de 45 m y el ancho correspondiente de 7 m por carril, los valores finales se observaran en la Tabla 10.

$$\text{densidad} = \left(\frac{\text{Cantidad total de la falla}}{\text{Area de muestra}} \right) * 100\%$$

$$\text{densidad}_{f1} = \left(\frac{21.07}{315} \right) * 100\%$$

$$\text{densidad}_{f1} = 6.69\%$$

$$\text{densidad}_{f2} = \left(\frac{11.93}{315} \right) * 100\%$$

$$\text{densidad}_{f2} = 3.79\%$$

$$\text{densidad}_{f3} = \left(\frac{27.61}{315} \right) * 100\%$$

$$\text{densidad}_{f3} = 8.77\%$$

$$\text{densidad}_{f4} = \left(\frac{137.34}{315} \right) * 100\%$$

$$\text{densidad}_{f4} = 43.60\%$$

Tabla 11.

Cuantificación de fallas y cálculo de densidad

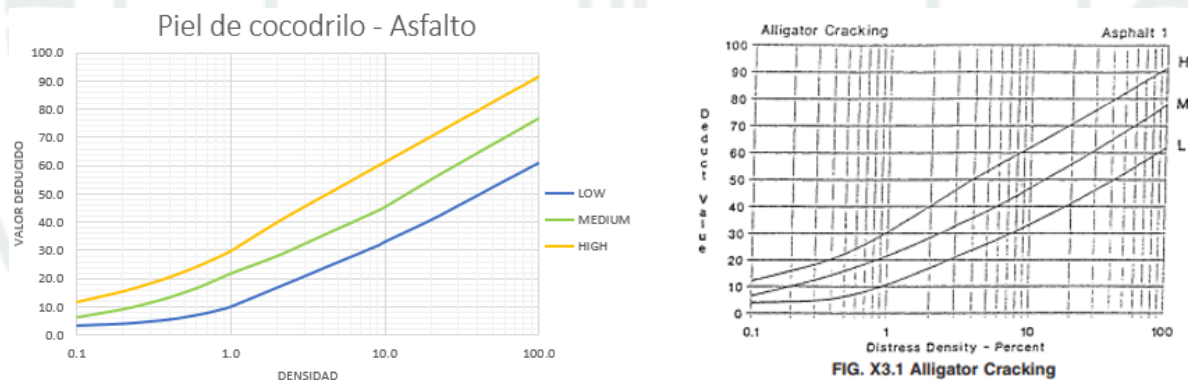
N	Tipo de falla	Severidad	Cantidad	Área UM	Densidad (%)
1	1	H	21.07	315	6.69
10	10	M	11.93	315	3.79
19	19	L	27.61	315	8.77
19	19	H	137.34	315	43.60

Nota. Elaboración propia, valores válidos para la UM 01 del carril derecho de la Av. Perú.

- Como siguiente paso tenemos que hallar el Valor Deducido (VD) para cada falla, este valor se obtiene por interpolación de acuerdo a los valores establecidos por la norma, como se observan en las siguientes Figuras 38, 39 Y 40; así mismo se detalla en la Tabla 12.

Figura 38.

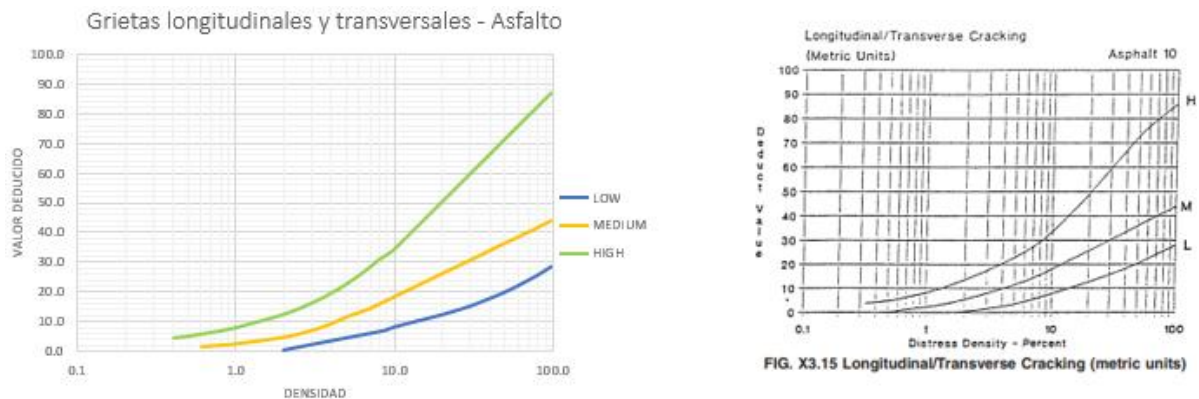
Curva de Valor deducido para falla de piel de cocodrilo en asfalto



Nota. Elaboración propia a partir de los valores de densidad y valor deducido establecidos en la norma ASTM D643.

Figura 39.

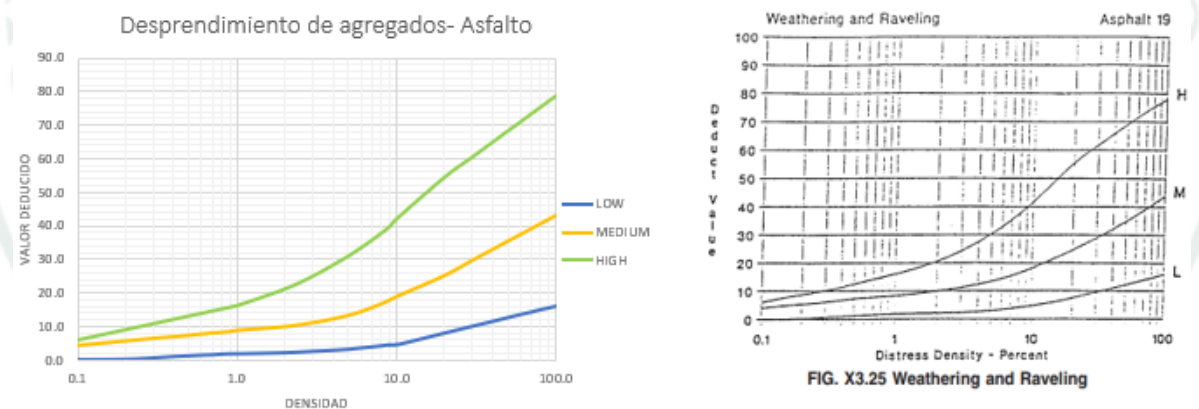
Curva de Valor deducido para falla de grietas longitudinales y transversales en asfalto



Nota. Elaboración propia a partir de los valores de densidad y valor deducido establecidos en la norma ASTM D6433.

Figura 40.

Curva de Valor deducido para falla de desprendimiento de agregados en asfalto



Nota. Elaboración propia a partir de los valores de densidad y valor deducido establecidos en la norma ASTM D6433.

Tabla 12.

Valores deducidos obtenidos por falla

N	Tipo de falla	Severidad	Cantidad	Área UM	Densidad (%)	VD
1	1	H	21.07	315	6.69	56.05
10	10	M	11.93	315	3.79	8.71
19	19	L	27.61	315	8.77	4.53
19	19	H	137.34	315	43.60	66.22

Nota. Elaboración propia, valores válidos para la UM 01 del carril derecho de la Av. Perú.

3. Continuando con el cálculo correspondiente para el PCI, tenemos que realizar el ordenamiento de los valores deducidos y el cálculo de máximo admisible de valores deducidos (m) y el número de valores a deducir (q) donde tienen que ser mayor a dos (02).

$$m = 1 + \left(\frac{9}{98}\right) * (100 - HDV)$$

- m= Máximo admisible de valores deducidos (mínimo de 01 y máximo de 10)
- HDV: Mayor Valor Deducido

Aplicando la formula obtenemos lo siguiente:

$$m = 1 + \left(\frac{9}{98}\right) * (100 - 66.22)$$

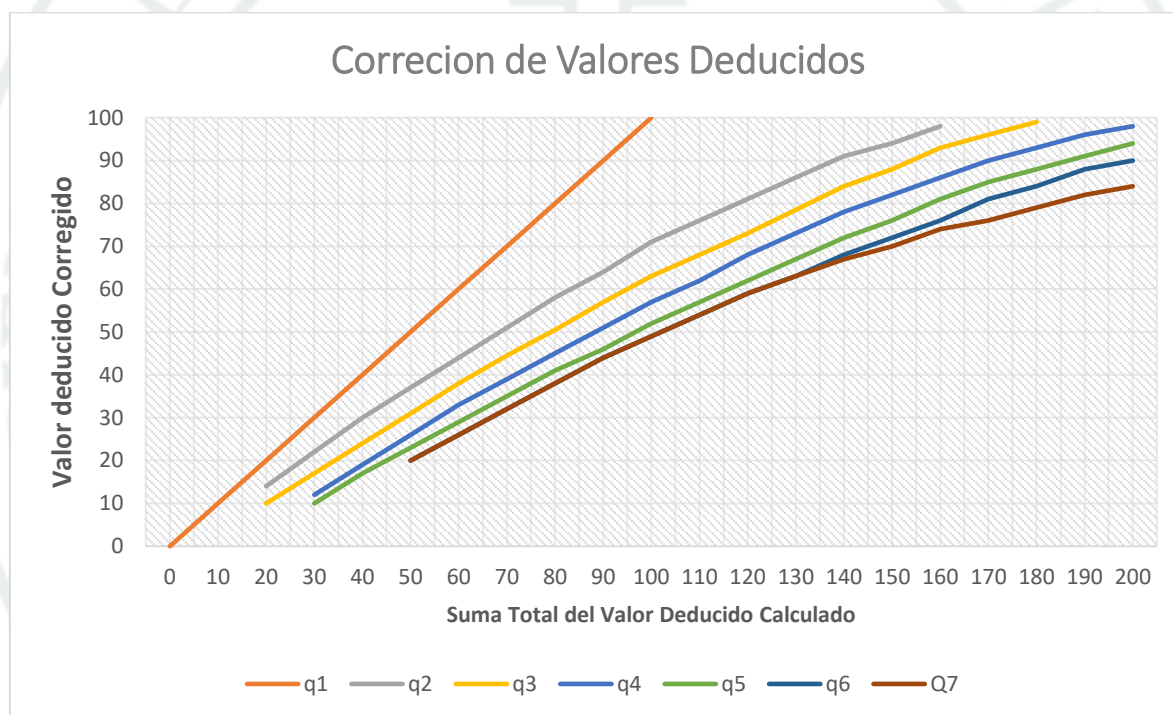
$$m = 4.10$$

$$q = 4.00$$

4. Se construye la matriz iterativa de corrección; en cada iteración se determina q como el número de valores deducidos mayores que 2; se suma el total de valores deducidos (VDT) y, con dicho total y el valor de q , se obtiene el Valor Deducido Corregido (VDC) leído de la curva de corrección. Posteriormente, el menor valor deducido mayor que 2 se reduce a 2 y se repite el procedimiento hasta llegar al Máximo Valor Deducido.

Figura 41.

Curva de corrección de Valores Deducidos — lectura del VDC en función de VDT y q



Nota. Elaboración propia a partir de la curva de corrección de valores deducidos establecidos en la norma ASTM D6433

Tabla 13.

Matriz iterativa de cálculo del Valor Deducido Corregido (VDC).

N	VD1	VD2	VD3	VD4	VD5	VD6	VD7	VDT	q	VDC
1	66.22	56.05	8.71	4.53				135.51	4	75.76
2	66.22	56.05	8.71	2.00				132.98	3	80.29
3	66.22	56.05	2.00	2.00				126.27	2	84.14
4	66.22	2.00	2.00	2.00				72.22	1	72.22
5										
6										
7										
Máximo									VDC	84.14

Nota. Elaboración propia, adaptado de la normativa ASTM D6433

- Después de todos los cálculos, obtenemos el Índice de Condición del Pavimento de dicha unidad con la siguiente formula y poder clasificar su condición de acuerdo a la norma ASTM D6433

$$PCI = 100 - \text{Maximo VDC}$$

$$PCI = 100 - 84.14$$

$$PCI = 16$$

Condicion = Muy malo

Tabla 14.

Rangos de clasificación del PCI según la condición del pavimento

Rango	Color	Clasificación
100-85	Verde oscuro	Excelente
85-70	Verde Claro	Muy Bueno
70-55	Amarillo	Bueno
55-40	Rojo	Regular
40-25	Rojo medio	Malo
25-10	Rojo oscuro	Muy Malo
10-0	Plomo	Fallado

Nota. Elaboración propia, adaptado de la normativa ASTM D6433

Nota normativa: Para determinar el número de valores deducidos (q), su valor deducido (VD) tiene que ser mayor a dos (02); si en la unidad de muestra solo un valor deducido es mayor que 2 (es decir, m resulta 0 en la ficha de campo, no se realiza el proceso iterativo); en caso el valor de m sea mayor al valor de q, se usara el número de valores deducidos (q), en el caso contrario de que el valor de m sea menor que q, se usara el valor de q; aun incluyendo las fracciones del último valor admisible se aplican.

Hoja de inspección y registro de fallas muestra 01

Nota. Elaboración propia. Hoja de inspección PCI diligenciada en campo correspondiente a la unidad de muestra N° 01 (progresiva KM 0+000 al KM 0+045), carril derecho.

3.6. Método de evaluación PCI asistido con RPAS

El análisis superficial del pavimento flexible de la Avenida Perú mediante el método PCI con apoyo de RPAS se estructuró en cuatro fases consecutivas y articuladas entre sí: la programación del vuelo, la realización del vuelo en modo autónomo, el tratamiento fotogramétrico de las imágenes en Pix4D Mapper y la detección y cuantificación de fallas sobre el ortomosaico georreferenciado en AutoCAD 2024. Este conjunto de etapas permitió obtener los valores del PCI aplicando el mismo procedimiento de cálculo que el método convencional, pero a partir de una fuente de datos objetiva, georreferenciada y de alta resolución espacial. A continuación, se describe cada etapa en detalle.

3.6.1. Planeación del vuelo

El plan de vuelo se desarrolla inicialmente en gabinete mediante la aplicación DJI Ground Station Pro, herramienta que posibilita la programación de misiones aéreas automatizadas para equipos de la marca DJI con una interfaz de uso intuitivo. Esta plataforma facilita la delimitación de la zona a cubrir sobre imágenes satelitales y permite configurar los parámetros operativos del vuelo, tales como el modelo de sensor del RPAS, la altitud de operación y los porcentajes de solapamiento longitudinal y transversal entre fotogramas, tal como se muestra en la Figura 43.

Figura 43.

Plan de vuelo de la avenida Perú



Nota. Elaboración propia. Captura de pantalla de la aplicación DJI Pilot 2 mostrando el plan de vuelo autónomo configurado sobre la Av. Perú, distrito de Cerro Colorado, Arequipa. Altitud: 30 m AGL; traslape frontal: 80%; traslape lateral: 70%.

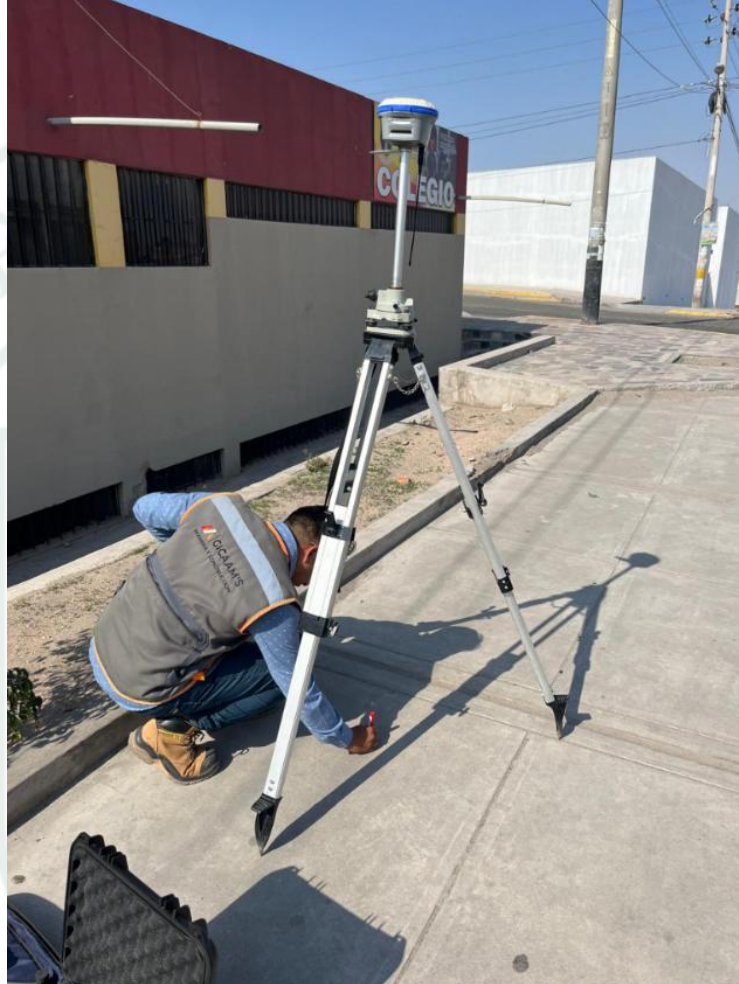
Con el propósito de identificar las deficiencias del pavimento, la metodología propuesta establece la realización de vuelos a una altitud de 20 metros, ya que esta altura es fundamental para asegurar una resolución de 5 milímetros por píxel (Ground Sample Distance - GSD), lo cual es crucial para la detección detallada de las fallas; asimismo, se incorporan solapamientos longitudinales y transversales del 80% en ambos casos, este porcentaje de solape es óptimo para generar un número elevado de puntos homólogos y, consecuentemente, garantizar una correlación exacta de los mismos, una vez que estos parámetros son introducidos en el sistema, el software procede a calcular automáticamente variables esenciales para la misión, tales como el número de líneas de vuelo, la cantidad de fotografías proyectadas, la velocidad de operación y el tiempo total de vuelo.

La planeación del vuelo se realizó con el equipo RPAS DJI Mavic 3 Enterprise, configurando los parámetros de misión en la aplicación DJI Pilot 2, el tramo evaluado corresponde a la Avenida Perú, distrito de Cerro Colorado, con una longitud de 1,800 m distribuida en dos carriles de 7 m de ancho cada uno, para un total de 42 unidades de muestra de $45\text{ m} \times 7\text{ m}$ (315 m^2).

Se estableció una altitud de vuelo de 30 m sobre el nivel del terreno (AGL), obteniendo una resolución de terreno (GSD) de 1.5 cm/píxel, suficiente para identificar fisuras de ancho mayor a 3 mm. El traslape frontal se configuró en 80% y el lateral en 70%, con patrón de vuelo en doble grilla orientada paralelamente al eje vial. Se distribuyeron 8 Puntos de Control en Tierra (GCP) por vuelo, medidos con GPS diferencial RTK con precisión planimétrica menor a 2 cm, para garantizar la georreferenciación absoluta de la ortofoto en el sistema WGS84 / UTM Zona 19S (EPSG: 32719)

Figura 44.

Medición de punto de control en tierra (GCP) con receptor GPS diferencial RTK sobre la Avenida Perú, Cerro Colorado



Nota. Personal técnico realizando la materialización y medición de un punto de control en tierra (GCP) Se aprecia el equipo en posición sobre la acera adyacente al tramo evaluado, con la antena receptora estacionada en el punto marcado. Fotografía tomada por los autores (2025).

Tabla 15.

Área de estudio y polígono de vuelo

N°	Descripción	Valor Especificación	/ Unidad	Observación
01	Vía evaluada	Avenida Perú	—	Cerro Colorado, Arequipa
02	Longitud total del tramo	1,890	m	Ambos carriles
03	Número de carriles	2 (Izquierdo y Derecho)	—	Circulación unidireccional
04	Ancho de carril	7.00	m	Cada carril
05	Área total evaluada	26,460	m ²	1890 × 7 m
06	Unidades de muestra por carril	42	UM	45 m × 7 m = 315 m ² c/u
07	Total de unidades de muestra	84	UM	42 izquierdo + 42 derecho
08	Margen lateral del polígono de vuelo	10	m	A cada lado de la calzada
09	Sistema de coordenadas	WGS84 – UTM Zona 19S	EPSG:32719	Georreferenciado
10	Datum vertical	EGM2008	—	Modelo geoidal

Nota. Elaboración propia. Parámetros del área de estudio y delimitación del polígono de vuelo para la evaluación RPAS de la Av. Perú, Cerro Colorado, Arequipa 2025. Sistema de coordenadas: WGS84 / UTM Zona 19S (EPSG: 32719).

Tabla 16.

Parámetros de vuelo configurados

N°	Parámetro	Valor Especificación	/	Unidad	Justificación técnica
01	Equipo RPAS	DJI Mavic 3 Enterprise	3	—	Cámara CMOS 4/3" – 20 MP
02	Altitud de vuelo (AGL)	50		m	GSD objetivo ≈ 1.5 cm/píxel
03	GSD (Ground Sampling Distance)	≈ 1.5		cm/píxel	Identifica fisuras de ≥ 3 mm
04	Velocidad de vuelo	5		m/s	Óptima para traslape objetivo
05	Traslape frontal (overlap)	80		%	Garantiza coincidencia entre imágenes
06	Traslape lateral (sidelap)	70		%	Garantiza cobertura lateral completa
07	Patrón de vuelo	Doble grilla (cuadrícula)		—	Orientación paralela al eje vial
08	Modo de disparo de cámara	Automático		1 foto/2 s	Garantiza traslape constante
09	N° total de imágenes estimadas	$\approx 1,200$		fotos/vuelo	Por carril (2 vuelos totales)
10	N° de vuelos realizados	2		vuelos	1 por carril
11	Horario de vuelo	8:00 – 11:00 a.m.		—	Mínima sombra, luz óptima
12	Autonomía de batería	≈ 43		min/batería	3 baterías disponibles

Nota. Elaboración propia. Parámetros de misión configurados en la aplicación DJI Pilot 2 para el vuelo autónomo del RPAS DJI Mavic 3 Enterprise sobre la Av. Perú, Cerro Colorado, Arequipa 2025.

Tabla 17.

Puntos de control en tierra (GCP)

N°	Especificación GCP	Valor	Unidad	Referencia
01	Mínimo de GCP por vuelo	4	GCP	Recomendación Pix4D para áreas lineales
02	Distribución de GCP	Extremos del tramo + puntos intermedios	—	Distribución uniforme
03	Material del target	Diana 50×50 cm blanco/negro	—	Alta visibilidad en ortofoto
04	Precisión planimétrica GPS	< 2	cm	GPS diferencial RTK
05	Precisión altimétrica GPS	< 3	cm	GPS diferencial RTK
06	RMSE objetivo en planta	< 3	cm	Validado en Quality Report Pix4D
07	Sistema de coordenadas GCP	WGS84 – UTM Zona 19S	EPSG:32719	Coherente con vuelo

Nota. Elaboración propia. Características y distribución de los Puntos de Control en Tierra (GCP) empleados para la georreferenciación absoluta de la ortofoto. Sistema de coordenadas: WGS84 / UTM Zona 19S (EPSG: 32719). Datum vertical: EGM2008.

3.6.2. Ejecución del vuelo

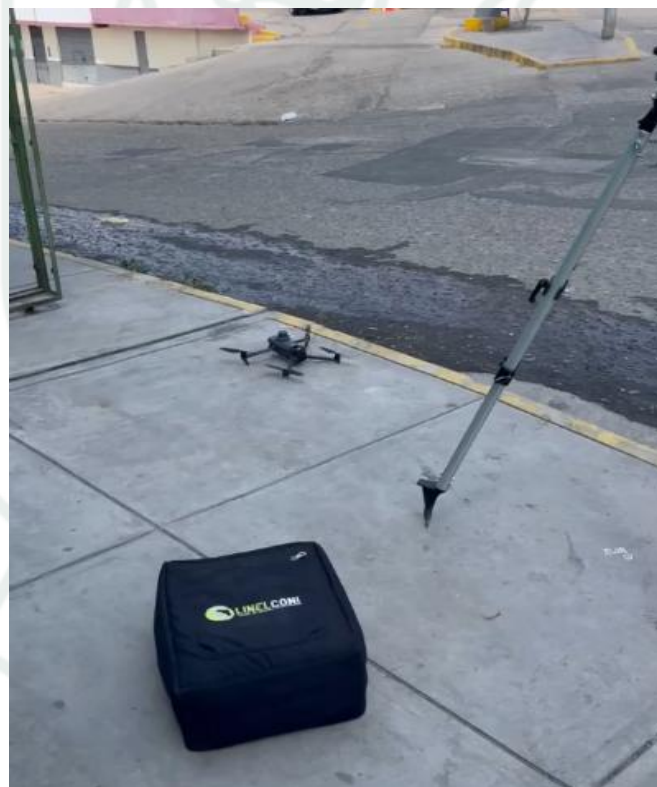
El vuelo se ejecutó un día domingo con poco tránsito y a las 8:00 am para minimizar las sombras, lo cual es preferible para evitar errores en el proceso de restitución. Las misiones se llevaron a cabo con el tránsito vehicular habitual, despegando desde un lado de la vía, según se muestra en la Figura 45. En total, se capturaron 702 imágenes georreferenciadas.

Antes de realizar el vuelo del dron sobre la avenida en estudio se deben verificar lo siguiente:

1. Hélices colocadas correctamente
2. Porcentaje de batería óptima tanto en el VANT como el radiocontrol.
3. Conexión correcta entre el radiocontrol y el VANT.
4. Buena recepción de señal de GPS (al menos 10 satélites)
5. Establecer punto de despegue y retorno en caso de pérdida de señal.
6. Tarjeta de memoria colocada correctamente.

Figura 45

Ejecución del vuelo en la avenida Perú



Nota. Elaboración propia.

Una vez que el VANT despegue e inicia el plan de vuelo, no es necesario el control manual alguno por parte del piloto, salvo se necesite cancelar o pausar el vuelo ante cualquier problema que perjudique el relevamiento de la información. Sin embargo, durante la ejecución del vuelo se puede monitorear en tiempo real la ubicación, velocidad, trayectoria, imagen de transmisión, número de satélites del GPS, cantidad de fotografías realizadas y porcentaje de la batería del equipo como se muestra en la Figura 46.

Figura 46.

Pantalla de monitoreo de vuelo



Nota. Elaboración propia. Captura de pantalla de la interfaz DJI Pilot 2 durante la ejecución del vuelo autónomo sobre la Av. Perú, mostrando en tiempo real la trayectoria, altitud, velocidad, número de satélites GPS y porcentaje de batería del RPAS DJI Mavic 3 Enterprise.

La ejecución del vuelo se realizó en una sola jornada de campo, operando el RPAS en modo VLOS (Visual Line of Sight) conforme a la normativa peruana RG 09-2015 de la DGAC. El equipo de campo estuvo conformado por dos personas: el piloto al mando (PIC) y un observador de seguridad. Se ejecutaron dos vuelos autónomos, uno por carril, con un tiempo aproximado de vuelo de 40 minutos cada uno, capturando un total de aproximadamente 2,400 imágenes en formato JPG con metadatos GPS embebidos.

El tiempo total de operación en campo fue de aproximadamente 2.6 horas, lo que representa un rendimiento de 1275 m/hora, significativamente superior al método convencional (78 m/hora). Las condiciones meteorológicas durante el vuelo fueron favorables: viento inferior a 5 m/s, temperatura entre 18°C y 24°C y visibilidad horizontal superior a 3 km.

Tabla 18.

Personal de vuelo

N°	Rol	Responsabilidad principal	Cantidad	Observación
01	Piloto RPAS (PIC – Pilot in Command)	Operación del RPAS, monitoreo de misión autónoma y toma de decisiones de seguridad	01	Con certificación DGAC
02	Observador de seguridad	Vigilancia del espacio aéreo, control del tráfico vehicular y comunicación con piloto	01	Señalización del área operativa

Nota. Elaboración propia. Conformación del equipo de vuelo para la evaluación RPAS de la Av. Perú, Cerro Colorado, Arequipa 2025. Operación en modo VLOS (Visual Line of Sight) conforme a la normativa peruana RG 09-2015 de la DGAC.

Tabla 19.

Equipos e instrumentos

N°	Equipo / Instrumento	Especificación técnica	Cantidad	Uso en campo
01	RPAS DJI Mavic 3 Enterprise	Cámara CMOS 4/3", 20 MP, autonomía ~43 min, GPS/GNSS integrado	01	Captura de imágenes aéreas
02	Baterías de vuelo DJI	77 Wh, autonomía ~43 min c/u	03	Garantiza cobertura completa del tramo
03	Control remoto DJI RC Pro	Pantalla integrada 1000 nits, alcance 15 km	01	Operación y monitoreo de la misión
04	GPS diferencial RTK	Precisión planimétrica ± 2 cm, altimétrica ± 3 cm	01	Levantamiento de coordenadas GCP
05	Targets GCP (dianas fotogramétricas)	Dianas 50×50 cm blanco/negro de alta visibilidad	08	Georreferenciación de la ortofoto
06	Laptop / Tablet con Pix4Dcapture	Planificación y monitoreo de la misión autónoma	01	Control de parámetros de vuelo
07	Wincha / cinta métrica	Longitud 50 m	01	Delimitación y verificación de UM
08	Equipo de protección personal (EPP)	Chalecos reflectivos, cascos, conos de seguridad	01 juego	Seguridad operativa del personal
09	Tarjetas de memoria microSD	64 GB Class 10 UHS-I	04	Almacenamiento de imágenes capturadas
10	Disco duro externo portátil	1 TB USB 3.0	01	Respaldo de imágenes en campo

Nota. Elaboración propia. Relación de equipos e instrumentos utilizados durante la ejecución del vuelo RPAS y la inspección convencional PCI de la Av. Perú, Cerro Colorado, Arequipa 2025.

Tabla 20.

Condiciones meteorológicas del vuelo

Nº	Parámetro	Condición registrada	Límite operacional	¿Apto?
01	Velocidad del viento	< 5 m/s (Beaufort 3)	< 10 m/s	Sí
02	Condición del cielo	Parcialmente nublado (nubosidad < 50%)	Sin lluvia ni tormenta	Sí
03	Temperatura ambiente	18°C – 24°C	–10°C a 40°C	Sí
04	Visibilidad horizontal	Superior a 3 km	> 1 km (VLOS)	Sí
05	Precipitación	Sin precipitación	Sin lluvia	Sí
06	Presencia de restricciones aéreas	Sin restricciones en el área	Fuera de zonas DGAC restringidas	Sí
07	Modo de operación	VLOS (Visual Line of Sight)	Requerido por RG 09-2015 DGAC	Sí

Nota. Elaboración propia. Condiciones meteorológicas registradas durante la ejecución de los vuelos RPAS sobre la Av. Perú, Cerro Colorado, Arequipa 2025. Fuente: estación meteorológica local y registro en campo.

Tabla 21.

Rendimiento de ejecución de vuelo

Nº	Actividad	Detalle	Tiempo (min)	Observación
01	Instalación y nivelación de GCP	Posicionamiento de 8 targets + lectura GPS RTK	30	Por jornada de vuelo
02	Verificaciones previas del RPAS	Batería, sensores, firmware, calibración de brújula	10	Por vuelo
03	Vuelo autónomo – Carril Izquierdo	1,800 m + margen lateral 10 m a cada lado	≈ 40	1 batería + recambio
04	Vuelo autónomo – Carril Derecho	1,800 m + margen lateral 10 m a cada lado	≈ 40	1 batería + recambio
05	Cambio de baterías entre vuelos	Recarga no disponible en campo	15	3 baterías alternadas
06	Descarga de imágenes al disco externo	≈ 1,200 imágenes por vuelo en formato JPG	10	Por vuelo

N°	Actividad	Detalle	Tiempo (min)	Observación
07	Desmontaje y traslado del equipo	Retiro de targets y equipo del área de vuelo	10	Por jornada
—	TIEMPO TOTAL EN CAMPO (ambos carriles)		≈ 155 min (≈ 2.6 h)	1 jornada de campo
—	N° total de imágenes capturadas	≈ 1,200 imágenes × 2 vuelos	≈ 2,400 fotos	Ambos carriles
—	Rendimiento lineal	3780 m evaluados en ≈ 2.6 h	≈ 1275 m/h	vs. 78 m/h método conv.

Nota. Elaboración propia. Indicadores de rendimiento obtenidos durante la ejecución del vuelo RPAS sobre la Av. Perú, Cerro Colorado, Arequipa 2025. El rendimiento de cobertura fue de aproximadamente 1275 m/hora, comparado con los 78 m/hora del método convencional

Terminado el vuelo, el equipo está programado para retornar automáticamente al punto de despegue a la altura indicada. Todas las imágenes quedan registradas en la memoria externa colocada en el equipo anteriormente, para luego ser descargadas en gabinete y proceder con el procesamiento.

3.6.3. Procesamiento de imágenes en Pix4Dmapper

El procesamiento de imágenes georreferenciadas comprende el conjunto de operaciones computacionales aplicadas sobre las fotografías aéreas capturadas por el RPAS con la finalidad de generar productos fotogramétricos de alta resolución —principalmente la ortofoto y el modelo digital de superficie— que permitan la identificación y cuantificación de fallas superficiales en el pavimento flexible. Este proceso se ejecutó íntegramente en el software Pix4Dmapper, siguiendo el flujo de trabajo estándar de la fotogrametría con Structure from Motion (SfM), conforme a las recomendaciones del fabricante y a las prácticas establecidas en la literatura técnica especializada (Ferrer-González et al., 2020).

Pix4Dmapper es un software de fotogrametría aérea desarrollado por la empresa Pix4D S.A. (Suiza), ampliamente utilizado en aplicaciones de ingeniería civil, topografía y evaluación de infraestructura vial. El software aplica algoritmos de Structure from Motion (SfM) y Multi-View Stereo (MVS) para reconstruir modelos tridimensionales georreferenciados a partir de conjuntos de imágenes aéreas con traslape. Su selección para el presente estudio se fundamenta en su robustez para el procesamiento de imágenes en superficies planas con bajo relieve, como es el caso de pavimentos urbanos, y en su capacidad de generar ortofotos con resolución de terreno (GSD) inferior a 2 cm/píxel, suficiente para la detección de fisuras de ancho mayor a 3 mm (Irizarry y Johnson, 2014)

El equipo de cómputo utilizado para el procesamiento contó con las siguientes especificaciones: procesador Intel Core i7 de 10.^a generación (3.8 GHz), memoria RAM de 32 GB DDR4, tarjeta gráfica NVIDIA GeForce GTX 1660 Super (6 GB VRAM) y almacenamiento en unidad SSD de 1 TB. Estas especificaciones permitieron ejecutar el flujo de procesamiento completo de aproximadamente 1,200 imágenes por vuelo en un tiempo promedio de 3 horas

3.6.3.1. Creación del proyecto

La creación del proyecto en Pix4Dmapper constituye la etapa inicial del flujo de procesamiento fotogramétrico. Dentro de la interfaz del programa, se genera un nuevo proyecto y se incorporan las imágenes.

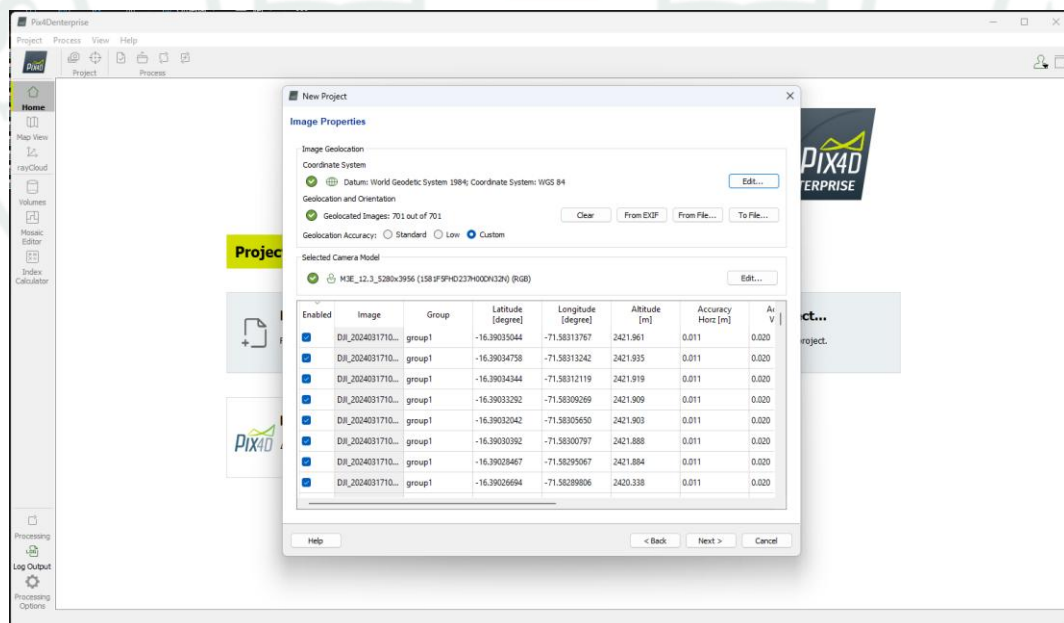
El software reconoce de manera automática las características de las imágenes importadas, incluyendo el sistema de referencia espacial, el modelo de sensor, las coordenadas de captura y la orientación de cada toma, tal como se observa en la Figura 47.

El procedimiento de creación del proyecto comprendió las siguientes acciones:

- Selección y carga de las imágenes capturadas en formato JPG, verificando que cada imagen contenga información de geolocalización GPS embebida en los metadatos EXIF.
- Configuración del sistema de coordenadas de salida, estableciéndose el sistema WGS84 / UTM Zona 19S (EPSG: 32719), coherente con la cartografía nacional del Instituto Geográfico Nacional del Perú.
- Selección de la plantilla de procesamiento 3D Maps, optimizada para la generación de ortofotos de alta resolución sobre superficies planas.
- Ingreso de los Puntos de Control en Tierra (GCP) mediante la importación del archivo de coordenadas obtenidas con el GPS diferencial RTK, para la georreferenciación absoluta del proyecto.

Figura 47

Configuración del proyecto en Pix4Dmapper para la evaluación del pavimento flexible



Nota. Elaboración propia. Creación del proyecto fotogramétrico en Pix4Dmapper para la evaluación del pavimento flexible de la Av. Perú, Cerro Colorado, Arequipa 2025.

3.6.3.2. *Procesamiento inicial*

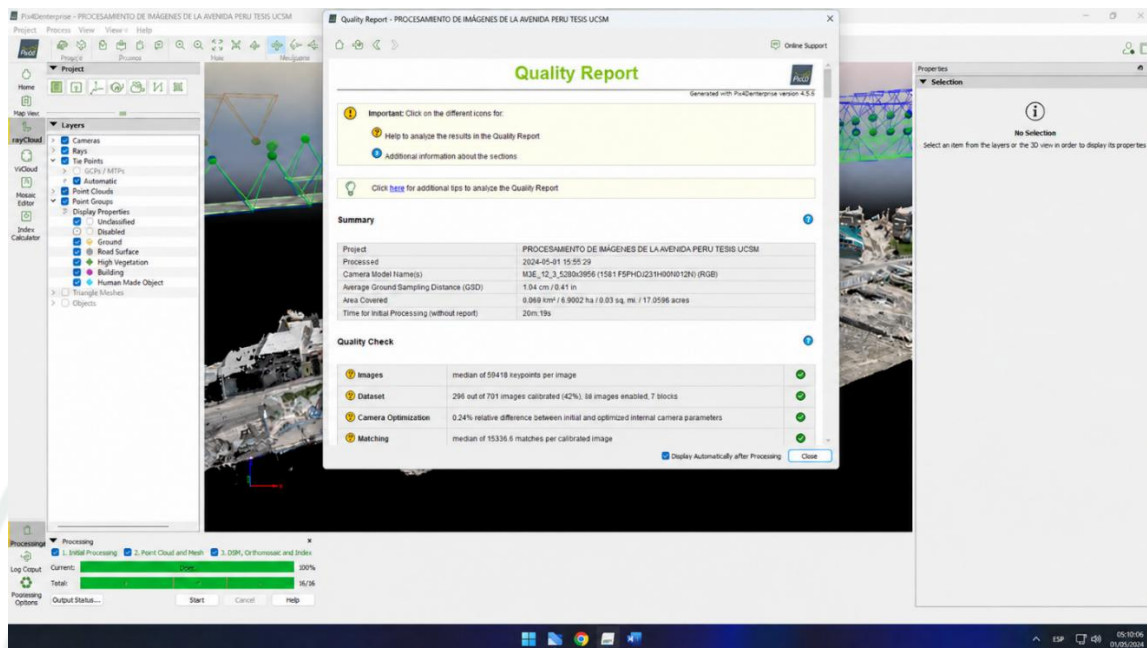
El procesamiento inicial corresponde a la Fase 1 del flujo de trabajo de Pix4Dmapper y constituye la etapa fundamental del proceso fotogramétrico. En esta fase, el software ejecuta los algoritmos de Structure from Motion (SfM), que comprenden:

- La extracción de puntos clave (keypoints) en cada imagen mediante el algoritmo SIFT (Scale-Invariant Feature Transform).
- La coincidencia automática de puntos homólogos entre imágenes superpuestas mediante el algoritmo de correspondencia densa.
- La calibración automática del modelo de cámara (corrección de distorsión radial y tangencial)
- La estimación de las posiciones y orientaciones de cada imagen en el espacio tridimensional.
- La georreferenciación del modelo mediante los GCP importados.

Al finalizar esta fase, Pix4Dmapper genera automáticamente el Quality Report, que contiene los indicadores de calidad del procesamiento. Este reporte fue verificado antes de proceder a las fases siguientes, asegurándose de que la puntuación global de calidad fuera Verde (Alto) para ambos proyectos. Los indicadores obtenidos se presentan en la Tabla 21.

Figura 48

Quality Report – Procesamiento inicial de Pix4Dmapper



Nota. Elaboración propia. Indicadores del Quality Report generado por Pix4Dmapper al finalizar el Procesamiento Inicial (Fase 1 – SfM) de las imágenes del vuelo RPAS sobre la Av. Perú, Cerro Colorado, Arequipa 2025. Puntuación global: Verde (Alto) en ambos carriles.

El Quality Report también generó la nube de puntos dispersa (sparse point cloud) como producto intermedio, permitiendo verificar visualmente la correcta reconstrucción del alineamiento de la vía y la ausencia de discontinuidades o errores sistemáticos en el modelo antes de proceder a la siguiente fase de procesamiento (Pix4D S.A, 2024).

3.6.3.3. Nube de puntos densa

La Fase 2 del procesamiento en Pix4Dmapper corresponde a la generación de la nube de puntos densa (dense point cloud). A partir de las posiciones y orientaciones de las cámaras estimadas en la Fase 1, el software aplica algoritmos de Multi-View Stereo (MVS) para reconstruir la geometría tridimensional de la superficie del pavimento con alta densidad de puntos. El resultado es una nube de puntos georreferenciada, en la que cada punto posee coordenadas X, Y, Z en el sistema UTM 19S y atributos de color RGB extraídos de las imágenes originales.

La densidad configurada para la generación de la nube de puntos fue **Óptima** (nivel de calidad intermedio-alto de Pix4Dmapper), lo que representa una relación adecuada entre la resolución del modelo y el tiempo de cómputo. Con esta configuración, se obtuvo una densidad aproximada de 500 puntos/m², suficiente para caracterizar con precisión las irregularidades superficiales del pavimento y delimitar los bordes de las fallas detectadas.

Adicionalmente, a partir de la nube de puntos densa se generó el Modelo Digital de Superficie (DSM – Digital Surface Model), que representa la variación altimétrica de la superficie del pavimento con una resolución de 2 cm/píxel. Este modelo permitió identificar deformaciones superficiales, como ahuellamiento y hundimientos, que complementan la información de fallas obtenida mediante la inspección visual de la ortofoto.

Los parámetros de configuración y los productos generados en la Fase 2 se detallan en la Tabla 22.

Tabla 22.

Configuración y productos de la Fase 2 – Nube de puntos densa en Pix4Dmapper

Parámetro / Producto	Configuración / Valor obtenido	Descripción
Calidad de procesamiento (densidad)	Óptima (Optimal)	Balance calidad–tiempo de procesamiento
Nº de puntos en la nube densa	≈ 90 millones de puntos por carril	Alta densidad sobre la superficie vial
Densidad de puntos	≈ 500 puntos/m ²	Resolución suficiente para detectar fallas ≥ 3 mm
Filtrado de la nube de puntos	Activado – filtro de ruido suave	Elimina puntos outliers manteniendo detalle superficial
Resolución del DSM generado	2 cm/píxel	Modelo Digital de Superficie del pavimento
Malla 3D texturizada	Generada (formato OBJ + textura JPG)	Modelo 3D del tramo vial para visualización
Tiempo de procesamiento Fase 2	≈ 90 min por proyecto	Con GPU NVIDIA GTX 1660 Super habilitada

Nota. Elaboración propia. Parámetros de configuración y productos obtenidos en la Fase 2 (nube de puntos densa y modelo 3D) del procesamiento fotogramétrico en Pix4Dmapper para la Av. Perú, Cerro Colorado, Arequipa 2025

3.6.3.4. Ortofotos y modelamiento de la superficie

La Fase 3 del flujo de procesamiento en Pix4Dmapper corresponde a la generación del ortomosaico (ortofoto) y la exportación del Modelo Digital de Superficie.; la ortofoto es una imagen aérea georreferenciada y corregida de las distorsiones perspectivas producidas por la inclinación de la cámara y el relieve del terreno, lo que garantiza que cada píxel corresponda a una posición geográfica exacta en el sistema de coordenadas UTM 19S (Ferrer-González et al., 2020)

El ortomosaico fue generado a partir de la nube de puntos densa y el DSM obtenidos en la Fase 2, aplicando el algoritmo de orto rectificación de Pix4Dmapper sobre cada imagen del conjunto, para luego combinarlas en un mosaico sin costuras (seamless mosaic) mediante técnicas de ajuste de color y nivelación de exposición.

El producto final fue exportado en formato GeoTIFF con sistema de referencia WGS84 / UTM Zona 19S, con una resolución de terreno (GSD) de 1.5 cm/píxel, suficiente para identificar fisuras de ancho mayor a 3 mm y delimitar con precisión el contorno de fallas superficiales como parcheo, huecos y pulimiento de agregados.

Las especificaciones técnicas de las ortofotos generadas para ambos carriles se presentan en la Tabla 23.

Tabla 23.

Especificaciones técnicas de las ortofotos generadas por Pix4Dmapper

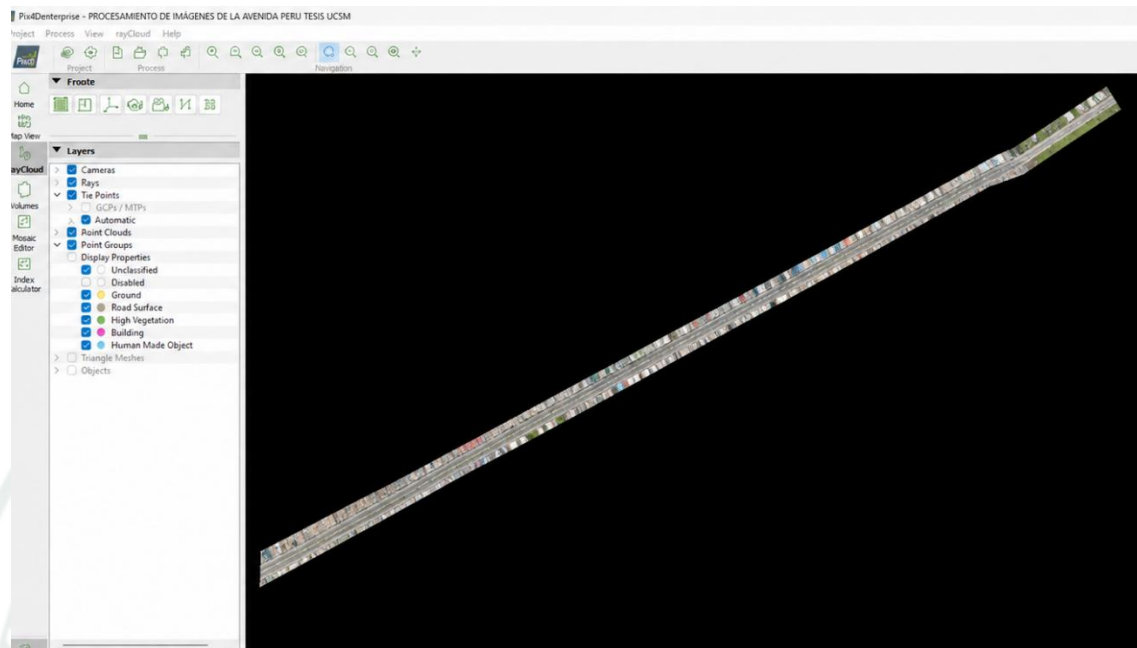
Característica	Carril Izquierdo	Carril Derecho	Unidad
Resolución de terreno (GSD)	1.5	1.5	cm/píxel
Dimensiones de la ortofoto	$\approx 12,000 \times 120,000$ px	$\approx 12,000 \times 120,000$ px	píxeles
Área cubierta	≈ 1.8 ha ($1,800 \times 27$ m)	≈ 1.8 ha	hectáreas
Formato de exportación	GeoTIFF (LZW)	GeoTIFF (LZW)	—
Sistema de coordenadas	WGS84/UTM Z19S	WGS84/UTM Z19S	EPSG:32719
Tamaño del archivo	≈ 2.1 GB	≈ 2.0 GB	GB
Profundidad de color	RGB 8 bits (3 bandas)	RGB 8 bits (3 bandas)	—
Cobertura del tramo evaluado	100%	100%	% del área
Tiempo de generación Fase 3	≈ 45 min	≈ 40 min	minutos

Nota. Elaboración propia. Especificaciones técnicas del ortomosaico georreferenciado generado en Pix4Dmapper para cada carril de la Av. Perú, Cerro Colorado, Arequipa 2025.

GSD = Ground Sample Distance. Sistema de coordenadas: WGS84 / UTM Zona 19S.

Figura 49.

Ortofoto completa de la Avenida Peru

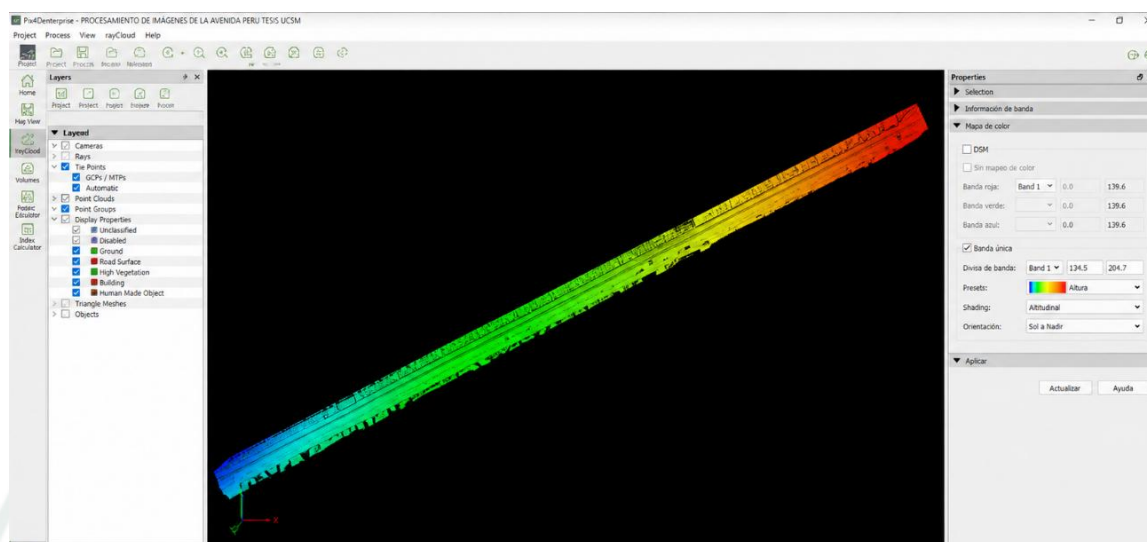


Nota. Elaboración propia. Vista general del ortomosaico georreferenciado generado mediante procesamiento fotogramétrico en Pix4Dmapper a partir de imágenes aéreas capturadas con RPAS DJI Mavic 3 Enterprise. GSD = 1.5 cm/píxel. Sistema de coordenadas WGS84/UTM Zona 19S. Av. Perú, Cerro Colorado, Arequipa 2025.

Una vez generada la ortofoto, fue importada en AutoCAD 2024 como imagen de referencia georeferenciada para la identificación y digitalización de las fallas superficiales del pavimento, manteniendo la escala 1:1 en metros y el sistema de coordenadas UTM 19S, lo que garantizó la precisión de las mediciones de área y longitud de cada falla registrada

Figura 50.

Modelo digital de Superficie (MDS)



Nota. Elaboración propia. Modelo Digital de Superficie generado en Pix4Dmapper mediante reconstrucción Multi-View Stereo (MVS) a partir de la nube de puntos densa. La escala de colores representa la variación altimétrica del tramo evaluado. Av. Perú, Cerro Colorado, Arequipa 2025.

3.6.3.5. Limpieza de obstáculos

Durante el vuelo de captura sobre la Avenida Perú, la presencia de elementos ajenos a la superficie del pavimento —tales como vehículos estacionados, sombras de edificaciones, señalización horizontal, vegetación en bermas y, en algunos casos, la acumulación de material suelto sobre la calzada— generó oclusiones parciales en la ortofoto que podrían interferir con la correcta identificación de fallas superficiales. Para mitigar este efecto, se ejecutó un proceso de limpieza de obstáculos en dos niveles: durante el procesamiento fotogramétrico en Pix4Dmapper y durante la digitalización en AutoCAD.

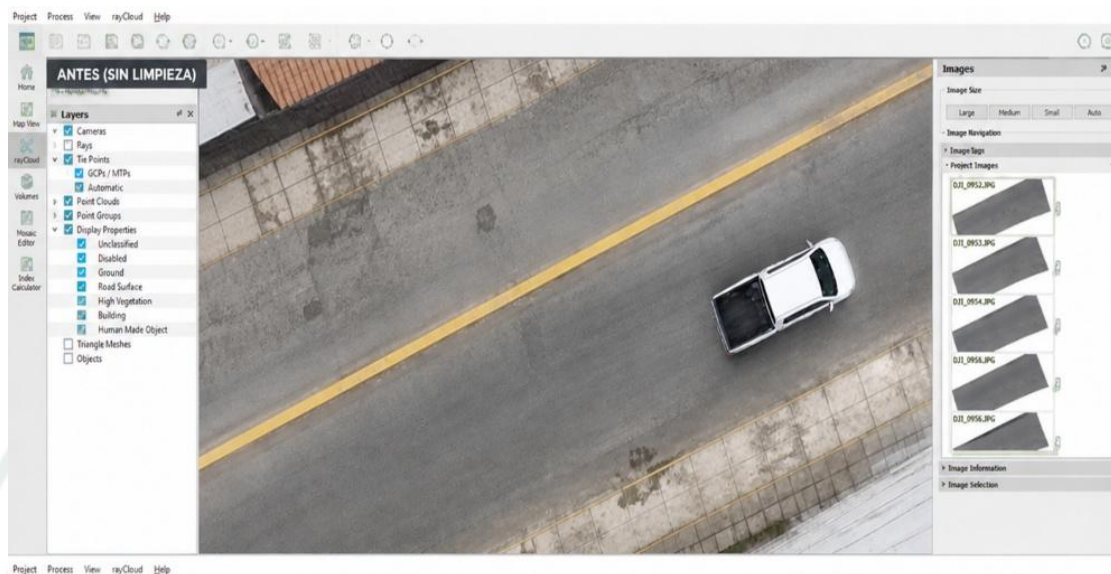
Pix4Dmapper incorpora herramientas de edición de la nube de puntos densa que permiten eliminar o enmascarar puntos correspondientes a objetos que no forman parte de la superficie del pavimento. Mediante la herramienta Cloud Editor, se identificaron y eliminaron manualmente los grupos de puntos correspondientes a:

- Vehículos en movimiento capturados en múltiples imágenes con posiciones inconsistentes.
- Vehículos estacionados que generaban discontinuidades en la nube de puntos y artefactos en la ortofoto.
- Postes y señales verticales cuyas sombras afectaban la visibilidad de la superficie.
- Peatones y obstáculos temporales sobre la calzada.

La edición de la nube de puntos se realizó por sectores, recorriendo sistemáticamente el tramo evaluado de cada carril. Una vez eliminados los puntos no deseados, se regeneró el DSM y la ortofoto en Pix4Dmapper (reprocesamiento parcial de la Fase 3), obteniendo una imagen limpia de la superficie del pavimento sin la presencia de los obstáculos identificados. Este procedimiento es consistente con el descrito por Irizarry y Johnson (2014) para la inspección de pavimentos con RPAS en entornos urbanos con tráfico activo.

Figura 51.

Ortofoto original con vehículo

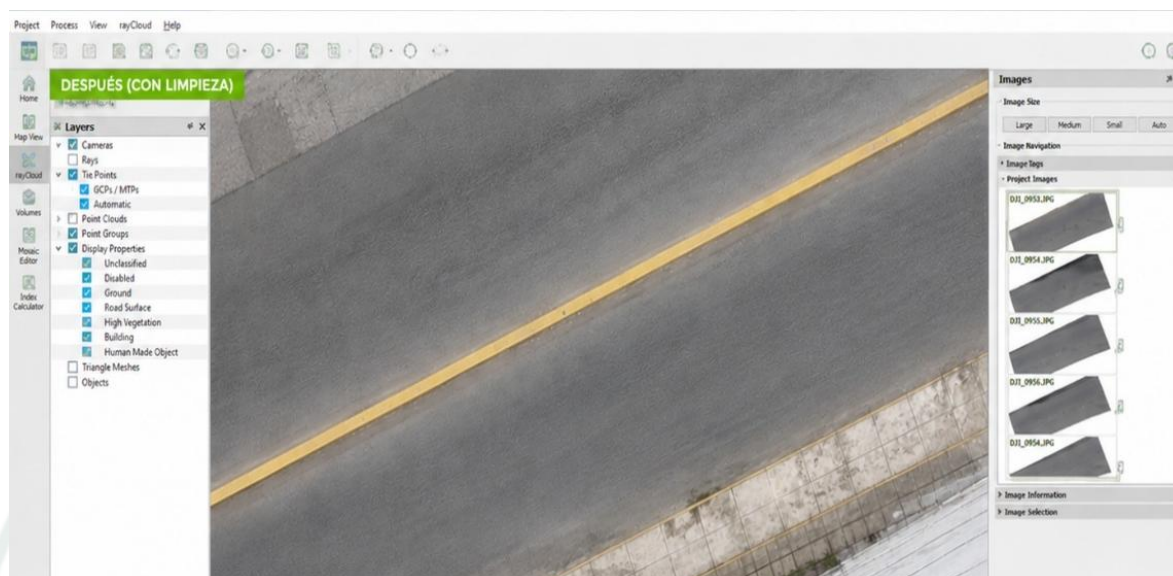


Nota. Elaboración propia. Captura del ortomosaico antes del proceso de limpieza de interferencias, mostrando la presencia de un vehículo estacionado que genera oclusión parcial de las fallas superficiales del pavimento. Procesado en Pix4Dmapper. Av. Perú, Cerro Colorado, Arequipa 2025.

En los sectores donde la limpieza fotogramétrica no fue suficiente para eliminar completamente la oclusión —principalmente en zonas con vehículos de gran tonelaje estacionados durante el vuelo— se procedió a la exclusión de esas áreas del metrado de fallas durante la digitalización en AutoCAD. Estas zonas fueron delimitadas como áreas no evaluadas y registradas en la hoja de campo como observaciones, señalando que la evaluación de ese sector específico se realizó mediante inspección convencional para complementar los datos del método RPAS.

Figura 52.

Ortofoto limpia de interferencias



Nota. Elaboración propia. Captura del ortomosaico posterior al proceso de limpieza de interferencias realizado en el editor de nube de puntos de Pix4Dmapper, permitiendo la visualización completa de la superficie del pavimento para la identificación y metrado de fallas. Av. Perú, Cerro Colorado, Arequipa 2025.

3.6.4. Identificación y metrado de fallas en AutoCAD

La validez de las mediciones realizadas sobre el ortomosaico para cada tipo de falla se sustenta en la resolución de terreno obtenida. Con un GSD de 1.5 cm/píxel, el ortomosaico permite distinguir elementos de hasta 3 mm de ancho en la imagen, umbral suficiente para identificar fisuras de severidad baja según la norma ASTM D6433-20.

Para las grietas longitudinales, transversales, de borde y en bloque, la medición de longitud sobre el ortomosaico mediante herramientas CAD presenta un error de escala inferior al 2%, dado el nivel de georreferenciación alcanzado con los 8 puntos de control en tierra medidos con GPS RTK de precisión planimétrica menor a 2 cm. Para las fallas de tipo área

como parcheos, piel de cocodrilo y desgaste superficial, la digitalización de polígonos en AutoCAD sobre el ortomosaico permite cuantificar la extensión con precisión equivalente a la medición manual con wincha. Para baches y ahuellamiento, cuya clasificación de severidad según la norma involucra medición de profundidad, se realizó verificación complementaria en campo durante la fase de inspección convencional, dado que el sensor RGB del RPAS no captura información de profundidad con la precisión milimétrica requerida por la norma. Esta distinción entre fallas medibles íntegramente desde la ortofoto y fallas que requieren verificación complementaria en campo delimita con precisión el alcance metrológico del método RPAS aplicado en esta investigación.

La identificación y cuantificación de las fallas superficiales del pavimento se realizó sobre la ortofoto generada en Pix4Dmapper, mediante el software de dibujo asistido AutoCAD. Este procedimiento consistió en la interpretación visual de la ortofoto de alta resolución, el trazado de polígonos y líneas sobre cada falla detectada, y la medición automatizada de sus dimensiones (área en m^2 o longitud en m) directamente sobre el plano georreferenciado

3.6.4.1. Procedimiento de interpretación y digitalización

El procedimiento de identificación y metrado de fallas mediante ortofoto siguió las siguientes etapas:

a) Importación de la ortofoto en AutoCAD. La ortofoto GeoTIFF generada por Pix4Dmapper fue importada como imagen de referencia georeferenciada en AutoCAD, respetando la escala y sistema de coordenadas UTM Zona 19S.

b) Configuración de capas (layers) por tipo de falla. Se crearon capas independientes para cada tipo de falla, con código de color estandarizado: celeste (Piel de cocodrilo - daño N° 01), naranja (Agrietamiento en bloque - daño N° 03), rosado (Abultamiento o hundimientos - daño N° 04), azul (Grietas longitudinales y transversales - daño N° 10), rojo (Parcheo – daño N° 11), amarillo (Pulimiento de agregados – daño N° 12), verde oscuro (Huecos – daño N° 13), café (Ahuellamiento – daño N° 15) y verde claro (Desprendimiento de agregados - daño N°19).

c) Trazado de polígonos y líneas sobre la ortofoto. Cada falla identificada visualmente en la ortofoto fue delimitada mediante polígonos cerrados (para fallas de área: parcheo, huecos, pulimiento) o líneas (para grietas), ajustándose a los bordes visibles de la falla en la imagen.

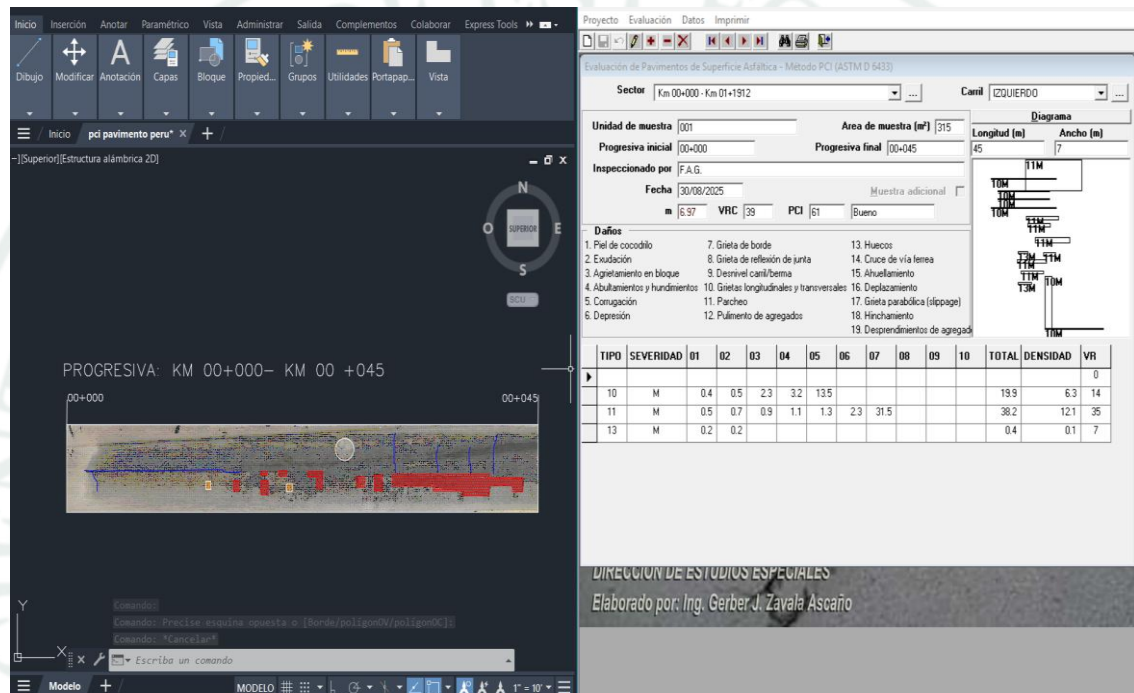
d) Medición de dimensiones. AutoCAD calculó automáticamente el área de los polígonos (m²) y la longitud de las líneas (m), registrándose los valores por falla en las hojas de registro PCI.

e) Clasificación de severidad. La severidad de cada falla (Baja – L, Media – M, Alta – H) fue determinada mediante criterios visuales de la norma ASTM D6433-20, considerando el ancho de fisuras, la profundidad estimada de los huecos y el grado de deterioro visible en la ortofoto.

f) Exportación de resultados. Los datos de ubicación (coordenadas X, Y), dimensiones y severidad de cada falla fueron exportados a hojas de cálculo Excel para el posterior cálculo del PCI por unidad de muestra.

Figura 53.

Identificación y metrado de fallas



Nota. Elaboración propia. Captura de pantalla del entorno de trabajo en AutoCAD 2024 durante la digitalización y metrado de fallas sobre la ortofoto georreferenciada del carril izquierdo, unidad de muestra N° 01 (KM 0+000–KM 0+045), Av. Perú, Cerro Colorado, Arequipa 2025.

3.6.4.2. Sistema de codificación de fallas

El sistema de codificación por colores utilizado en AutoCAD se presenta en la Tabla 24:

Tabla 24.

Sistema de codificación de las fallas del PCI en AutoCAD para la evaluación RPAS

Código ASTM	Tipo de falla	Color en AutoCAD	Geometría de medición	Unidad
01	Piel de cocodrilo	Celeste	Polígono (hatch)	m ²
03	Agrietamiento en bloque	Naranja	Polígono (hatch)	m ²
04	Abultamiento o hundimientos	Rosado	Polígono (hatch)	m ²
10	Grieta longitudinal y transversal	Azul	Línea (polyline)	m
11	Parcheo	Rojo	Polígono (hatch)	m ²
12	Pulimiento de agregados	Amarillo	Polígono (hatch)	m ²
13	Hueco	Verde oscuro	Polígono (hatch)	und
15	Ahuellamiento	Café	Polígono (hatch)	m ²
19	Desprendimiento de agregados	Verde claro	Polígono (hatch)	m ²

Nota. Elaboración propia. Clasificación de fallas según ASTM D6433-20. La codificación por color permite la identificación automática de áreas y longitudes en AutoCAD 2024.

3.7. Técnicas de análisis de datos

El análisis de los datos obtenidos mediante ambas metodologías de evaluación se realizó en dos niveles complementarios: el estadístico descriptivo para caracterizar la condición del pavimento en cada carril y en el conjunto de la vía, y el comparativo para determinar la equivalencia práctica entre el método convencional y el método asistido con RPAS.

Para el análisis descriptivo se calculó el PCI promedio, el valor mínimo, el valor máximo y la desviación estándar para cada carril y para el total de la vía, tanto en el método convencional como en el RPAS, permitiendo analizar de forma completa el estado superficial del pavimento flexible de la Avenida Perú para cada metodología de forma independiente.

Para el análisis comparativo se calculó la diferencia absoluta del PCI entre métodos por unidad de muestra, expresada como $|\Delta\text{PCI}| = |\text{PCI convencional} - \text{PCI RPAS}|$, para las 84 unidades evaluadas. El criterio de equivalencia adoptado como metodología propia de esta investigación comprende dos niveles: un límite de ± 10 puntos PCI para la decisión de intervención, sustentado en la amplitud de 15 puntos de las categorías de condición y de 30 puntos de los rangos de intervención de la Tabla 2, y un límite estricto de equivalencia numérica de ± 5 puntos PCI, adoptado por analogía con el error admisible que la norma ASTM D6433-20 considera aceptable para el estimado del PCI de una sección, de modo que una diferencia inferior a ese umbral indica que ambos métodos producen resultados numéricamente equivalentes para efectos de gestión vial. Adicionalmente se verificó en cada unidad de muestra si la categoría de condición asignada coincidía entre métodos, dado que es la categoría y no el valor numérico exacto la que determina las decisiones de intervención en la práctica.

Para la verificación de equivalencia estadística se aplicó el coeficiente de correlación de rangos de Spearman, estadístico que evalúa la asociación monotónica entre dos conjuntos de valores ordinales sin asumir distribución normal de los datos, conforme a las recomendaciones de Winter et al. (2016). El criterio de correlación fuerte se establece en $r_s \geq 0.80$, siendo el umbral a partir del cual se considera que ambos métodos producen un ordenamiento consistente de las unidades de muestra según su nivel de deterioro.

Complementariamente se aplicó el marco de control de calidad SMART propuesto por Chang et al. (2025), que emplea estadísticos de confiabilidad entre evaluadores para analizar la calidad de datos de condición del pavimento provenientes de inspecciones de campo. De los estadísticos contemplados en el SMART, se aplicaron el Porcentaje de Acuerdo (PA) entre categorías de condición asignadas por ambos métodos, el coeficiente de Spearman como medida de correlación ordinal, y el diagrama de Bland-Altman modificado para visualizar la dispersión de las diferencias $|\Delta\text{PCI}|$ y detectar posibles sesgos sistemáticos entre métodos.

La hipótesis de equivalencia práctica se acepta cuando el PA es del 100%, el coeficiente de Spearman supera el umbral de 0.80 y la diferencia promedio en el diagrama de Bland-Altman se mantiene dentro de los límites de equivalencia adoptados como criterio metodológico propio de esta investigación: ± 10 puntos PCI para la decisión de intervención y ± 5 puntos PCI para la equivalencia numérica estricta.

Cabe precisar que el coeficiente de Spearman se emplea en esta investigación para verificar la consistencia del ordenamiento relativo de las unidades de muestra entre ambos métodos, y no como medida de acuerdo numérico entre ellos; este último se evalúa mediante el Porcentaje de Acuerdo y el diagrama de Bland-Altman, uso que es consistente con un diseño descriptivo-comparativo. Su inclusión no modifica el nivel de la investigación dado que no se busca establecer una relación causal ni de dependencia entre variables, sino verificar el grado de acuerdo entre los resultados obtenidos por ambas metodologías de evaluación.

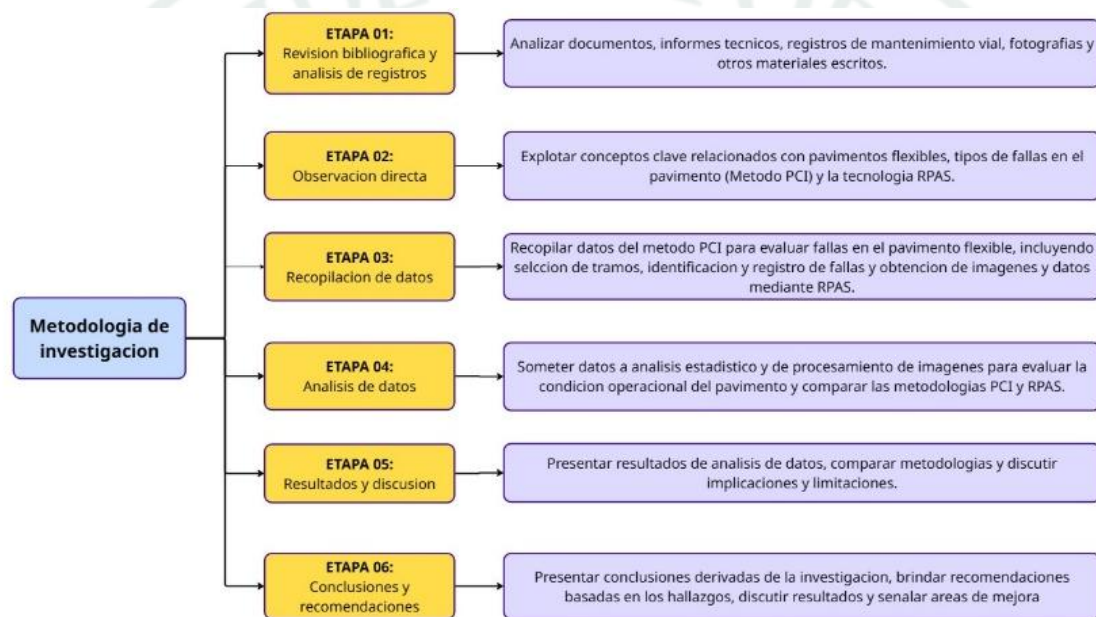
Para el análisis de la cobertura del levantamiento se calculó el porcentaje del área del tramo cubierta por el ortomosaico GeoTIFF generado en Pix4Dmapper respecto al área total evaluada. La repetibilidad se verificó mediante la constatación de la existencia del archivo ortomosaico georreferenciado como registro permanente reproducible sin necesidad de retorno a campo. La seguridad operativa del personal se evaluó mediante el tiempo de exposición al tráfico vehicular registrado en cada método, expresado en horas, conforme a los indicadores de exposición al riesgo reconocidos por la norma ISO 39001 de Gestión de la Seguridad Vial.

El análisis de costos asociados a cada metodología se realizó de forma descriptiva y cualitativa, comparando los recursos humanos, el equipamiento y el software requeridos por cada método para completar el ciclo completo de evaluación, sin cuantificación monetaria formal dado que los costos unitarios de equipamiento varían significativamente según el contexto de implementación y la disponibilidad previa de los equipos.

La Figura 54 presenta de manera esquemática el flujo metodológico completo de la investigación, integrando las etapas del método convencional y del método asistido con RPAS descritas en el presente capítulo

Figura 54.

Metodología a seguir en la investigación



Nota. Elaboración propia. El esquema representa el flujo metodológico empleado en la investigación para la comparación del método PCI convencional y el método asistido con RPAS en la Av. Perú, Cerro Colorado, Arequipa 2025.

CAPÍTULO IV: RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Descripción general de la vía evaluada

La evaluación superficial del pavimento flexible se realizó en la Avenida Perú, ubicada en el distrito de Cerro Colorado, provincia y región Arequipa, en un tramo de 1,890 m de longitud distribuido en dos carriles de circulación —izquierdo y derecho— con un ancho de 7 m cada uno. Se evaluaron en total 84 unidades de muestra de 45 m × 7 m (315 m²) cada una, 42 por carril, aplicando de forma paralela el método PCI convencional y el método PCI asistido con RPAS sobre las mismas unidades, conforme al procedimiento establecido en la norma ASTM D6433-20.

4.2. Valores del PCI por tramo – Convencional y RPAS

En atención al primer objetivo específico, el cual es comparar los valores del PCI por tramo mediante ambos métodos, se presentan los valores del PCI por unidad de muestra obtenidos mediante ambas metodologías para los carriles izquierdo y derecho de la Avenida Perú.

4.2.1. Carril izquierdo – Método convencional:

Los resultados del PCI por unidad de muestras del carril izquierdo se presentan en la Tabla 25 y las Figuras 55 y 56.

Tabla 25.

Carril izquierdo

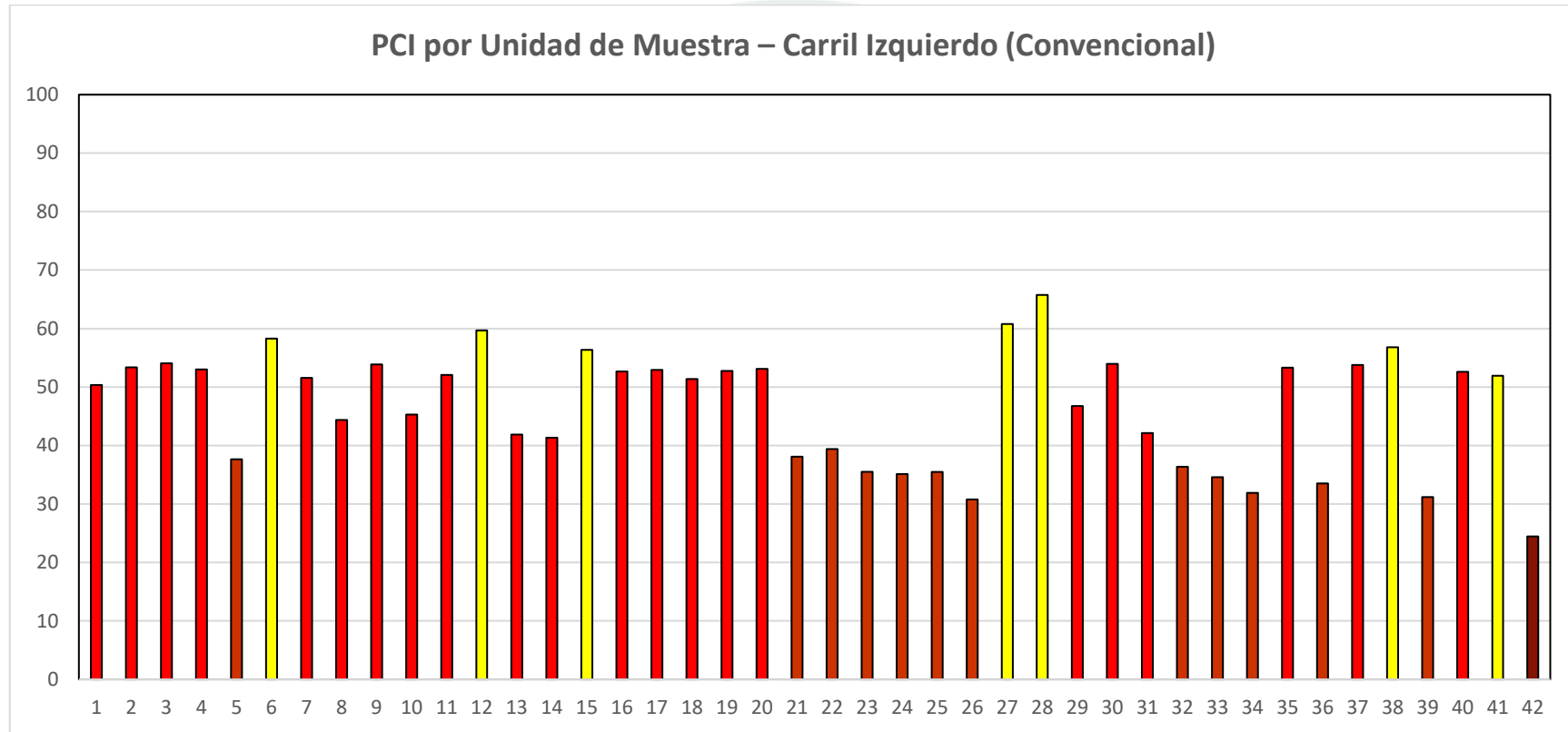
N° UM	Prog. Ini. (m)	Prog. Fin. (m)	VDC Máx.	PCI	Condición	Intervención recomendada
1	KM 00+000	KM 00+045	49.70	50	Regular	Mantenimiento periódico
2	KM 00+045	KM 00+090	46.60	53	Regular	Mantenimiento periódico
3	KM 00+090	KM 00+135	45.90	54	Regular	Mantenimiento periódico
4	KM 00+135	KM 00+180	47.00	53	Regular	Mantenimiento periódico
5	KM 00+180	KM 00+225	62.40	38	Malo	Rehabilitación
6	KM 00+225	KM 00+270	41.70	58	Bueno	Mantenimiento periódico
7	KM 00+270	KM 00+315	48.40	52	Regular	Mantenimiento periódico
8	KM 00+315	KM 00+360	55.60	44	Regular	Mantenimiento periódico
9	KM 00+360	KM 00+405	46.10	54	Regular	Mantenimiento periódico
10	KM 00+405	KM 00+450	54.70	45	Regular	Mantenimiento periódico
11	KM 00+450	KM 00+495	47.90	52	Regular	Mantenimiento periódico
12	KM 00+495	KM 00+540	39.90	60	Bueno	Mantenimiento periódico
13	KM 00+540	KM 00+585	57.70	42	Regular	Mantenimiento periódico
14	KM 00+585	KM 00+630	58.60	41	Regular	Mantenimiento periódico
15	KM 00+630	KM 00+675	43.60	56	Bueno	Mantenimiento periódico
16	KM 00+675	KM 00+720	47.40	53	Regular	Mantenimiento periódico
17	KM 00+720	KM 00+765	47.20	53	Regular	Mantenimiento periódico
18	KM 00+765	KM 00+810	48.60	51	Regular	Mantenimiento periódico
19	KM 00+810	KM 00+855	46.70	53	Regular	Mantenimiento periódico
20	KM 00+855	KM 00+900	46.90	53	Regular	Mantenimiento periódico
21	KM 00+900	KM 00+945	61.90	38	Malo	Rehabilitación
22	KM 00+945	KM 00+990	60.90	39	Malo	Rehabilitación
23	KM 00+990	KM 01+035	64.50	35	Malo	Rehabilitación
24	KM 01+035	KM 01+080	64.89	35	Malo	Rehabilitación
25	KM 01+080	KM 01+125	64.50	35	Malo	Rehabilitación
26	KM 01+125	KM 01+170	69.20	31	Malo	Rehabilitación
27	KM 01+170	KM 01+215	39.20	61	Bueno	Mantenimiento periódico
28	KM 01+215	KM 01+260	34.30	66	Bueno	Mantenimiento periódico
29	KM 01+260	KM 01+305	52.90	47	Regular	Mantenimiento periódico
30	KM 01+305	KM 01+350	46.00	54	Regular	Mantenimiento periódico
31	KM 01+350	KM 01+395	57.60	42	Regular	Mantenimiento periódico
32	KM 01+395	KM 01+440	63.60	36	Malo	Rehabilitación
33	KM 01+440	KM 01+485	65.40	35	Malo	Rehabilitación
34	KM 01+485	KM 01+530	68.10	32	Malo	Rehabilitación
35	KM 01+530	KM 01+575	46.70	53	Regular	Mantenimiento periódico

N° UM	Prog. Ini. (m)	Prog. Fin. (m)	VDC Máx.	PCI	Condición	Intervención recomendada
36	KM 01+575	KM 01+620	66.50	34	Malo	Rehabilitación
37	KM 01+620	KM 01+665	46.20	54	Regular	Mantenimiento periódico
38	KM 01+665	KM 01+710	43.20	57	Bueno	Mantenimiento periódico
39	KM 01+710	KM 01+755	68.80	31	Malo	Rehabilitación
40	KM 01+755	KM 01+800	47.40	53	Regular	Mantenimiento periódico
41	KM 01+800	KM 01+845	44.40	52	Regular	Mantenimiento periódico
42	KM 01+845	KM 01+890	75.90	24	Muy Malo	Rehabilitación
Promedio		Carril Izq.	53.15	47	Regular	Mantenimiento periódico

Nota. Elaboración propia. Resultados del PCI por unidad de muestra del carril izquierdo obtenidos mediante el método de inspección convencional, Av. Perú, Cerro Colorado, Arequipa 2025. PCI promedio: 47 (condición Regular).

Figura 55.

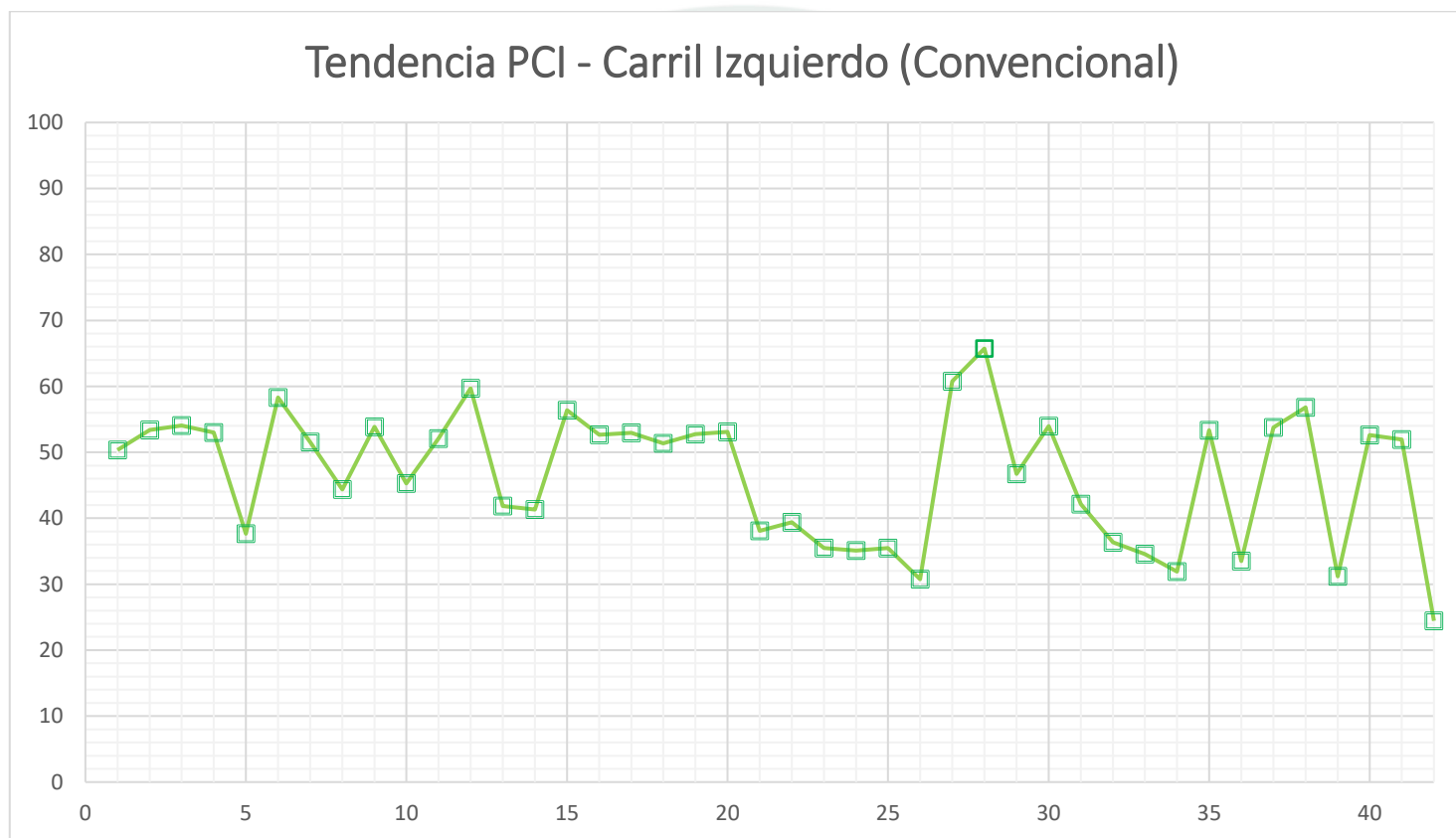
PCI del carril izquierdo



Nota. Elaboración propia. Gráfico de barras del Índice de Condición del Pavimento (PCI) por unidad de muestra del carril izquierdo, método convencional, Av. Perú, Cerro Colorado, Arequipa 2025. PCI promedio 47 – Condición Regular según ASTM D6433-20.

Figura 56.

Tendencia de PCI del carril izquierdo



Nota. Elaboración propia. Gráfico de líneas de tendencia del PCI por unidad de muestra del carril izquierdo, método convencional, Av. Perú, Cerro Colorado, Arequipa 2025. La línea refleja la variación del estado superficial a lo largo del tramo evaluado.

El carril izquierdo obtuvo un PCI promedio de 47, correspondiente a la categoría Regular según la escala de clasificación de la norma ASTM D6433-20, los valores de PCI por unidad de muestra oscilaron entre 24 y 66.

- El 54.8% de las unidades de muestra (23 de 42) se encuentran en condición Regular.
- El 28.6% de las unidades de muestra (12 de 42) en condición Malo.
- El 14.3% de las unidades de muestra (06 de 42) en condición Bueno.
- El 2.3% de las unidades de muestra (01 de 42) en condición Muy Malo.
- Ninguna unidad del carril izquierdo alcanzó condición Excelente, Muy Bueno o Fallado.

4.2.2. Carril derecho – Método convencional.

Los resultados del PCI por unidad de muestras del carril derecho se presentan en la Tabla 26 y las Figuras 57 y 58

Tabla 26.

Carril derecho

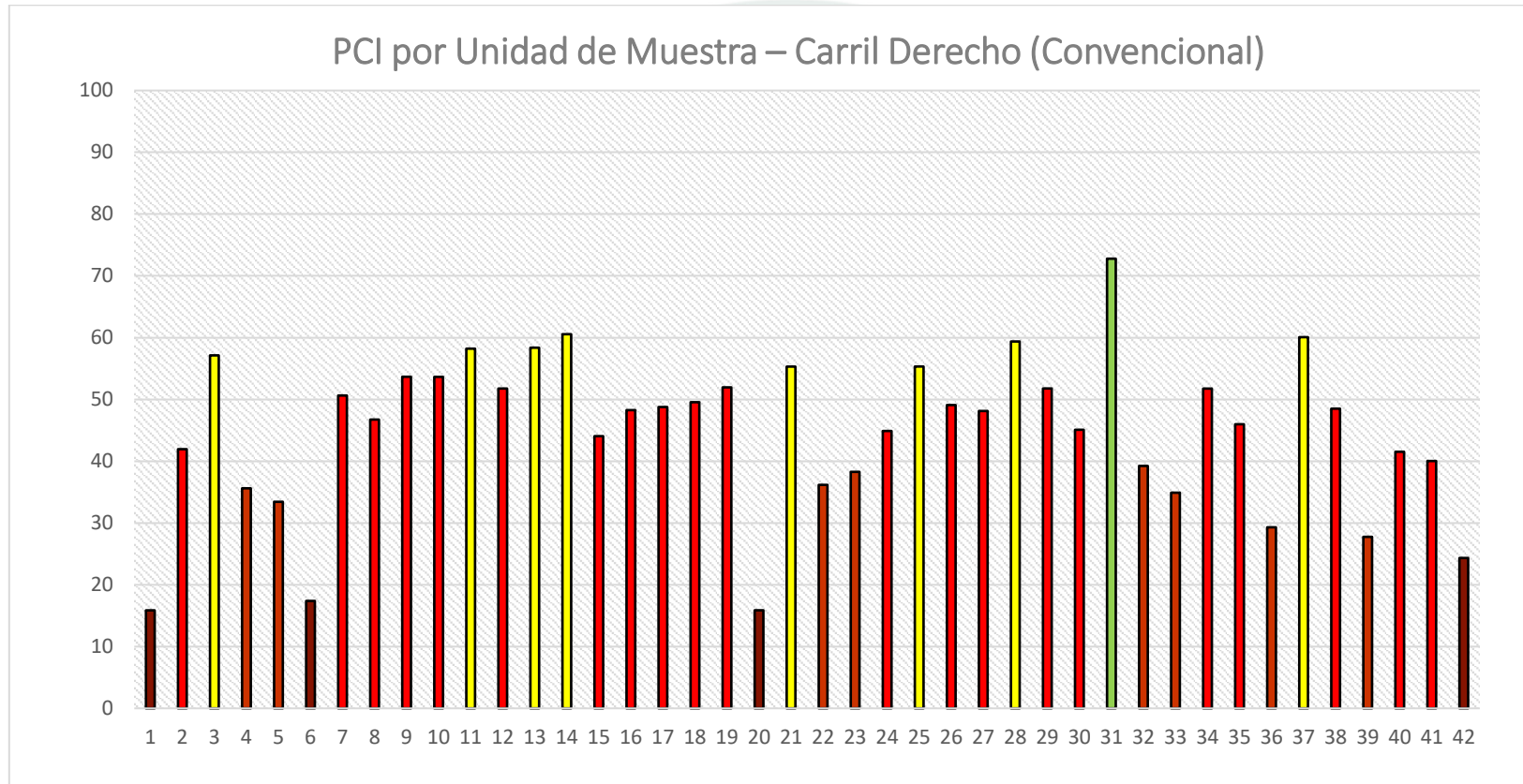
N° UM	Prog.Ini. (m)	Prog.Fin. (m)	VDC Máx.	PCI	Condición	Intervención recomendada
1	KM 00+000	KM 00+045	84.1	16	Muy Malo	Rehabilitación
2	KM 00+045	KM 00+090	58.1	42	Regular	Mantenimiento periódico
3	KM 00+090	KM 00+135	42.9	57	Bueno	Mantenimiento periódico
4	KM 00+135	KM 00+180	64.4	36	Malo	Rehabilitación
5	KM 00+180	KM 00+225	66.6	33	Malo	Rehabilitación
6	KM 00+225	KM 00+270	82.6	17	Muy Malo	Rehabilitación
7	KM 00+270	KM 00+315	49.4	51	Regular	Mantenimiento periódico
8	KM 00+315	KM 00+360	53.3	47	Regular	Mantenimiento periódico
9	KM 00+360	KM 00+405	46.5	54	Regular	Mantenimiento periódico
10	KM 00+405	KM 00+450	45.9	54	Regular	Mantenimiento periódico
11	KM 00+450	KM 00+495	41.8	58	Bueno	Mantenimiento periódico
12	KM 00+495	KM 00+540	48.2	52	Regular	Mantenimiento periódico
13	KM 00+540	KM 00+585	42.4	58	Bueno	Mantenimiento periódico
14	KM 00+585	KM 00+630	39.4	61	Bueno	Mantenimiento periódico
15	KM 00+630	KM 00+675	55.9	44	Regular	Mantenimiento periódico
16	KM 00+675	KM 00+720	51.7	48	Regular	Mantenimiento periódico
17	KM 00+720	KM 00+765	50.5	49	Regular	Mantenimiento periódico
18	KM 00+765	KM 00+810	50.4	50	Regular	Mantenimiento periódico
19	KM 00+810	KM 00+855	48	52	Regular	Mantenimiento periódico
20	KM 00+855	KM 00+900	84.1	16	Muy Malo	Rehabilitación
21	KM 00+900	KM 00+945	44.7	55	Regular	Mantenimiento periódico
22	KM 00+945	KM 00+990	63.8	36	Malo	Rehabilitación
23	KM 00+990	KM 01+035	61.7	38	Malo	Rehabilitación
24	KM 01+035	KM 01+080	55.1	45	Regular	Mantenimiento periódico
25	KM 01+080	KM 01+125	44.7	55	Regular	Mantenimiento periódico
26	KM 01+125	KM 01+170	50.9	49	Regular	Mantenimiento periódico
27	KM 01+170	KM 01+215	51.9	48	Regular	Mantenimiento periódico
28	KM 01+215	KM 01+260	40.6	59	Bueno	Mantenimiento periódico
29	KM 01+260	KM 01+305	48.2	52	Regular	Mantenimiento periódico

N° UM	Prog.Ini. (m)	Prog.Fin. (m)	VDC Máx.	PCI	Condición	Intervención recomendada
30	KM 01+305	KM 01+350	55.2	45	Regular	Mantenimiento periódico
31	KM 01+350	KM 01+395	26.6	73	Muy Bueno	Mantenimiento rutinario
32	KM 01+395	KM 01+440	60.8	39	Malo	Rehabilitación
33	KM 01+440	KM 01+485	65.1	35	Malo	Rehabilitación
34	KM 01+485	KM 01+530	47.5	52	Regular	Mantenimiento periódico
35	KM 01+530	KM 01+575	54	46	Regular	Mantenimiento periódico
36	KM 01+575	KM 01+620	70.7	29	Malo	Rehabilitación
37	KM 01+620	KM 01+665	39.9	60	Bueno	Mantenimiento periódico
38	KM 01+665	KM 01+710	51.5	49	Regular	Mantenimiento periódico
39	KM 01+710	KM 01+755	72.2	28	Malo	Rehabilitación
40	KM 01+755	KM 01+800	58.5	42	Regular	Mantenimiento periódico
41	KM 01+800	KM 01+845	60	40	Malo	Rehabilitación
42	KM 01+845	KM 01+890	75.7	24	Muy Malo	Rehabilitación
Promedio		Carril der.	55	45	Regular	Mantenimiento periódico

Nota. Elaboración propia. Resultados del PCI por unidad de muestra del carril derecho obtenidos mediante el método de inspección convencional, Av. Perú, Cerro Colorado, Arequipa 2025. PCI promedio: 45 (condición Regular).

Figura 57.

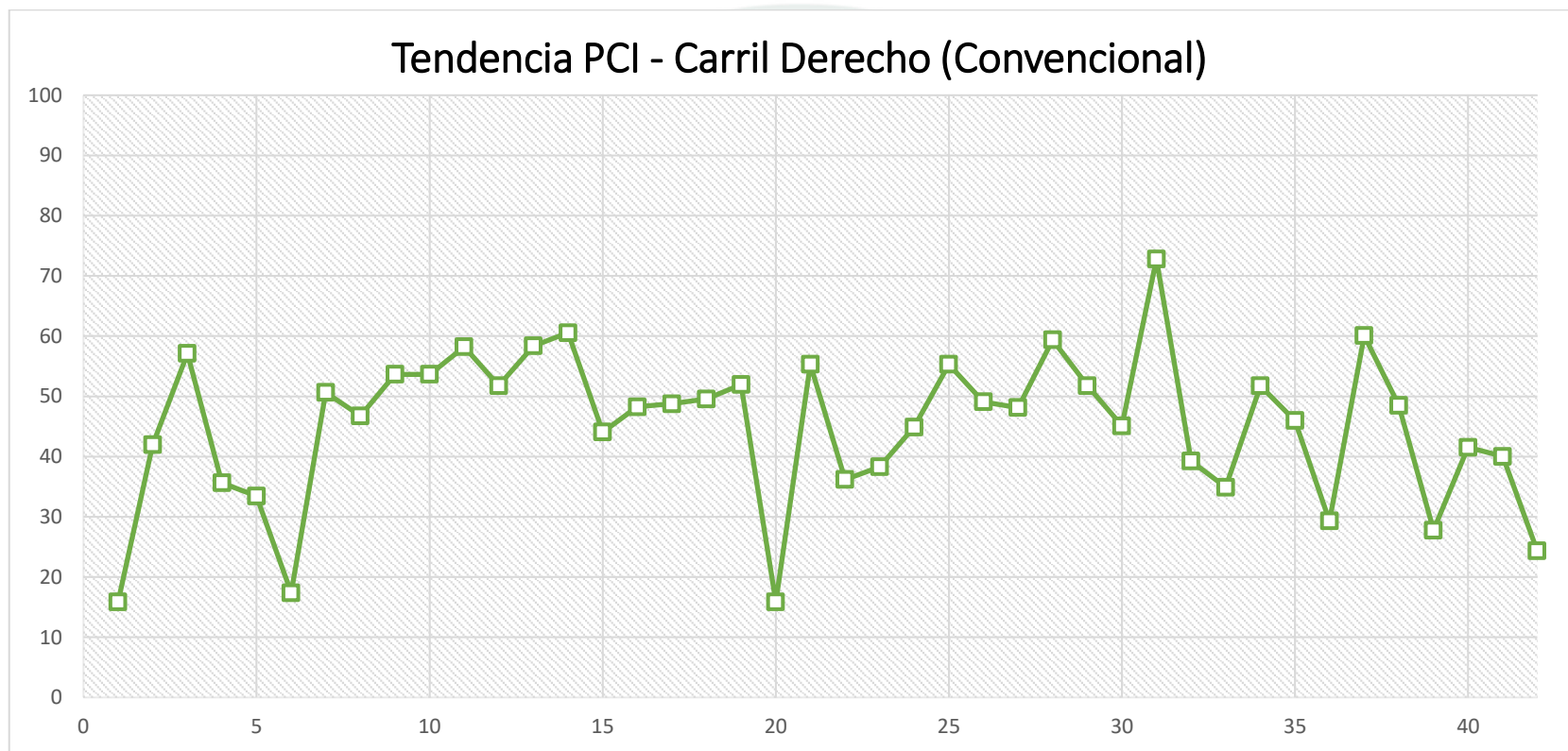
PCI del carril derecho



Nota. Elaboración propia. Gráfico de barras del PCI por unidad de muestra del carril derecho, método convencional, Av. Perú, Cerro Colorado, Arequipa 2025. PCI promedio: 45 (condición Muy Malo). Calculado conforme a ASTM D6433-20.

Figura 58.

Tendencia de PCI del carril derecho



Nota. Elaboración propia. Gráfico de líneas de tendencia del PCI por unidad de muestra del carril derecho, método convencional, Av. Perú, Cerro Colorado, Arequipa 2025.

El carril derecho presentó un PCI promedio de 45, correspondiente a la categoría Regular, evidenciando un estado de deterioro significativamente más avanzado que el carril izquierdo. Los valores de PCI oscilaron entre 16 y 73.

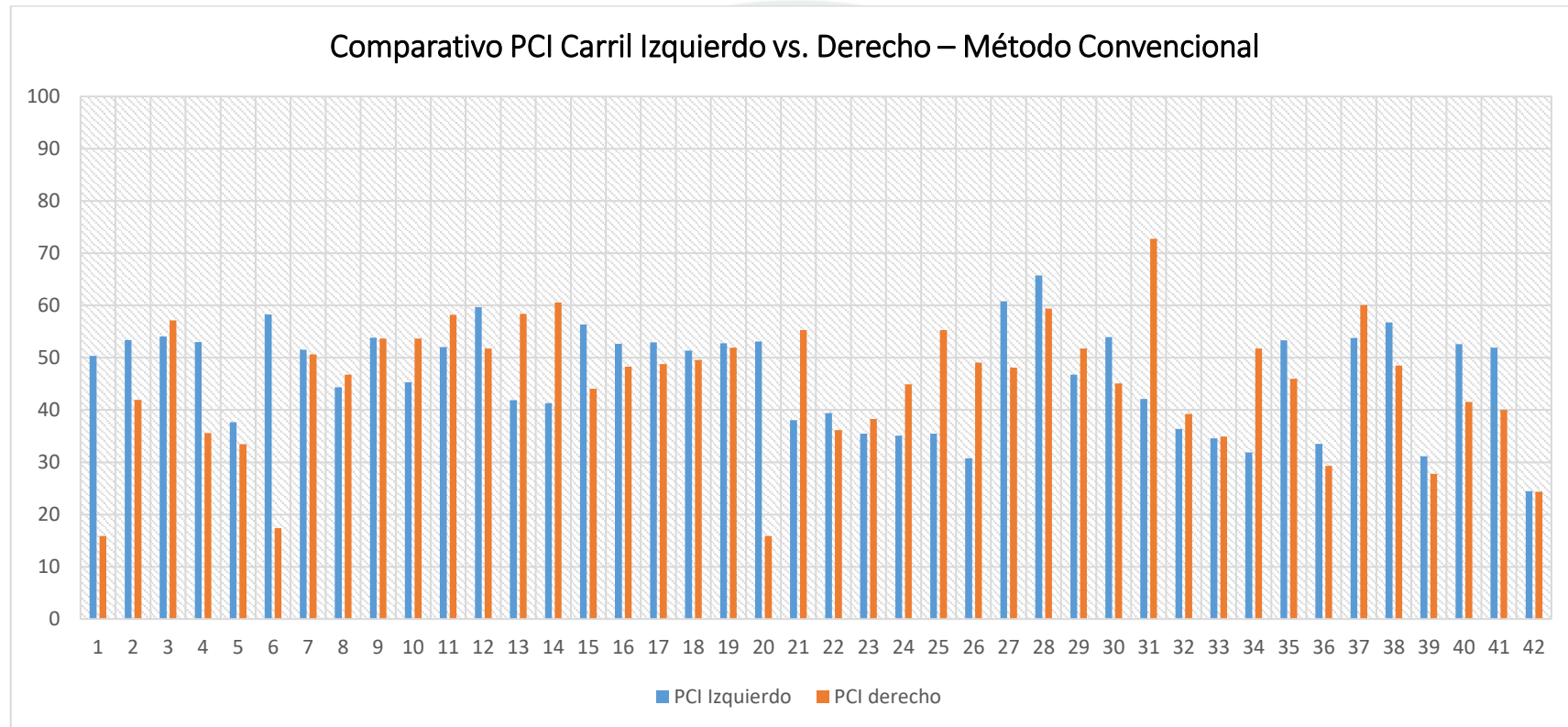
- El 52.4% de las unidades de muestra (22 de 42) se encuentran en condición Regular.
- El 21.4% de las unidades de muestra (09 de 42) en Malo.
- El 14.3% de las unidades de muestra (06 de 42) en Bueno.
- El 9.5% de las unidades de muestra (4 de 42) en Muy Malo.
- El 2.4% de las unidades de muestra (1 de 42) en Muy Bueno.
- Ninguna unidad del carril derecho alcanzó condición Excelente o Fallado.

4.2.3. Condición global PCI convencional

Los resultados globales de ambos carriles mediante el método convencional se presentan en las Figuras 59 y 60.

Figura 59.

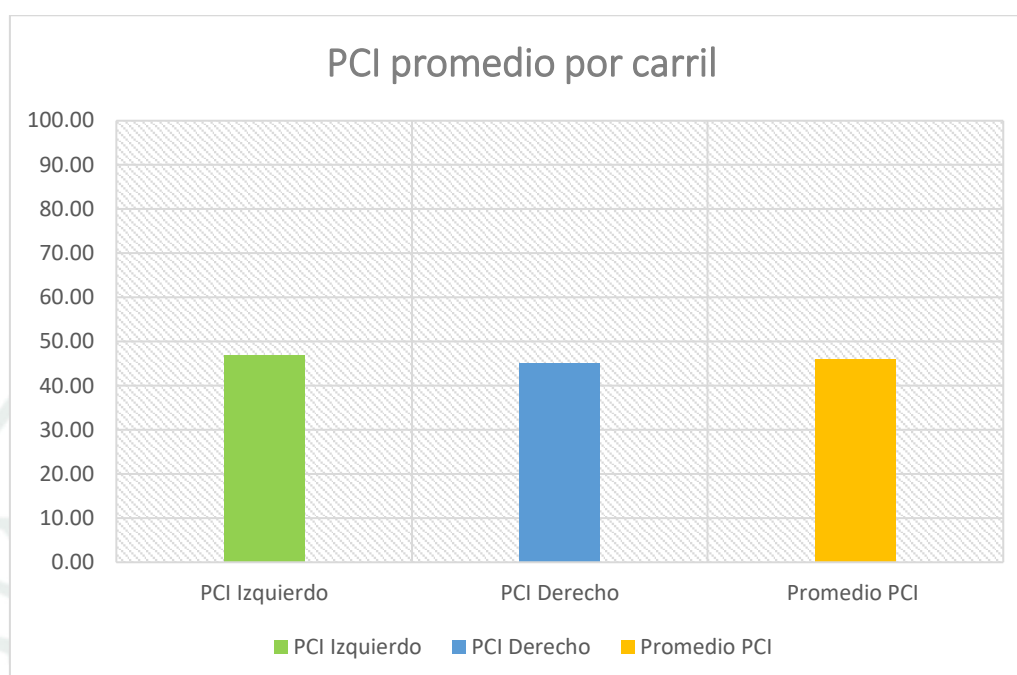
Comparativo PCI carril izquierdo vs derecho



Nota. Elaboración propia. Gráfico comparativo del PCI por unidad de muestra entre el carril izquierdo (PCI prom. 47 Regular) y el carril derecho (PCI prom. 45, Regular), método convencional, Av. Perú, Cerro Colorado, Arequipa 2025.

Figura 60.

PCI promedio por carril



Nota. Elaboración propia. Gráfico de barras del PCI promedio por carril y PCI global de la Av. Perú, método convencional, Cerro Colorado, Arequipa 2025. PCI global: 46.0 condición Regular. Calculado conforme a ASTM D6433-20.

Considerando ambos carriles en conjunto, la Avenida Perú registró un PCI global de 46.0 mediante el método convencional.

Este resultado indica que la vía en su conjunto supera el umbral de mantenimiento preventivo y requiere intervenciones de mantenimiento correctivo a corto plazo, con prioridad de rehabilitación estructural y reconstrucción total en los sectores críticos del carril derecho.

4.2.4. Carril izquierdo – RPAS.

Los resultados del PCI por unidad de muestras del carril izquierdo se presentan en la Tabla 27.y la figura 61

Tabla 27.

Resultados del PCI por unidad de muestra – Carril Izquierdo | Método RPAS | Av. Perú,
Cerro Colorado, Arequipa 2025

N° UM	KM Ini.	KM Fin.	VDC Máx.	PCI	Condición	Intervención recomendada
01	KM 00+000	KM 00+045	44	56	Bueno	Mantenimiento periódico
02	KM 00+045	KM 00+090	48	52	Regular	Mantenimiento periódico
03	KM 00+090	KM 00+135	36	64	Bueno	Mantenimiento periódico
40	KM 00+135	KM 00+180	40	60	Bueno	Mantenimiento periódico
05	KM 00+180	KM 00+225	60	40	Malo	Mantenimiento periódico
06	KM 00+225	KM 00+270	33	67	Bueno	Mantenimiento periódico
07	KM 00+270	KM 00+315	34	66	Bueno	Mantenimiento periódico
08	KM 00+315	KM 00+360	45	55	Regular	Mantenimiento periódico
09	KM 00+360	KM 00+405	38	62	Bueno	Mantenimiento periódico
10	KM 00+405	KM 00+450	53	47	Regular	Mantenimiento periódico
11	KM 00+450	KM 00+495	50	50	Regular	Mantenimiento periódico
12	KM 00+495	KM 00+540	33	67	Bueno	Mantenimiento periódico
13	KM 00+540	KM 00+585	54	46	Regular	Mantenimiento periódico
14	KM 00+585	KM 00+630	38	62	Bueno	Mantenimiento periódico
15	KM 00+630	KM 00+675	41	59	Bueno	Mantenimiento periódico
16	KM 00+675	KM 00+720	41	59	Bueno	Mantenimiento periódico
17	KM 00+720	KM 00+765	30	70	Bueno	Mantenimiento rutinario
18	KM 00+765	KM 00+810	41	59	Bueno	Mantenimiento periódico
19	KM 00+810	KM 00+855	40	60	Bueno	Mantenimiento periódico
20	KM 00+855	KM 00+900	39	61	Bueno	Mantenimiento periódico
21	KM 00+900	KM 00+945	53	47	Regular	Mantenimiento periódico
22	KM 00+945	KM 00+990	44	56	Bueno	Mantenimiento periódico
23	KM 00+990	KM 01+035	62	38	Malo	Rehabilitación
24	KM 01+035	KM 01+080	48	52	Regular	Mantenimiento periódico
25	KM 01+080	KM 01+125	55	45	Regular	Mantenimiento periódico
26	KM 01+125	KM 01+170	63	37	Malo	Rehabilitación
27	KM 01+170	KM 01+215	38	62	Bueno	Mantenimiento periódico
28	KM 01+215	KM 01+260	24	76	Muy Bueno	Mantenimiento rutinario
29	KM 01+260	KM 01+305	50	50	Regular	Mantenimiento periódico
30	KM 01+305	KM 01+350	41	59	Bueno	Mantenimiento periódico
31	KM 01+350	KM 01+395	54	46	Regular	Mantenimiento periódico
32	KM 01+395	KM 01+440	60	40	Malo	Mantenimiento periódico
33	KM 01+440	KM 01+485	48	52	Regular	Mantenimiento periódico

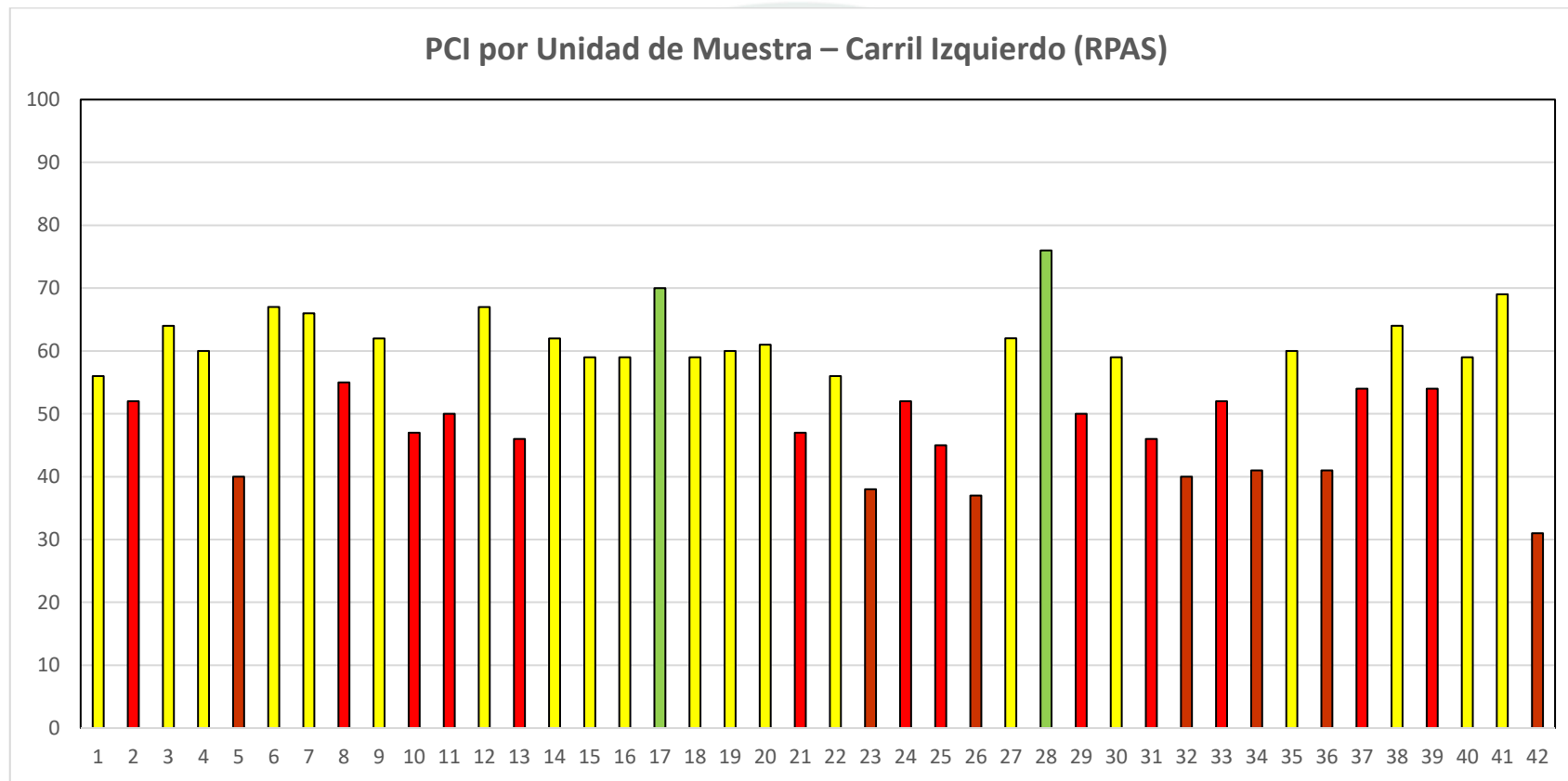
N° UM	KM Ini.	KM Fin.	VDC Máx.	PCI	Condición	Intervención recomendada
34	KM 01+485	KM 01+530	59	41	Regular	Mantenimiento periódico
35	KM 01+530	KM 01+575	40	60	Bueno	Mantenimiento periódico
36	KM 01+575	KM 01+620	59	41	Regular	Mantenimiento periódico
37	KM 01+620	KM 01+665	46	54	Regular	Mantenimiento periódico
38	KM 01+665	KM 01+710	36	64	Bueno	Mantenimiento periódico
39	KM 01+710	KM 01+755	46	54	Regular	Mantenimiento periódico
40	KM 01+755	KM 01+800	41	59	Bueno	Mantenimiento periódico
41	KM 01+800	KM 01+845	31	69	Bueno	Mantenimiento periódico
42	KM 01+845	KM 01+890	69	31	Malo	Rehabilitación
Promedio		Carril izq.	45	55	Regular	Mantenimiento periódico

Nota. Elaboración propia. PCI calculado según ASTM D6433-20 a partir de las fallas identificadas en la ortofoto georreferenciada (GSD = 1.5 cm/px) generada en Pix4Dmapper.

VDC. La condición y la intervención recomendada se determinan de acuerdo a los criterios de INVIAS.

Figura 61.

PCI carril izquierdo- Método RPAS



Nota. Elaboración propia. Gráfico de barras del PCI por unidad de muestra del carril izquierdo, método asistido con RPAS (Pix4Dmapper + AutoCAD), Av. Perú, Cerro Colorado, Arequipa 2025. PCI promedio: 55 condición Regular.

El carril izquierdo de la Avenida Perú presentó un PCI promedio de 55 mediante el método asistido con RPAS, correspondiente a la categoría Regular según la escala de clasificación de la norma ASTM D6433-20. Los valores de PCI oscilaron entre 31 y 76, con una desviación estándar de 10.2 puntos, lo que evidencia heterogeneidad en el estado superficial del pavimento a lo largo del tramo evaluado.

Las unidades de muestra con mayor deterioro corresponden a las progresivas KM 1+845–1+890 (PCI = 31, Malo), KM 1+125–1+170 (PCI = 37, Malo), KM 0+990–1+035 (PCI = 38, Malo) y KM 0+180–0+225 (PCI = 40, Malo), donde las fallas predominantes identificadas en la ortofoto fueron Parcheo (daño N° 11) y Grietas Longitudinales y Transversales (daño N° 10) de severidad media, que generaron los valores deducidos más elevados en el cálculo iterativo del VDC.

Las unidades con mejor condición superficial se ubican en las progresivas KM 1+215–1+260 (PCI = 76, Muy Bueno), KM 0+720–0+765 (PCI = 70, Bueno), KM 1+800–1+845 (PCI = 69, Bueno) y KM 0+495–0+540 (PCI = 67, Bueno), indicando que dichos sectores presentan un nivel de deterioro moderado.

En cuanto a la distribución de condiciones, el 50% de las unidades se encuentra en condición Bueno (21 de 42 UM), el 35.71% en Regular (15 UM), el 11.9% en Malo (5 UM) y el 2.38% en Muy Bueno (1 UM); ninguna unidad del carril izquierdo registró condición Excelente, Muy Malo o Fallado.

4.2.5. Carril derecho – RPAS.

Los resultados del PCI por unidad de muestras del carril derecho se presentan en la Tabla 28 y Figura 62

Tabla 28.

Resultados del PCI por unidad de muestra – Carril Derecho | Método RPAS | Av. Perú, Cerro Colorado, Arequipa 2025

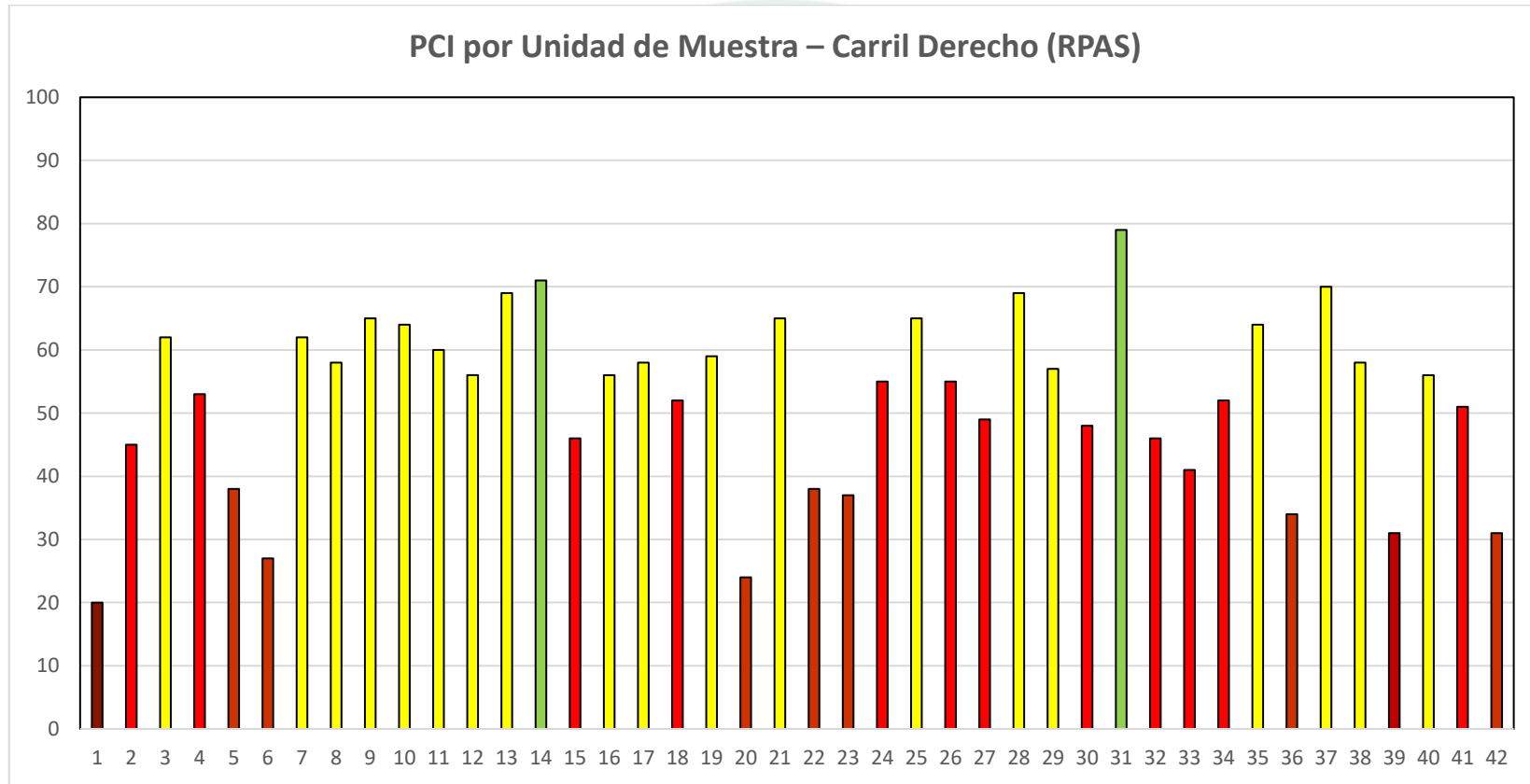
N° UM	KM Ini.	KM Fin.	VDC Máx.	PCI	Condición	Intervención recomendada
1	KM 00+000	KM 00+045	80	20	Muy Malo	Rehabilitación
2	KM 00+045	KM 00+090	55	45	Regular	Mantenimiento periódico
3	KM 00+090	KM 00+135	38	62	Bueno	Mantenimiento periódico
4	KM 00+135	KM 00+180	47	53	Regular	Mantenimiento periódico
5	KM 00+180	KM 00+225	62	38	Malo	Rehabilitación
6	KM 00+225	KM 00+270	73	27	Malo	Rehabilitación
7	KM 00+270	KM 00+315	38	62	Bueno	Mantenimiento periódico
8	KM 00+315	KM 00+360	42	58	Bueno	Mantenimiento periódico
9	KM 00+360	KM 00+405	35	65	Bueno	Mantenimiento periódico
10	KM 00+405	KM 00+450	36	64	Bueno	Mantenimiento periódico
11	KM 00+450	KM 00+495	40	60	Bueno	Mantenimiento periódico
12	KM 00+495	KM 00+540	44	56	Bueno	Mantenimiento periódico
13	KM 00+540	KM 00+585	31	69	Bueno	Mantenimiento periódico
14	KM 00+585	KM 00+630	29	71	Muy Bueno	Mantenimiento rutinario
15	KM 00+630	KM 00+675	54	46	Regular	Mantenimiento periódico
16	KM 00+675	KM 00+720	44	56	Bueno	Mantenimiento periódico
17	KM 00+720	KM 00+765	42	58	Bueno	Mantenimiento periódico
18	KM 00+765	KM 00+810	48	52	Regular	Mantenimiento periódico
19	KM 00+810	KM 00+855	41	59	Bueno	Mantenimiento periódico
20	KM 00+855	KM 00+900	76	24	Muy Malo	Rehabilitación
21	KM 00+900	KM 00+945	35	65	Bueno	Mantenimiento periódico
22	KM 00+945	KM 00+990	62	38	Malo	Rehabilitación
23	KM 00+990	KM 01+035	63	37	Malo	Rehabilitación
24	KM 01+035	KM 01+080	45	55	Regular	Mantenimiento periódico
25	KM 01+080	KM 01+125	35	65	Bueno	Mantenimiento periódico
26	KM 01+125	KM 01+170	45	55	Regular	Mantenimiento periódico
27	KM 01+170	KM 01+215	51	49	Regular	Mantenimiento periódico
28	KM 01+215	KM 01+260	31	69	Bueno	Mantenimiento periódico
29	KM 01+260	KM 01+305	43	57	Bueno	Mantenimiento periódico
30	KM 01+305	KM 01+350	52	48	Regular	Mantenimiento periódico
31	KM 01+350	KM 01+395	21	79	Muy Bueno	Mantenimiento rutinario
32	KM 01+395	KM 01+440	54	46	Regular	Mantenimiento periódico
33	KM 01+440	KM 01+485	59	41	Regular	Mantenimiento periódico
34	KM 01+485	KM 01+530	48	52	Regular	Mantenimiento periódico

35	KM 01+530	KM 01+575	36	64	Bueno	Mantenimiento periódico
36	KM 01+575	KM 01+620	66	34	Malo	Rehabilitación
37	KM 01+620	KM 01+665	30	70	Bueno	Mantenimiento rutinario
38	KM 01+665	KM 01+710	42	58	Bueno	Mantenimiento periódico
39	KM 01+710	KM 01+755	69	31	Malo	Rehabilitación
40	KM 01+755	KM 01+800	44	56	Bueno	Mantenimiento periódico
41	KM 01+800	KM 01+845	49	51	Regular	Mantenimiento periódico
42	KM 01+845	KM 01+890	69	31	Malo	Rehabilitación
Promedio		Carril izq.	48	52	Regular	Mantenimiento periódico

Nota. Elaboración propia. PCI calculado según ASTM D6433-20 a partir de las fallas identificadas en la ortofoto georreferenciada (GSD = 1.5 cm/px) generada en Pix4Dmapper. VDC. La condición y la intervención recomendada se determinan de acuerdo a los criterios de INVIAS.

Figura 62.

PCI carril derecho- Método RPAS



Nota. Elaboración propia. Gráfico de barras del PCI por unidad de muestra del carril izquierdo, método asistido con RPAS (Pix4Dmapper + AutoCAD), Av. Perú, Cerro Colorado, Arequipa 2025. PCI promedio: 55 condición Regular

El carril derecho presentó un PCI promedio de 52 mediante el método asistido con RPAS, correspondiente a la categoría Regular según la escala de clasificación de la norma ASTM D6433-20; los valores de PCI oscilaron entre 20 (Muy Malo) y 79 (Muy Bueno), con una desviación estándar de 13.8 puntos. Este resultado evidencia una condición superficial promedio similar a la del carril izquierdo, aunque con una mayor variabilidad y la presencia de unidades puntuales en estado de deterioro avanzado a lo largo del tramo evaluado.

Las unidades de muestra más críticas son KM 0+000–0+045 (PCI = 20, Muy Malo), KM 0+855–0+900 (PCI = 24, Muy Malo) y KM 0+225–0+270 (PCI = 27, Malo), en estas unidades se identificaron fallas de alta densidad en la ortofoto: Huecos (daño N° 13) de severidad alta, Parcheo extensivo (daño N° 11) de severidad media y alta, y Grietas Longitudinales (daño N° 10) de severidad media, que en conjunto generaron los valores de VDC más elevados del carril. Las progresivas KM 1+710–1+755 (PCI = 31, Malo), KM 1+845–1+890 (PCI = 31, Malo) y KM 1+575–1+620 (PCI = 34, Malo) presentan deterioros de impacto considerable.

En cuanto a la distribución de condiciones, el 45.24% en Bueno (19 UM), el 28.57% en Regular (12 UM), el 16.67% en Malo (7 UM), el 4.76% de las unidades se encuentra en condición Muy Bueno (2 de 42 UM) y el 4.76% en Muy Malo (2 UM); ninguna unidad del carril derecho registró condición Excelente ni Fallado; no obstante, la mayoría de las unidades requiere algún nivel de intervención.

4.2.6. Condición global RPAS

Los resultados globales de ambos carriles mediante el método convencional se presentan en la Tabla 29 y las Figuras 63 y 64.

Tabla 29.

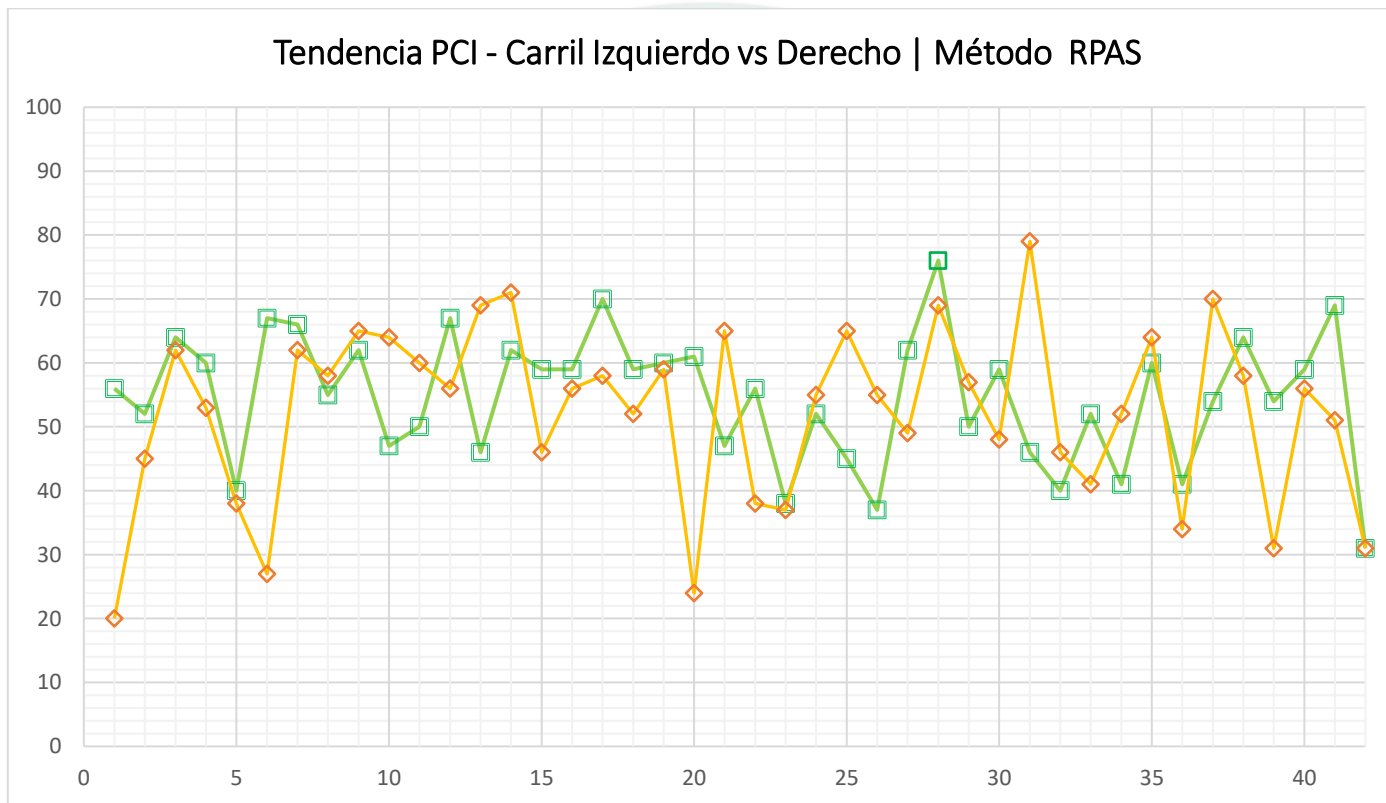
Resumen estadístico del PCI – Método RPAS | Ambos carriles | Av. Perú, Cerro Colorado, Arequipa 2025

Carril	N° UM	PCI Mín.	PCI Máx.	PCI Prom.	Condición	Intervención general
Izquierdo	42	31	76	55	Bueno	Mantenimiento periódico
Derecho	42	20	79	52	Regular	Mantenimiento periódico
Promedio	84	26	78	54	Regular	Mantenimiento periódico

Nota. Elaboración propia. PCI Prom. = Promedio aritmético de las 84 unidades de muestra por carril. La condición general según ASTM D6433 y la intervención se determinan según lo definido en INVIAS.

Figura 63.

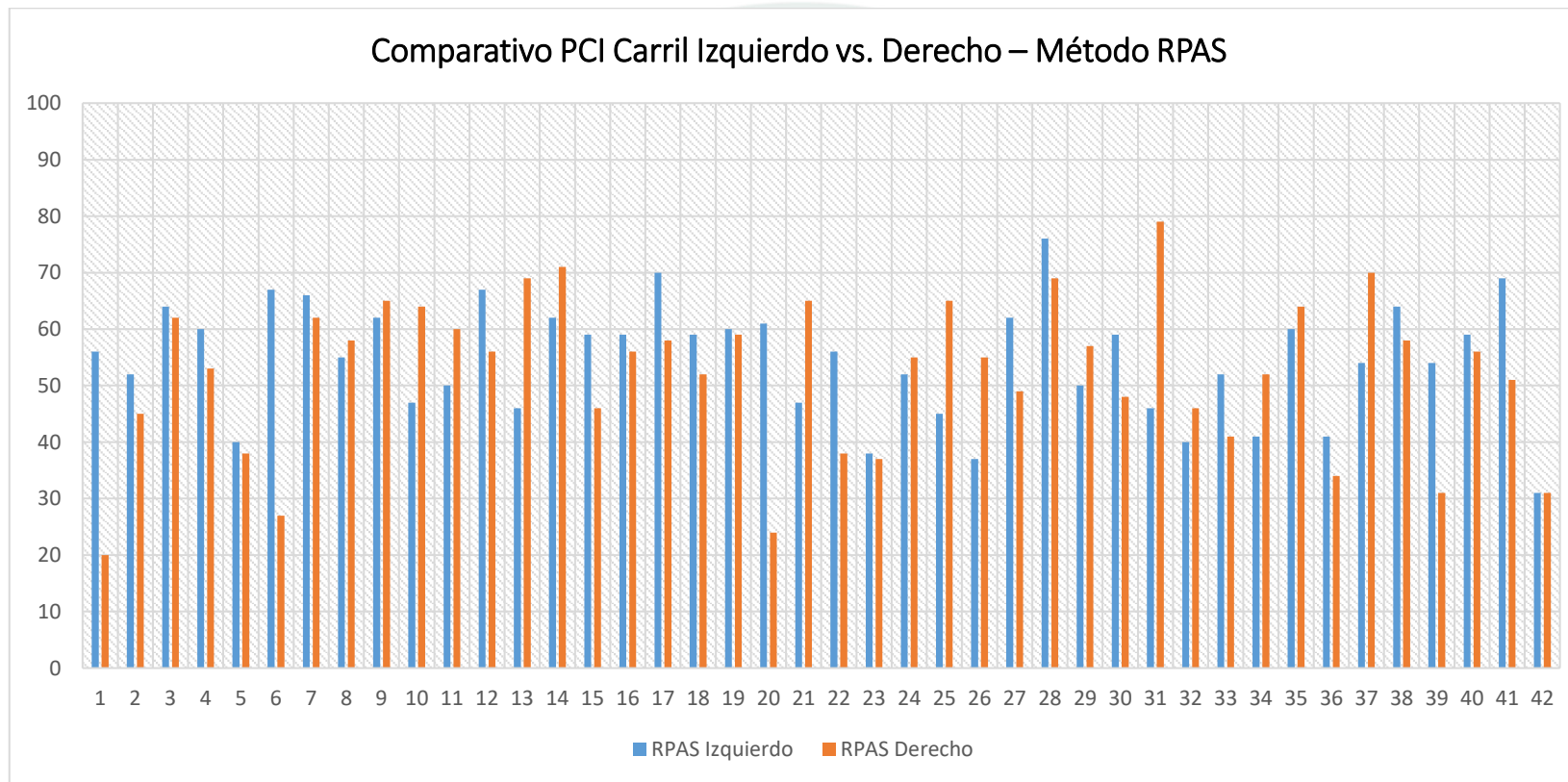
Tendencia PCI carril izquierdo vs derecho



Nota. Elaboración propia. Gráfico de líneas de tendencia del PCI por unidad de muestra de ambos carriles, método asistido con RPAS, Av. Perú, Cerro Colorado, Arequipa 2025.

Figura 64.

PCI por UM izquierdo vs derecho



Nota. Elaboración propia. Gráfico comparativo del PCI por unidad de muestra entre carril izquierdo y derecho, método asistido con RPAS, Av.

Perú, Cerro Colorado, Arequipa 2025. PCI global RPAS: 54 condición Regular. Calculado conforme a ASTM D6433-20.

Considerando ambos carriles en conjunto, la Avenida Perú registró un PCI global de 54 mediante el método asistido con RPAS, correspondiente a la categoría Regular según la norma ASTM D6433-20. Este resultado indica que la vía en su conjunto presenta un deterioro superficial moderado que supera el umbral de mantenimiento preventivo y requiere intervenciones de mantenimiento correctivo en el corto plazo, con prioridad de rehabilitación estructural y reconstrucción en los sectores críticos del carril derecho.

4.3. Concordancia en la identificación y severidad de fallas

En atención al objetivo específico b), se analiza a continuación la concordancia entre el método convencional y el método asistido con RPAS en la identificación, tipificación y clasificación de severidad de las fallas registradas en las 84 unidades de muestra evaluadas.

4.3.1. Tipos de fallas identificados por ambos métodos

Ambas metodologías emplearon la codificación de deterioros establecida en la norma ASTM D6433-20 y coincidieron en la identificación de siete de los nueve tipos de falla presentes en las 84 unidades de muestra evaluadas; el método convencional registró adicionalmente ahuellamiento y abultamientos o hundimientos, deterioros que el método asistido con RPAS no registró en ninguna unidad de muestra; el método convencional registró las fallas mediante medición directa con wincha en campo, mientras que el método RPAS las detectó sobre la ortofoto georreferenciada mediante la codificación por color en AutoCAD (celeste para piel de cocodrilo, naranja para agrietamiento en bloque, rosado para abultamientos y hundimientos, azul para grietas longitudinales y transversales, rojo para parcheo, amarillo para pulimiento de agregados, verde oscuro para huecos, café para ahuellamiento y verde claro para desprendimiento de agregados).

En el tramo evaluado se identificaron nueve tipos de daño, siete de ellos registrados por ambos métodos:

- Piel de cocodrilo (daño N° 01)
- Agrietamiento en bloque (daño N° 03)
- Abultamiento o hundimiento (daño N° 04)
- Grietas Longitudinales y Transversales (daño N° 10).
- Parcheo (daño N° 11).
- Pulimiento de Agregados (daño N° 12).
- Hueco (daño N° 13).
- Ahuellamiento (daño N° 15)
- Desprendimiento de Agregados (daño N° 19).

Tabla 30.

Deterioros de la norma ASTM D6433-20 no registrados en el tramo evaluado

Daño ASTM D6433-20	Situación	Sustento técnico
Exudación del ligante	No registrado	No se observó afloramiento de ligante en la inspección directa ni en la ortofoto
Corrugación	No registrado	Deterioro con componente de profundidad; no observado en campo y no resoluble sobre ortofoto bidimensional
Depresión	No registrado	Deterioro con componente de profundidad; no observado en campo y no resoluble sobre ortofoto bidimensional
Grieta de borde	No registrado	Sección urbana confinada por sardinel en ambos bordes, condición que restringe la ocurrencia de este deterioro
Grieta por reflexión de junta	No aplica	El pavimento evaluado no constituye refuerzo asfáltico sobre losas de concreto hidráulico
Desnivel carril-berma	No aplica	La sección transversal urbana no presenta berma; el confinamiento lateral es sardinel
Cruce de vía férrea	No aplica	El tramo evaluado no presenta cruce ferroviario a nivel
Desplazamiento	No registrado	No se observaron desplazamientos plásticos de la carpeta en campo ni en la ortofoto
Grieta parabólica o por deslizamiento	No registrado	No se observó este patrón de agrietamiento en campo ni en la ortofoto

Daño ASTM D6433-20	Situación	Sustento técnico
Hinchamiento	No registrado	Deterioro con componente de profundidad; no observado en campo y no resoluble sobre ortofoto bidimensional

Nota. Elaboración propia a partir de ASTM D6433-20.

De los diecinueve deterioros reconocidos por la norma ASTM D6433-20, nueve fueron registrados en el tramo evaluado. De los diez restantes, tres no son aplicables a la tipología de la vía grieta por reflexión de junta, desnivel carril-berma y cruce de vía férrea por corresponder a configuraciones estructurales o geométricas ausentes en la sección urbana evaluada, y siete no fueron registrados por ninguno de los dos métodos. Entre estos últimos, la corrugación, la depresión y el hinchamiento son deterioros cuya identificación y clasificación de severidad dependen de la medición de una componente vertical, por lo que su ausencia en el registro del método asistido con RPAS no puede atribuirse únicamente a su inexistencia en el tramo, sino también a la limitación del ortomosaico bidimensional para resolverlos. Esta distinción es relevante para la interpretación de los resultados y se retoma en el análisis de concordancia.

Tabla 31.

Comparación de metrados por tipo de deterioro Método Convencional vs. Método RPAS |

Deterioro (código ASTM)	Convencional	RPAS	Diferencia
Piel de cocodrilo	852.34 m ²	640.26 m ²	-24.9%
Agrietamiento en bloque	1,368.90 m ²	1,033.75 m ²	-24.5%
Abultamientos y hundimientos	11.20 m ²	0.00 m ²	-100.0%
Grietas longitudinales y transversales	1,785.98 m	1,602.93 m	-10.2%
Parcheo	2,781.13 m ²	2,104.52 m ²	-24.3%
Pulimiento de agregados	8.82 m ²	8.20 m ²	-7.0%
Huecos	206 und	11 und	-94.7%
Ahuellamiento	217.24 m ²	0.00 m ²	-100.0%
Desprendimiento de agregados	4,132.03 m ²	2,495.29 m ²	-39.6%
Total, de deterioro de área	9,371.66 m²	6,282.02 m²	-33.0%

Nota. Elaboración propia a partir de los metrados por unidad de muestra del Anexo 6. La fila de total considera únicamente los deterioros cuantificados en unidades de área.

La comparación de los metrados revela que el método asistido con RPAS subregistra el deterioro en todos los tipos de falla, con un déficit global del 33.0% del área deteriorada. El subregistro no es uniforme: alcanza el 100% en los deterioros con componente de profundidad —ahuellamiento y abultamientos o hundimientos— y el 94.7% en el conteo de huecos, mientras que en los deterioros medibles en planta se mantiene entre el 7.0% y el 39.6%. Este patrón constituye la explicación física del sesgo sistemático identificado en el análisis de Bland-Altman: un menor metrado de deterioro produce valores deducidos menores y, en consecuencia, un PCI más alto.

4.3.2. Severidades asignadas

En los deterioros registrados por ambos métodos, la clasificación de severidad —baja (L), media (M) o alta (H)— coincidió en la totalidad de las unidades de muestra evaluadas. En el método convencional la severidad se determinó mediante la medición del ancho de fisura con regla rígida y la evaluación visual directa conforme a los criterios de la norma ASTM D6433-20. En el método RPAS la severidad se determinó por criterios visuales sobre la ortofoto a escala 1:1, donde el GSD de 1.5 cm/píxel permitió distinguir con claridad fisuras con anchos superiores a 3 mm, umbral suficiente para la clasificación de severidades L, M y H según la norma. Esta coincidencia se verifica únicamente sobre los siete tipos de falla que ambos métodos identificaron y cuya severidad se establece a partir de atributos medibles en planta —ancho de fisura, extensión superficial y densidad—, y no alcanza a los deterioros cuya severidad se define por profundidad, cuya clasificación el ortomosaico bidimensional no permite verificar.

4.3.3. Diferencia de PCI por unidad de muestra

La Tabla 30 y Tabla 31 presentan la comparación entre los valores de PCI convencional y PCI RPAS para cada una de las 84 unidades de muestra evaluadas, incluyendo la diferencia absoluta entre métodos y la verificación de coincidencia en la categoría de condición asignada.

Tabla 32.

Comparativo del PCI por unidad de muestra — Carril Izquierdo | Método Convencional vs. Método RPAS | Av. Perú, Cerro Colorado, Arequipa 2025

N° UM	Progresiva Inicial	Progresiva Final	PCI Convencional.	Cond. Convencional	PCI RPAS	Cond. RPAS	Δ PCI
1	KM 00+000	KM 00+045	50	Regular	56	Bueno	06
2	KM 00+045	KM 00+090	53	Regular	52	Regular	01
3	KM 00+090	KM 00+135	54	Regular	64	Bueno	10
4	KM 00+135	KM 00+180	53	Regular	60	Bueno	07
5	KM 00+180	KM 00+225	38	Malo	40	Regular	02
6	KM 00+225	KM 00+270	58	Bueno	67	Bueno	09
7	KM 00+270	KM 00+315	52	Regular	66	Bueno	14
8	KM 00+315	KM 00+360	44	Regular	55	Regular	11
9	KM 00+360	KM 00+405	54	Regular	62	Bueno	08
10	KM 00+405	KM 00+450	45	Regular	47	Regular	02
11	KM 00+450	KM 00+495	52	Regular	50	Regular	02
12	KM 00+495	KM 00+540	60	Bueno	67	Bueno	07
13	KM 00+540	KM 00+585	42	Regular	46	Regular	04
14	KM 00+585	KM 00+630	41	Regular	62	Bueno	21
15	KM 00+630	KM 00+675	56	Bueno	59	Bueno	03
16	KM 00+675	KM 00+720	53	Regular	59	Bueno	06
17	KM 00+720	KM 00+765	53	Regular	70	Bueno	17
18	KM 00+765	KM 00+810	51	Regular	59	Bueno	08
19	KM 00+810	KM 00+855	53	Regular	60	Bueno	07
20	KM 00+855	KM 00+900	53	Regular	61	Bueno	08
21	KM 00+900	KM 00+945	38	Malo	47	Regular	09
22	KM 00+945	KM 00+990	39	Malo	56	Bueno	17
23	KM 00+990	KM 01+035	35	Malo	38	Malo	03
24	KM 01+035	KM 01+080	35	Malo	52	Regular	14
25	KM 01+080	KM 01+125	35	Malo	45	Regular	10
26	KM 01+125	KM 01+170	31	Malo	37	Malo	06

N° UM	Progresiva Inicial	Progresiva Final	PCI Convencional.	Cond. Convencional	PCI RPAS	Cond. RPAS	Δ PCI
27	KM 01+170	KM 01+215	61	Bueno	62	Bueno	01
28	KM 01+215	KM 01+260	66	Bueno	76	Muy Bueno	10
29	KM 01+260	KM 01+305	47	Regular	50	Regular	03
30	KM 01+305	KM 01+350	54	Regular	59	Bueno	05
31	KM 01+350	KM 01+395	42	Regular	46	Regular	04
32	KM 01+395	KM 01+440	36	Malo	40	Malo	04
33	KM 01+440	KM 01+485	35	Malo	52	Regular	17
34	KM 01+485	KM 01+530	32	Malo	41	Regular	09
35	KM 01+530	KM 01+575	53	Regular	60	Bueno	07
36	KM 01+575	KM 01+620	34	Malo	41	Regular	07
37	KM 01+620	KM 01+665	54	Regular	54	Regular	00
38	KM 01+665	KM 01+710	57	Bueno	64	Bueno	07
39	KM 01+710	KM 01+755	31	Malo	54	Regular	23
40	KM 01+755	KM 01+800	53	Regular	59	Bueno	06
41	KM 01+800	KM 01+845	52	Bueno	69	Bueno	17
42	KM 01+845	KM 01+890	24	Muy Malo	31	Malo	07
Promedio			Carril izq. 47	Regular	55	Regular	08

Nota. Elaboración propia. PCI = Pavement Condition Index calculado según ASTM D6433-

20. |Δ| = diferencia absoluta en puntos PCI entre el método convencional y el método asistido con RPAS.

Tabla 33.

Comparativo del PCI por unidad de muestra — Carril Derecho | Método Convencional vs.

Método RPAS | Av. Perú, Cerro Colorado, Arequipa 2025

N°	Progresiva	Progresiva	PCI	Cond.	PCI	Condición.	Δ
UM	Inicial	Final	Convencional	Convencional.	RPAS	RPAS	PCI
1	KM 00+000	KM 00+045	16	Muy Malo	20	Muy Malo	04
2	KM 00+045	KM 00+090	42	Regular	45	Regular	03
3	KM 00+090	KM 00+135	57	Bueno	62	Bueno	05
4	KM 00+135	KM 00+180	36	Malo	53	Regular	17
5	KM 00+180	KM 00+225	33	Malo	38	Malo	05
6	KM 00+225	KM 00+270	17	Muy Malo	27	Malo	10
7	KM 00+270	KM 00+315	51	Regular	62	Bueno	11
8	KM 00+315	KM 00+360	47	Regular	58	Bueno	11
9	KM 00+360	KM 00+405	54	Regular	65	Bueno	11
10	KM 00+405	KM 00+450	54	Regular	64	Bueno	10
11	KM 00+450	KM 00+495	58	Bueno	60	Bueno	02
12	KM 00+495	KM 00+540	52	Regular	56	Bueno	04
13	KM 00+540	KM 00+585	58	Bueno	69	Bueno	11
14	KM 00+585	KM 00+630	61	Bueno	71	Muy Bueno	10
15	KM 00+630	KM 00+675	44	Regular	46	Regular	02
16	KM 00+675	KM 00+720	48	Regular	56	Bueno	08
17	KM 00+720	KM 00+765	49	Regular	58	Bueno	09
18	KM 00+765	KM 00+810	50	Regular	52	Regular	02
19	KM 00+810	KM 00+855	52	Regular	59	Bueno	07
20	KM 00+855	KM 00+900	16	Muy Malo	24	Muy Malo	08
21	KM 00+900	KM 00+945	55	Regular	65	Bueno	10
22	KM 00+945	KM 00+990	36	Malo	38	Malo	2
23	KM 00+990	KM 01+035	38	Malo	37	Malo	01
24	KM 01+035	KM 01+080	45	Regular	55	Regular	10
25	KM 01+080	KM 01+125	55	Regular	65	Bueno	10
26	KM 01+125	KM 01+170	49	Regular	55	Regular	06
27	KM 01+170	KM 01+215	48	Regular	49	Regular	01
28	KM 01+215	KM 01+260	59	Bueno	69	Bueno	10
29	KM 01+260	KM 01+305	52	Regular	57	Bueno	05
30	KM 01+305	KM 01+350	45	Regular	48	Regular	03
31	KM 01+350	KM 01+395	73	Muy Bueno	79	Muy Bueno	06
32	KM 01+395	KM 01+440	39	Malo	46	Regular	07
33	KM 01+440	KM 01+485	35	Malo	41	Regular	06

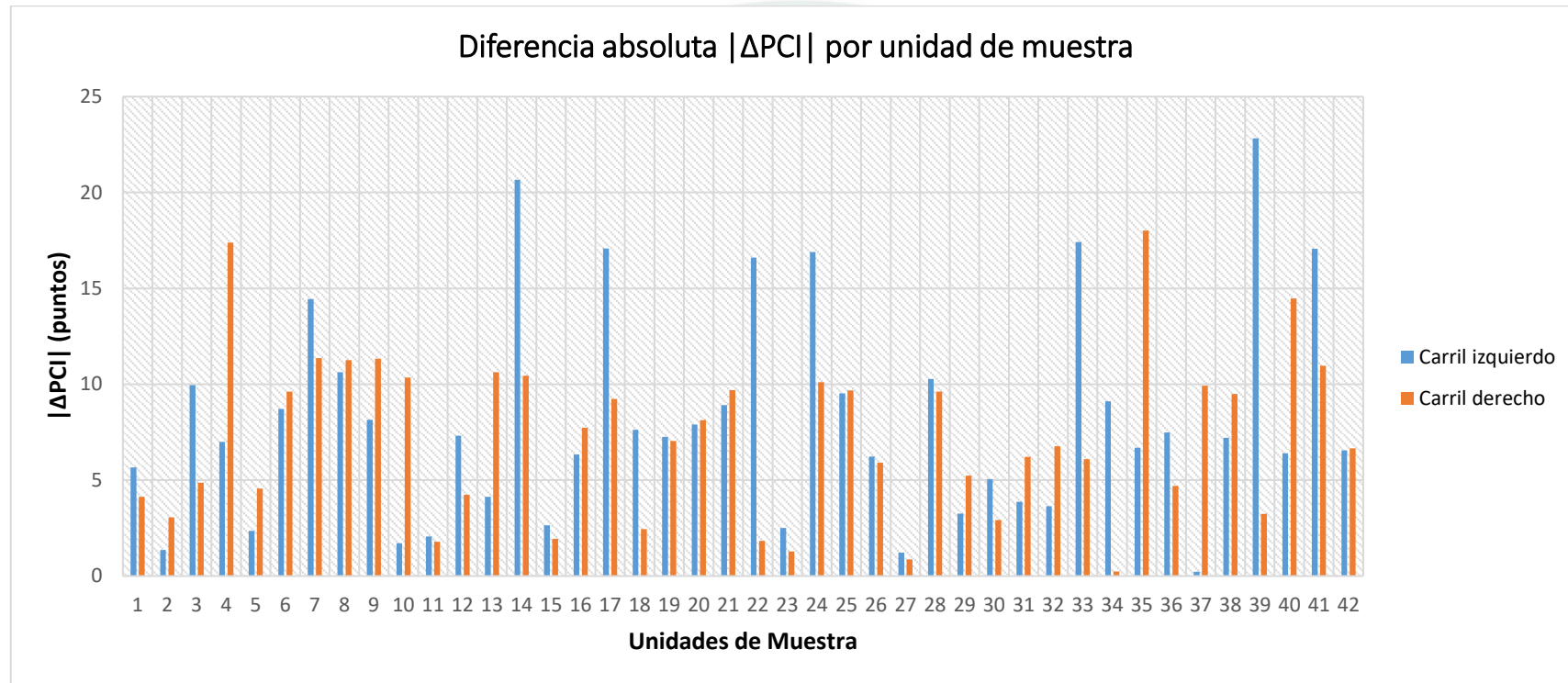
N°	Progresiva	Progresiva	PCI	Cond.	PCI	Condición.	Δ
UM	Inicial	Final	Convencional	Convencional.	RPAS	RPAS	PCI
34	KM 01+485	KM 01+530	52	Regular	52	Regular	00
35	KM 01+530	KM 01+575	46	Regular	64	Bueno	18
36	KM 01+575	KM 01+620	29	Malo	34	Malo	05
37	KM 01+620	KM 01+665	60	Bueno	70	Bueno	10
38	KM 01+665	KM 01+710	49	Regular	58	Bueno	09
39	KM 01+710	KM 01+755	28	Malo	31	Malo	03
40	KM 01+755	KM 01+800	42	Regular	56	Bueno	14
41	KM 01+800	KM 01+845	40	Malo	51	Regular	11
42	KM 01+845	KM 01+890	24	Muy Malo	31	Malo	07
Promedio		Carril der.	45	Regular	52	Regular	07

Nota. Elaboración propia. PCI = Pavement Condition Index calculado según ASTM D6433-

20. $|\Delta|$ = diferencia absoluta en puntos PCI entre el método convencional y el método asistido con RPAS.

Figura 65.

Diferencia absoluta $|\Delta PCI|$ entre método convencional y RPAS por unidad de muestra



Nota. Elaboración propia.

La diferencia promedio entre los valores de PCI convencional y PCI RPAS fue de 8.1 puntos en el carril izquierdo y de 7.3 puntos en el carril derecho, con un diferencial global de 7.7 puntos para el conjunto de la vía. La diferencia máxima registrada en cualquier unidad de muestra individual fue de 23 puntos.

4.4. Eficiencia operativa – Tiempos y costos

En atención al objetivo específico c), se compara a continuación la eficiencia operativa de ambas metodologías en términos de tiempos de ejecución y costos asociados a la evaluación superficial del 100% del pavimento flexible de la Avenida Perú.

4.4.1. Comparativo de tiempos

El comparativo de tiempos de ejecución entre ambas metodologías se construye a partir de los datos de rendimiento registrados durante el trabajo de campo; para el método convencional registró un total de 48 horas y 50 minutos de trabajo efectivo en campo distribuidas en 09 jornadas, con un rendimiento promedio de 78 m/hora (véase Tabla 10); para el método RPAS completó la adquisición de imágenes de la totalidad del tramo en aproximadamente 2.6 horas de vuelo efectivo, equivalente a un rendimiento de 1275 m/hora, lo que representa una mejora de 16.3 veces en la velocidad de adquisición de datos respecto al método convencional (véase Tabla 21).

Tabla 34.

Comparativo de tiempos de ejecución en campo — Método Convencional vs. Método RPAS |

Av. Perú, Cerro Colorado, Arequipa 2025

Etapas / Actividad	Método Convencional	Método RPAS	Observación
Reconocimiento y señalización	30 min / jornada	20 min (vuelo + GCP)	El RPAS requiere instalación de GCP
Delimitación de unidades de muestra	15 min / jornada	—	El RPAS no requiere esta etapa
Inspección / Adquisición de imágenes	30 min / UM (prom.)	2.6 h (vuelo total)	Conv: por UM RPAS: tramo completo
Total, tiempo efectivo en campo	48 h 40 min (09 jornadas)	~3.0 h (incluye GCP)	RPAS: 16.20x más rápido en campo
Rendimiento en campo	78 m/hora	1275m/hora	RPAS: 16.30x mayor rendimiento

Nota. Elaboración propia. Los tiempos del método convencional se obtuvieron del registro de las jornadas de campo (véase Tabla 10), los tiempos del método RPAS corresponden al registro de ejecución del vuelo (véase Tabla 21). El rendimiento se expresa en metros lineales evaluados por hora de trabajo efectivo en campo.

Tabla 35.

Comparativo de tiempos de gabinete y totales del proceso — PCI Convencional vs. PCI

RPAS

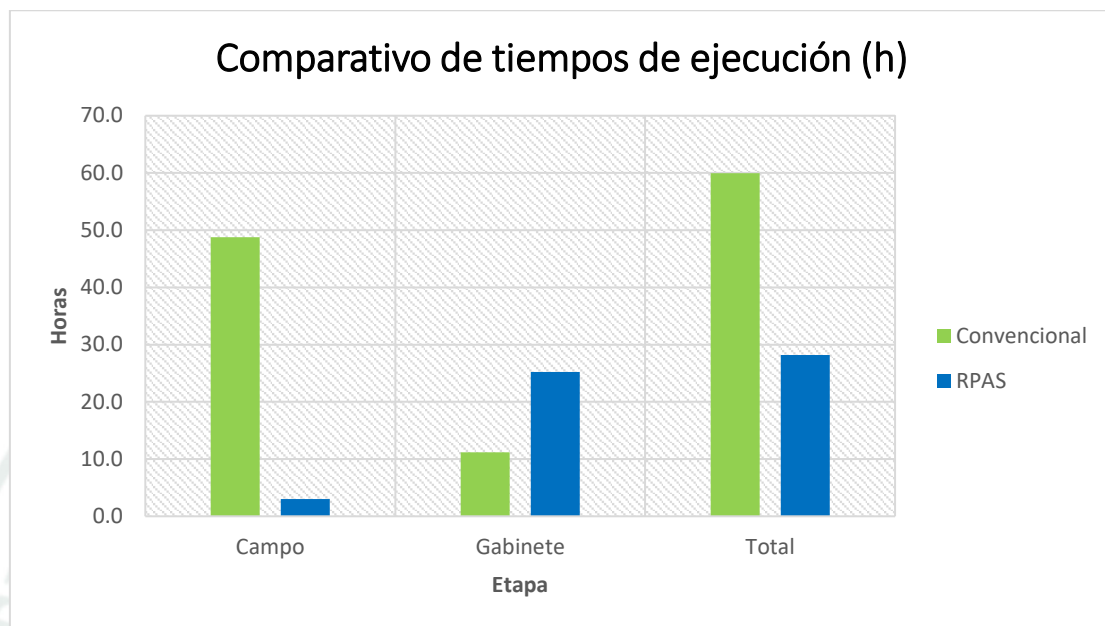
Etapa / Actividad		Método Convencional	Método RPAS	Observación
Procesamiento	fotogramétrico	—	6.0 h por carril	Solo aplica al método RPAS
Pix4D		—		
Digitalización y	metrado en	—	8.0 h por carril	Solo aplica al método RPAS
AutoCAD				
Cálculo del PCI en Excel		11.2 (84 UM)	10h (84 UM)	Igual en ambos métodos
TOTALES				
Total, tiempo de gabinete		11 h 20 min	24.0 h	RPAS requiere mayor tiempo en gabinete
Tiempo total del proceso		60 h	27.0 h	Ciclo completo de evaluación
Tiempo en campo		48 h 40 min (80.7%)	3.0 h (11.1%)	Reducción drástica en campo con RPAS
Tiempo en gabinete		11 h 20 min (19.3%)	24.0 h (88.9%)	RPAS traslada el trabajo al gabinete
Personal requerido en campo		2 evaluadores	1 piloto + 1 observador	Mismo número de personas
Exposición al tráfico vehicular		Alta (48 h 40 min)	Baja (~0.5 h GCP)	Ventaja de seguridad del RPAS

Nota. Elaboración propia. Los tiempos de gabinete del método RPAS incluyen el procesamiento fotogramétrico en Pix4Dmapper y la digitalización y metrado de fallas en AutoCAD 2024.

En consecuencia, el método RPAS completó el ciclo completo de evaluación de toda la Av. Perú es alrededor de 27 horas frente a las 60 horas del método convencional, lo que representa una reducción del 55% en el tiempo total del proceso y confirma que la eficiencia del método asistido con RPAS se incrementa a medida que aumenta la extensión y el número de unidades de muestra evaluadas, posicionándolo como la alternativa más eficaz para la evaluación de tramos extensos o de cobertura completa.

Figura 66.

Comparativo de tiempos de ejecución entre métodos — Av. Perú, Cerro Colorado 2025



Nota. Elaboración propia. Los tiempos de campo corresponden al trabajo efectivo de inspección y vuelo. Los tiempos de gabinete incluyen el procesamiento en Pix4Dmapper y AutoCAD para el método RPAS, y el cálculo del PCI en Excel para ambos métodos.

Sin embargo, al considerar el ciclo completo del método RPAS en relación con el PCI convencional, el tiempo total del proceso de identificación de fallas superó al del método convencional; esta diferencia evidencia que la ventaja operativa del método RPAS se concentra en la fase de adquisición de datos en campo, mientras que la fase de gabinete representa su principal limitación en términos de tiempo total del ciclo de evaluación.

4.4.2. Análisis de costos

El análisis de costos asociados a cada metodología comprende los recursos humanos, el equipamiento y el software requeridos para completar la evaluación de las 84 unidades de muestra; para el método convencional involucró el costo del personal de dos evaluadores durante las nueve jornadas de campo, así como los materiales de inspección (hojas de registro, wincha, regla, EPP), sin requerir inversión en equipamiento especializado ni software de procesamiento; para el método RPAS, en cambio, requirió la inversión en el RPAS DJI Mavic 3 Enterprise, la licencia de Pix4Dmapper y la licencia de AutoCAD, además del tiempo de gabinete del operador para el procesamiento y la digitalización.

En términos de costo por unidad de muestra evaluada, el método convencional presenta un costo operativo más bajo en el corto plazo cuando el equipamiento RPAS no está disponible; no obstante, cuando el equipo ya está adquirido y el operador está capacitado, el costo marginal del método RPAS por evaluación adicional es significativamente inferior al del método convencional, lo que posiciona al método RPAS como más costo-efectivo para la evaluación de tramos completos y para organizaciones con programas continuos de gestión de pavimentos.

4.5. Cobertura, repetibilidad y seguridad operativa

En atención al objetivo específico d), se comparan a continuación la cobertura del levantamiento, la repetibilidad de las mediciones y la seguridad operativa del personal entre ambas metodologías de evaluación.

4.5.1. Cobertura del levantamiento

El método convencional evaluó las 84 unidades de muestra seleccionadas, cubriendo el 100% del total de unidades posibles por carril (42 de 42) mediante un proceso de inspección secuencial en campo; este método no genera un registro visual continuo del tramo, sino fichas de datos por unidad y fotografías representativas de las fallas identificadas; de modo que la información queda limitada a los tramos efectivamente inspeccionados y a la apreciación del evaluador en el momento de la medición.

Por otro lado el método RPAS, generó una cobertura aerofotogramétrica continua del 100% del tramo de 1,890 m en ambos carriles, produciendo un ortomosaico georreferenciado sin interrupciones con un GSD de 1.5 cm/píxel que constituye un registro permanente, consultable y reproducible del estado del pavimento al momento de la evaluación; esta cobertura continua permite, además, identificar y reevaluar fallas en cualquier sector del tramo sin necesidad de retornar a campo, información que el método convencional no captura una vez concluida la jornada de inspección.

4.5.2. Repetibilidad de las mediciones

La repetibilidad hace referencia a la capacidad de reproducir las mismas mediciones en un segundo momento sin necesidad de una nueva intervención en campo; para el método convencional, cualquier verificación o corrección de datos requiere una nueva jornada de inspección presencial sobre el tramo, lo que implica costos adicionales en el personal y tiempo, exponiendo nuevamente a los evaluadores al tráfico vehicular.

El método RPAS ofrece una ventaja significativa en este aspecto, dado que la ortofoto georreferenciada permanece disponible en formato digital y permite al evaluador revisar, corregir o ampliar las mediciones de fallas en cualquier momento desde gabinete, sin desplazamiento al campo. Esta característica reduce el margen de error asociado a la subjetividad del evaluador y garantiza que las mediciones puedan ser verificadas por terceros de forma independiente, lo que fortalece la trazabilidad y la objetividad del proceso de evaluación. Cabe precisar, no obstante, que la repetibilidad del método RPAS está condicionada a los tipos de falla detectables sobre la ortofoto bidimensional, dado que los deterioros con componente de profundidad no quedan registrados de forma confiable en el producto fotogramétrico.

4.5.3. Seguridad operativa del personal

La inspección convencional expuso al equipo de dos evaluadores al tráfico vehicular activo de la Avenida Perú durante las nueve jornadas de campo necesarias para cubrir las 84 unidades de muestra, en una vía con circulación constante y niveles de congestión moderados a altos en horas punta; esta condición representó un riesgo real para la seguridad del personal, que debió compartir el espacio de la calzada con vehículos en movimiento durante aproximadamente 48 horas con 40 minutos de trabajo presencial.

El método RPAS eliminó prácticamente esta exposición al ejecutar la adquisición de datos desde tierra mediante el pilotaje remoto de la aeronave, sin necesidad de que ningún integrante del equipo permaneciera en la calzada durante el vuelo; el único momento de exposición al tráfico en el método RPAS fue durante la colocación de los Puntos de Control en Tierra (GCP), etapa de corta duración (aproximadamente 30 minutos) y fácilmente gestionable con señalización temporal. Esta reducción del riesgo operativo de cerca de 49 horas de exposición a menos de una hora; constituye una ventaja cualitativa del método RPAS que

adquiere mayor relevancia conforme aumenta la extensión del tramo evaluado y en vías de alto tráfico donde la interrupción del flujo vehicular no es viable.

4.6. Equivalencia estadística y costo efectividad – Prueba SMART

En atención al objetivo específico e), se presenta a continuación la verificación de la equivalencia práctica entre los valores de PCI obtenidos por ambas metodologías mediante la prueba SMART y el coeficiente de correlación de rangos de Spearman, así como el análisis de costo-efectividad entre métodos

4.6.1. Prueba SMART

Aplicando el marco SMART propuesto por Chang et al. (2025) para el control de calidad de datos PCI de campo, se obtuvieron los siguientes resultados sobre las 84 unidades de muestra evaluadas; el Porcentaje de Acuerdo (PA) entre las categorías de condición asignadas por ambos métodos fue del 41.7%, dado que 35 de las 84 unidades de muestra conservaron la misma categoría de condición entre el método convencional y el método RPAS, mientras que las 49 unidades restantes, equivalentes al 58.33%, presentaron un cambio de categoría.

Es importante señalar que en la práctica totalidad de los casos de desacuerdo el cambio se produjo en un único sentido: el método RPAS asignó una categoría de condición superior (mejor) a la del método convencional, principalmente desplazamientos de Regular a Bueno y de Malo a Regular; este patrón unidireccional indica que el desacuerdo entre métodos no es aleatorio, sino que responde a una tendencia sistemática del método RPAS a calificar el pavimento en mejor condición de la registrada en la inspección presencial.

La verificación de la equivalencia entre ambos métodos requiere un análisis de concordancia y no únicamente de correlación. El coeficiente de Spearman mide la asociación en el ordenamiento de las unidades de muestra, de modo que dos métodos pueden alcanzar una

correlación perfecta y diferir sistemáticamente en una constante; puesto que las decisiones de conservación se adoptan sobre el valor absoluto del PCI —la categoría de condición y el rango de intervención asociado—, la comparación exige cuantificar la magnitud de la discrepancia y no solo su consistencia ordinal. El diagrama de Bland-Altman es el procedimiento estándar para ese propósito porque descompone la discrepancia en dos componentes de naturaleza distinta: un sesgo sistemático, dado por la media de las diferencias, y una dispersión aleatoria, expresada en los límites de acuerdo del 95%. La distinción es operativamente decisiva: un sesgo sistemático es corregible mediante calibración del método, mientras que la dispersión aleatoria no lo es y determina el margen de incertidumbre con el que debe interpretarse cada unidad de muestra individual. El procedimiento no exige, además, suponer que alguno de los dos métodos esté libre de error, supuesto que no sería sostenible en este caso: aunque la inspección convencional constituye el procedimiento normativo de referencia, la propia norma ASTM D6433-20 reconoce su variabilidad al asumir una desviación estándar del PCI y al fijar un error admisible para el estimado de la sección. Las diferencias se representan frente al promedio de ambos métodos, conforme a la formulación original de Bland y Altman (1986, 1995), a fin de evitar la correlación espuria que se introduce al graficarlas contra uno de los dos métodos.

La aplicación del diagrama de Bland-Altman requiere definir, con carácter previo al análisis, el límite de equivalencia práctica, entendido como la máxima diferencia entre métodos que no altera la decisión técnica que se adopta a partir de la medición (Bland y Altman, 1999). La norma ASTM D6433-20 no establece un criterio de concordancia entre metodologías de levantamiento; el valor de ± 5 puntos que la norma emplea corresponde al error admisible en el estimado del PCI de una sección obtenido por muestreo, parámetro que determina el número de unidades a inspeccionar y que en la presente investigación no resulta operativo por haberse evaluado la totalidad de las unidades de muestra de ambos carriles. En consecuencia, el límite

de equivalencia se establece en esta investigación como criterio metodológico propio, sustentado en la consecuencia de gestión de la medición, en dos niveles. En primer lugar, un límite de equivalencia para la decisión de intervención de ± 10 puntos PCI, cuyo sustento es que las categorías de condición de la norma tienen una amplitud de 15 puntos, por lo que una diferencia contenida en ± 10 puntos no puede desplazar una unidad de muestra más de una categoría, y que los rangos de intervención adoptados en la Tabla 2 tienen una amplitud de 30 puntos, de modo que una incertidumbre de ± 10 puntos preserva la intervención asignada salvo en las unidades situadas a menos de 10 puntos de un umbral, que son precisamente las que se somete a verificación en campo. En segundo lugar, un límite estricto de equivalencia numérica de ± 5 puntos PCI, adoptado por analogía con la tolerancia que la propia norma considera admisible para que un estimado del PCI sea utilizable en decisiones de conservación; se declara expresamente que se trata de una analogía adoptada por los autores y no de una exigencia normativa aplicable a la comparación entre métodos. La equivalencia se declara verificada cuando la media de las diferencias y su intervalo de confianza del 95% quedan contenidos en el límite establecido; adicionalmente se examina si los límites de acuerdo del 95% quedan contenidos en el mismo intervalo, condición más exigente que gobierna la interpretación de cada unidad de muestra individual.

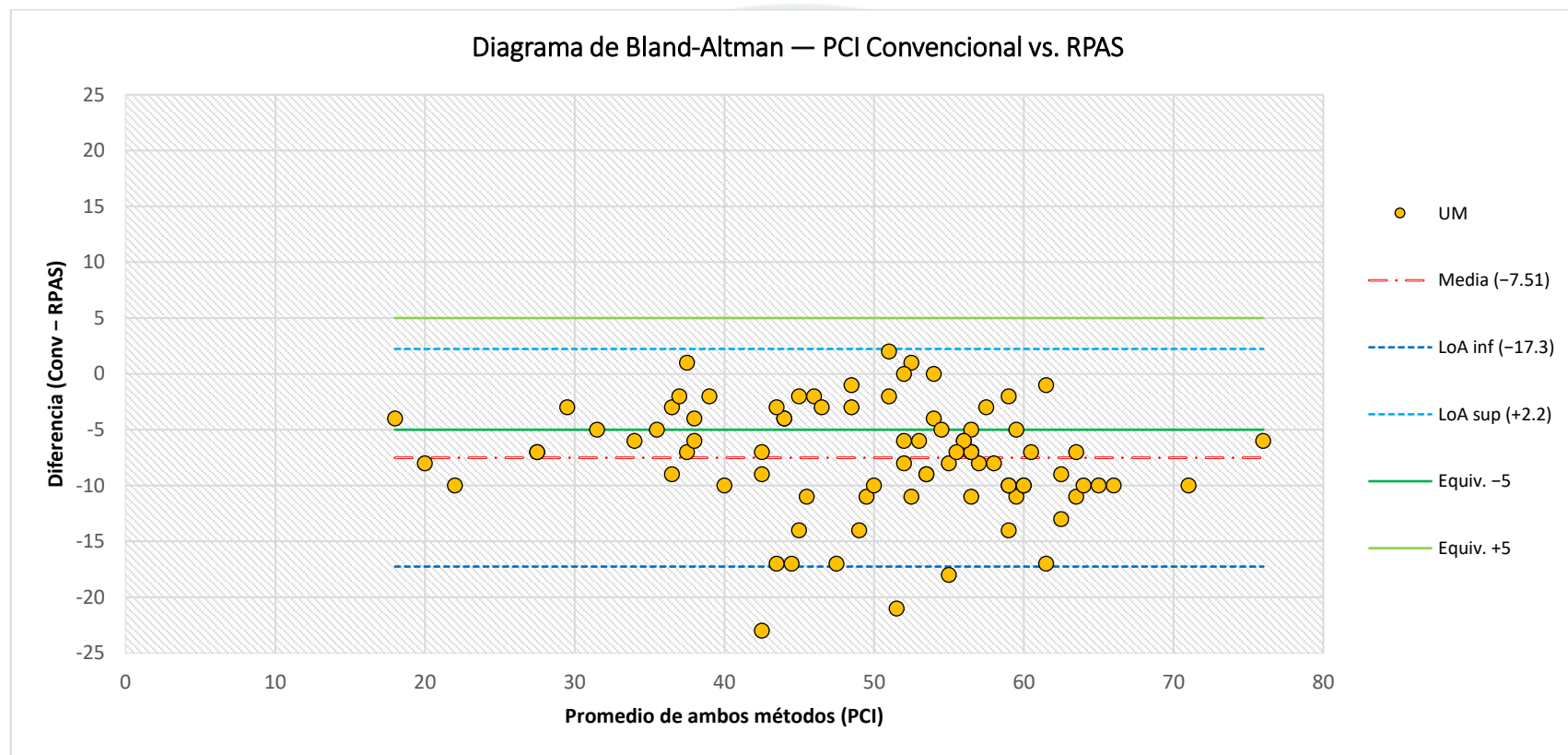
El diagrama de Bland-Altman, presentado en la Figura 67, muestra la dispersión de las diferencias entre el PCI convencional y el PCI RPAS respecto al promedio de ambos métodos por unidad de muestra. La media de las diferencias fue de -7.60 puntos PCI (IC 95%: -8.69 a -6.50), con una desviación estándar de 5.10 puntos y límites de acuerdo del 95% comprendidos entre -17.59 y $+2.40$ puntos. El signo negativo indica un sesgo sistemático: el método asistido con RPAS asigna, en promedio, un PCI 7.60 puntos superior al del método convencional, diferencia estadísticamente significativa (prueba t de una muestra: $t = -13.65$; $p < 0.001$). La verificación de supuestos muestra que las diferencias no siguen una distribución normal

(Shapiro-Wilk: $W = 0.955$; $p = 0.005$), por lo que se reportan también los límites de acuerdo no paramétricos, comprendidos entre -17.93 y $+0.92$ puntos, coincidentes en magnitud con los paramétricos. El análisis de sesgo proporcional, mediante regresión de las diferencias sobre el promedio de ambos métodos, no resulta significativo (pendiente = -0.067 ; $R^2 = 0.023$; $p = 0.169$), lo que indica que la magnitud del sesgo es constante en todo el rango de condición evaluado; esta verificación es la que habilita técnicamente la aplicación de un factor de corrección aditivo único, que sería improcedente si el sesgo variara con el nivel de deterioro. El coeficiente de correlación de concordancia de Lin, calculado como medida complementaria de acuerdo, alcanzó 0.748 .

Contrastado el resultado con los límites definidos previamente, el sesgo de -7.60 puntos y su intervalo de confianza del 95% exceden el límite estricto de equivalencia numérica de ± 5 puntos, por lo que no puede afirmarse equivalencia numérica estricta entre ambos métodos; en cambio, quedan contenidos en el límite de equivalencia para la decisión de intervención de ± 10 puntos, condición que la prueba de las dos pruebas unilaterales confirma ($p < 0.001$ en ambas colas). Los límites de acuerdo del 95%, comprendidos entre -17.59 y $+2.40$ puntos, exceden ambos límites, de modo que la incertidumbre asociada a una unidad de muestra individual puede alcanzar los 17 puntos PCI y no permite sustituir la medición convencional por la asistida con RPAS en la determinación de valores absolutos. Este comportamiento es coherente con las limitaciones del ortomosaico bidimensional documentadas en la comparación de metrados: el método asistido con RPAS subregistró el 33.0% del área deteriorada, con déficits del 100% en ahuellamiento y en abultamientos o hundimientos y del 94.7% en el conteo de huecos, lo que reduce el valor deducido total y eleva en consecuencia el PCI resultante.

Figura 67.

Diagrama de Bland-Altman - Diferencia entre PCI convencional y PCI RPAS por unidad de muestra | Av. Perú, Cerro Colorado



Nota. Elaboración propia. Diagrama de Bland-Altman. El eje X representa el promedio de ambos métodos por unidad de muestra y el eje Y la diferencia entre el PCI convencional y el PCI asistido con RPAS. La línea roja indica la media de diferencias (-7.60 puntos) y las líneas punteadas

los límites de acuerdo del 95% (-17.59 y $+2.40$ puntos). Las líneas verdes indican el límite estricto de equivalencia numérica de ± 5 puntos adoptado como criterio metodológico propio en la presente investigación, conforme se sustenta en el apartado precedente.

A efectos de dimensionar la utilidad de una calibración del método, se verificó el resultado de sustraer el sesgo de 7.60 puntos a los valores de PCI obtenidos con RPAS. Con esa corrección, los límites de acuerdo del 95% se reducen a ± 9.99 puntos, quedando contenidos en el límite de equivalencia para la decisión de intervención; la proporción de unidades de muestra con diferencia absoluta menor o igual a 5 puntos se eleva del 34.5% al 71.4%, y el coeficiente de correlación de concordancia de Lin pasa de 0.748 a 0.906. La desviación estándar de las diferencias se mantiene en 5.10 puntos, por cuanto la calibración corrige el sesgo sistemático y no la dispersión aleatoria. Cabe precisar que el factor de corrección de -7.60 puntos se obtuvo de la misma muestra analizada, por lo que constituye una calibración local cuya transferibilidad a otros tramos requeriría validación independiente.

4.6.2. Coeficiente de correlación de Spearman

Se empleó el coeficiente de correlación de rangos de Spearman por tratarse de datos que no requieren el supuesto de normalidad, conforme a las recomendaciones de (de Winter et al., 2016) para variables de condición de pavimento; el coeficiente obtenido entre los valores de PCI convencional y PCI RPAS del conjunto de las 84 unidades de muestra fue de $r_s = 0.869$ ($p < 0.001$), valor que se interpreta como una correlación muy fuerte y estadísticamente significativa. Analizado por carril, el coeficiente fue de $r_s = 0.820$ para el carril izquierdo y $r_s = 0.921$ para el carril derecho, ambos significativos ($p < 0.001$).

Estos valores confirman que el ordenamiento relativo de las unidades de muestra según su nivel de deterioro es altamente concordante entre ambos métodos: las unidades que el método convencional identifica como más deterioradas son, en lo esencial, las mismas que identifica el método RPAS, y viceversa, la correlación ligeramente superior en el carril derecho se asocia a la mayor presencia de fallas de extensión superficial (parcheo y desprendimiento de agregados) claramente detectables sobre la ortofoto.

Tabla 36.

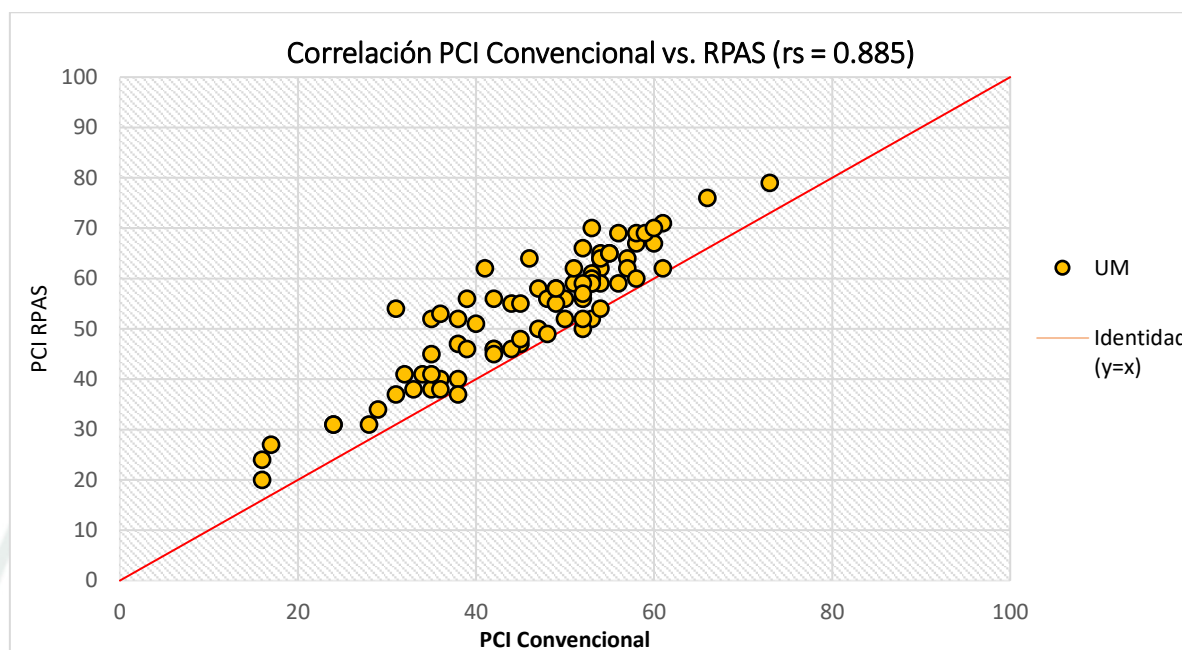
Coeficiente de correlación de Spearman entre PCI convencional y PCI RPAS

Conjunto evaluado	Nº de UM	Spearman (r_s)	Interpretación
Carril izquierdo	42	0.820	Muy fuerte ($p < 0.001$)
Carril derecho	42	0.921	Muy fuerte ($p < 0.001$)
Global (ambos carriles)	84	0.869	Muy fuerte ($p < 0.001$)

Nota. Elaboración propia. Coeficiente de correlación de rangos de Spearman calculado sobre los pares de PCI convencional y PCI RPAS por unidad de muestra.

Figura 68.

Correlación PCI Convencional vs RPAS



Nota. Elaboración propia. Diagrama de dispersión entre el PCI obtenido por el método convencional (eje X) y el PCI obtenido por el método asistido con RPAS (eje Y) para las 84 unidades de muestra. La línea discontinua representa la identidad ($y = x$), correspondiente a la concordancia perfecta entre ambos métodos. El coeficiente de correlación de rangos de Spearman fue $r_s = 0.869$ ($p < 0.001$), indicando una correlación muy fuerte y estadísticamente significativa entre ambos métodos.

En conjunto, los estadísticos aplicados dentro del marco SMART —Porcentaje de Acuerdo del 41.7% en la categoría de condición, coeficiente de Spearman de 0.869 y media de diferencias de -7.60 puntos en el diagrama de Bland-Altman— permiten concluir que existe una concordancia muy fuerte en el ordenamiento relativo de las unidades de muestra según su nivel de deterioro y una equivalencia verificada dentro del límite de ± 10 puntos establecido para la decisión de intervención, pero no una equivalencia numérica estricta entre el método

convencional y el método asistido con RPAS, debido al sesgo sistemático mediante el cual el método RPAS sobreestima el PCI en 7.60 puntos.

Este hallazgo responde al objetivo específico e): el método asistido con RPAS reproduce de manera confiable la jerarquización del deterioro del pavimento y resulta válido para priorizar intervenciones y gestionar la conservación vial, si bien sus valores absolutos de PCI deben interpretarse considerando su tendencia sistemática a resultar más optimistas que los de la inspección convencional. En consecuencia, para el empleo de sus valores absolutos en el dimensionamiento de metas físicas de intervención se requiere aplicar el factor de corrección verificado o verificar en campo las unidades de muestra situadas a menos de 10 puntos de un umbral de intervención.

4.6.3. Prioridades de intervención.

El porcentaje de acuerdo en el tipo de intervención asignada por ambos métodos fue del 83.34% (70 de 84 unidades de muestra necesitan el mismo tipo de intervención), mientras que en el 16.66% restante (14 de 84 unidades de muestra difieren en el tipo de intervención recomendada) En los casos donde la intervención recomendada es diferente, el cambio se produjo en el sentido de una mejora aparente de la condición; principalmente de Regular a Bueno y de Malo a Regular por parte del análisis de RPAS, lo que refuerza la existencia del sesgo de sobreestimación detectado en el análisis de Bland-Altman.

A partir de los valores de PCI obtenidos por el método convencional PCI y el método asistido con RPAS, la Tabla 35 y la Tabla 36 presentan las prioridades de intervención establecidas para la Avenida Perú de acuerdo a sus carriles izquierdo y derecho para ambos métodos, ordenadas de mayor a menor urgencia, con las unidades de muestra involucradas y su progresiva.

Tabla 37.

Prioridades de intervención según el PCI Convencional vs PCI RPAS – Carril izquierdo

Prior.	Tipo de intervención	Tramos de PCI Convencional	Tramos PCI RPAS	Condición	Rango PCI
1	Reconstrucción	UM 05 (00+180-00+225) - UM 21 (00+900-00+945) - UM 22 (00+945-00+990) - UM 23 (00+990-01+035) - UM 24 (01+035-01+080) - UM 25 (01+080-01+125) -	UM 05 (00+180-00+225) - UM 23 (00+990-01+035) - UM 26 (01+125-01+170) - UM 32 (01+395-01+440) - UM 33 (01+440-01+485) - UM 34 (01+485-01+530) - UM 36 (01+575-01+620) - UM 39 (01+710-01+755) - UM 42 (01+845-01+890)	Fallado	0-10
2	Rehabilitación	UM 26 (01+125-01+170) - UM 32 (01+395-01+440) - UM 33 (01+440-01+485) - UM 34 (01+485-01+530) - UM 36 (01+575-01+620) - UM 39 (01+710-01+755) - UM 42 (01+845-01+890)	UM 01 (00+000-00+045) - UM 02 (00+045-00+090) - UM 03 (00+090-00+135) - UM 04 (00+135-00+180) - UM 06 (00+225-00+270) - UM 07 (00+270-00+315) - UM 08 (00+315-00+360) - UM 09 (00+360-00+405) - UM 10 (00+405-00+450) - UM 11 (00+450-00+495) - UM 12 (00+495-00+540) - UM 13 (00+540-00+585) - UM 14 (00+585-00+630) - UM 15 (00+630-00+675) - UM 16 (00+675-00+720) - UM 17 (00+720-00+765) - UM 18 (00+765-00+810) - UM 19 (00+810-00+855) - UM 20 (00+855-00+900) - UM 27 (01+170-01+215) - UM 28 (01+215-01+260) -	Muy Malo / Malo	10-40
3	Mantenimiento Periódico	UM 01 (00+000-00+045) - UM 02 (00+045-00+090) - UM 03 (00+090-00+135) - UM 04 (00+135-00+180) - UM 06 (00+225-00+270) - UM 07 (00+270-00+315) - UM 08 (00+315-00+360) - UM 09 (00+360-00+405) - UM 10 (00+405-00+450) - UM 11 (00+450-00+495) - UM 12 (00+495-00+540) - UM 13 (00+540-00+585) - UM 14 (00+585-00+630) - UM 15 (00+630-00+675) - UM 16 (00+675-00+720) - UM 17 (00+720-00+765) - UM 18 (00+765-00+810) - UM 19 (00+810-00+855) - UM 20 (00+855-00+900) - UM 27 (01+170-01+215) - UM 28 (01+215-01+260) -	UM 01 (00+000-00+045) - UM 02 (00+045-00+090) - UM 03 (00+090-00+135) - UM 04 (00+135-00+180) - UM 06 (00+225-00+270) - UM 07 (00+270-00+315) - UM 08 (00+315-00+360) - UM 09 (00+360-00+405) - UM 10 (00+405-00+450) - UM 11 (00+450-00+495) - UM 12 (00+495-00+540) - UM 13 (00+540-00+585) - UM 14 (00+585-00+630) - UM 15 (00+630-00+675) - UM 16 (00+675-00+720) - UM 17 (00+720-00+765) - UM 18 (00+765-00+810) - UM 19 (00+810-00+855) - UM 20 (00+855-00+900) - UM 27 (01+170-01+215) - UM 28 (01+215-01+260) -	Regular / Bueno	40-70

Prior.	Tipo de intervención	Tramos de PCI Convencional	Tramos PCI RPAS	Condición	Rango PCI
4	Mantenimiento rutinario	UM 29 (01+260-01+305) -	- UM 19 (00+810-		
		UM 30 (01+305-01+350) -	00+855) -UM 20		
		UM 31 (01+350-01+395) -	(00+855-00+900) - UM		
		UM 35 (01+530-01+575) -	21 (00+900-00+945) -		
		UM 37 (01+620-01+665) -	UM 22 (00+945-00+990)		
		UM 38 (01+665-01+710) -	- UM 24 (01+035-		
		UM 40 (01+755-01+800) -	01+080) - UM 25		
		UM 41 (01+800-01+845)	(01+080-01+125) - UM		
			27 (01+170-01+215) -		
			UM 29 (01+260-01+305)		
			- UM 30 (01+305-		
			01+350) - UM 31		
			(01+350-01+395) - UM		
			33 (01+440-01+485) -		
			UM 34 (01+485-01+530)		
			- UM 35 (01+530-		
			01+575) - UM 36		
			(01+575-01+620) - UM		
			37 (01+620-01+665) -		
			UM 38 (01+665-01+710)		
			- UM 39 (01+710-		
			01+755) - UM 40		
			(01+755-01+800) - UM		
			41 (01+800-01+845)		
			UM 28 (01+215-01+260)	Muy Bueno /	70-
			-	Excelente	100

Nota. Elaboración propia. Las prioridades se establecen en función de la categoría de condición PCI según la norma ASTM D6433-20 y se ordenan de mayor (1) a menor (-) urgencia de intervención.

Tabla 38.

Prioridades de intervención según el PCI Convencional vs PCI RPAS – Carril derecho

Prior.	Tipo de intervención	Tramos de PCI Convencional	Tramos PCI RPAS	Condición	Rango PCI
1	Reconstrucción	UM 01 (00+000-00+045) - UM 04 (00+135-00+180) - UM 05 (00+180-00+225) - UM 06 (00+225-00+270) - UM 20 (00+855-00+900) - UM 22 (00+945-00+990) -	UM 01 (00+000-00+045) - UM 05 (00+180-00+225) - UM 06 (00+225-00+270) - UM 20 (00+855-00+900) -	Fallado	0-10
2	Rehabilitación	UM 23 (00+990-01+035) - UM 32 (01+395-01+440) - UM 33 (01+440-01+485) - UM 36 (01+575-01+620) - UM 39 (01+710-01+755) - UM 41 (01+800-01+845) - UM 42 (01+845-01+890) UM 02 (00+045-00+090) - UM 03 (00+090-00+135) - UM 07 (00+270-00+315) - UM 08 (00+315-00+360) - UM 09 (00+360-00+405) - UM 10 (00+405-00+450) - UM 11 (00+450-00+495) - UM 12 (00+495-00+540) - UM 13 (00+540-00+585) - UM 14 (00+585-00+630) - UM 15 (00+630-00+675) - UM 16 (00+675-00+720) - UM 17 (00+720-00+765) - UM 18 (00+765-00+810) - UM 19 (00+810-00+855) - UM 21 (00+900-00+945) - UM 24 (01+035-01+080) - UM 25 (01+080-01+125) - UM 26 (01+125-01+170) - UM 27 (01+170-01+215) - UM 28 (01+215-01+260) -	UM 22 (00+945-00+990) - UM 23 (00+990-01+035) - UM 36 (01+575-01+620) - UM 39 (01+710-01+755) - UM 42 (01+845-01+890) UM 02 (00+045-00+090) - UM 03 (00+090-00+135) - UM 04 (00+135-00+180) - UM 07 (00+270-00+315) - UM 08 (00+315-00+360) - UM 09 (00+360-00+405) - UM 10 (00+405-00+450) - UM 11 (00+450-00+495) - UM 12 (00+495-00+540) - UM 13 (00+540-00+585) - UM 15 (00+630-00+675) - UM 16 (00+675-00+720) - UM 17 (00+720-00+765) - UM 18 (00+765-00+810) - UM 19 (00+810-00+855) - UM 21 (00+900-00+945) - UM 24 (01+035-01+080) - UM 25 (01+080-01+125) - UM 26 (01+125-01+170) - UM 27 (01+170-01+215) - UM 28 (01+215-01+260) -	Muy Malo / Malo	10-40
3	Mantenimiento Periódico			Regular / Bueno	40-70

Prior.	Tipo de intervención	Tramos de PCI Convencional	Tramos PCI RPAS	Condición	Rango PCI
		UM 29 (01+260-01+305) -	UM 29 (01+260-01+305) -		
		UM 30 (01+305-01+350) -	UM 30 (01+305-01+350) -		
		UM 34 (01+485-01+530) -	UM 32 (01+395-01+440) -		
		UM 35 (01+530-01+575) -	UM 33 (01+440-01+485) -		
		UM 37 (01+620-01+665) -	UM 34 (01+485-01+530) -		
		UM 38 (01+665-01+710) -	UM 35 (01+530-01+575) -		
		UM 40 (01+755-01+800) -	UM 37 (01+620-01+665) -		
			UM 38 (01+665-01+710) -		
			UM 40 (01+755-01+800) -		
			UM 41 (01+800-01+845) -		
4	Mantenimiento rutinario	UM 31 (01+350-01+395) -	UM 14 (00+585-00+630) -	Muy Bueno	70–
			UM 31 (01+350-01+395) -	/ Excelente	100

Nota. Elaboración propia. Las prioridades se establecen en función de la categoría de condición PCI según la norma ASTM D6433-20 y se ordenan de mayor (1) a menor (–) urgencia de intervención.

4.6.4. Porcentaje de área por tipo de intervención

Con el fin de expresar los resultados en términos aplicables a la programación de obras, se cuantificó la intervención requerida como porcentaje del área de calzada evaluada, aplicando el criterio de la Tabla 2 sobre los valores de PCI de las 84 unidades de muestra. Dado que todas las unidades de muestra tienen una superficie idéntica de 315 m², el porcentaje de área coincide con el porcentaje de unidades de muestra y con el porcentaje de longitud del tramo, lo que hace directamente trazable la cifra resultante sobre un área total evaluada de 26,460 m².

Tabla 39.

Porcentaje de área por tipo de intervención — Método Convencional vs. Método RPAS |

Ambos carriles

Tipo de intervención	Rango PCI	UM conv.	Área conv. (m ²)	% conv.	UM RPAS	Área RPAS (m ²)	% RPAS
Mantenimiento rutinario	70 < PCI ≤ 100	1	315	1.19	3	945	3.57
Mantenimiento periódico	40 < PCI ≤ 70	57	17,955	67.86	67	21,105	79.76
Rehabilitación	10 < PCI ≤ 40	26	8,190	30.95	14	4,410	16.67
Reconstrucción	0 ≤ PCI ≤ 10	0	0	0.00	0	0	0.00
Total	—	84	26,460	100.00	84	26,460	100.00

Nota. Elaboración propia. Porcentajes calculados sobre un área total evaluada de 26,460 m², correspondiente a 84 unidades de muestra de 315 m² cada una. Los rangos de PCI corresponden al criterio de intervención de la Tabla 2.

Tabla 40.

Porcentaje de área por tipo de intervención y por carril — Método Convencional

Carril	Rehabilitación	Mantenimiento periódico	Mantenimiento rutinario
Izquierdo (13,230 m ²)	13 UM · 4,095 m ² · 30.95%	29 UM · 9,135 m ² · 69.05%	0 UM · 0 m ² · 0.00%
Derecho (13,230 m ²)	13 UM · 4,095 m ² · 30.95%	28 UM · 8,820 m ² · 66.67%	1 UM · 315 m ² · 2.38%

Nota. Elaboración propia. Se adopta el método convencional como referencia por corresponder al procedimiento normativo de la ASTM D6433-20.

Con el método convencional, adoptado como referencia por corresponder al procedimiento normativo de la ASTM D6433-20, el 30.95% del área evaluada (8,190 m²) requiere rehabilitación, el 67.86% (17,955 m²) mantenimiento periódico y el 1.19% (315 m²) mantenimiento rutinario, sin áreas que demanden reconstrucción. La aplicación del segundo nivel del criterio de intervención, referido a la densidad de deterioros asociados a carga, reclasifica a rehabilitación cuatro unidades de muestra adicionales por conteo de huecos KM 00+270–00+315 y KM 01+260–01+305 del carril izquierdo, y KM 00+270–00+315 y KM 00+675–00+720 del carril derecho, con lo que el área que requiere rehabilitación asciende al 35.71% (9,450 m²) y el área que admite mantenimiento periódico se reduce al 63.10% (16,695 m²). El método asistido con RPAS, en cambio, asigna a rehabilitación el 16.67% del área (4,410 m²), esto es, 3,780 m² menos que la inspección convencional; la diferencia se explica íntegramente por el sesgo de sobreestimación del PCI analizado en el apartado precedente y confirma que los valores absolutos del método RPAS no deben emplearse sin calibración para dimensionar metas físicas de intervención. En cuanto a la naturaleza del deterioro, los metrados convencionales muestran que el desprendimiento de agregados, el parcheo previo y el agrietamiento en bloque concentran el 88.4% del área deteriorada, mientras que los deterioros asociados a carga —piel de cocodrilo, ahuellamiento y abultamientos o hundimientos suman

1,080.78 m², equivalentes al 11.5% del deterioro de área y al 4.1% del área total evaluada, lo que caracteriza el deterioro de la Avenida Perú como predominantemente funcional.

El criterio que se tomo para categorizar las intervenciones requeridas en cada uno de nuestros 84 tramos va guiado de la Matriz de categorización e intervención corredores de mantenimiento integral del Instituto Nacional de Vías, siendo los criterios revisados los siguientes:

✓ **Mantenimiento Rutinario:**

- Rocería y desmonte manual.
- Limpieza manual de cunetas.
- Limpieza de encoles y descoles.
- Limpieza de señales.

✓ **Mantenimiento Periódico:**

- Sello de fisuras.
- Pintura asfáltica.
- Parcheo de la carpeta asfáltica.
- Tratamiento superficial doble.
- Parcheo y tratamiento superficial doble.
- Renivelación de la carpeta asfáltica.
- Sello de fisuras y refuerzo de 5 cm.

✓ **Rehabilitación:**

- Estudio, diseño y rehabilitación de la estructura de pavimento, para un período de vida útil mínimo de 6 años, incluyendo obras de drenaje.

✓ **Reconstrucción:**

- Estudio, diseño y reconstrucción de la estructura de pavimento, para un período de vida útil mínimo de 10 años, incluyendo obras de dren.

4.7. DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

Los resultados obtenidos en la presente investigación permiten establecer una comparación con los hallazgos de estudios previos sobre evaluación de pavimentos mediante el método PCI convencional y asistido con RPAS, identificando coincidencias, diferencias y factores explicativos que enriquecen la interpretación de los datos obtenidos en la Avenida Perú, distrito de Cerro Colorado, Arequipa 2025.

4.7.1. Equivalencia entre métodos

El resultado más relevante de la investigación es la correlación de rangos muy fuerte obtenida entre el método convencional y el método asistido con RPAS ($r_s = 0.869$; $p < 0.001$) para el conjunto de las 84 unidades de muestra evaluadas, acompañada sin embargo de un sesgo sistemático de sobreestimación de 7.60 puntos PCI a favor del método RPAS que excede el límite estricto de equivalencia numérica de ± 5 puntos adoptado en la metodología de la presente investigación, aunque queda contenido en el límite de ± 10 puntos establecido para la decisión de intervención y que se tradujo en un cambio de categoría de condición en el 58.3% de las unidades de muestra. Este hallazgo matiza lo reportado por (Berríos O. et al., 2020), quienes al comparar la inspección superficial mediante VANT con el método PCI convencional en El Salvador encontraron diferencias estadísticamente no significativas entre ambas metodologías cuando la ortofoto empleada contaba con un GSD inferior a 2 cm/píxel.

En la presente investigación se obtuvo un GSD de 1.5 cm/píxel, condición incluso más exigente que el umbral reportado por dichos autores; sin embargo, la equivalencia numérica no se verificó, lo que sugiere que la resolución de la ortofoto por sí sola no garantiza la equivalencia entre métodos cuando las fallas comparadas incluyen deterioros con componente de profundidad. Pucha y Zárate (2020), trabajando sobre pavimento rígido en Ecuador con el mismo software de procesamiento Pix4Dmapper, obtuvieron asimismo errores mínimos entre

las mediciones fotogramétricas y las mediciones manuales en campo; la diferencia entre ese resultado y el obtenido en la Avenida Perú sugiere que el tipo de pavimento incide en el grado de equivalencia alcanzable, dado que el pavimento flexible presenta fallas como el ahuellamiento y los huecos cuya severidad depende de mediciones de profundidad no resueltas de forma confiable por un sensor RGB bidimensional, a diferencia de las fallas predominantemente superficiales del pavimento rígido. En conjunto, estos antecedentes y los resultados de la presente investigación permiten precisar que el método RPAS reproduce de forma confiable la jerarquización relativa del deterioro, pero que su equivalencia numérica con el método convencional está condicionada al tipo de fallas presentes en el pavimento evaluado.

4.7.2. Condición del pavimento evaluado

El PCI global de la Avenida Perú fue de 46.0 mediante el método convencional (carril izquierdo 47, carril derecho 45) y de 54 mediante el método RPAS (carril izquierdo 55, carril derecho 52), ambos en categoría Regular tanto para el conjunto de la vía como para cada carril de forma individual; a diferencia de lo observado en etapas preliminares de esta investigación con un tamaño de muestra reducido, el análisis sobre las 84 unidades de muestra no evidencia una disparidad marcada entre carriles, sino un patrón de deterioro relativamente homogéneo, con el carril derecho entre 2 y 3 puntos PCI por debajo del izquierdo según el método empleado. Este patrón es consistente con lo documentado por (Espinoza Cordova, 2023), en la Avenida Huancavelica de Huancayo, una vía urbana con características de tráfico mixto comparables a las de la Avenida Perú, donde el autor identificó valores de PCI distribuidos heterogéneamente por unidad de muestra dentro de una misma vía, aun cuando los promedios generales por sección no difirieran drásticamente. Lizana Yarlequé (2021), al evaluar la Avenida Grau en el distrito de Castilla, Piura, también reportó variabilidad punto a punto en los valores de PCI, confirmando que la heterogeneidad del deterioro a nivel de unidad de muestra —más que una disparidad sistemática entre carriles— es un patrón estructural característico de las vías urbanas

peruanas, atribuible a la distribución no uniforme de la carga vehicular y a la ausencia de programas sistemáticos de mantenimiento preventivo.

En cuanto a la distribución de condiciones por el método convencional, el carril derecho concentra una mayor proporción de unidades en estados críticos: 9.5% en condición Muy Malo (4 de 42 unidades) y 21.4% en Malo, frente a 2.3% y 28.6% respectivamente en el carril izquierdo; ninguna unidad de la vía alcanzó la categoría Fallado. Las cuatro unidades en condición Muy Malo del carril derecho se ubican en las progresivas KM 00+000–00+045, KM 00+225–00+270, KM 00+855–00+900 y KM 01+845–01+890, esta última coincidente con la única unidad en igual condición del carril izquierdo, lo que evidencia un punto de deterioro crítico localizado al final del tramo evaluado que afecta a ambos carriles simultáneamente. Paredes Asalde y Torres Alcántara (2022), en la carretera Reposo–Saramiriza de Bagua, encontraron igualmente una concentración del deterioro más severo en tramos puntuales dentro de una vía con condición promedio moderada, concluyendo que la caracterización precisa de esas zonas críticas es indispensable para priorizar eficientemente los recursos de mantenimiento; los resultados de la presente investigación permiten aplicar esa misma lógica de priorización a la Avenida Perú, identificando con precisión las cinco unidades en condición Muy Malo —cuatro en el carril derecho y una en el izquierdo— que demandan rehabilitación estructural prioritaria.

4.7.3. Rendimiento operativo del método RPAS

El método RPAS permitió cubrir los 1,890 m del tramo evaluado en aproximadamente 2.6 horas de vuelo efectivo, equivalente a un rendimiento de cobertura de 1,275 m/hora, frente a las 48 horas y 40 minutos y los 78 m/hora del método convencional, lo que representa una velocidad de adquisición de datos en campo 16.3 veces superior. Esta ventaja operativa es coherente con lo reportado por (Peddinti et al., 2023), quienes destacaron la capacidad del UAV de cubrir grandes áreas en tiempo reducido como su principal ventaja frente a la inspección manual, señalando además que esta característica posibilita evaluaciones más frecuentes de la red vial, algo prácticamente inviable con el método convencional en municipios con recursos limitados. Fiestas León y Merino Rodríguez (2020), evaluando la Avenida Don Bosco en Piura, también confirmaron que el uso de drones agiliza significativamente el proceso de inspección y reduce la exposición del personal al tráfico vehicular, beneficio operativo que se verificó igualmente en la Avenida Perú, donde la circulación constante de vehículos representó el principal riesgo durante las nueve jornadas de inspección convencional.

Al considerar el ciclo completo de evaluación que incluye el procesamiento fotogramétrico en Pix4Dmapper y la digitalización y metrado de fallas en AutoCAD el método RPAS completó el proceso en 27.0 horas frente a las 60.0 horas del método convencional, lo que representa una reducción del 55% en el tiempo total. No obstante, la proporción de tiempo destinada al trabajo de gabinete se invierte entre métodos: mientras el método convencional concentra el 80.7% de su tiempo en campo, el método RPAS destina el 88.9% de su tiempo al gabinete, trasladando la carga de trabajo de la exposición vial al procesamiento digital. Esta limitación fue igualmente señalada por (Arroyo y Cervantes, 2023), en su estudio sobre la carretera Paracas–Pisco, donde los autores indicaron que el tiempo de gabinete representa el principal factor que condiciona la adopción del método en la gestión vial municipal. A diferencia de la velocidad de adquisición de datos en campo, el tiempo de procesamiento en

gabinete depende de la experiencia del operador en Pix4D y AutoCAD, lo que sugiere que la brecha de 24.0 horas de gabinete del método RPAS puede reducirse significativamente con el entrenamiento del personal técnico municipal en estas herramientas

4.7.4. Precisión en la detección de fallas

Astor et al. (2023) reportaron que la precisión del modelo fotogramétrico respecto a las mediciones manuales en campo osciló entre el 75% y el 98% en su estudio de pavimentos mediante los métodos PCI y SDI, atribuyendo las diferencias más próximas al límite inferior de ese rango a la oclusión de fallas por vegetación y vehículos durante el vuelo. En la presente investigación, la diferencia promedio entre métodos fue de 7.7 puntos PCI para el conjunto de la vía (8.1 en el carril izquierdo y 7.3 en el carril derecho), con una diferencia máxima de 23 puntos en una unidad de muestra individual; expresada como magnitud relativa sobre la escala de 100 puntos del PCI, esta discrepancia se ubica dentro del rango reportado por dichos autores, aunque en la zona menos favorable de dicho rango; a diferencia de lo reportado por Astor et al. (2023), en la Avenida Perú la oclusión por vegetación o vehículos no constituyó un factor relevante, dado que la verificación complementaria en campo permitió completar el inventario de fallas en los sectores con obstrucciones puntuales; la principal fuente de discrepancia identificada en esta investigación fue, en cambio, la limitación del sensor RGB bidimensional para resolver fallas con componente de profundidad, conforme a lo detallado en el apartado 4.6.

Fernández D. et al. (2021), al comparar Agisoft PhotoScan con Pix4Dmapper para la detección de fallas en pavimento flexible, no encontraron diferencias estadísticamente significativas en los errores de medición entre ambos programas, validando la elección de Pix4Dmapper como herramienta de procesamiento en esta investigación; ello permite descartar al software de procesamiento fotogramétrico como fuente relevante del sesgo identificado en

el apartado 4.6, y respalda que dicho sesgo obedece a una limitación estructural del sensor RGB frente a las fallas con componente de profundidad, antes que a la herramienta de procesamiento empleada. Los autores señalaron además que la resolución de los ortomosaicos disminuye con la altura de vuelo, lo que refuerza la decisión de operar a baja altitud en la Avenida Perú para maximizar el GSD y minimizar el error de medición sobre la ortofoto.

Cabe precisar que la reducción de subjetividad atribuida al método RPAS en esta investigación es parcial y no absoluta. Si bien la captura aérea mediante RPAS elimina las condiciones variables del trabajo en campo como la fatiga del evaluador, la interferencia del tráfico y las condiciones de iluminación cambiantes, la etapa de digitalización e interpretación de fallas sobre el ortomosaico en AutoCAD mantiene un componente de juicio del evaluador; en este sentido, el RPAS traslada la subjetividad de la inspección en campo hacia el gabinete, sin eliminarla por completo. Resulta relevante que el sesgo sistemático de 7.60 puntos y el Porcentaje de Acuerdo de apenas 41.7% se hayan registrado a pesar de que el mismo equipo evaluador aplicó ambos métodos con idénticos criterios normativos, lo que en principio debería controlar la variabilidad interobservador; esto sugiere que la discrepancia entre métodos no proviene principalmente de la subjetividad del evaluador, sino de una limitación estructural del sensor RGB bidimensional para resolver la severidad de fallas con componente de profundidad, conforme a lo señalado en el apartado 1.7 y en el apartado 4.6. Futuras investigaciones que comparen la metodología RPAS entre evaluadores independientes permitirán cuantificar con mayor precisión la variabilidad interobservador inherente a la digitalización en AutoCAD, de forma independiente al sesgo estructural aquí identificado.

4.7.5. Perspectivas tecnológicas

Chen et al. (2024) propusieron un marco que integra la captura aérea de imágenes con algoritmos de aprendizaje profundo para la clasificación automática de grietas, alcanzando 87.2% de precisión y un PCI de 61.28 en el tramo evaluado en China. Samadzadegan et al. (2023) y Jiang et al. (2023), citados en Chen et al. (2024), obtuvieron resultados similares con YOLOv4 y RDD-YOLOv5, confirmando que la automatización de la detección de fallas sobre imágenes UAV es técnicamente viable con los algoritmos actuales. Incorporar estas herramientas al flujo de trabajo RPAS de la presente investigación permitiría eliminar la digitalización manual en AutoCAD —la etapa más demandante en tiempo, según lo señalado antes— y, mediante sensores complementarios como cámaras multiespectrales o LiDAR aerotransportado, explorar la resolución del componente de profundidad de fallas (ahuellamiento, huecos), principal limitación identificada para alcanzar la equivalencia numérica con el método convencional..

Cárdenas Resines et al. (2023), en su revisión sistemática de 31 artículos publicados entre 2007 y 2023, concluyeron que la combinación de fotogrametría y redes neuronales constituye la opción tecnológica más precisa y eficiente para evaluar fallas en pavimentos flexibles. Este hallazgo marca la dirección natural de evolución del método empleado en la presente investigación: en tanto dichas herramientas se consolidan e incorporan sensores capaces de resolver la profundidad de las fallas, se recomienda que la aplicación práctica del método RPAS incluya el factor de corrección identificado en el apartado 4.6, o la verificación en campo de las unidades de muestra ubicadas en los límites entre categorías de condición, antes de emplear sus resultados en decisiones definitivas de intervención.

CAPÍTULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones

- **Conclusión general:** Considerando ambos carriles en conjunto, la Avenida Perú registró un PCI global de 46.0 mediante el método convencional y de 54 mediante el método asistido con RPAS, ambos correspondientes a la categoría Regular. Este resultado indica que la vía, en su conjunto, ha superado el umbral en el que el mantenimiento periódico resulta suficiente, siendo necesarias intervenciones de mantenimiento a corto plazo y de rehabilitación estructural en las unidades de muestra más críticas de ambos carriles, independientemente del método de evaluación empleado; no obstante, dado el sesgo sistemático de sobreestimación del método RPAS descrito en la conclusión específica e, dicho umbral debe verificarse preferentemente con los valores del método convencional o aplicando el factor de corrección correspondiente.
- **Conclusión específica a:** El carril izquierdo de la Avenida Perú obtuvo un PCI promedio de 47 (Regular) mediante el método convencional y de 55 (Regular) mediante el método RPAS; el carril derecho obtuvo 45 (Regular) y 52 (Regular), respectivamente. La diferencia promedio entre métodos fue de 8.1 puntos PCI en el carril izquierdo y de 7.3 puntos en el carril derecho, con una diferencia máxima de 23 puntos en una unidad de muestra individual, superando en ambos carriles el límite estricto de equivalencia numérica de ± 5 puntos adoptado en la metodología de la presente investigación, aunque sin exceder el límite de ± 10 puntos establecido para la decisión de intervención; en la práctica totalidad de las unidades con diferencia relevante, el método RPAS asignó un valor de PCI superior (mejor condición) al del método convencional, lo que evidencia un sesgo unidireccional y sistemático, antes que un error aleatorio de medición.

- **Conclusión específica b:** De los nueve tipos de fallas del pavimento flexible presentes en la Avenida Perú, ambos métodos identificaron siete —el método convencional registró además ahuellamiento y abultamientos o hundimientos, que el método RPAS no detectó en ninguna unidad de muestra—, con coincidencia en la clasificación de severidad de las fallas registradas por ambos métodos en las 84 unidades de muestra evaluadas, lo que confirma que la resolución del ortomosaico ($GSD = 1.5 \text{ cm/píxel}$) permite replicar el nivel de detalle de la inspección visual directa en campo. Sin embargo, esta concordancia cualitativa no se tradujo en una equivalencia cuantitativa del PCI resultante: el método RPAS presenta limitaciones reconocidas para resolver con precisión la severidad de fallas con componente de profundidad, como el ahuellamiento y los huecos de severidad baja, dado que el sensor RGB bidimensional no captura información tridimensional; esta limitación, antes que la variabilidad del evaluador, constituye la principal causa del sesgo sistemático descrito en la conclusión específica e.
- **Conclusión específica c:** El método RPAS demostró un rendimiento de adquisición de datos en campo 16.3 veces superior al del método convencional (1,275 m/hora frente a 78 m/hora), completando el levantamiento aerofotogramétrico de los 1,890 m de la Avenida Perú en 2.6 horas de vuelo frente a las 48 horas y 40 minutos de trabajo presencial que demandó el método convencional. Considerando el ciclo completo de evaluación —incluyendo el procesamiento fotogramétrico en Pix4Dmapper y la digitalización de fallas en AutoCAD—, el método RPAS también resultó más eficiente en términos globales, completando el proceso en 27.0 horas frente a 60.0 horas del método convencional (reducción del 55%); no obstante, la distribución del tiempo se

invierte entre métodos, dado que el método RPAS concentra el 88.9% de su tiempo en gabinete frente al 19.3% del método convencional, lo que constituye su principal limitación operativa y exige personal capacitado en herramientas de fotogrametría y CAD. En términos económicos, el método convencional presenta un menor costo inicial al no requerir inversión en equipamiento ni licencias de software, mientras que el método RPAS, una vez adquirido el equipo y capacitado el operador, ofrece un menor costo marginal por unidad de muestra adicional evaluada, resultando más costo-efectivo para programas de gestión vial continuos o de cobertura extensa

- **Conclusión específica d:** El método PCI asistido con RPAS presentó ventajas frente al método convencional en las tres dimensiones evaluadas: mayor cobertura del levantamiento, al generar un ortomosaico georreferenciado continuo del 100% del tramo de 1,890 m con una resolución de 1.5 cm/píxel; mayor repetibilidad, al contar con un registro digital permanente que permite revisar o corregir mediciones desde gabinete sin retorno a campo, si bien esta repetibilidad está condicionada a los tipos de falla detectables sobre una ortofoto bidimensional; y mejor seguridad operativa del personal, al reducir la exposición al tráfico vehicular de las 48 horas y 40 minutos que demandaron las nueve jornadas de inspección convencional a aproximadamente 30 minutos requeridos para la colocación de los puntos de control en tierra
- **Conclusión específica e:** La verificación mediante el marco SMART sobre las 84 unidades de muestra evaluadas arrojó un Porcentaje de Acuerdo de 41.7% (35 unidades conservaron la misma categoría de condición), un coeficiente de correlación de Spearman global de $r_s = 0.869$ ($p < 0.001$) y una media de diferencias de 7.60 puntos en el diagrama de Bland-Altman, con una desviación

estándar de 5.10 puntos y límites de acuerdo del 95% entre -17.6 y $+2.4$ puntos. El coeficiente de Spearman, muy fuerte y estadísticamente significativo, confirma que el método RPAS reproduce de manera confiable el ordenamiento relativo de las unidades de muestra según su nivel de deterioro, validando su uso para la priorización de intervenciones; no obstante, la media de diferencias de Bland-Altman excede el límite estricto de equivalencia numérica de ± 5 puntos adoptado en la metodología de la presente investigación, aunque queda contenido en el límite de ± 10 puntos establecido para la decisión de intervención, por lo que no se verifica una equivalencia numérica estricta entre ambos métodos. El sesgo identificado es sistemático y unidireccional el método RPAS sobreestima el PCI en 7.60 puntos en promedio respecto al método convencional y es atribuible a la limitación del sensor RGB bidimensional para resolver fallas con componente de profundidad, por lo que se recomienda verificar en campo las unidades situadas en los límites entre categorías antes de tomar decisiones definitivas de intervención.

5.2. Recomendaciones

- **Recomendación general:** Se recomienda a la Municipalidad Distrital de Cerro Colorado implementar un plan integral de intervención en la Avenida Perú que priorice la atención de las unidades de muestra en condición Muy Malo de ambos carriles, y que adopte el método PCI asistido con RPAS como herramienta complementaria de la inspección convencional en su sistema de gestión de pavimentos, aplicando la verificación descrita en la conclusión específica e para aproximar los valores de PCI obtenidos por RPAS a los del método convencional, y estableciendo evaluaciones periódicas que permitan el seguimiento sistemático del deterioro en la red vial del distrito. Se recomienda

dimensionar dicho plan por áreas de intervención y no por número de unidades de muestra, considerando los 9,450 m² que requieren rehabilitación y los 16,695 m² que admiten mantenimiento periódico, y programar la rehabilitación por sectores continuos antes que por unidades aisladas, a fin de reducir los costos de movilización y de señalización en una vía de circulación constante.

- **Recomendación específica a:** Se recomienda atender con carácter prioritario las cinco unidades de muestra en condición Muy Malo identificadas mediante el método convencional —KM 00+000–00+045, KM 00+225–00+270 y KM 00+855–00+900 del carril derecho, y KM 01+845–01+890 en ambos carriles mediante rehabilitación estructural; se recomienda además verificar en campo, con carácter previo a cualquier decisión de intervención, las unidades de muestra donde el método RPAS y el método convencional difieren en la categoría de condición asignada en el entorno de Muy Malo en particular KM 00+225–00+270 del carril derecho y KM 01+845–01+890 en ambos carriles, clasificadas como Muy Malo por el método convencional y como Malo por el RPAS, dado que estas unidades se ubican en los límites entre categorías donde el sesgo sistemático identificado en esta investigación puede alterar la clasificación y, en consecuencia, la prioridad de intervención asignada. Para las unidades restantes en condición Regular o Bueno, ambos métodos convergen mayoritariamente en el nivel de intervención recomendado (mantenimiento periódico), conforme al detalle presentado en las Tablas 35 y 36. Se recomienda asimismo verificar en campo, antes de aprobar el expediente técnico de intervención, las cuatro unidades de muestra que el criterio de deterioro asociado a carga reclasifica a rehabilitación pese a presentar un PCI superior a 40 —KM 00+270–00+315 y KM 01+260–01+305 del carril izquierdo, y KM

00+270–00+315 y KM 00+675–00+720 del carril derecho—, por concentrar cinco o más huecos por unidad de 315 m².

- **Recomendación específica b:** Se recomienda mantener rigurosamente los criterios de identificación, tipificación y severidad de fallas establecidos en la norma ASTM D6433-20 en todas las futuras evaluaciones con RPAS, dado que la concordancia alcanzada en la identificación de tipos de falla y en la clasificación de severidad en esta investigación está condicionada al GSD mínimo de 1.5 cm/píxel del ortomosaico generado; una resolución inferior a este umbral podría comprometer la identificación de fisuras de severidad baja y reducir aún más el grado de concordancia numérica entre métodos. Asimismo, se recomienda que futuras evaluaciones incorporen sensores complementarios (cámaras multiespectrales, LiDAR aerotransportado) o protocolos de verificación en campo específicos para fallas con componente de profundidad ahuellamiento, huecos y depresiones, dado que esta limitación fue identificada como la principal causa del sesgo sistemático de sobreestimación del PCI mediante RPAS.
- **Recomendación específica c:** Para reducir el tiempo de gabinete del método RPAS, identificado como su principal limitación operativa, se recomienda a futuros investigadores y organismos gestores de vías explorar la integración de algoritmos de inteligencia artificial y visión por computadora para la detección y clasificación automática de fallas sobre ortofotos generadas por RPAS, lo que reduciría la dependencia de la digitalización manual en AutoCAD y el tiempo total del ciclo de evaluación, así como explorar sensores capaces de estimar la profundidad de las fallas para reducir el sesgo de sobreestimación del PCI identificado en esta investigación.

- **Recomendación específica d:** Se recomienda que la Municipalidad Distrital de Cerro Colorado adopte el método de inspección PCI asistido con RPAS como herramienta complementaria y permanente en su sistema de gestión de pavimentos, realizando evaluaciones periódicas sobre la red vial urbana del distrito; la cobertura continua del 100% del tramo, la disponibilidad del registro digital georreferenciado permanente para análisis comparativos futuros y la reducción de la exposición del personal al tráfico vehicular de aproximadamente 49 horas a menos de una hora justifican técnica y operativamente esta adopción, siempre que se aplique el factor de corrección o la verificación en campo descritos en las conclusiones y recomendaciones precedentes para las unidades situadas en los límites entre categorías de condición.
- **Recomendación específica e:** Dado que el marco SMART aplicado en esta investigación verificó una correlación de rangos muy fuerte ($r_s = 0.869$) pero no una equivalencia numérica estricta entre ambos métodos, se recomienda emplear los resultados de esta investigación como sustento técnico para la priorización y jerarquización de intervenciones en futuros procesos de gestión vial en el distrito de Cerro Colorado, mas no como sustituto directo del valor absoluto de PCI obtenido mediante inspección convencional sin aplicar el factor de corrección correspondiente. Se recomienda asimismo replicar la metodología comparativa empleada —incluyendo el análisis SMART, Spearman y Bland-Altman sobre una muestra igualmente representativa— en otros tramos viales de la ciudad de Arequipa, con el propósito de verificar si el sesgo sistemático identificado se mantiene consistente en otros contextos y de construir progresivamente una base de datos georreferenciada del estado de la red vial distrital.

REFERENCIAS

- Arias-Odón, F. G. (2012). *El proyecto de investigación: Introducción a la metodología científica* (6.^a ed.). Episteme.
- Arroyo, E. M., y Cervantes, N. S. (2023). *Evaluación superficial del pavimento flexible empleando el método PCI y VIZIR con dron para una propuesta de intervención de un tramo de la carretera Emp. PE-1S (Dv. Paracas) hasta EMP. PE-28 (DV. Paracas), Pisco, Ica - 2023.*
- ASTM International. (2020). Standard Practice for Roads and Parking Lots Pavement Condition Index Surveys. *ASTM International*, (ASTM D6433-20).
- Astor, Y., Nabesima, Y., Utami, R., Sihombing, A. V. R., Adli, M., y Firdaus, M. R. (2023). Unmanned aerial vehicle implementation for pavement condition survey. *Transportation Engineering*, 12, 100168. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.treng.2023.100168>
- Berríos O., A. E., Flores B., J. E., Ramos F., Cristian Balmore, y Reyes N., M. de J. I. (2020). *Comparación de la evaluación superficial del pavimento empleando un vehículo aéreo no tripulado (VANT) y la forma tradicional de evaluación visual del método PCI.* [UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR]. <https://ri.ues.edu.sv/id/eprint/22319>
- Bland, J. M., y Altman, D. G. (1986). Statistical methods for assessing agreement between two methods of clinical measurement. *The Lancet*, 327(8476), 307–310. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(86\)90837-8](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(86)90837-8)
- Bou H., M., y Nassereddine, H. (2022). *The Use of Drones in the Construction Industry: Applications and Implementation.* <https://doi.org/10.22260/ISARC2022/0077>

- Cárdenas Resines, C. L., Carrillo Sinche, J. L., Izarra Vargas, A. D., Murga Tirado, C. E., y Vásquez Salazar, A. G. (2023). Herramientas tecnológicas de evaluación de fallas en la superficie de pavimento flexible, una revisión sistemática. *Llamkasun*, 4(2), 10–23. <https://doi.org/10.47797/LLAMKASUN.V4I2.121>
- Castañeda Mota, M. M. (2022). The scientificity of quantitative, qualitative and emerging methodologies. *Revista Digital de Investigación en Docencia Universitaria*, 16(1), e1555. <https://doi.org/10.19083/ridu.2022.1555>
- Chang, C. M., Cheng, D. X., Smith, R. E., Tan, S. G., y Hossain, A. (2025). SMART quality control analysis of pavement condition data for pavement management applications. *International Journal of Transportation Science and Technology*, 18, 227–244. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ijtst.2024.06.007>
- Chen, X., Liu, C., Chen, L., Zhu, X., Zhang, Y., y Wang, C. (2024). A Pavement Crack Detection and Evaluation Framework for a UAV Inspection System Based on Deep Learning. *Applied Sciences*, 14(3). <https://doi.org/10.3390/app14031157>
- Chu, C., Wang, L., y Xiong, H. (2022). A review on pavement distress and structural defects detection and quantification technologies using imaging approaches. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*, 9(2), 135–150. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jtte.2021.04.007>
- Creswell, J., y Creswell, D. (2017). *Research Design: Qualitative, Quantitative, and Mixed Methods Approaches*. SAGE Publications. <https://books.google.com.pe/books?id=335ZDwAAQBAJ>
- Cruz Toribio, J. (2022). *CÁLCULO DEL INDICE DE REGULARIDAD INTERNACIONAL (IRI) A TRAVÉS DE IMÁGENES OBTENIDAS DE UN*

VEHICULO AÉREO NO TRIPULADO.

<https://doi.org/10.13140/RG.2.2.36251.13609>

de Winter, J. C. F., Gosling, S. D., y Potter, J. (2016). Comparing the Pearson and Spearman correlation coefficients across distributions and sample sizes: A tutorial using simulations and empirical data. *Psychological Methods*, 21(3), 273–290. <https://doi.org/10.1037/met0000079>

Espinoza Cordova. (2023). *Evaluación con dron del pavimento flexible por la metodología Pavement Condition Index PCI, avenida Huancavelica, Huancayo-2023.*

Fan, J., y Saadeghvaziri, M. (2019). *Applications of Drones in Infrastructures: Challenges and Opportunities*. <https://doi.org/10.5281/zenodo.3566281>

Fernández D., A., Saavedra T., C., Muñoz P., J., Ramos M., J., Cayo C., N., y Rocha, J. (2021). *Análisis comparativo entre los programas Agisoft PhotoScan y Pix4Dmapper para la identificación de fallas en pavimento flexible usando Vehículos Aéreos No Tripulados (VANTs)*. 818–827. <https://doi.org/10.4322/CINPAR.2021.103>

Ferrer-González, E., Agüera-Vega, F., Carvajal-Ramírez, F., y Martínez-Carricondo, P. (2020). UAV Photogrammetry Accuracy Assessment for Corridor Mapping Based on the Number and Distribution of Ground Control Points. *Remote Sensing*, 12(15). <https://doi.org/10.3390/rs12152447>

Fiestas León, C. D., y Merino Rodriguez, F. G. (2020). *Cálculo del índice de condición del pavimento flexible a la Av. Don Bosco-Piura usando drones.*

Gobierno Regional de Arequipa. (s/f). *Plan de Desarrollo Urbano.*

- Greenwood, W., Lynch, J., y Zekkos, D. (2019). Applications of UAVs in Civil Infrastructure. *Journal of Infrastructure Systems*, 25(2), 4019002. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)IS.1943-555X.0000464](https://doi.org/10.1061/(ASCE)IS.1943-555X.0000464)
- Harwin, S., y Lucieer, A. (2012). Assessing the Accuracy of Georeferenced Point Clouds Produced via Multi-View Stereopsis from Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Imagery. *Remote Sensing*, 4, 1573–1599. <https://doi.org/10.3390/rs4061573>
- Ibragimov, E., Kim, Y., Lee, J. H., Cho, J., y Lee, J.-J. (2024). Automated Pavement Condition Index Assessment with Deep Learning and Image Analysis: An End-to-End Approach. *Sensors*, 24(7). <https://doi.org/10.3390/s24072333>
- Instituto Nacional de Vías. (2007). *Manual de diseño de pavimentos asfálticos para vías con bajos volúmenes de tránsito*.
- Instituto Nacional de Vías. (2008). *Guía metodológica para el diseño de obras de rehabilitación de pavimentos asfálticos de carreteras* (2.ª ed.).
- Irizarry, J., y Johnson, E. N. (2014). Feasibility Study to Determine the Economic and Operational Benefits of Utilizing Unmanned Aerial Vehicles (UAVs). *SMARTech Repository (Georgia Institute of Technology)*. <http://hdl.handle.net/1853/52810>
- Islam, K. M., y Gassman, S. L. (2023). Predicting Flexible Pavement Distress and IRI Considering Subgrade Resilient Modulus of Fine-Grained Soils Using MEPDG. *Materials*, 16(3). <https://doi.org/10.3390/ma16031126>
- Jiang, Y., Yan, H., Zhang, Y., Wu, K., Liu, R., y Lin, C. (2023). RDD-YOLOv5: Road Defect Detection Algorithm with Self-Attention Based on Unmanned Aerial Vehicle Inspection. *Sensors*, 23(19). <https://doi.org/10.3390/s23198241>
- Kerlinger, F., Lee, H., Ayala, L., y Magaña, I. (2002). *Investigación del comportamiento*. McGraw-Hill. <https://books.google.com.pe/books?id=6Y3gOwAACAAJ>

- Lizana Yarlequé, C. P. (2021). *Uso del método PCI para la evaluación del pavimento flexible en la Av. Grau, distrito de Castilla*.
- Mallick, R., y El-Korchi, T. (2008). *Pavement Engineering: Principles and Practice*. CRC Press. <https://books.google.com.pe/books?id=nwDLBQAAQBAJ>
- Ministerio de Transportes y Comunicaciones (MTC) del Perú. (2021). *Plan Vial Nacional 2022-2031*.
- Morgenthal, G., y Hallermann, N. (2014). Quality Assessment of Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Based Visual Inspection of Structures. *Advances in Structural Engineering*, 17, 289–302. <https://doi.org/10.1260/1369-4332.17.3.289>
- Ortega Rengifo, D. M., Capa Salinas, J., Perez Caicedo, J. A., y Rojas Manzano, M. A. (2024). Unmanned Aircraft Systems in Road Assessment: A Novel Approach to the Pavement Condition Index and VIZIR Methodologies. *Drones*, 8(3). <https://doi.org/10.3390/drones8030099>
- Peddinti, P., Puppala, H., y Kim, B. (2023). Pavement Monitoring Using Unmanned Aerial Vehicles: An Overview. *Journal of Transportation Engineering Part B Pavements*.
- Pérez, A., Sánchez, C. N., y Velasco, J. (2024). Damage Importance Analysis for Pavement Condition Index Using Machine-Learning Sensitivity Analysis. *Infrastructures*, 9(9). <https://doi.org/10.3390/infrastructures9090157>
- Pietersen, R. A., Beauregard, M. S., y Einstein, H. H. (2022). Automated method for airfield pavement condition index evaluations. *Automation in Construction*, 141, 104408. <https://doi.org/10.1016/J.AUTCON.2022.104408>

Pix4D S.A. (2024). *Pix4Dmapper software manual*. <https://support.pix4d.com/hc/en-us/articles/204272989>.

Pucha, P., y Zárata, B. (2020). Evaluación superficial de pavimentos rígidos en carreteras mediante ortoimágenes obtenidas mediante un vehículo aéreo no tripulado. *Avances Investigación en Ingeniería*, 17. <https://doi.org/10.18041/1794-4953/avances.2.6599>

Radwan, M. M., Mousa, A., y Zahran, E. M. M. (2024). Enhancing Pavement Sustainability: Prediction of the Pavement Condition Index in Arid Urban Climates Using the International Roughness Index. *Sustainability*, 16(8). <https://doi.org/10.3390/su16083158>

Rakha, T., y Gorodetsky, A. (2018). Review of Unmanned Aerial System (UAS) applications in the built environment: Towards automated building inspection procedures using drones. *Automation in Construction*, 93, 252–264. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2018.05.002>

Roberts, R., Inzerillo, L., y Di Mino, G. (2020). Using UAV Based 3D Modelling to Provide Smart Monitoring of Road Pavement Conditions. *Information*, 11(12). <https://doi.org/10.3390/info11120568>

Rodríguez Triviño, M. S., Solórzano López, E. A., y García Vincés, J. J. (2024). Evaluación del pavimento flexible mediante método PCI y fotogrametría aérea en la vía San Antonio – Chone. *Dominio de las Ciencias*, 10(4), 767–787. <https://doi.org/10.23857/dc.v10i4.4093>

Samadzadegan, F., Dadras Javan, F., Hasanlou, M., Gholamshahi, M., y Ashtari Mahini, F. (2023). Automatic road crack recognition based on deep learning networks from UAV imagery. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial*

Information Sciences, X-4/W1-2022, 685–690. <https://doi.org/10.5194/isprs-annals-X-4-W1-2022-685-2023>

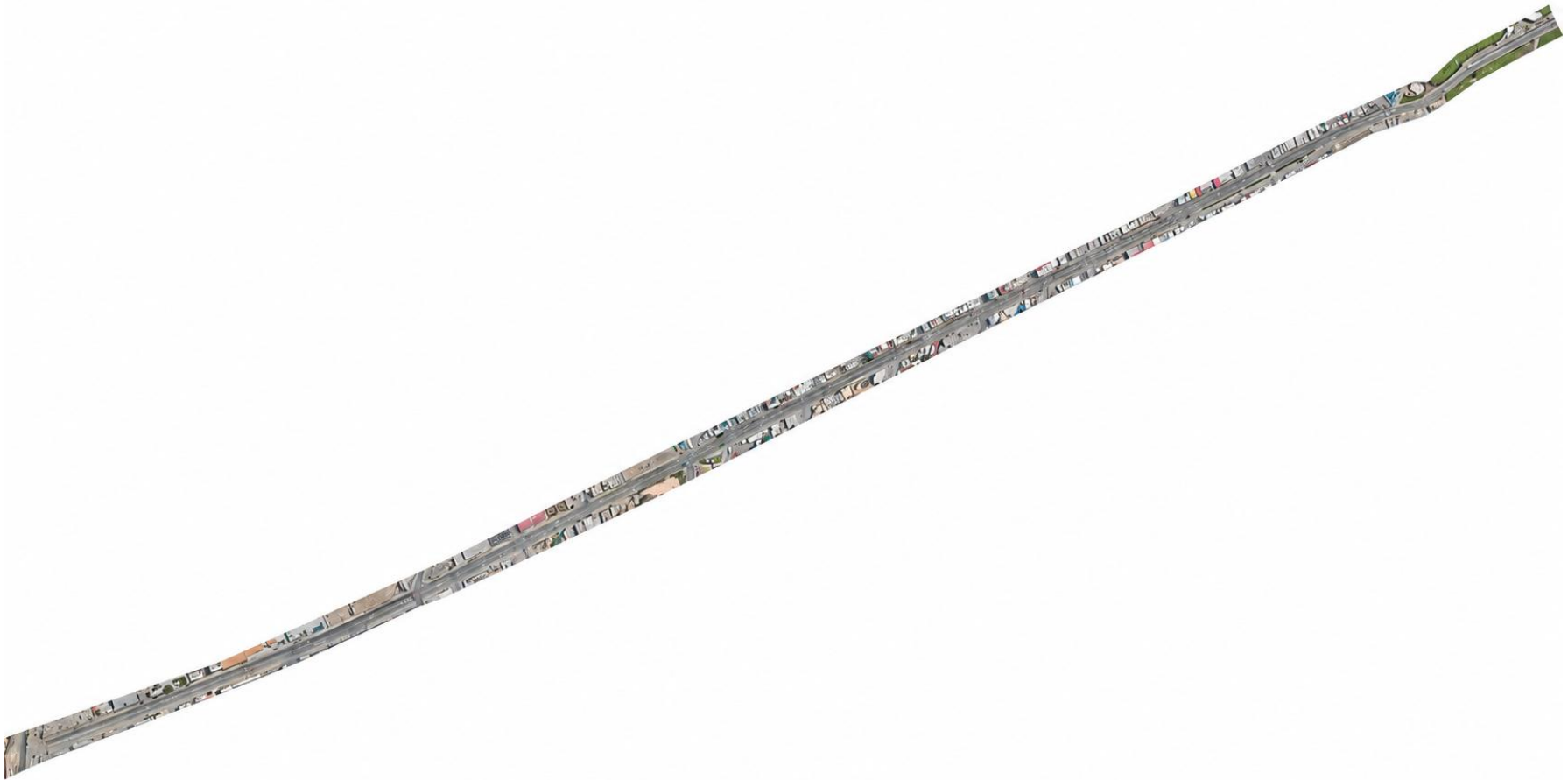
Shakhatreh, H., Sawalmeh, A. H., Al-Fuqaha, A., Dou, Z., Almaita, E., Khalil, I., Othman, N. S., Khreishah, A., y Guizani, M. (2019). Unmanned Aerial Vehicles (UAVs): A Survey on Civil Applications and Key Research Challenges. En *IEEE Access* (Vol. 7, pp. 48572–48634). Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2909530>

Zhou, K., Wang, Z., Ni, Y.-Q., Zhang, Y., y Tang, J. (2023). Unmanned aerial vehicle-based computer vision for structural vibration measurement and condition assessment: A concise survey. *Journal of Infrastructure Intelligence and Resilience*, 7(2), 110–122. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.iintel.2023.100031>

Zhu, J., Zhong, J., Ma, T., Huang, X., Zhang, W., y Zhou, Y. (2022). Pavement distress detection using convolutional neural networks with images captured via UAV. *Automation in Construction*, 133, 103991. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.autcon.2021.103991>

ANEXOS

Anexo 1. Ortofoto de la Av. Perú



Anexo 2. Fallas inspeccionadas en la Av. Perú mediante RPAS



Se evidencia diversas fallas, tales como: Piel de cocodrilo, Parcheos, Grietas Transversales y Longitudinales, Desprendimiento de agregados. Av. Perú, Cerro Colorado Arequipa



Se evidencia diversas fallas, tales como: Piel de cocodrilo, Parcheos, Grietas Transversales y Longitudinales, Desprendimiento de agregados y Huecos. Av. Perú, Cerro Colorado Arequipa



Se evidencia diversas fallas, tales como: Agrietamiento en bloque, Parcheos, Grietas Transversales y Longitudinales en la Av. Perú, Cerro Colorado Arequipa



Se evidencia diversas fallas, tales como: Pulimiento de agregados, Parcheos, Grietas Transversales y Longitudinales, Huecos en la Av. Perú, Cerro Colorado Arequipa

Anexo 3. Hojas de inspección PCI diligenciadas en campo - Método Convencional

[illegible]

• 1961 •

1961

236

1961

1961

239

1961

241

METODO PAVEMENT CONDITION INDEX (PCI)	
INDICE DE CONDICION DE PAVIMENTO EN VIAS DE PAVIMENTO FLEXIBLE	
EVALUACION SUPERFICIAL DE PAVIMENTOS	
NOMBRE DE LA VIA:	AV. PERU, CERRO COLORADO
CARRIL:	IZQUIERDO
EVALUADO POR:	F.A.G - R.R.Y.P
FECHA:	Octubre 2025
PROGRESIVA INICIAL(Km):	KM 00+225
SEVERIDAD	
PROGRESIVA FINAL(Km):	KM 00+270
LOW(BAJA)	L
ANCHO DE VIA(m):	7.00
MEDIANA(MEDIA)	M
AREA DE LA MUESTRA(m²):	315.00
HIGH(ALTA)	H

N°	Tipo de Falla	Cod.	Unidad
1	PIEL DE COCOIRILO	PC	m2
2	EXUDACIÓN	EX	m2
3	AGRIETAMIENTO EN BLOQUE	BLO	m2
4	ABULTAMIENTOS Y HUNDIMIENTOS	ABH	m2
5	CORRUGACIÓN	COR	m2
6	DEPRESIÓN	DEP	m2
7	GRIETA DE BORDE	GB	m
8	GRIETA DE REFLEJON DE JUNTA	GR	m
9	DESNIVEL EN CARRIL/BERMA	DNI	m
10	GRIETAS LONGITUDINALES Y TRANSVERSALES	GLT	m

N°	Tipo de Falla	Cod.	Unidad
11	PARCHEO	PA	m2
12	PULIMIENTO DE AGREGADOS	PU	m2
13	HUECOS	HUE	und
14	CRUCE DE VÍA FÉRREA	CVF	m2
15	AHUELLAMIENTO	AHU	m2
16	DESPLAZAMIENTO	DES	m2
17	GRIETA PARABÓLICA	GP	m2
18	HINCHAMIENTO	HN	m2
19	DESPRENDIMIENTO DE AGREGADOS	DAG	m2

FALLAS EXISTENTES															TOTAL	DENSIDAD %	VD
FALLA	SEVERIDAD	CANTIDADES PARCIALES															
10	M	21.48												21.48	6.82	14.06	
10	H	13.84												13.84	4.39	20.72	
11	L	3.62												3.62	1.15	2.61	
11	M	6.08												6.08	1.93	14.01	
13	L	4.00												4.00	1.27	21.74	
19	L	72.18												72.18	22.91	8.58	
														TOTAL VD		81.73	

Numero de valores deducidos > 2 (q)
Mayor valor deducido (HDVi)
Numero máximo de valores deducidos (mi)

6
21.74
8.19

$mi = \frac{1 + (9/98)^{(100-HDVi)}}{}$

N°	VALORES DEDUCIDOS							VDT	q	VALORES DEDUCIDOS CORREGIDOS (VDCi)
1	21.74	20.72	14.06	14.01	8.58	2.61		81.73	6	39.04
2	21.74	20.72	14.06	14.01	8.58	2.00		81.12	5	41.56
3	21.74	20.72	14.06	14.01	2.00	2.00		74.53	4	41.72
4	21.74	20.72	14.06	2.00	2.00	2.00		62.53	3	39.64
5	21.74	20.72	2.00	2.00	2.00	2.00		50.46	2	37.32
6	21.74	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00		31.74	1	31.74
7										
									Máx VDC	41.72

Nota: VDC máx. y PCI según tesis (nomogramas); VD de detalle por curvas digitalizadas.

INDICE DE CONDICION DEL PAVIMENTO (PCI)

CONDICION DEL ESTADO DEL PAVIMENTO:

PCI

PCI

100 - (Máx VDC o Total VD)

58

243

[illegible]

1961

246

[illegible]

1961

1901

[illegible]

1961

1961

Universidad Católica de Santa María	METODO PAVEMENT CONDITION INDEX (PCI)																																																																																																
	INDICE DE CONDICION DE PAVIMENTO EN VIAS DE PAVIMENTO FLEXIBLE																																																																																																
	EVALUACION SUPERFICIAL DE PAVIMENTOS																																																																																																
	NOMBRE DE LA VIA:	AV. PERU, CERRO COLORADO										CARRIL:																																																																																					
EVALUADO POR:	F.A.A.G - R.R.Y.P										FECHA:	Octubre 2025																																																																																					
PROGRESIVA INICIAL(Km):	KM 00+450										SEVERIDAD																																																																																						
PROGRESIVA FINAL(Km):	KM 00+495										LOW(BAJA)		L																																																																																				
ANCHO DE VIA(m):	7.00										MEDIANA(MEDIA)		M																																																																																				
AREA DE LA MUESTRA(m2):	315.00										HIGH(ALTA)		H																																																																																				
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr style="background-color: #cfe2f3;"> <th>N°</th> <th>Tipo de Falla</th> <th>Cod.</th> <th>Unidad</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>1</td><td>PIEL DE COCOWILO</td><td>PC</td><td>m2</td></tr> <tr><td>2</td><td>EXUDACIÓN</td><td>EX</td><td>m2</td></tr> <tr><td>3</td><td>AGRIETAMIENTO EN BLOQUE</td><td>BLO</td><td>m2</td></tr> <tr><td>4</td><td>ABULTAMIENTOS Y HUNDIMIENTOS</td><td>ABH</td><td>m2</td></tr> <tr><td>5</td><td>CORRUGACIÓN</td><td>COR</td><td>m2</td></tr> <tr><td>6</td><td>DEPRESIÓN</td><td>DEP</td><td>m2</td></tr> <tr><td>7</td><td>GRIETA DE BORDE</td><td>GB</td><td>m</td></tr> <tr><td>8</td><td>GRIETA DE REFLEXION DE JUNTA</td><td>GR</td><td>m</td></tr> <tr><td>9</td><td>DESNIVEL EN CARRIL/BERMA</td><td>DN</td><td>m</td></tr> <tr><td>10</td><td>GRIETAS LONGITUDINALES Y TRANSVERSALES</td><td>GLT</td><td>m</td></tr> </tbody> </table> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse; margin-left: 20px;"> <thead> <tr style="background-color: #cfe2f3;"> <th>N°</th> <th>Tipo de Falla</th> <th>Cod.</th> <th>Unidad</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>11</td><td>PARCHEO</td><td>PA</td><td>m2</td></tr> <tr><td>12</td><td>PULIMIENTO DE AGREGADOS</td><td>PU</td><td>m2</td></tr> <tr><td>13</td><td>HUECOS</td><td>HUE</td><td>und</td></tr> <tr><td>14</td><td>CRUCE DE VÍA FÉRREA</td><td>CVF</td><td>m2</td></tr> <tr><td>15</td><td>AHUILLAMIENTO</td><td>AHU</td><td>m2</td></tr> <tr><td>16</td><td>DESPLAZAMIENTO</td><td>DPS</td><td>m2</td></tr> <tr><td>17</td><td>GRIETA PARABÓLICA</td><td>GP</td><td>m2</td></tr> <tr><td>18</td><td>HINCHAMIENTO</td><td>HN</td><td>m2</td></tr> <tr><td>19</td><td>DESPRENDIMIENTO DE AGREGADOS</td><td>DAG</td><td>m2</td></tr> </tbody> </table>														N°	Tipo de Falla	Cod.	Unidad	1	PIEL DE COCOWILO	PC	m2	2	EXUDACIÓN	EX	m2	3	AGRIETAMIENTO EN BLOQUE	BLO	m2	4	ABULTAMIENTOS Y HUNDIMIENTOS	ABH	m2	5	CORRUGACIÓN	COR	m2	6	DEPRESIÓN	DEP	m2	7	GRIETA DE BORDE	GB	m	8	GRIETA DE REFLEXION DE JUNTA	GR	m	9	DESNIVEL EN CARRIL/BERMA	DN	m	10	GRIETAS LONGITUDINALES Y TRANSVERSALES	GLT	m	N°	Tipo de Falla	Cod.	Unidad	11	PARCHEO	PA	m2	12	PULIMIENTO DE AGREGADOS	PU	m2	13	HUECOS	HUE	und	14	CRUCE DE VÍA FÉRREA	CVF	m2	15	AHUILLAMIENTO	AHU	m2	16	DESPLAZAMIENTO	DPS	m2	17	GRIETA PARABÓLICA	GP	m2	18	HINCHAMIENTO	HN	m2	19	DESPRENDIMIENTO DE AGREGADOS	DAG	m2
N°	Tipo de Falla	Cod.	Unidad																																																																																														
1	PIEL DE COCOWILO	PC	m2																																																																																														
2	EXUDACIÓN	EX	m2																																																																																														
3	AGRIETAMIENTO EN BLOQUE	BLO	m2																																																																																														
4	ABULTAMIENTOS Y HUNDIMIENTOS	ABH	m2																																																																																														
5	CORRUGACIÓN	COR	m2																																																																																														
6	DEPRESIÓN	DEP	m2																																																																																														
7	GRIETA DE BORDE	GB	m																																																																																														
8	GRIETA DE REFLEXION DE JUNTA	GR	m																																																																																														
9	DESNIVEL EN CARRIL/BERMA	DN	m																																																																																														
10	GRIETAS LONGITUDINALES Y TRANSVERSALES	GLT	m																																																																																														
N°	Tipo de Falla	Cod.	Unidad																																																																																														
11	PARCHEO	PA	m2																																																																																														
12	PULIMIENTO DE AGREGADOS	PU	m2																																																																																														
13	HUECOS	HUE	und																																																																																														
14	CRUCE DE VÍA FÉRREA	CVF	m2																																																																																														
15	AHUILLAMIENTO	AHU	m2																																																																																														
16	DESPLAZAMIENTO	DPS	m2																																																																																														
17	GRIETA PARABÓLICA	GP	m2																																																																																														
18	HINCHAMIENTO	HN	m2																																																																																														
19	DESPRENDIMIENTO DE AGREGADOS	DAG	m2																																																																																														
FALLAS EXISTENTES																																																																																																	
FALLA	SEVERIDAD	CANTIDADES PARCIALES												TOTAL	DENSIDAD %	VD																																																																																	
3	L	43.81													43.81	13.91	9.99																																																																																
10	L	7.94													7.94	2.52	1.09																																																																																
10	H	18.32													18.32	5.82	24.97																																																																																
11	M	24.45													24.45	7.76	27.87																																																																																
19	L	52.96													52.96	16.81	6.92																																																																																
												TOTAL VD		70.84																																																																																			
Numero de valores deducidos > 2 (q)		4																																																																																															
Mayor valor deducido (HDVI)		27.87																																																																																															
Numero máximo de valores deducidos (mi)		7.62		$m=1+(9/98)^{(100-HDVI)}$																																																																																													
N°	VALORES DEDUCIDOS						VDT	q	VALORES DEDUCIDOS CORREGIDOS (VDC)																																																																																								
1	27.87	24.97	9.99	6.92			69.75	4	38.85																																																																																								
2	27.87	24.97	9.99	2.00			64.83	3	41.14																																																																																								
3	27.87	24.97	2.00	2																																																																																													

254

255

Nº	Tipo de Falla	Cod.	Unidad
11	PARCHEO	PA	m2
12	PULIMENTO DE AGREGADOS	PU	m2
13	HUECOS	HUE	und
14	CRUCE DE VÍA FÉRREA	CVF	m2
15	AHUELLAMIENTO	AHL	m2
16	DESPLAZAMIENTO	DES	m2
17	GRIETA PARABÓLICA	GP	m2
18	HINCHAMIENTO	HN	m2
19	DESPRENDIMIENTO DE AGREGADOS	DAG	m2

$$mi=1+(9/98)*(100-HDVi)$$

Nota: VDC máx. y PCI según tesis (nomogramas); VD de detalle por curvas digitalizadas.

Regular

256

257

258

259

260

261

262

263

264

265

[illegible]

268

NOMBRE DE LA VIA:	AV. PERU, CERRO COLORADO	CARRIL:	DERECHO	
EVALUADO POR:	F.A.A.G - R.R.Y.P	FECHA:	Octubre 2025	
PROGRESIVA INICIAL(Km):	KM 00+810	SEVERIDAD		
PROGRESIVA FINAL(Km):	KM 00+855	LOW(BAJA)	L	
ANCHO DE VIA(m):	7.00	MEDIANA(MEDIA)	M	
AREA DE LA MUESTRA(m2):	315.00	HIGH(ALTA)	H	

Nº	Tipo de Falla	Cod.	Unidad
1	PIEL DE COCODRILO	PC	m2
2	EXUDACIÓN	EX	m2
3	AGRIETAMIENTO EN BLOQUE	BLO	m2
4	ABULTAMIENTOS Y HUNDIMIENTOS	ABH	m2
5	CORRUGACIÓN	COR	m2
6	DEPRESIÓN	DEP	m2
7	GRIETA DE BORDE	GB	m
8	GRIETA DE REFLEXIÓN DE JUNTA	GR	m
9	DESNIVEL EN CARRIL/BERMA	DN	m
10	GRIETAS LONGITUDINALES Y TRANSVERSALES	GLT	m

Nº	Tipo de Falla	Cod.	Unidad
11	PARCHEO	PA	m2
12	PULIMENTO DE AGREGADOS	PU	m2
13	HUECOS	HUE	und
14	CRUCE DE VÍA FÉRREA	CVF	m2
15	AHUELLAMIENTO	AHU	m2
16	DESPLAZAMIENTO	DES	m2
17	GRIETA PARABÓLICA	GP	m2
18	HINCHAMIENTO	HN	m2
19	DESPRENDIMIENTO DE AGREGADOS	DAG	m2

[illegible]

Numero de valores deducidos > 2 (q)
Mayor valor deducido (HDI)
Numero máximo de valores deducidos (mi)

5
38.04
6.69

$$mi=1+(9/98)*(100-HDVi)$$

[illegible]

Nota: VDC máx. y PCI según tesis (nomogramas); VD de detalle por curvas digitalizadas.

INDICE DE CONDICION DEL PAVIMENTO (PCI)

PCI	$100 - (\text{Máx VDC o Total VD})$
PCI	52

CONDICION DEL ESTADO DEL PAVIMENTO:

Regular

RANGO	COLOR	CLASIFICACIÓN
100-85		Excelente
85-70		Muy Bueno
70-55		Bueno
55-40		Regular
40-25		Malo
25-10		Muy Malo
10-0		Fallido

• 1961 •

NOMBRE DE LA VIA:	AV. PERU, CERRO COLORADO	CARRIL:	DERECHO
EVALUADO POR:	F.A.A.G - R.R.Y.P	FECHA:	Octubre 2025
PROGRESIVA INICIAL(Km):	KM 00+855	SEVERIDAD	
PROGRESIVA FINAL(Km):	KM 00+900	LOW(BAJA)	L
ANCHO DE VIA(m):	7.00	MEDIANA(MEDIA)	M
AREA DE LA MUESTRA(m2):	315.00	HIGH(AlTA)	H

Nº	Tipo de Falla	Cod.	Unidad
1	PIEL DE COCROILO	PC	m2
2	EXUDACIÓN	EX	m2
3	AGRIETAMIENTO EN BLOQUE	BLO	m2
4	ABULTAMIENTOS Y HUNDIMIENTOS	ABH	m2
5	CORRUGACIÓN	COR	m2
6	DEPRESIÓN	DEP	m2
7	GRIETA DE BORDE	GB	m
8	GRIETA DE REFLEXION DE JUNTA	GR	m
9	DESNIVEL EN CARRIL/BERMA	DN	m
10	GRIETAS LONGITUDINALES Y TRANSVERSALES	GLT	m

Nº	Tipo de Falla	Cod.	Unidad
11	PARCHEO	PA	m ²
12	PULIMENTO DE AGREGADOS	PU	m ²
13	HUECOS	HUE	und
14	CRUCE DE VÍA FÉRREA	CVF	m ²
15	AHUELLAMIENTO	AHU	m ²
16	DESPLAZAMIENTO	DES	m ²
17	GRIETA PARABÓLICA	GP	m ²
18	HINCHAMIENTO	HN	m ²
19	DESPRENDIMIENTO DE AGREGADOS	DAG	m ²

[illegible]

Numero de valores deducidos > 2 (a)	7	
Mayor valor deducido (HDI)	63.67	
Numero máximo de valores deducidos (m)	4.34	$mi=1+(9/98)*(100-HDI)$

[illegible]

Nota: VDC máx. y PCI según tesis (nomogramas); VD de detalle por curvas digitalizadas.

INDICE DE CONDICION DEL PAVIMENTO (PCI)

PCI	$100 - (\text{Máx VDC o Total VD})$
PCI	16

CONDICION DEL ESTADO DEL PAVIMENTO:

Muy Malo

RANGO	COLOR	CLASIFICACIÓN
100-85		Excelente
85-70		Muy Bueno
70-55		Bueno
55-40		Regular
40-25		Malo
25-10		Muy Malo
10-0		Fallado

[illegible]

• 1961 •

• 1961 •

275

• 1961 •

• 1961 •

[illegible]

• 1961 •

• 1961 •

• 1961 •

• 1961 •

• 1961 •

285

286

[illegible]

• 1961 •

[illegible]

• 1961 •

• 1961 •

• 1961 •

• 1961 •

295

• 1961 •

**Universidad Católica
de Santa María**

 METODO PAVEMENT CONDITION INDEX (PCI)

INDICE DE CONDICION DE PAVIMENTO EN VIAS DE PAVIMENTO FLEXIBLE						
EVALUACION SUPERFICIAL DE PAVIMENTOS						
NOMBRE DE LA VIA:	AV. PERU, CERRO COLORADO				CARRIL:	DERECHO
EVALUADOR POR:	F.A.G - R.R.Y.P				FECHA:	Octubre 2025
PROGRESIVA INICIAL(Km):	KM 01+440				SEVERIDAD	
PROGRESIVA FINAL(Km):	KM 01+485				LOW(BAJA)	L
ANCHO DE VÍA(m):	7.00				MEDIANA(MEDIA)	M
AREA DE LA MUESTRA(m²):	315.00				HIGH(Alta)	H

N°	Tipo de Falla	Cod.	Unidad
1	PIEL DE COCOTRILE	PC	m²
2	EXUDACIÓN	EX	m²
3	AQUIETAMIENTO EN BLOQUE	BLO	m²
4	ABULTAMIENTOS Y HUNDIMIENTOS	ABH	m²
5	CORRUCCIÓN	COR	m²
6	DEPRESIÓN	DEP	m²
7	GRIETA DE BORDE	GB	m
8	GRIETA DE REFLEXIÓN DE JUNTA	GR	m
9	DESNIVEL EN CARRILLERMA	DN	m
10	GRIetas LONGITUDINALES Y TRANSVERSALES	QLT	m

N°	Tipo de Falla	Cod.	Unidad
11	PARCHEO	PA	m²
12	PULIMIENTO DE AGREGADOS	PU	m²
13	HUECOS	HUE	und
14	CRUCE DE VÍA FÉRREA	CVF	m²
15	AHUELLAMIENTO	AHU	m²
16	DESPLAZAMIENTO	DES	m²
17	GRIETA PARABÓLICA	GP	m²
18	HINCHAMIENTO	HN	m²
19	DESPRENDIMIENTO DE AGREGADOS	DAG	m²

FALLA	SEVERIDAD	CANTIDADES PARCIALES										TOTAL	DENSIDAD %	VD
1	M	17.06										17.06	5.42	38.79
3	M	15.18										15.18	4.82	11.06
10	M	18.52										18.52	5.88	12.82
11	L	20.17										20.17	6.40	12.30
11	M	25.06										25.06	7.96	28.22
13	L	3.00										3.00	0.95	18.56
15	L	4.29										4.29	1.36	10.11
19	M	27.68										27.68	8.79	17.67
													TOTAL VD	149.54

Numero de valores deducidos > 2 (q) 8

Mayor valor deducido (HDVl) 38.79

Numero máximo de valores deducidos (mi) 6.62

$m = \frac{f + (\frac{g}{98}) * (100 - HDVl)}{}$

N°	VALORES DEDUCIDOS							VDT	q	VALORES DEDUCIDOS CORREGIDOS (VDC)
1	38.79	28.22	18.56	17.67	12.82	12.30	6.87	135.24	7	65.09
2	38.79	28.22	18.56	17.67	12.82	12.30	2.00	130.36	6	63.15
3	38.79	28.22	18.56	17.67	12.82	2.00	2.00	120.06	5	62.03
4	38.79	28.22	18.56	17.67	2.00	2.00	2.00	109.24	4	61.62
5	38.79	28.22	18.56	2.00	2.00	2.00	2.00	93.57	3	59.14
6	38.79	28.22	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	77.01	2	55.91
7	38.79	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	50.79	1	50.79
									Máx VDC	65.09

Nota: VDC máx. y PCI según tesis (nomogramas); VD de detalle por curvas digitalizadas.

INDICE DE CONDICION DEL PAVIMENTO (PCI)

PCI
PCI

CONDICION DEL ESTADO DEL PAVIMENTO:

Malo

100 - (Máx VDC o Total VD)

35

• 1961 •

• 1961 •

• 1961 •

• 1961 •

303

305

• 1961 •

• 1961 •

[illegible]

• 1961 •

• 1961 •

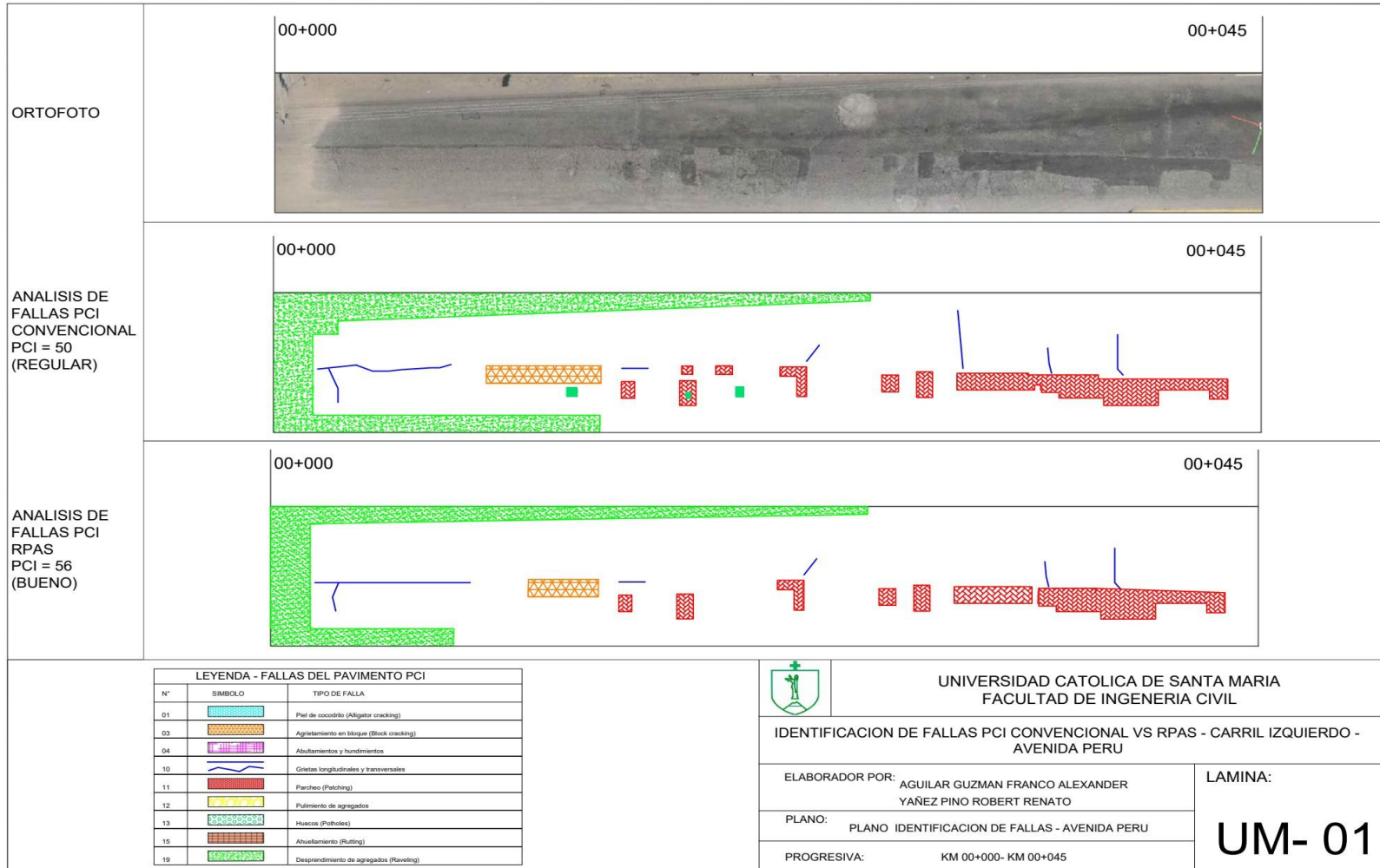
• 1961 •

• 1961 •

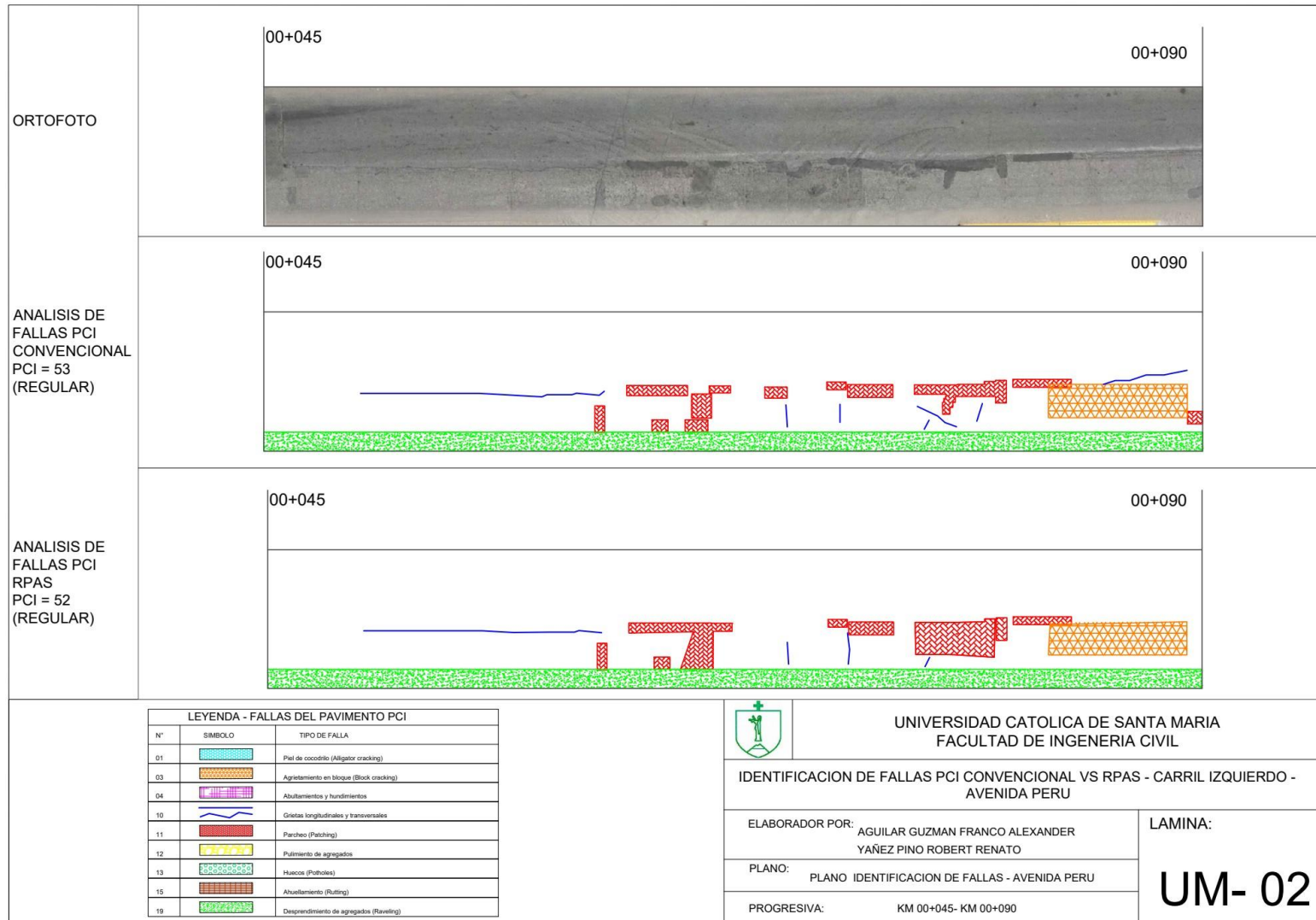
[illegible]

Anexo 4. Identificación de fallas de Carril izquierdo – Método PCI convencional vs RPAS

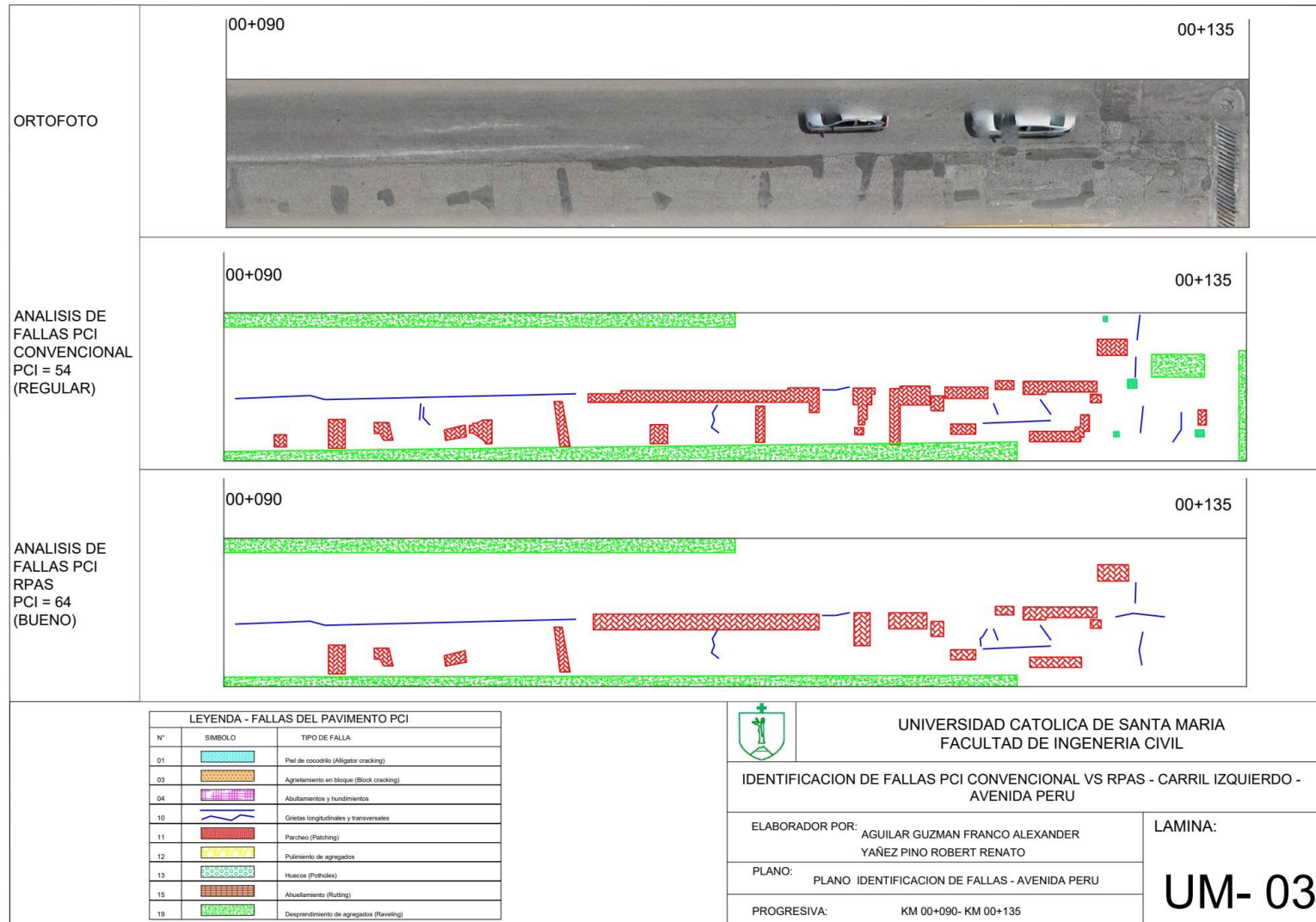
UM 01 (00+000-00+045)



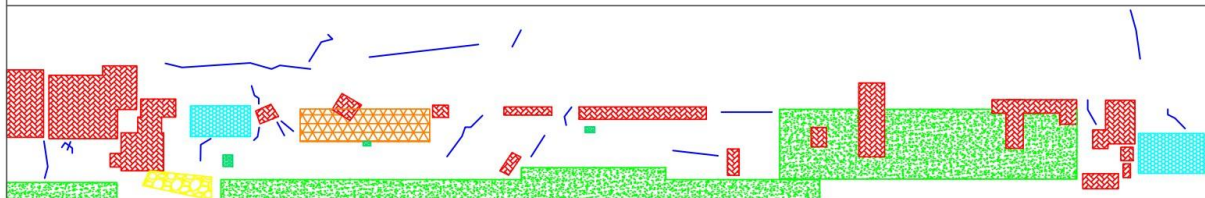
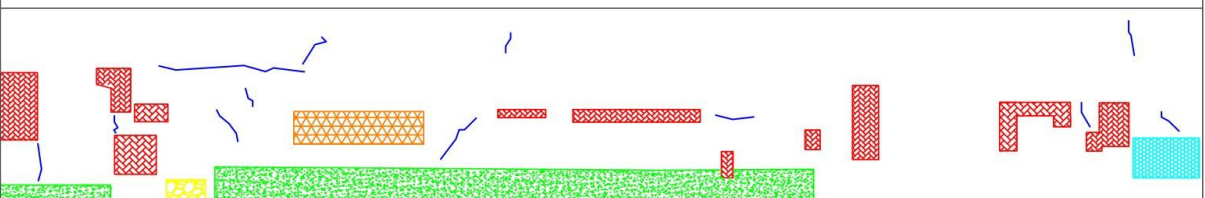
UM 02 (00+045-00+090)



UM 03 (00+090-00+135)



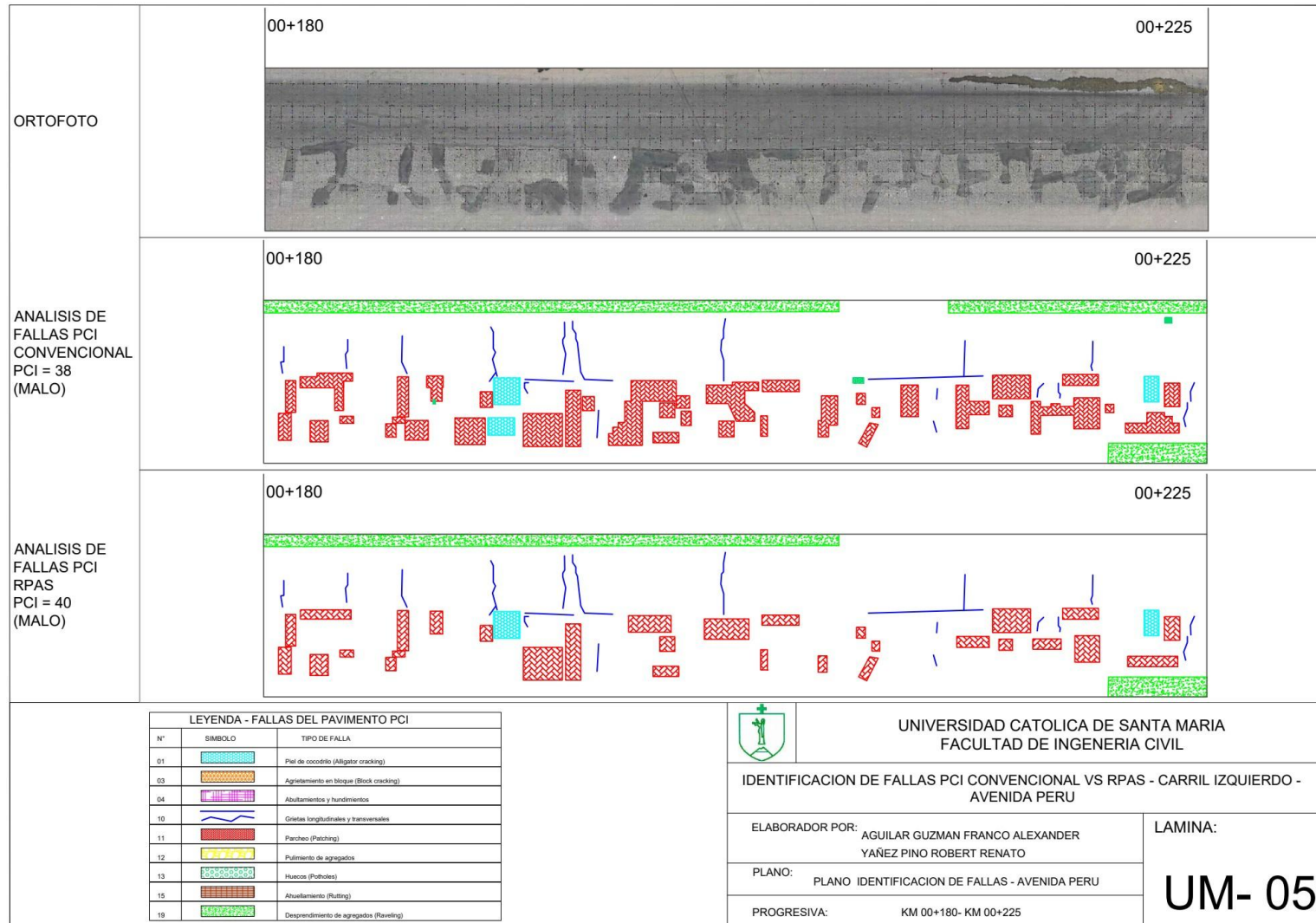
UM 04 (00+135-00+180)

ORTOFOTO	00+135	00+180	
	00+135	00+180	
ANALISIS DE FALLAS PCI CONVENCIONAL PCI = 53 (REGULAR)	00+135	00+180	
ANALISIS DE FALLAS PCI RPAS PCI = 60 (BUENO)			

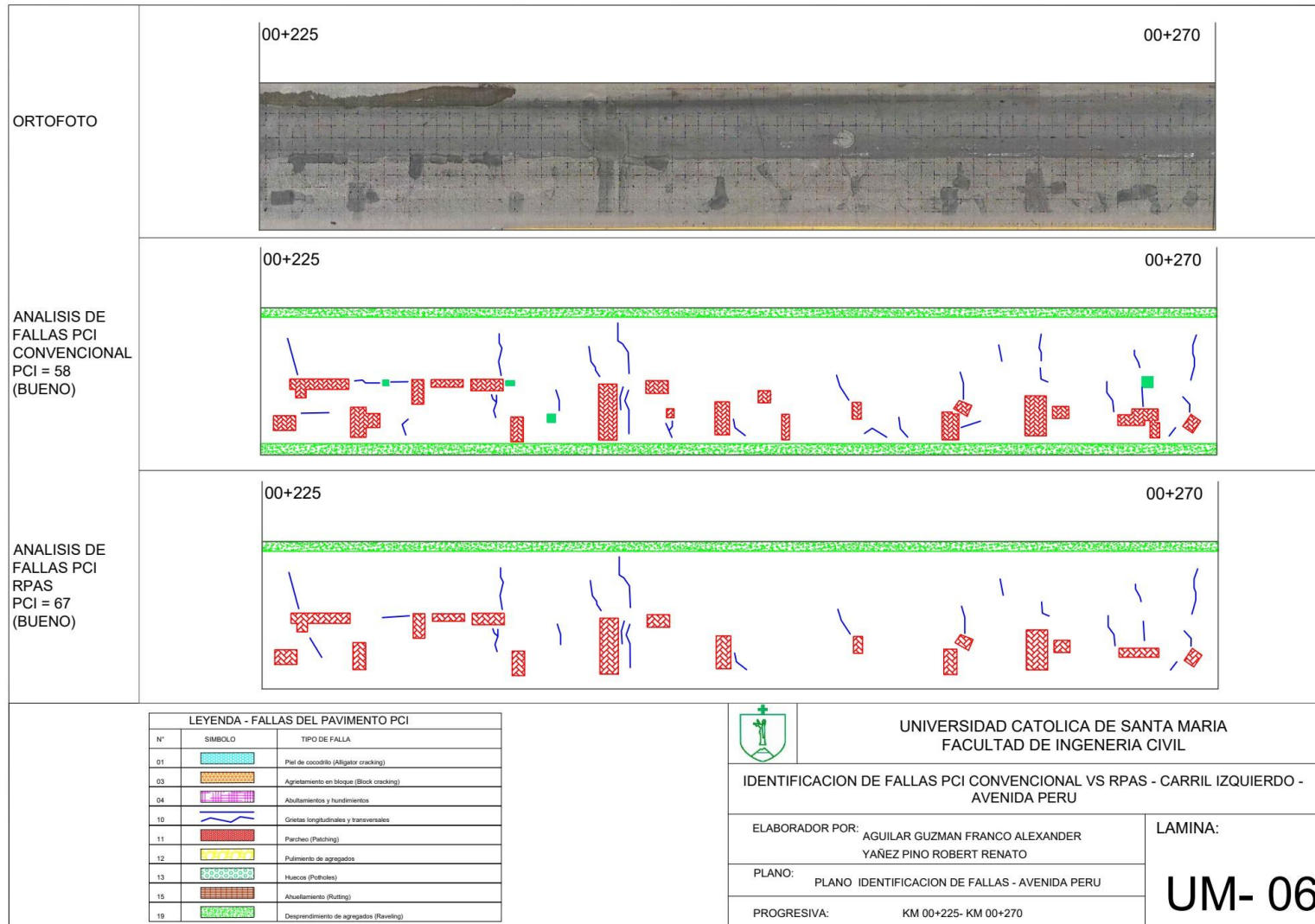
LEYENDA - FALLAS DEL PAVIMENTO PCI		
N°	SÍMBOLO	TIPO DE FALLA
01		Piel de cocodrilo (Alligator cracking)
03		Agrietamiento en bloque (Block cracking)
04		Abultamientos y hundimientos
10		Grietas longitudinales y transversales
11		Parcheo (Patching)
12		Pulimento de agregados
13		Huecos (Potholes)
15		Ahuellamiento (Rutting)
19		Desprendimiento de agregados (Raveling)

	UNIVERSIDAD CATOLICA DE SANTA MARIA FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL	
IDENTIFICACION DE FALLAS PCI CONVENCIONAL VS RPAS - CARRIL IZQUIERDO - AVENIDA PERU		
ELABORADOR POR:	AGUILAR GUZMAN FRANCO ALEXANDER YAÑEZ PINO ROBERT RENATO	
PLANO:	PLANO IDENTIFICACION DE FALLAS - AVENIDA PERU	
PROGRESIVA:	KM 00+135- KM 00+180	
		LAMINA:
		UM- 04

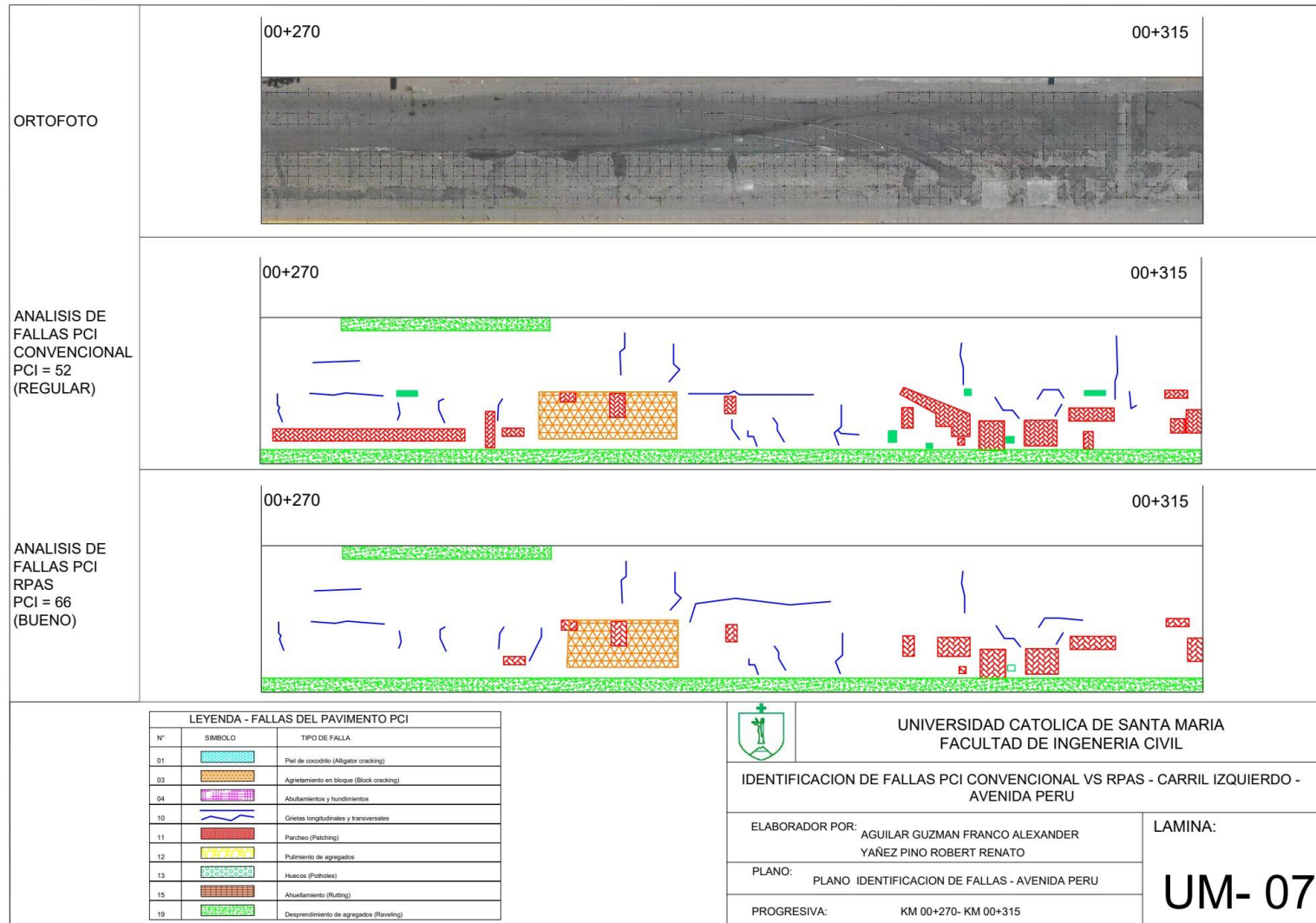
UM 05 (00+180-00+225)



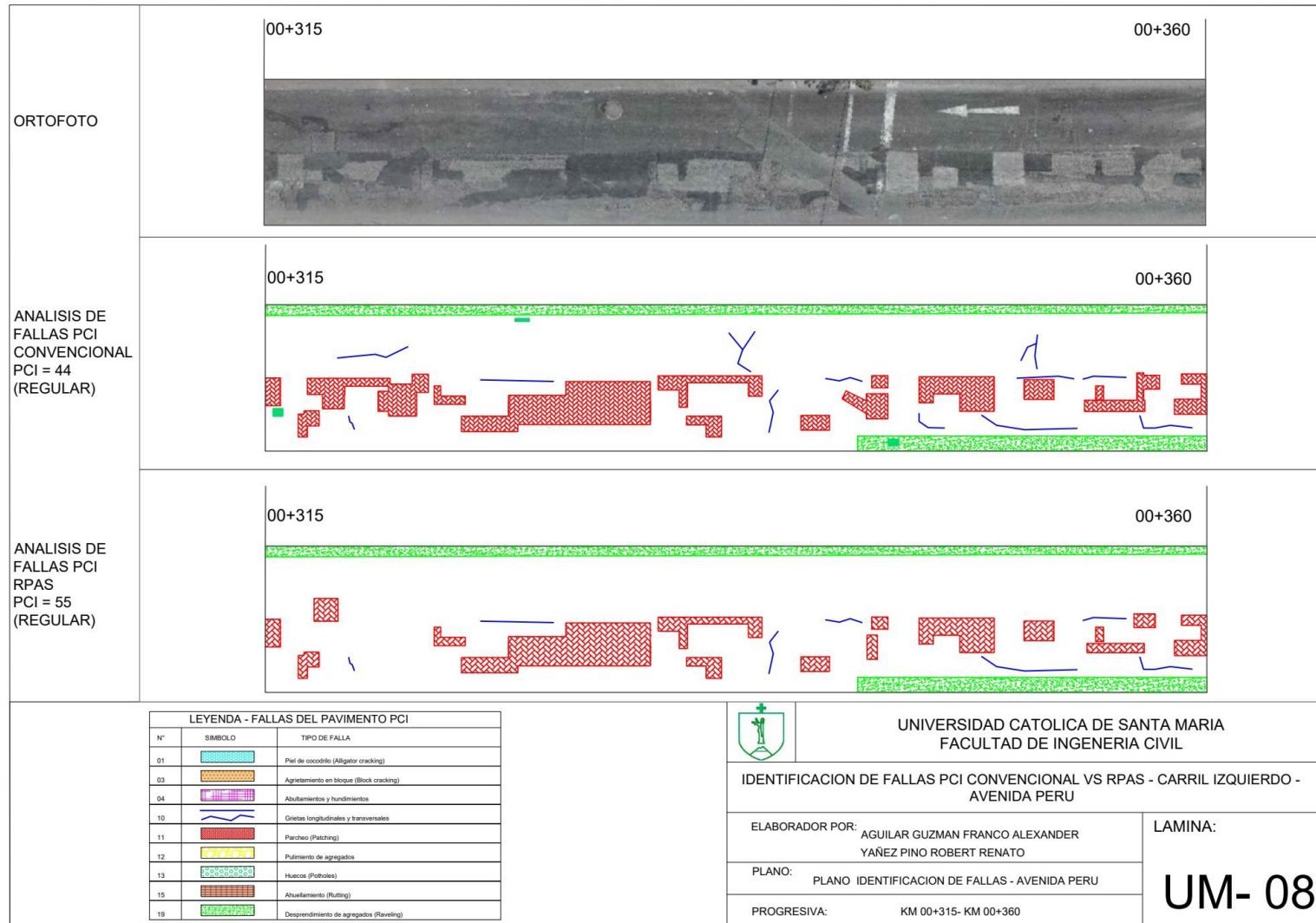
UM 06 (00+225-00+270)



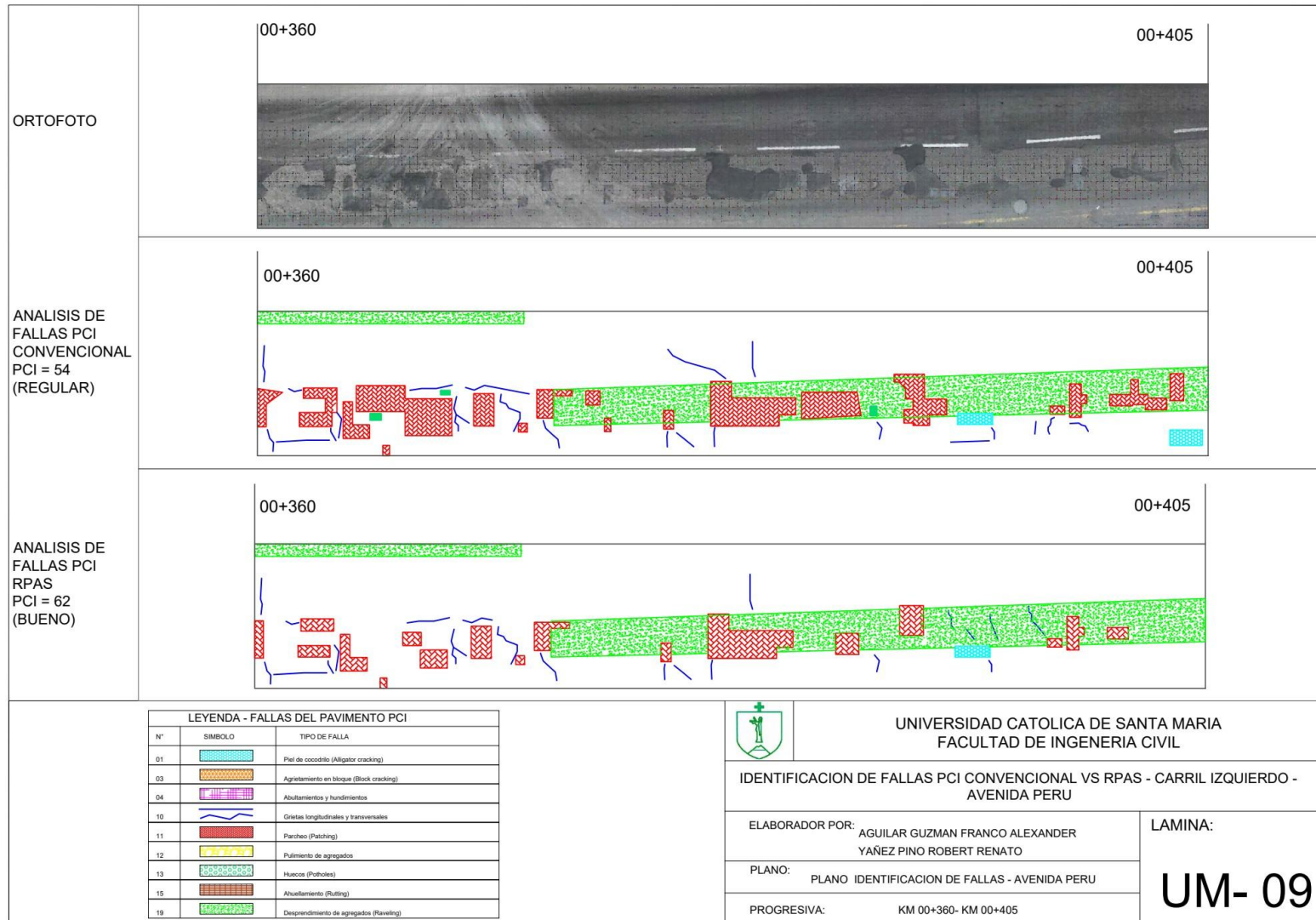
UM 07 (00+270-00+315)



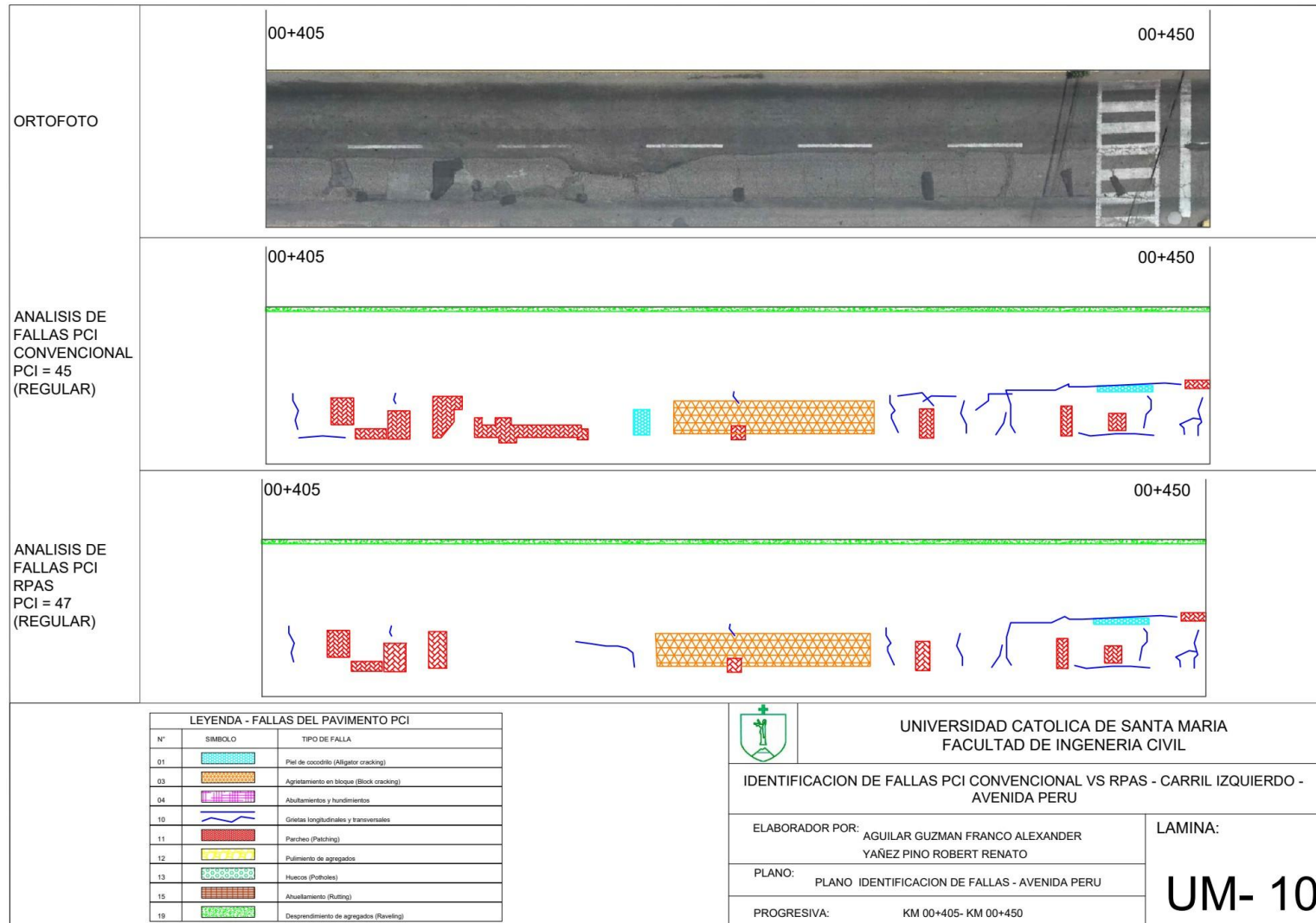
UM 08 (00+315-00+360)



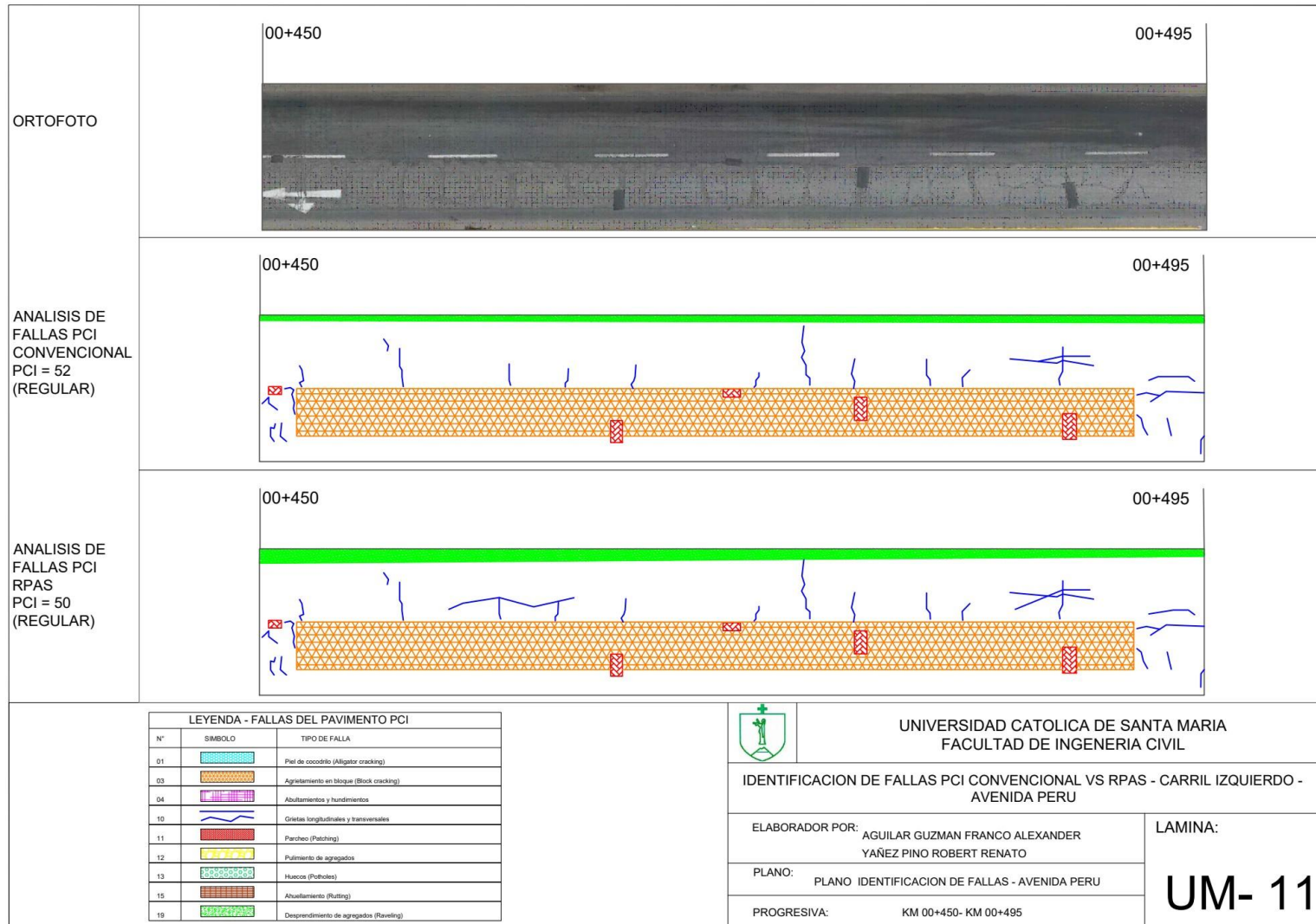
UM 09 (00+360-00+405)



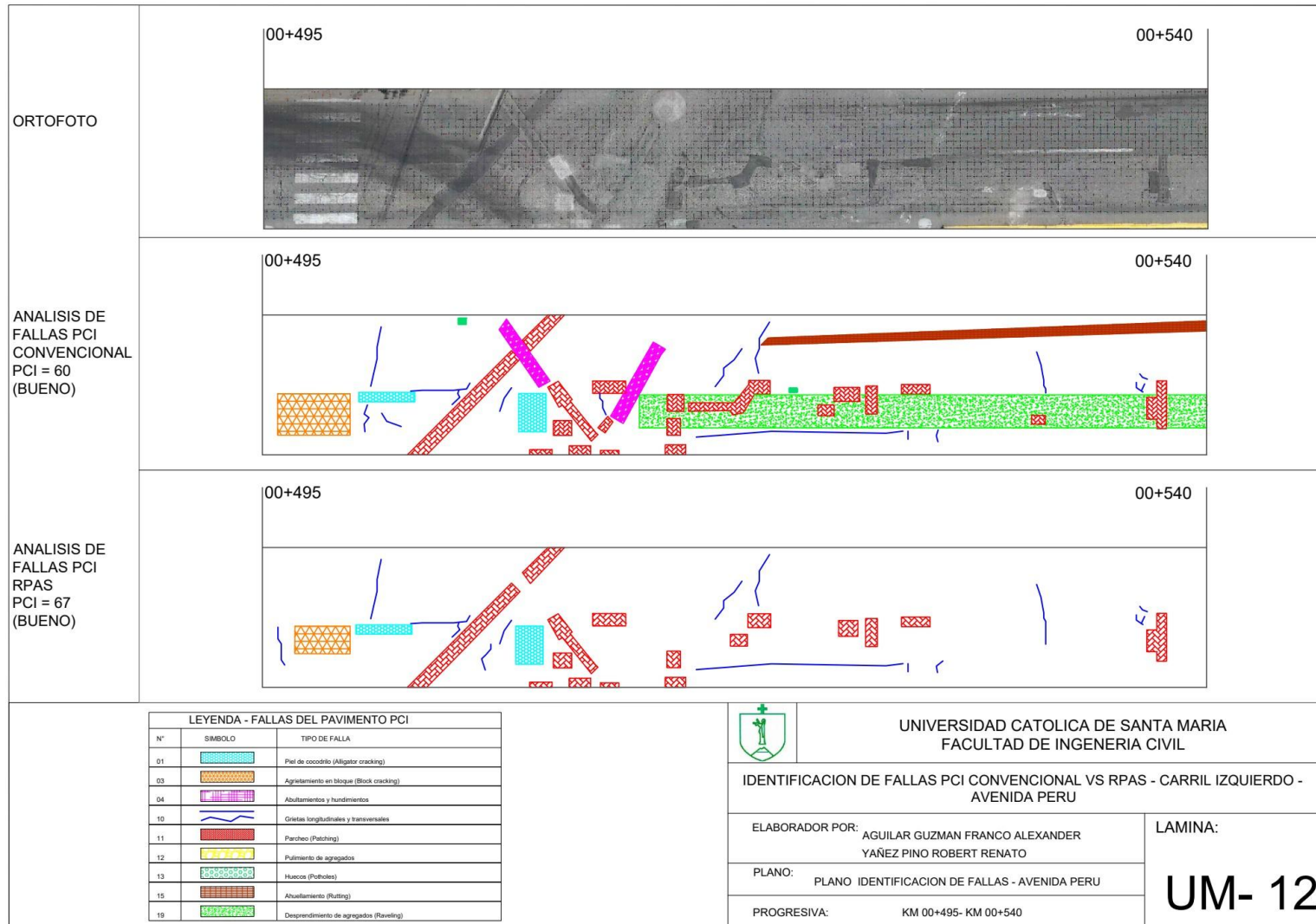
UM 10 (00+405-00+450)



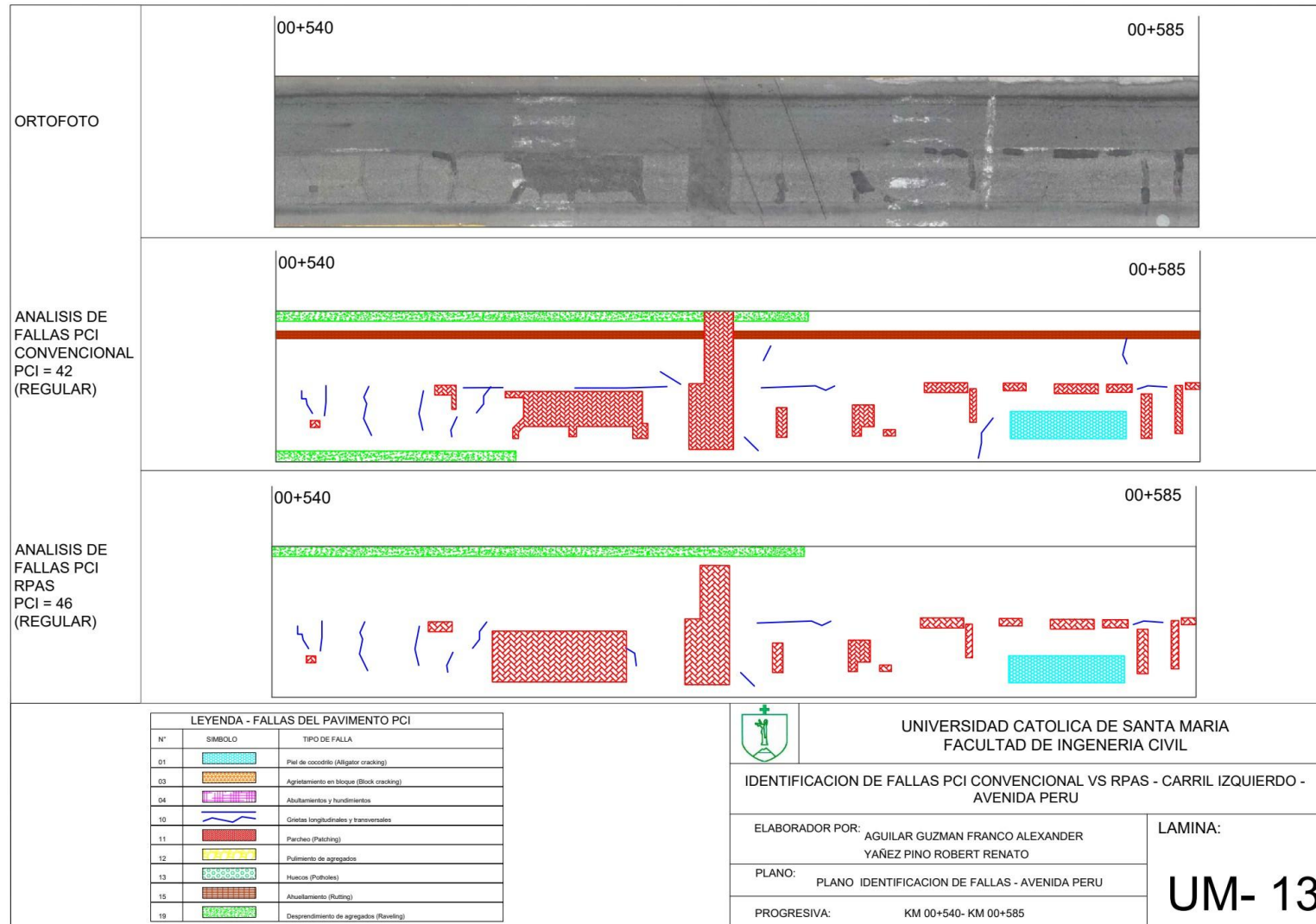
UM 11 (00+450-00+495)



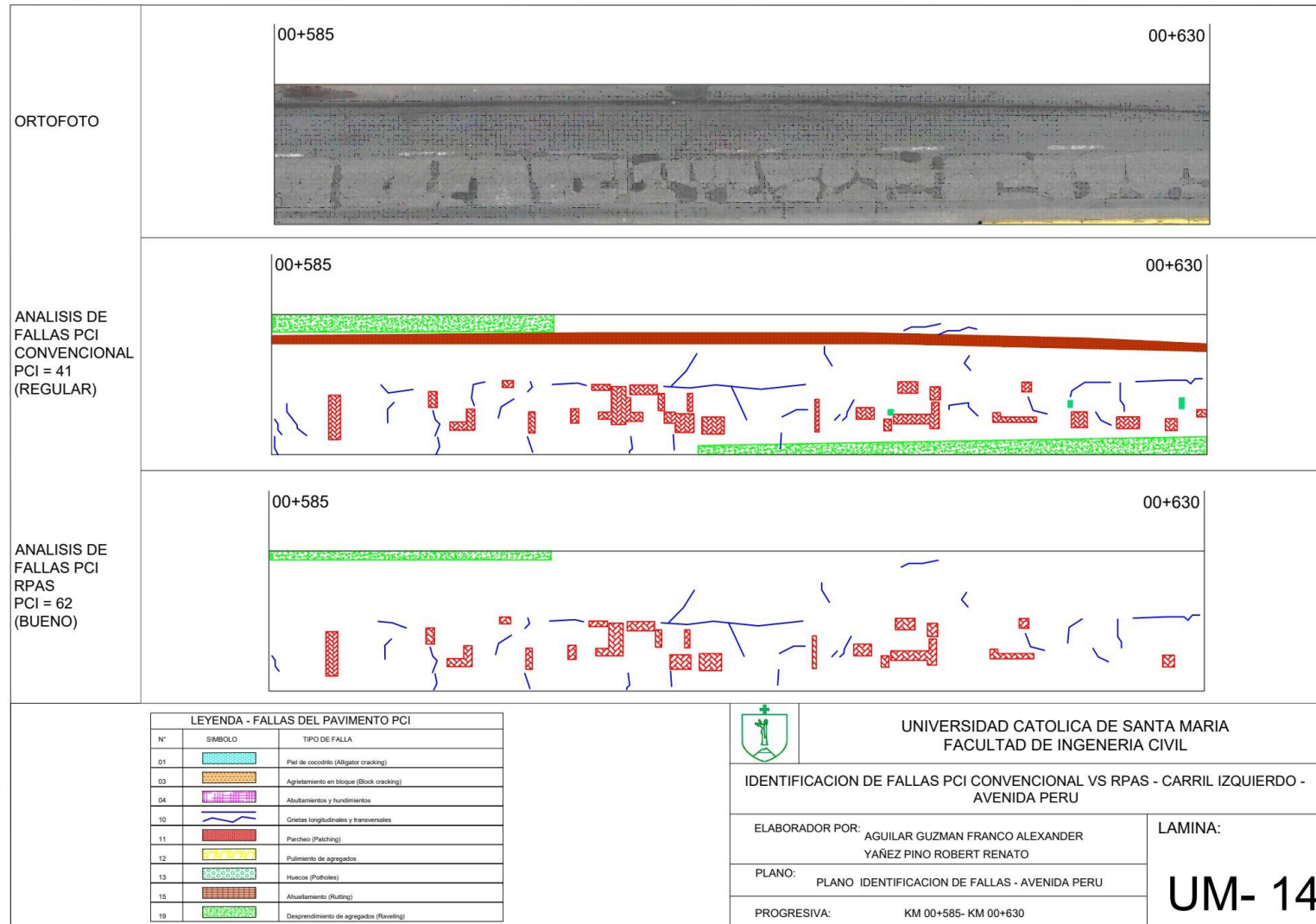
UM 12 (00+495-00+540)



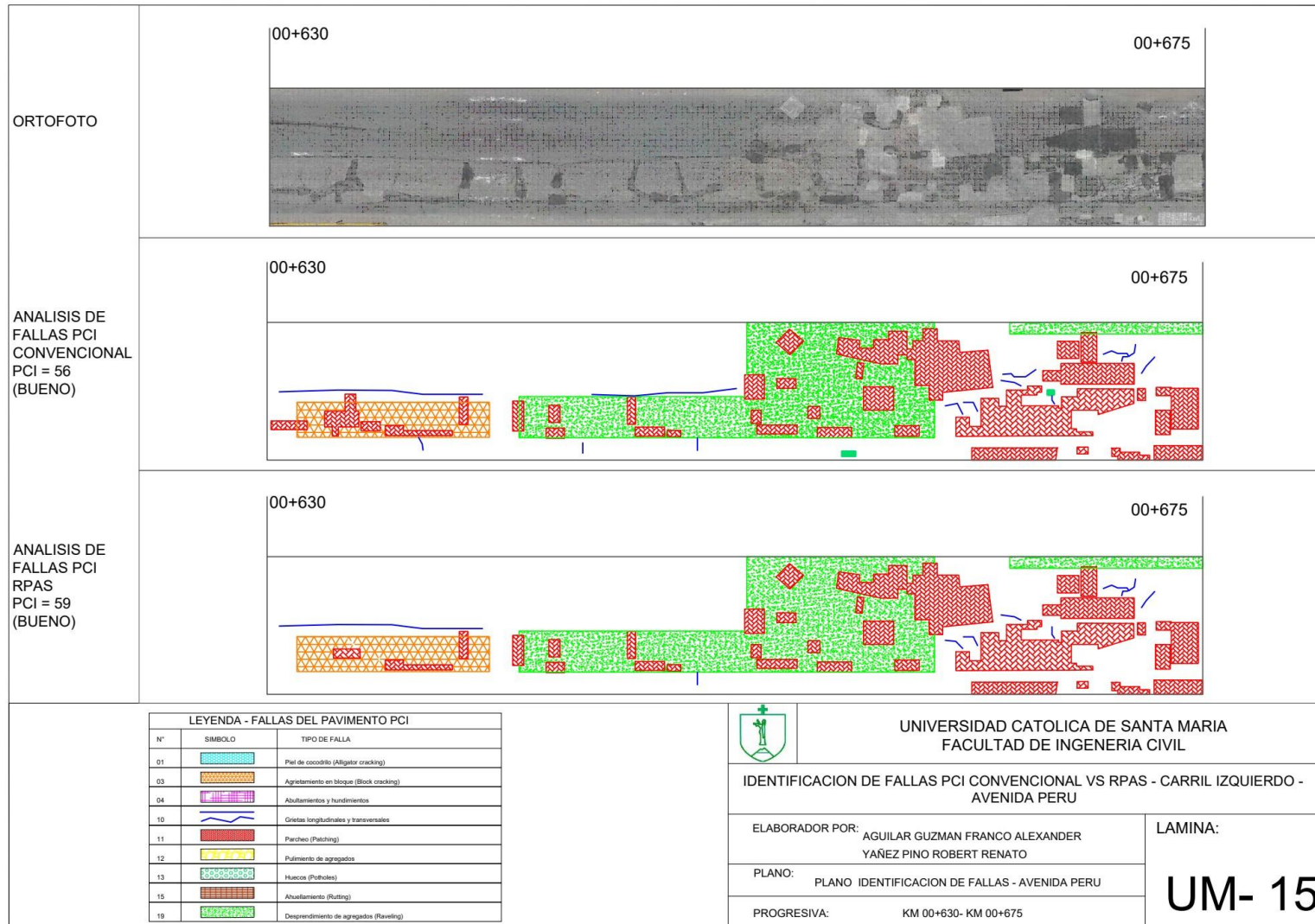
UM 13 (00+540-00+585)



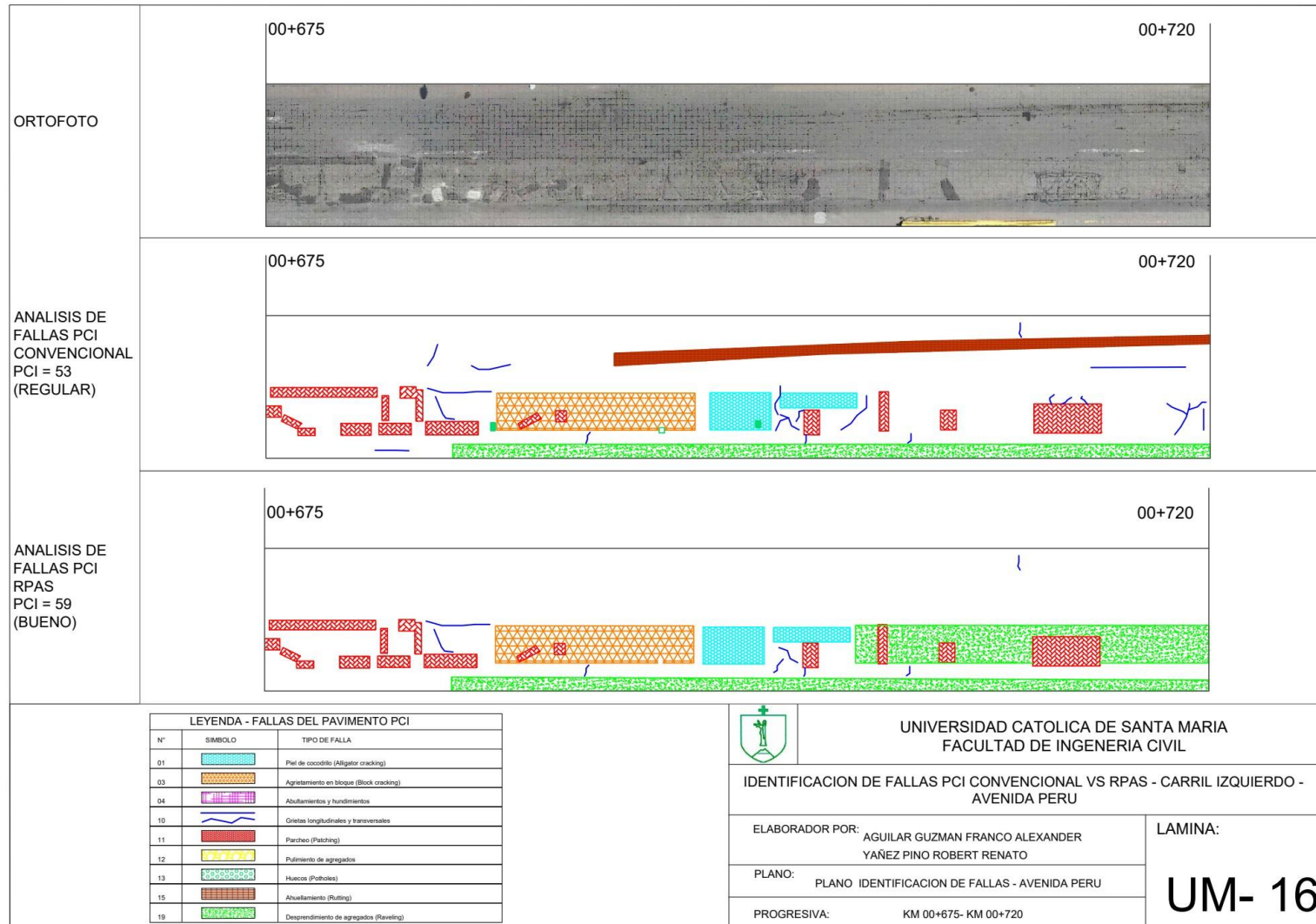
UM 14 (00+585-00+630)



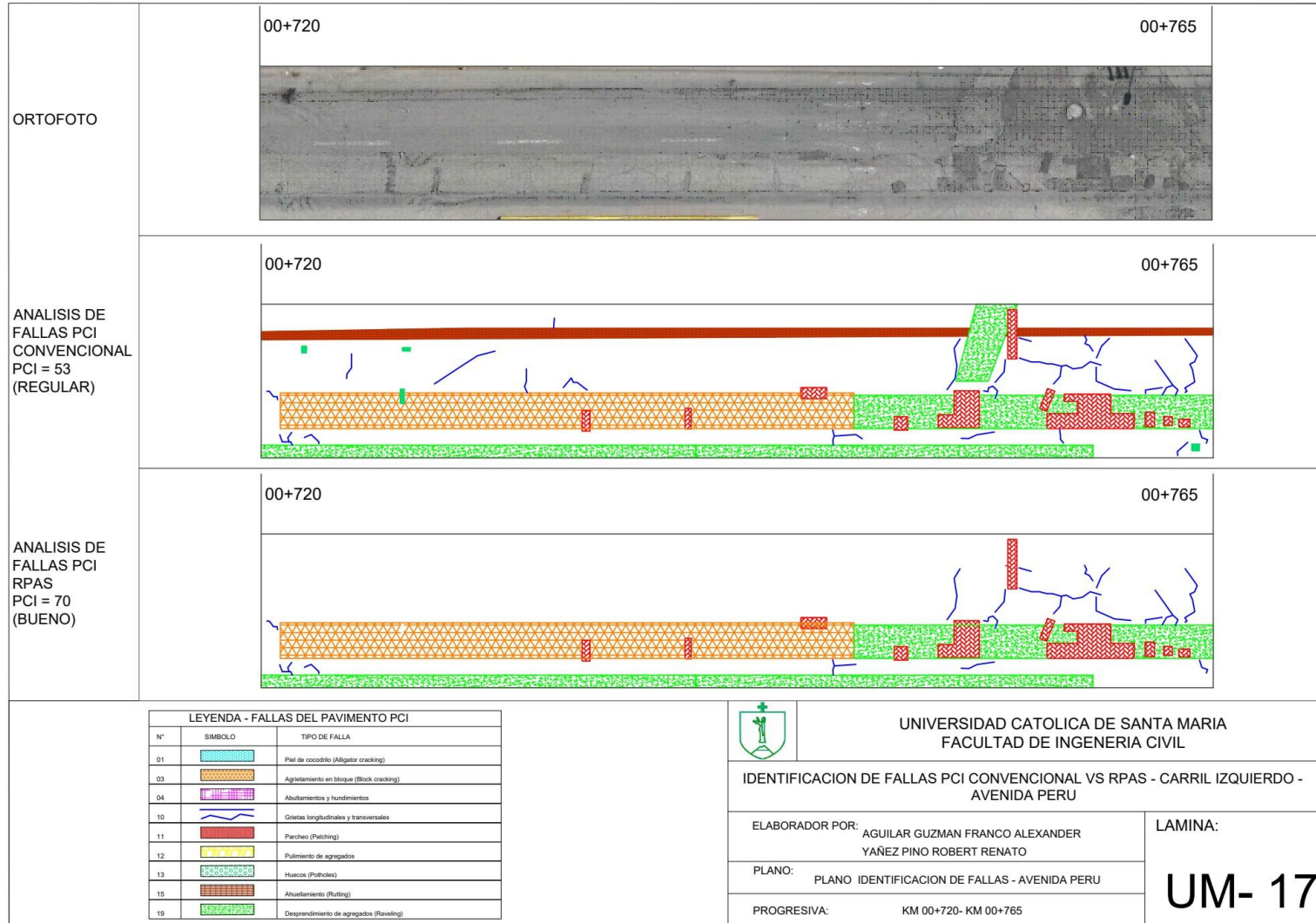
UM 15 (00+630-00+675)



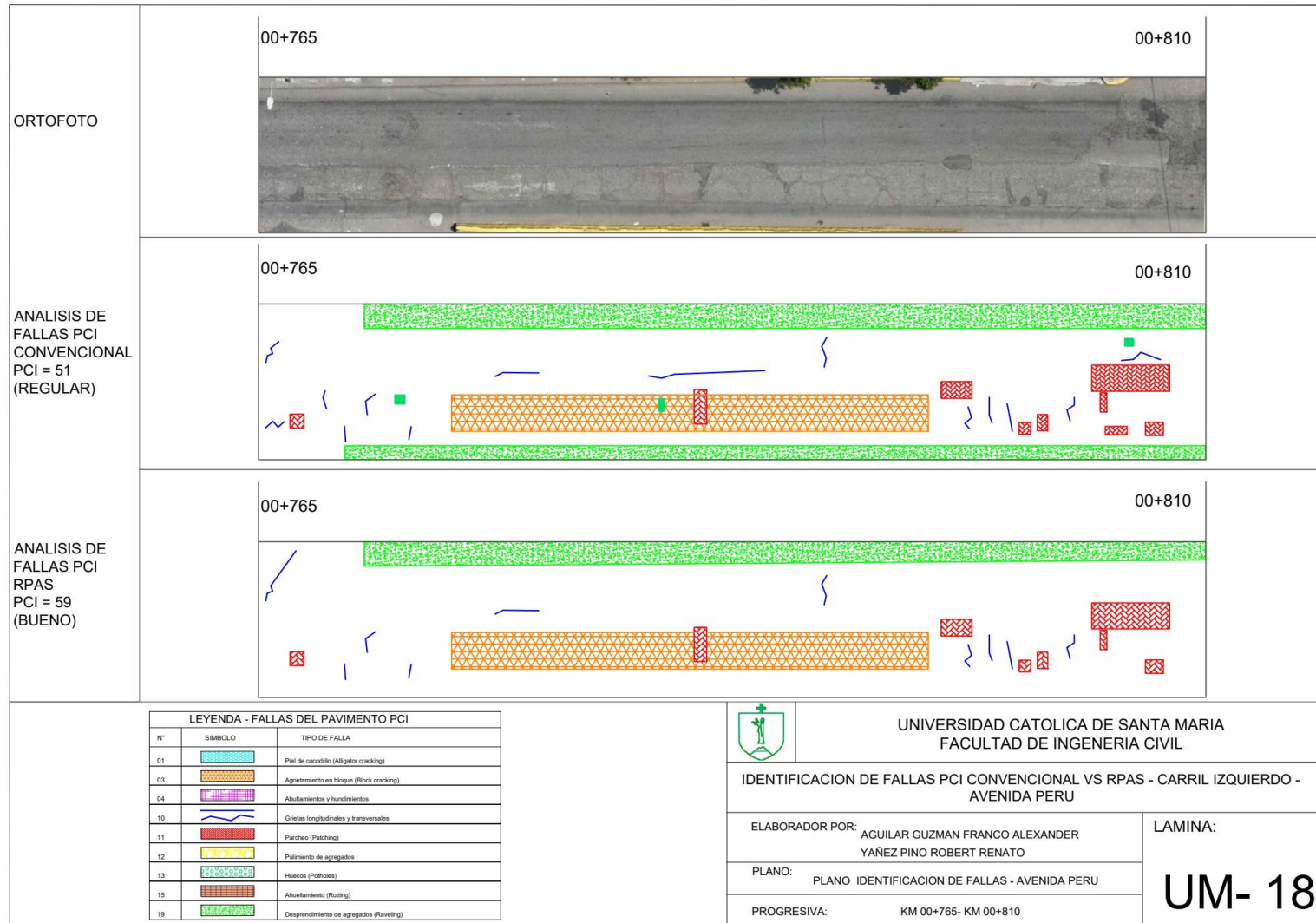
UM 16 (00+675-00+720)



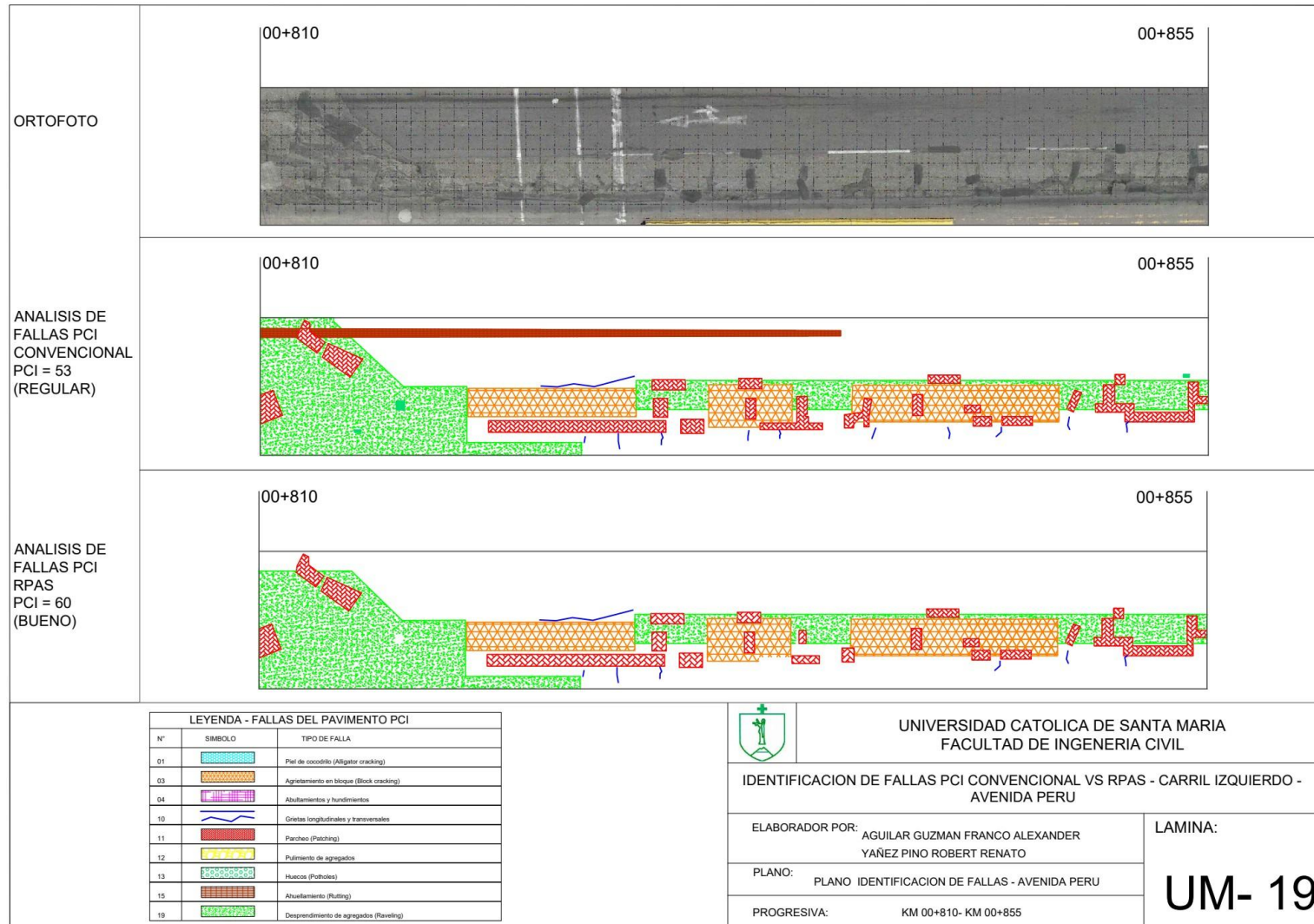
UM 17 (00+720-00+765)



UM 18 (00+765-00+810)



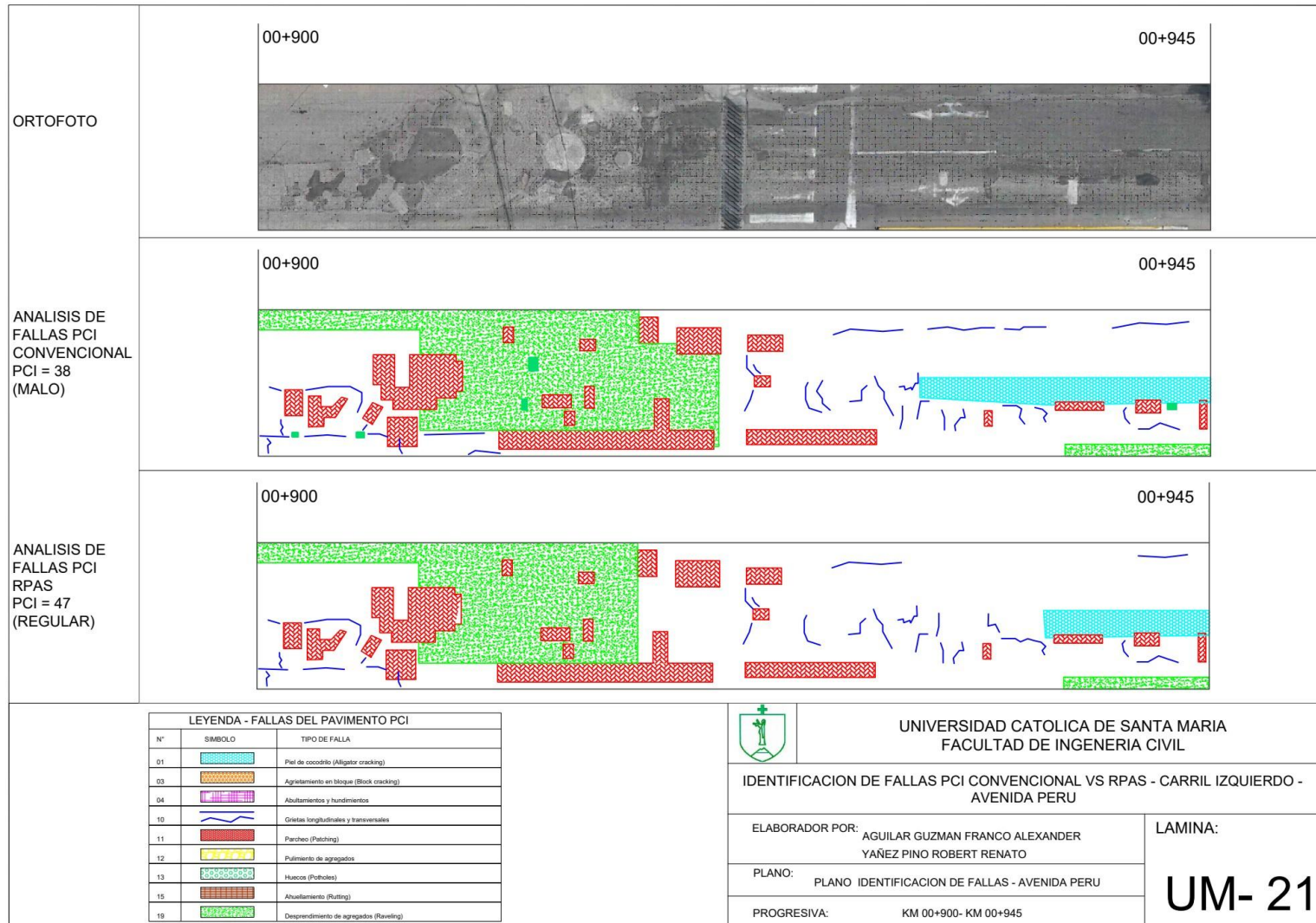
UM 19 (00+810-00+855)



UM 20 (00+855-00+900)



UM 21 (00+900-00+945)



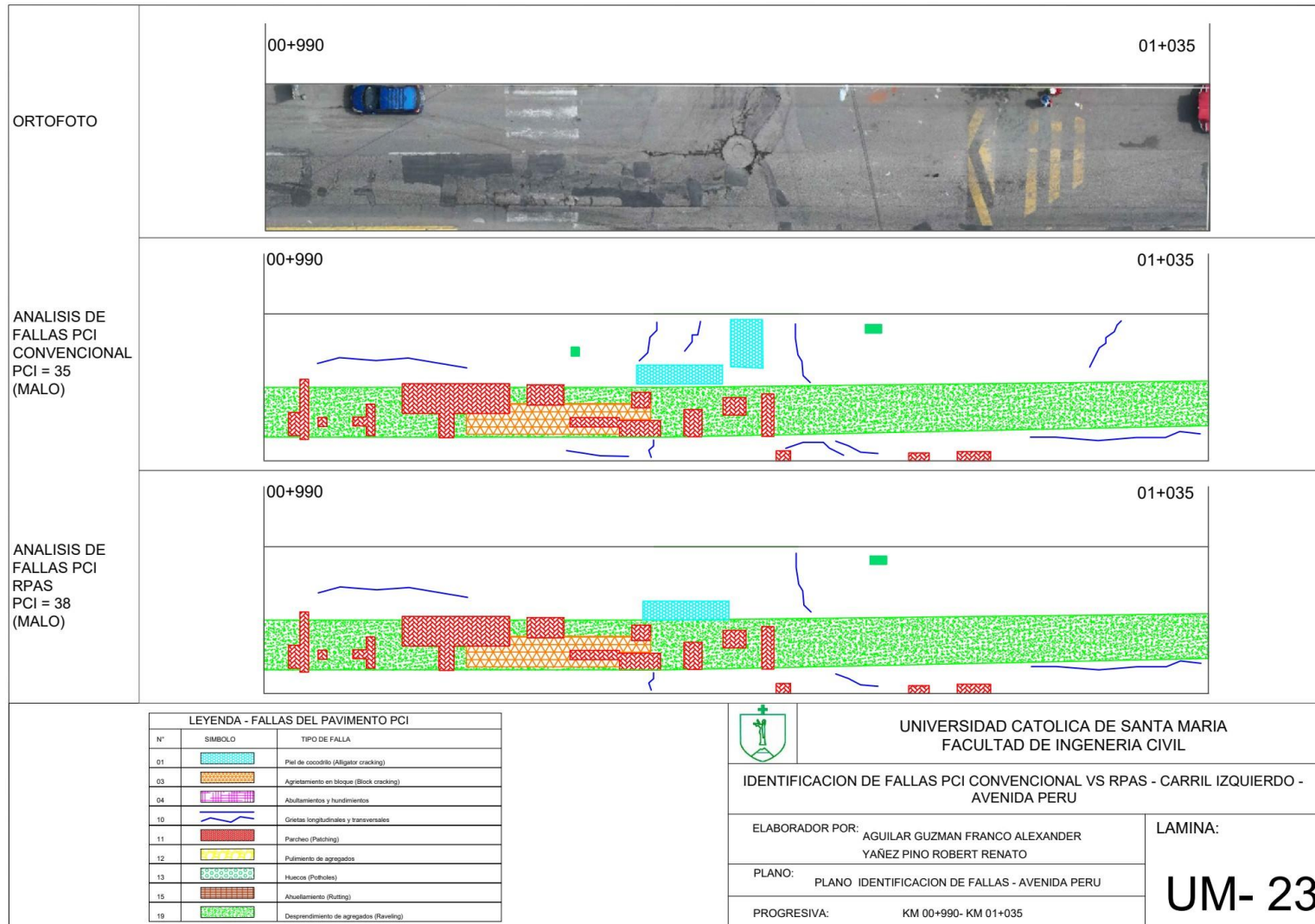
UM 22 (00+945-00+990)

ORTOFOTO	00+945	00+990	
	00+945	00+990	
	00+945	00+990	
ANALISIS DE FALLAS PCI CONVENCIONAL PCI = 39 (MALO)			
ANALISIS DE FALLAS PCI RPAS PCI = 56 (BUENO)			

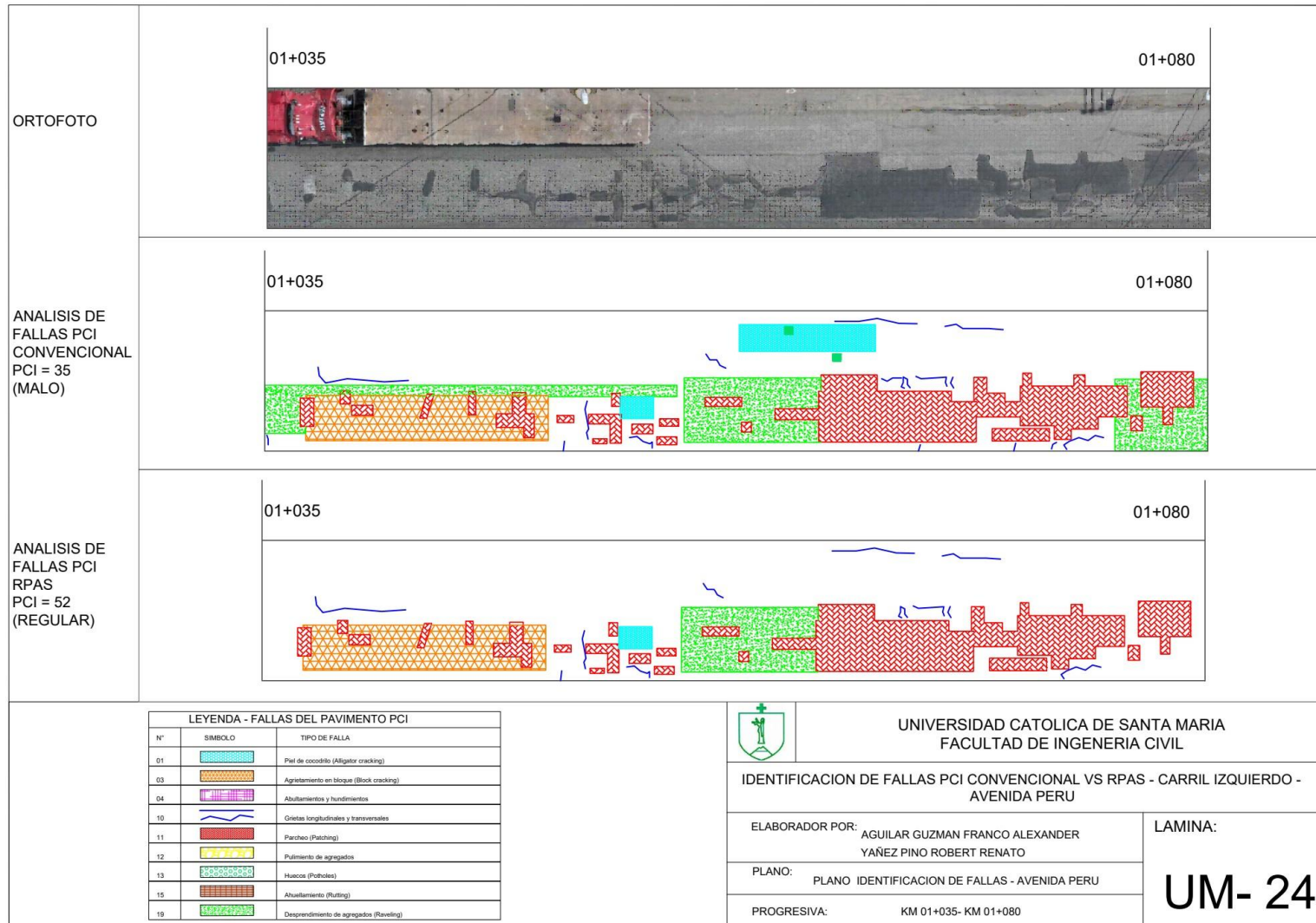
LEYENDA - FALLAS DEL PAVIMENTO PCI		
N°	SÍMBOLO	TIPO DE FALLA
01		Piel de cocodrilo (Alligator cracking)
03		Agrietamiento en bloque (Block cracking)
04		Abultamientos y hundimientos
10		Grietas longitudinales y transversales
11		Parcheo (Patching)
12		Pulimiento de agregados
13		Huecos (Potholes)
15		Ahuellamiento (Rutting)
19		Desprendimiento de agregados (Raveling)

	UNIVERSIDAD CATOLICA DE SANTA MARIA FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL	
IDENTIFICACION DE FALLAS PCI CONVENCIONAL VS RPAS - CARRIL IZQUIERDO - AVENIDA PERU		
ELABORADOR POR: AGUILAR GUZMAN FRANCO ALEXANDER YAÑEZ PINO ROBERT RENATO		LAMINA:
PLANO: PLANO IDENTIFICACION DE FALLAS - AVENIDA PERU		UM- 22
PROGRESIVA: KM 00+945- KM 00+990		

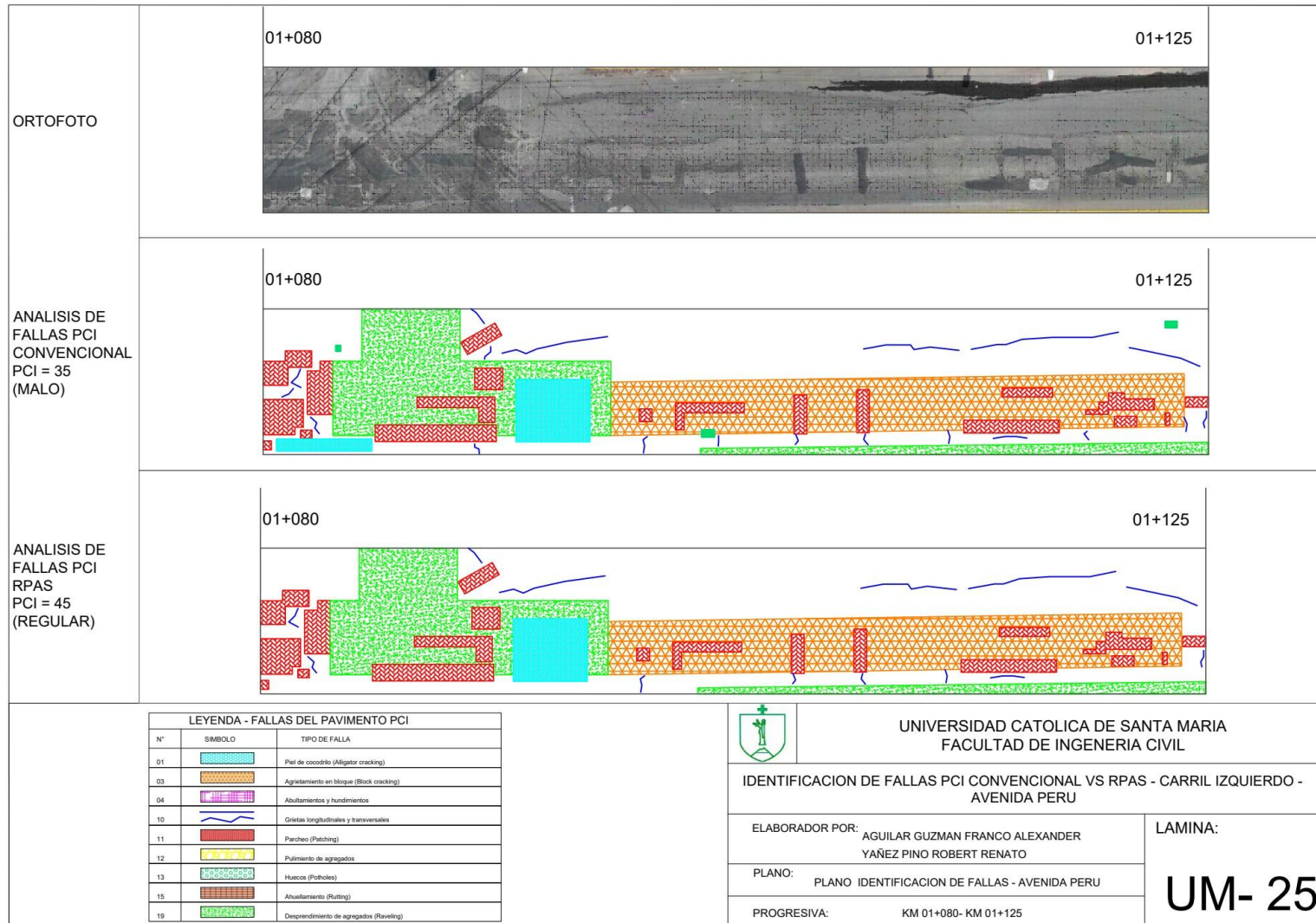
UM 23 (00+990-01+035)



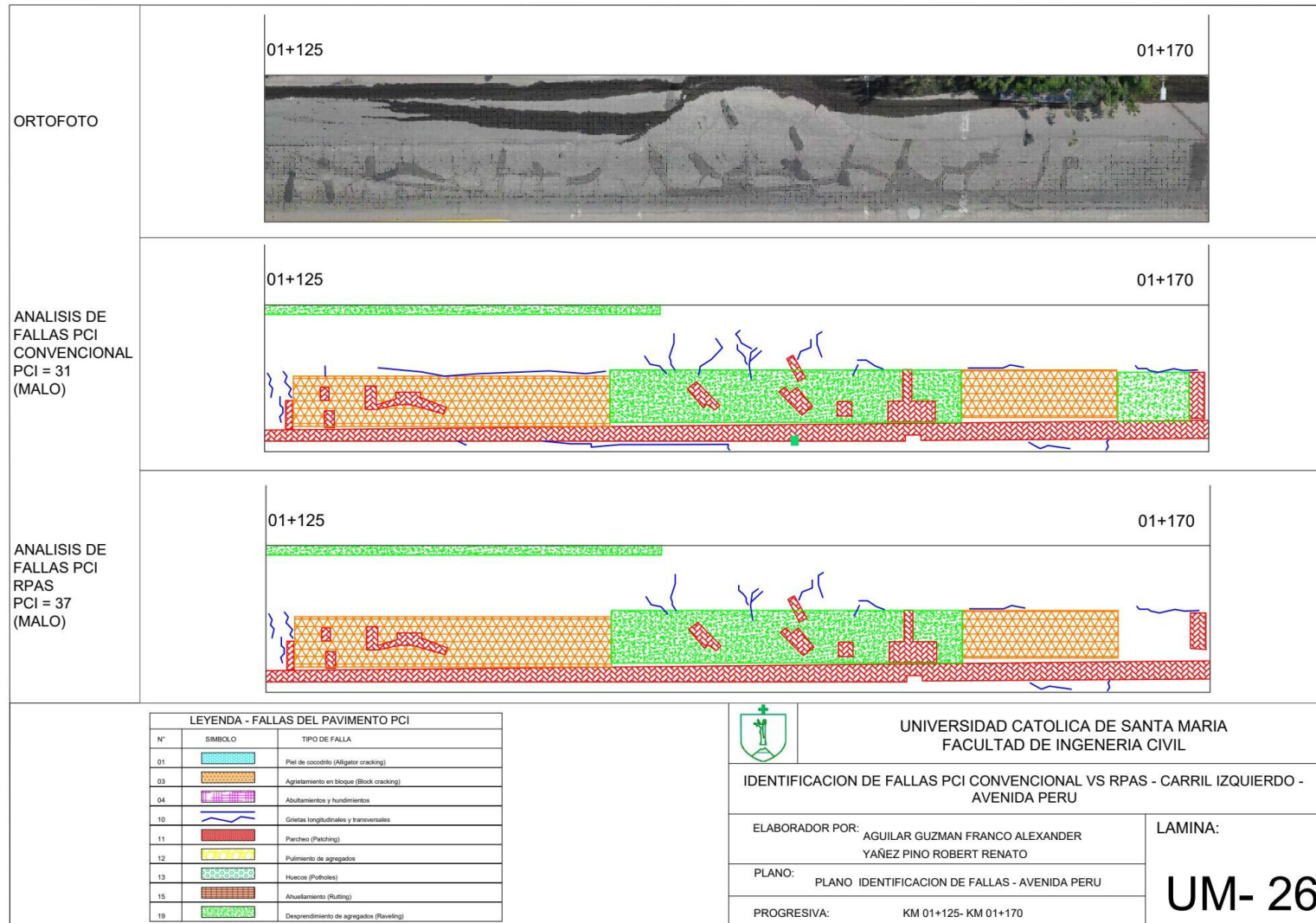
UM 24 (01+035-01+080)



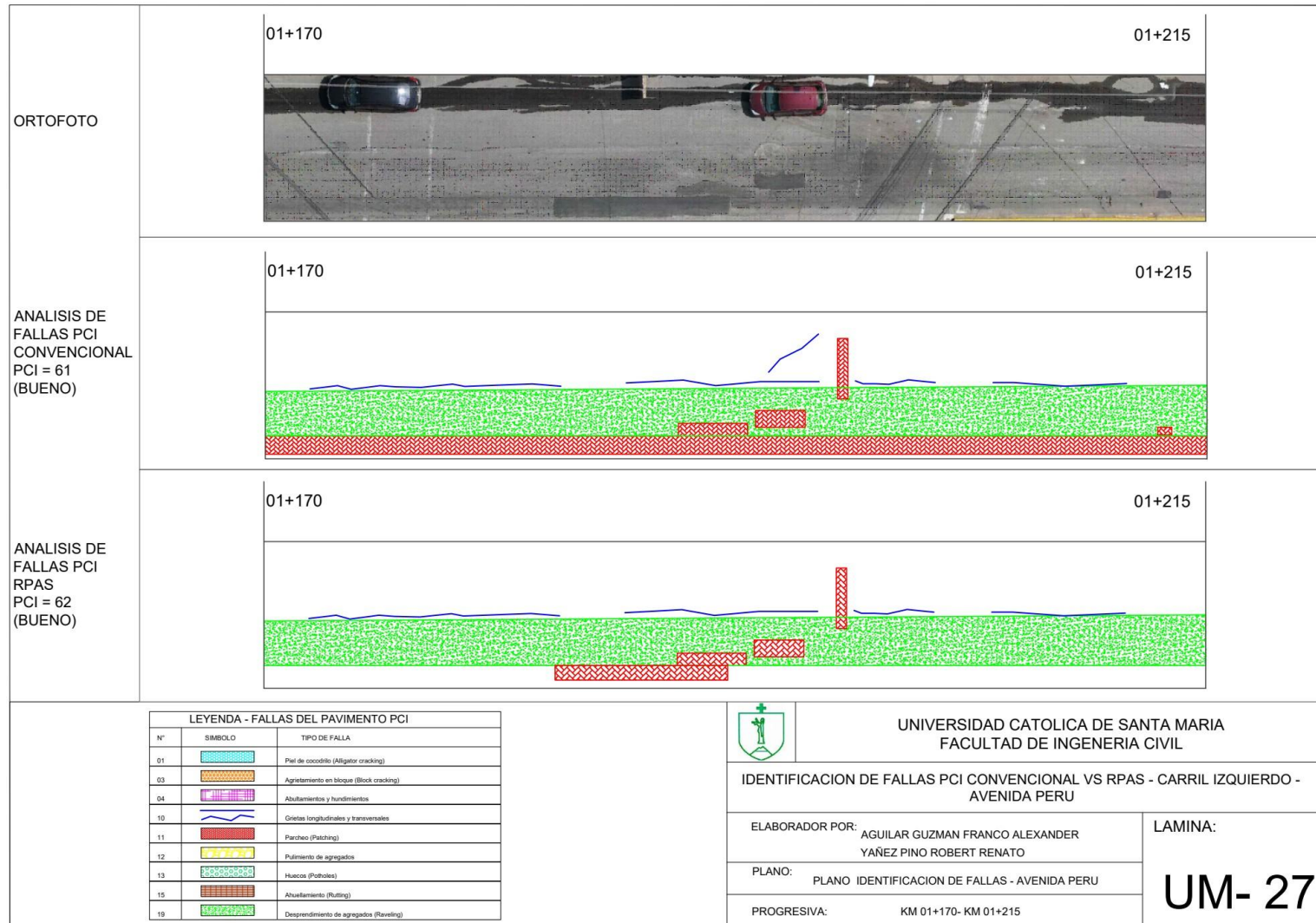
UM 25 (01+080-01+125)



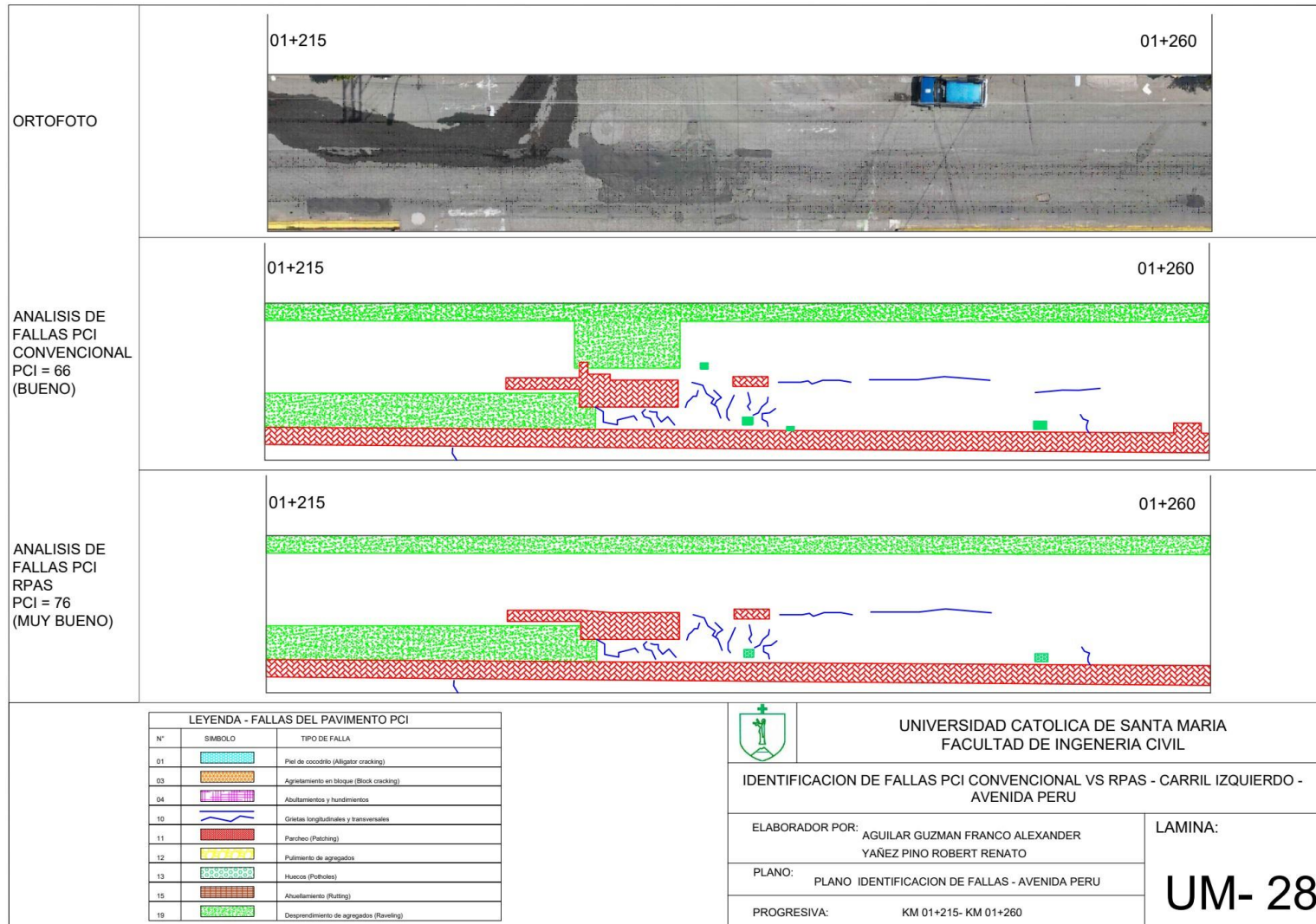
UM 26 (01+125-01+170)



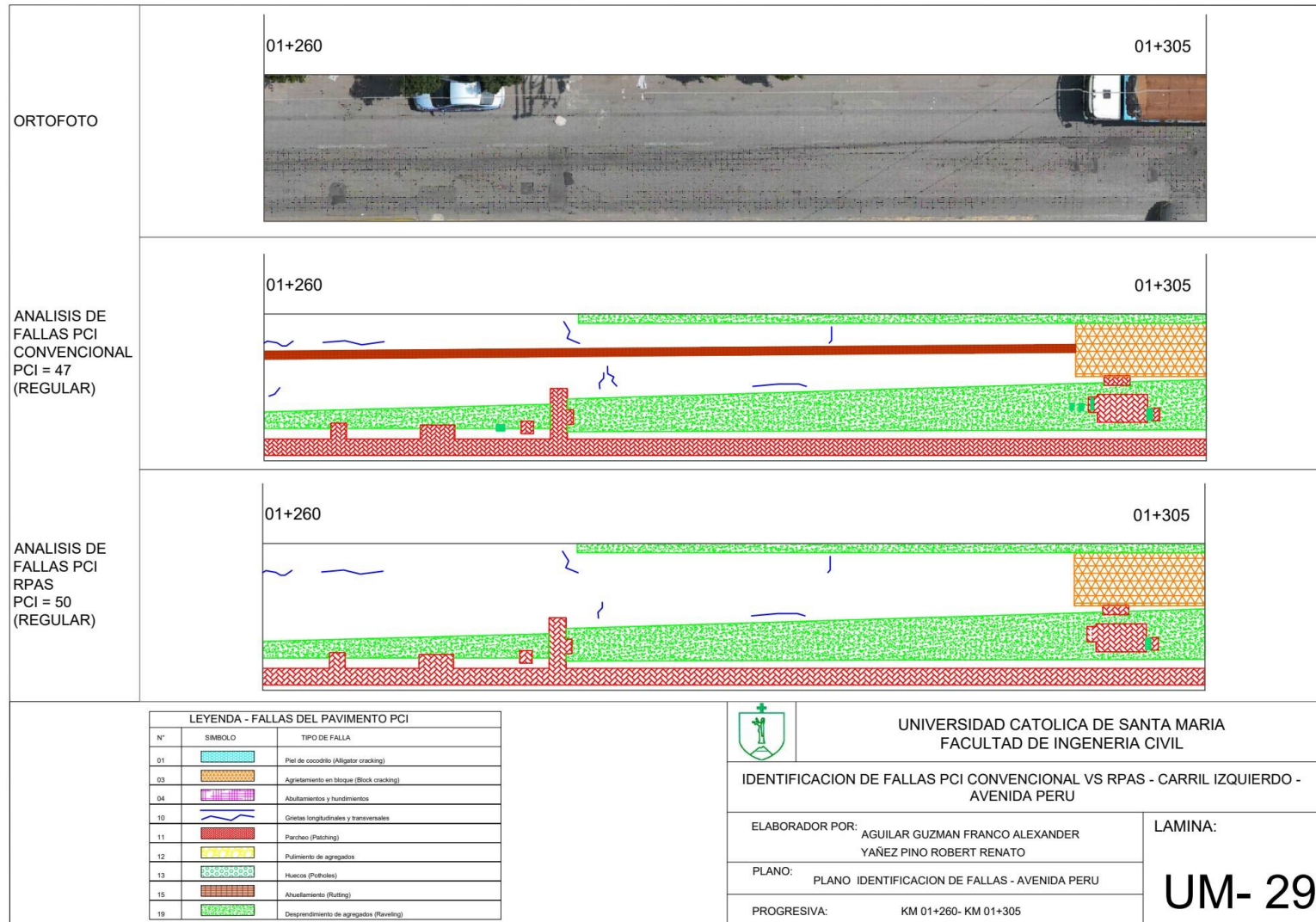
UM 27 (01+170-01+215)



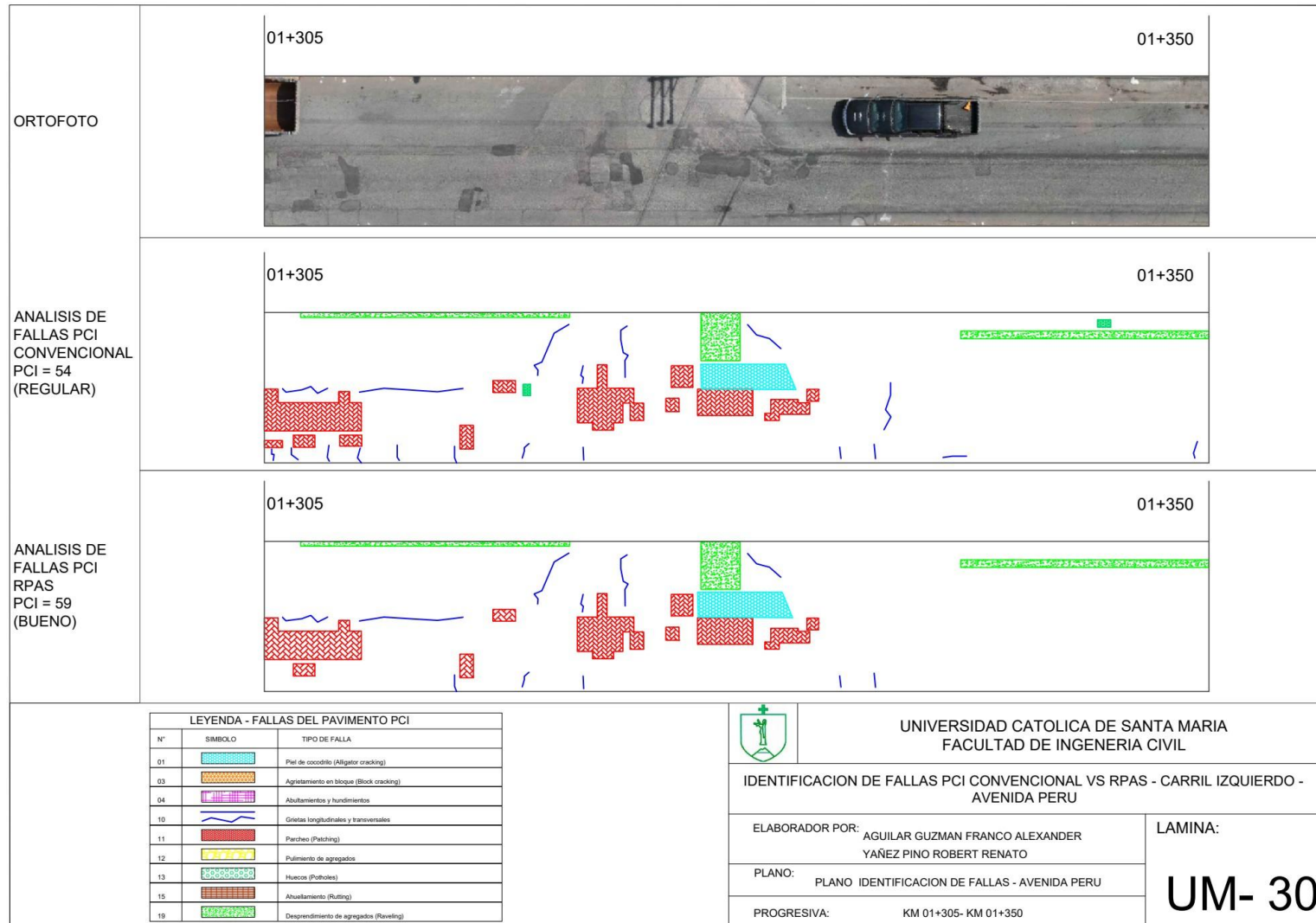
UM 28 (01+215-01+260)



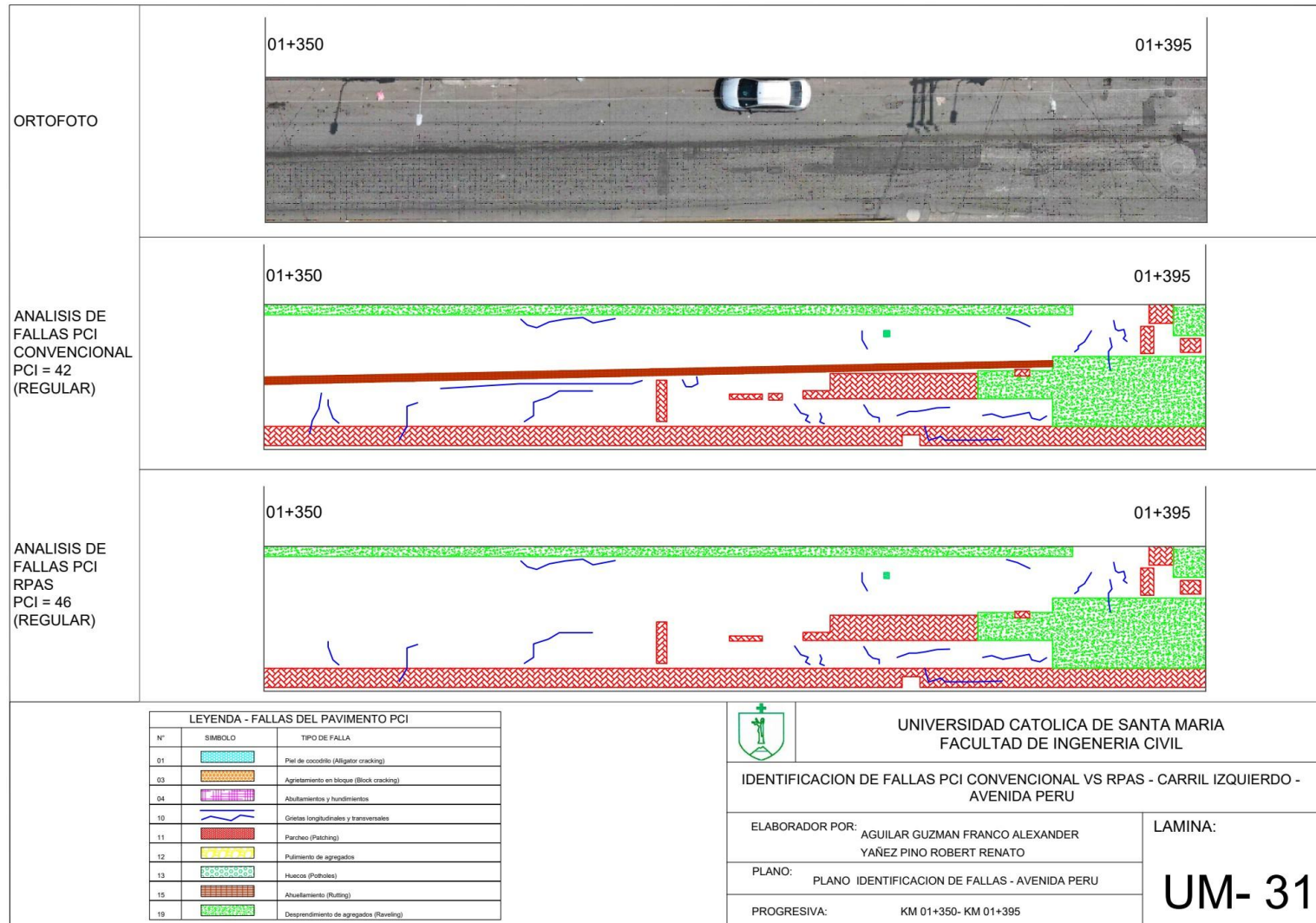
UM 29 (01+260-01+305)



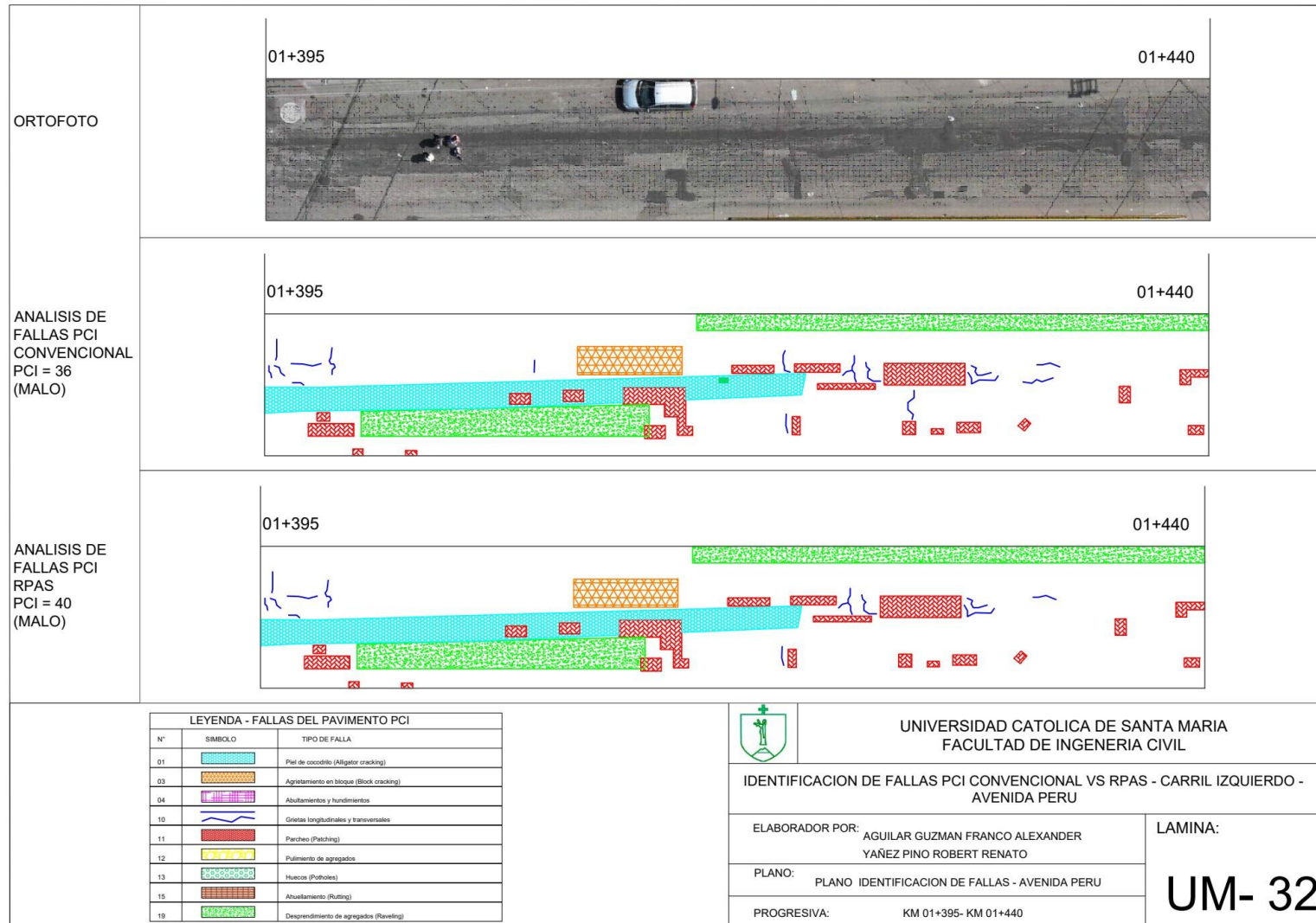
UM 30 (01+305-01+350)



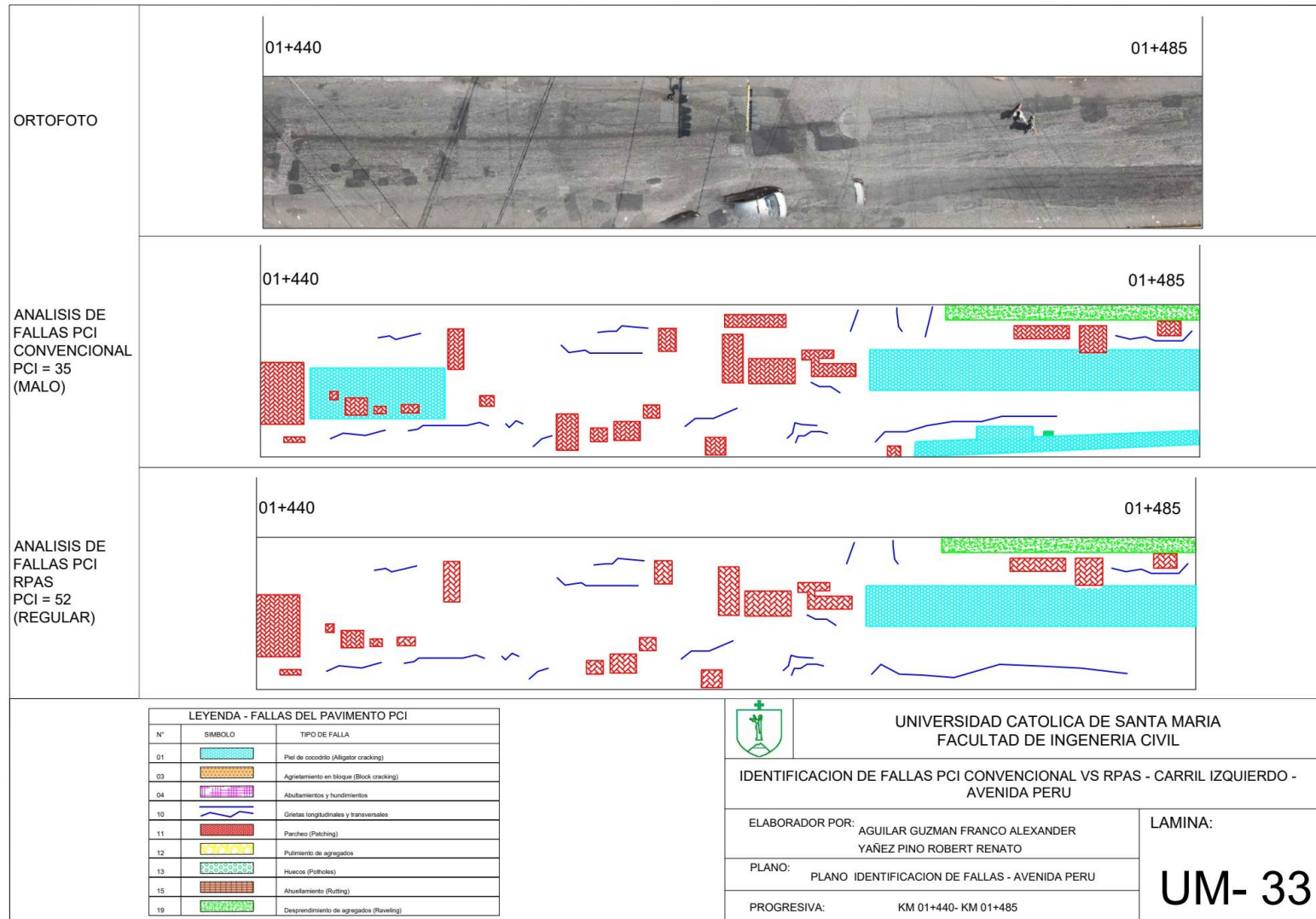
UM 31 (01+350-01+395)



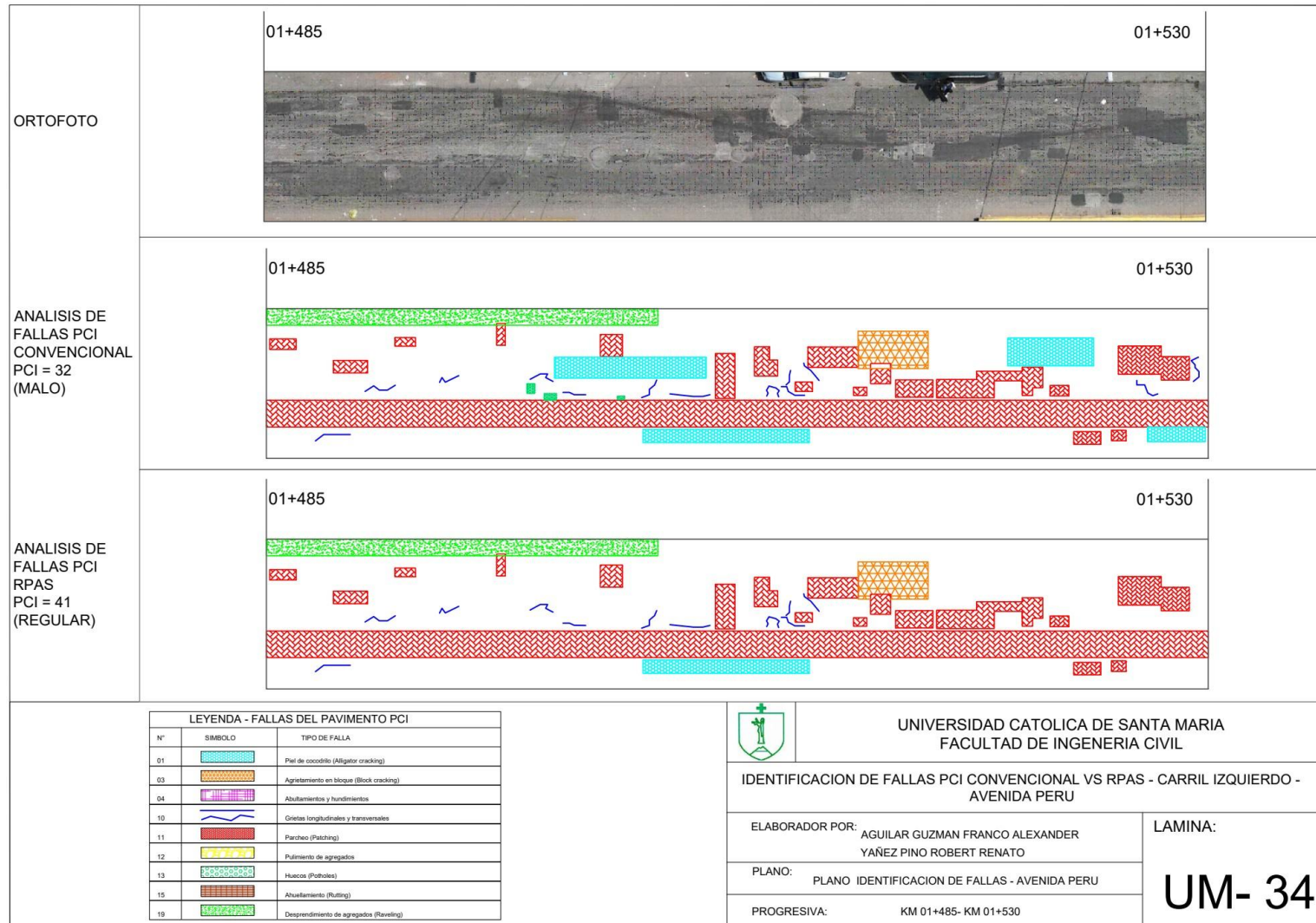
UM 32 (01+395-01+440)



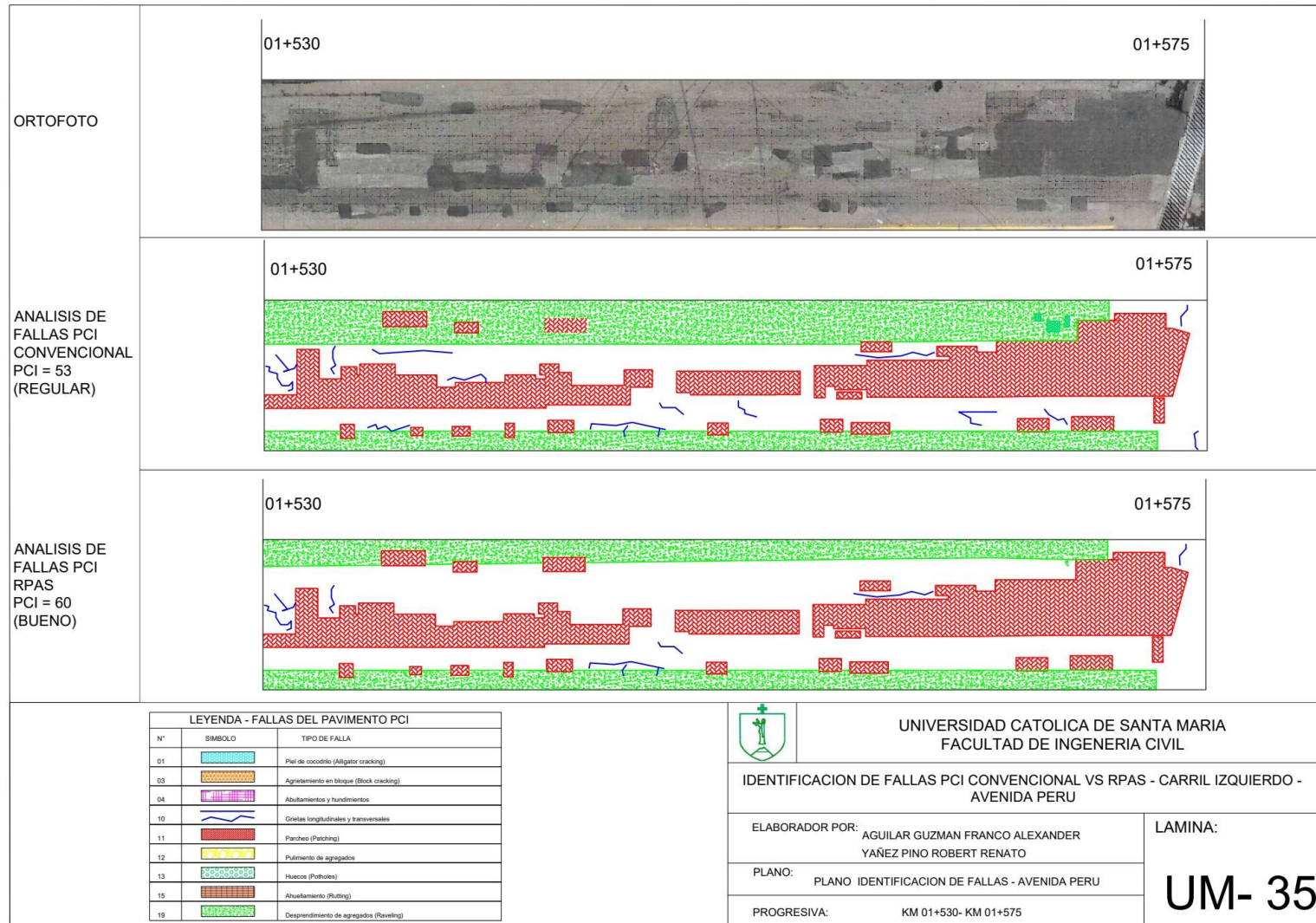
UM 33 (01+440-01+485)



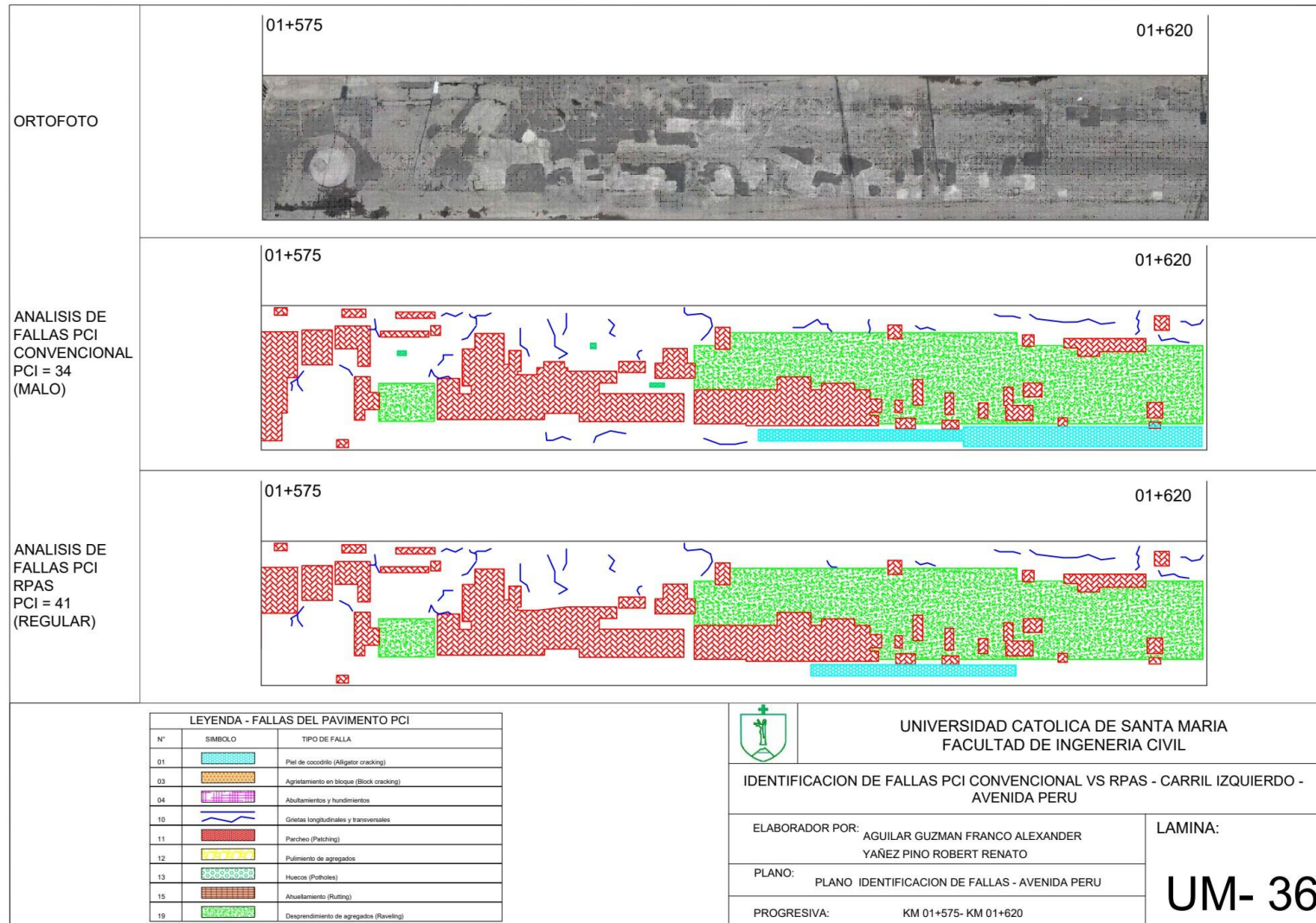
UM 34 (01+485-01+530)



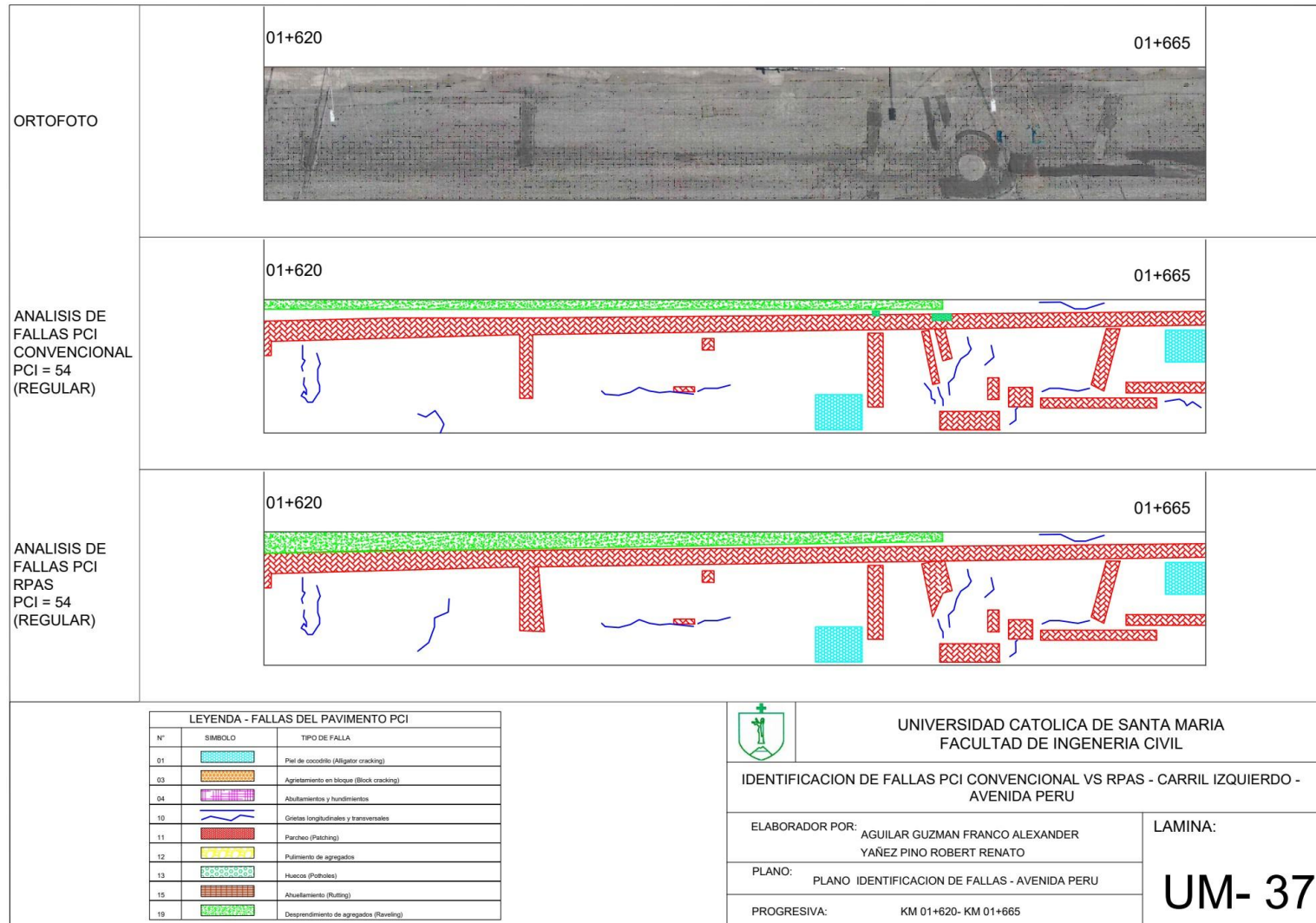
UM 35 (01+530-01+575)



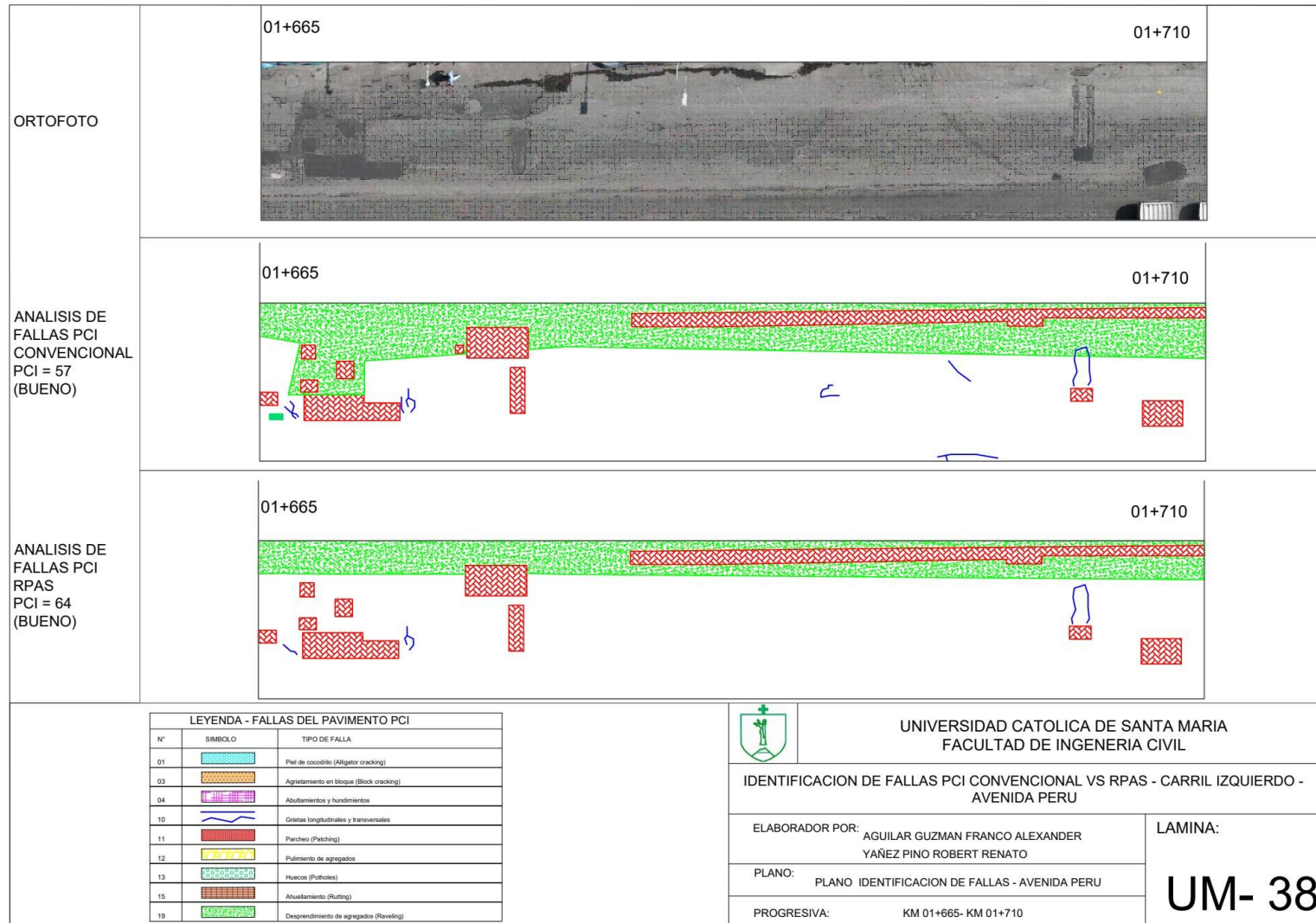
UM 36 (01+575-01+620)



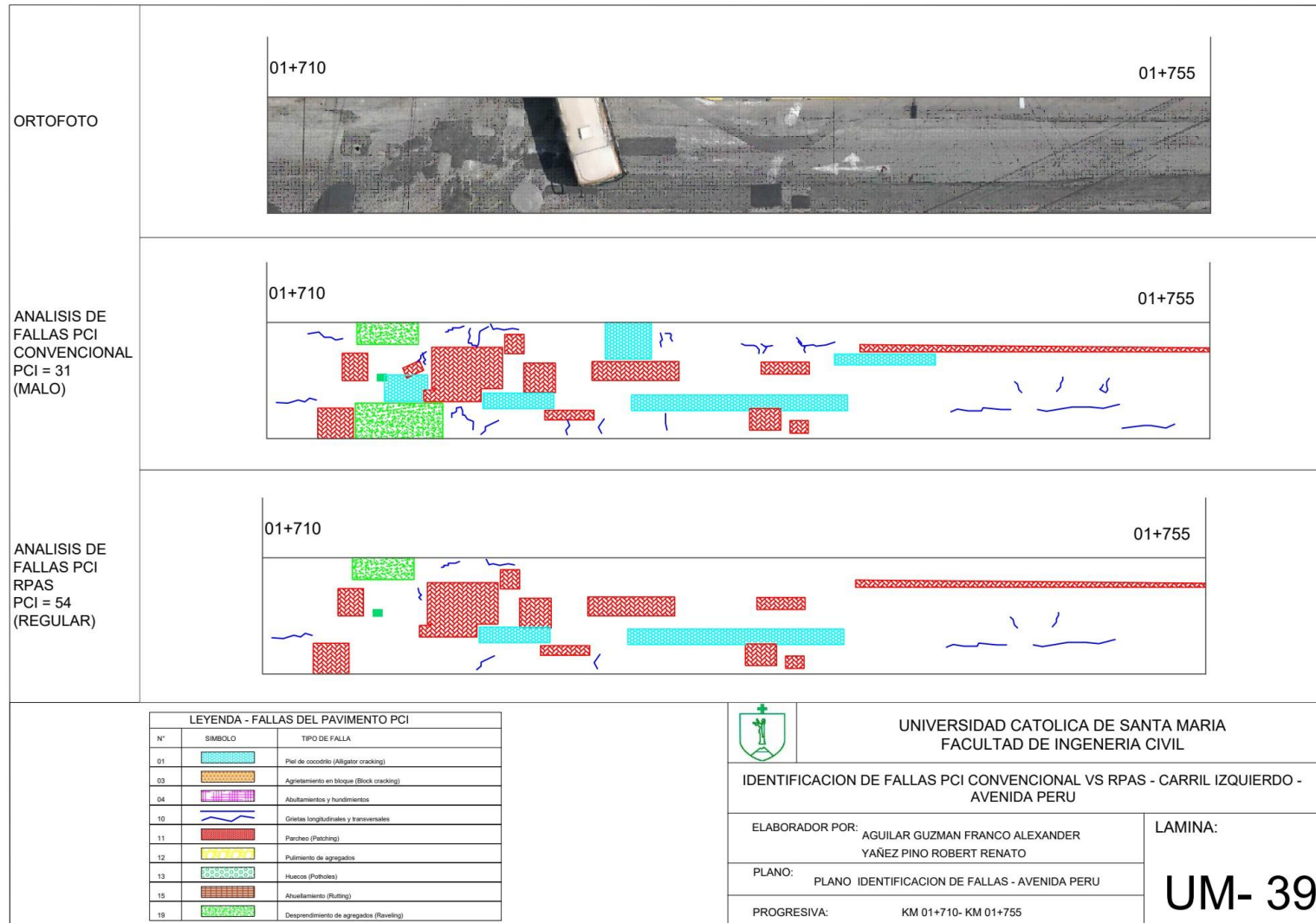
UM 37 (01+620-01+665)



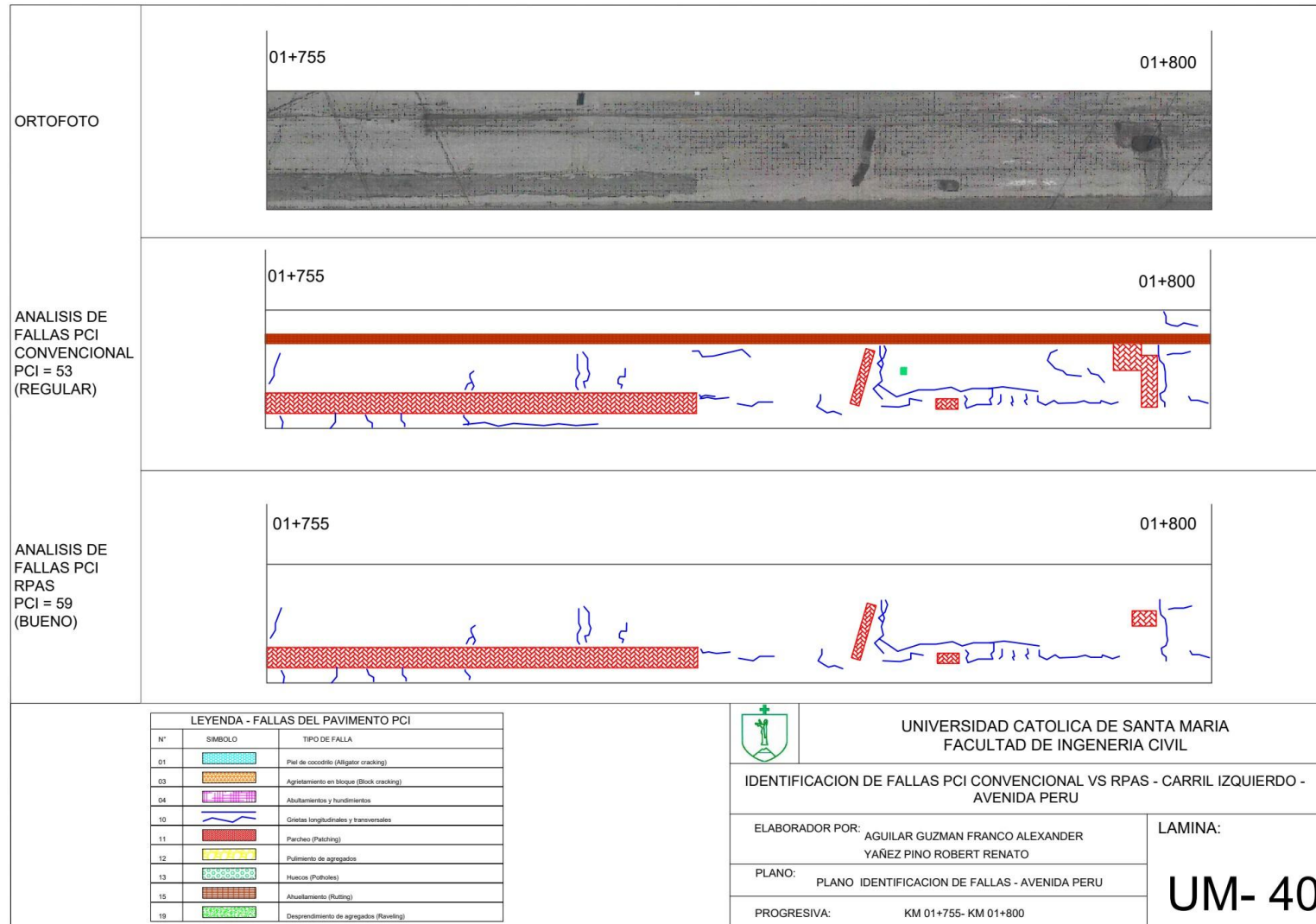
UM 38 (01+665-01+710)



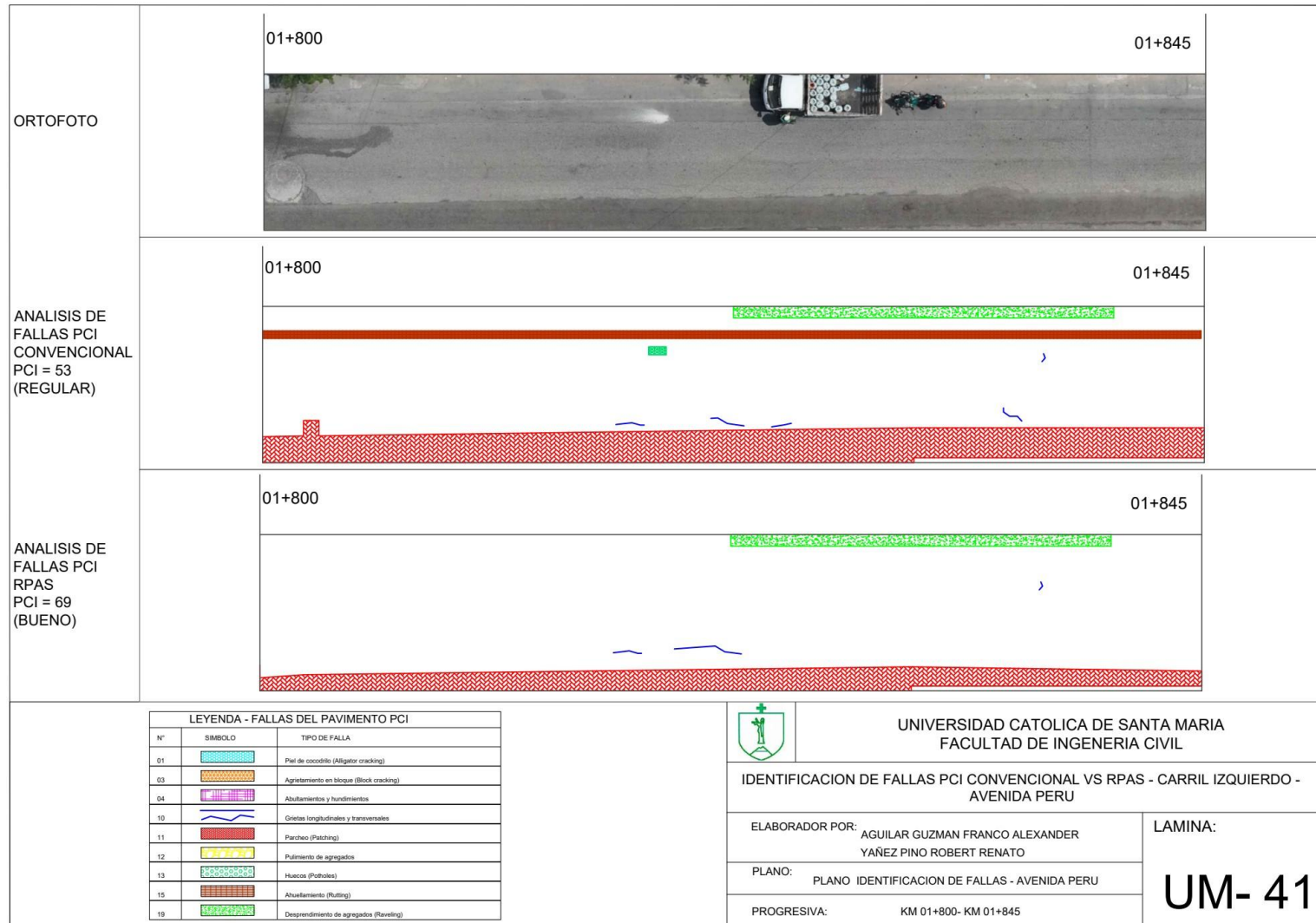
UM 39 (01+710-01+755)



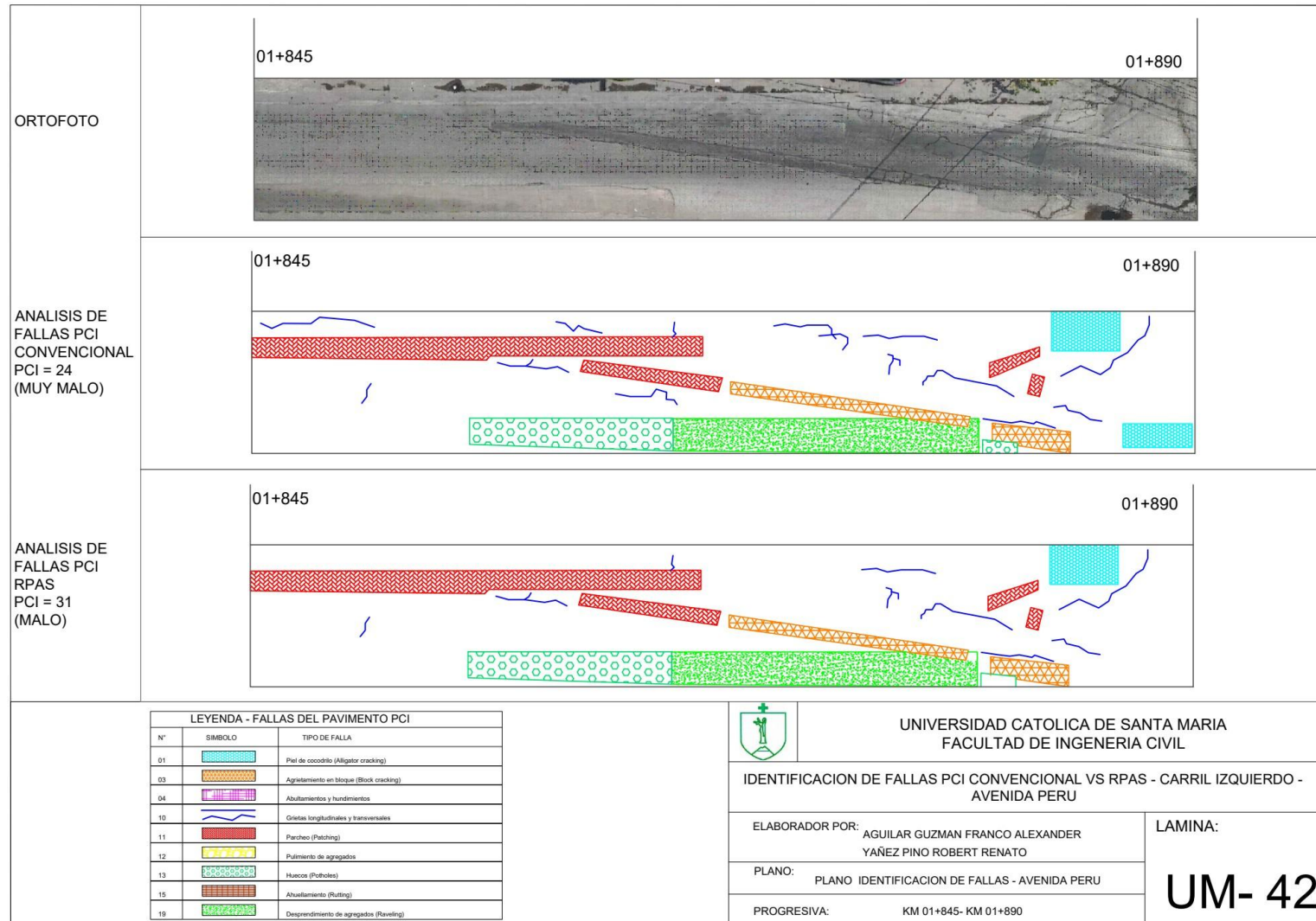
UM 40 (01+755-01+800)



UM 41 (01+800-01+845)

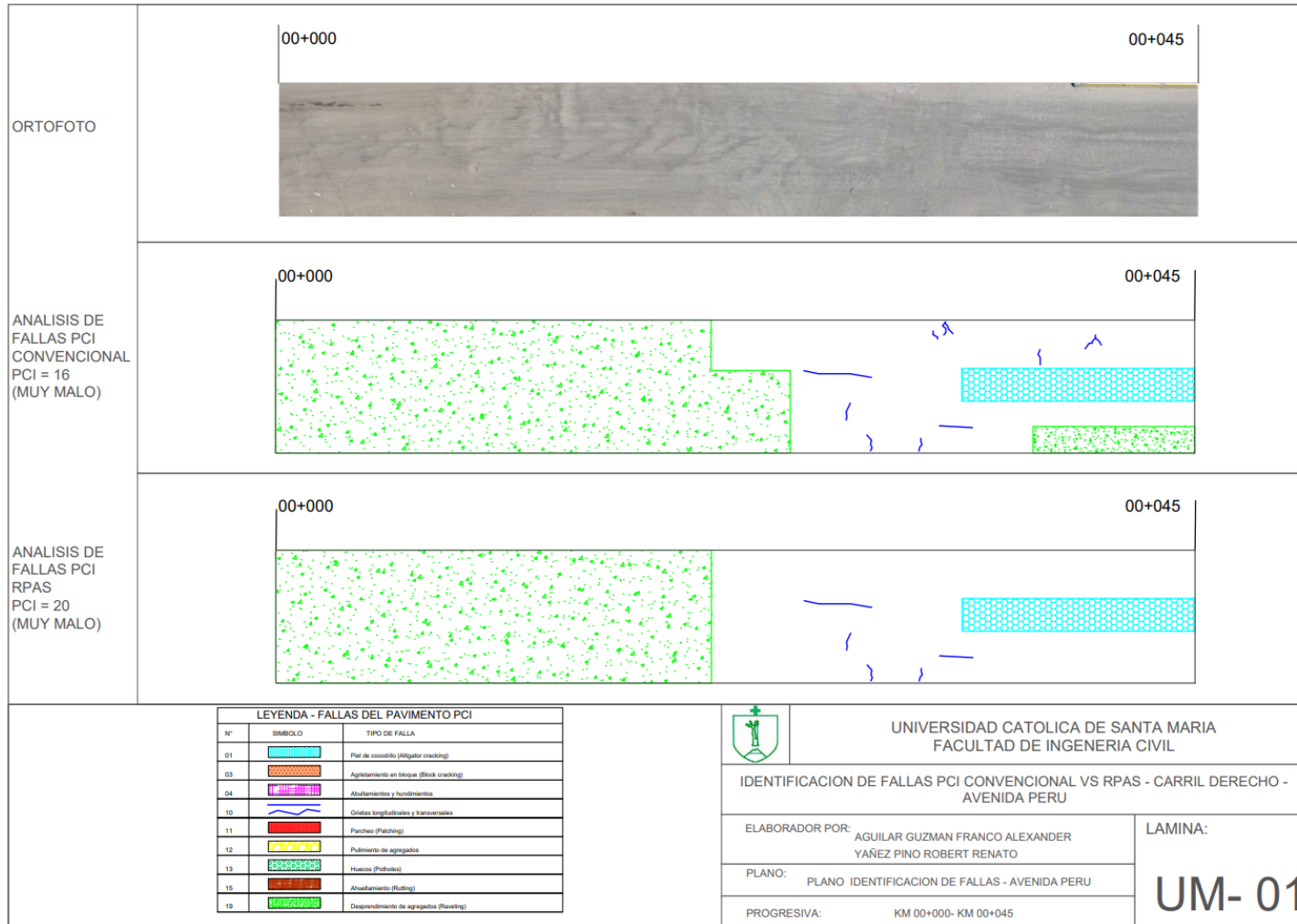


UM 42 (01+845-01+890)



Anexo 5. Identificación de fallas de Carril derecho – Método PCI convencional vs RPAS

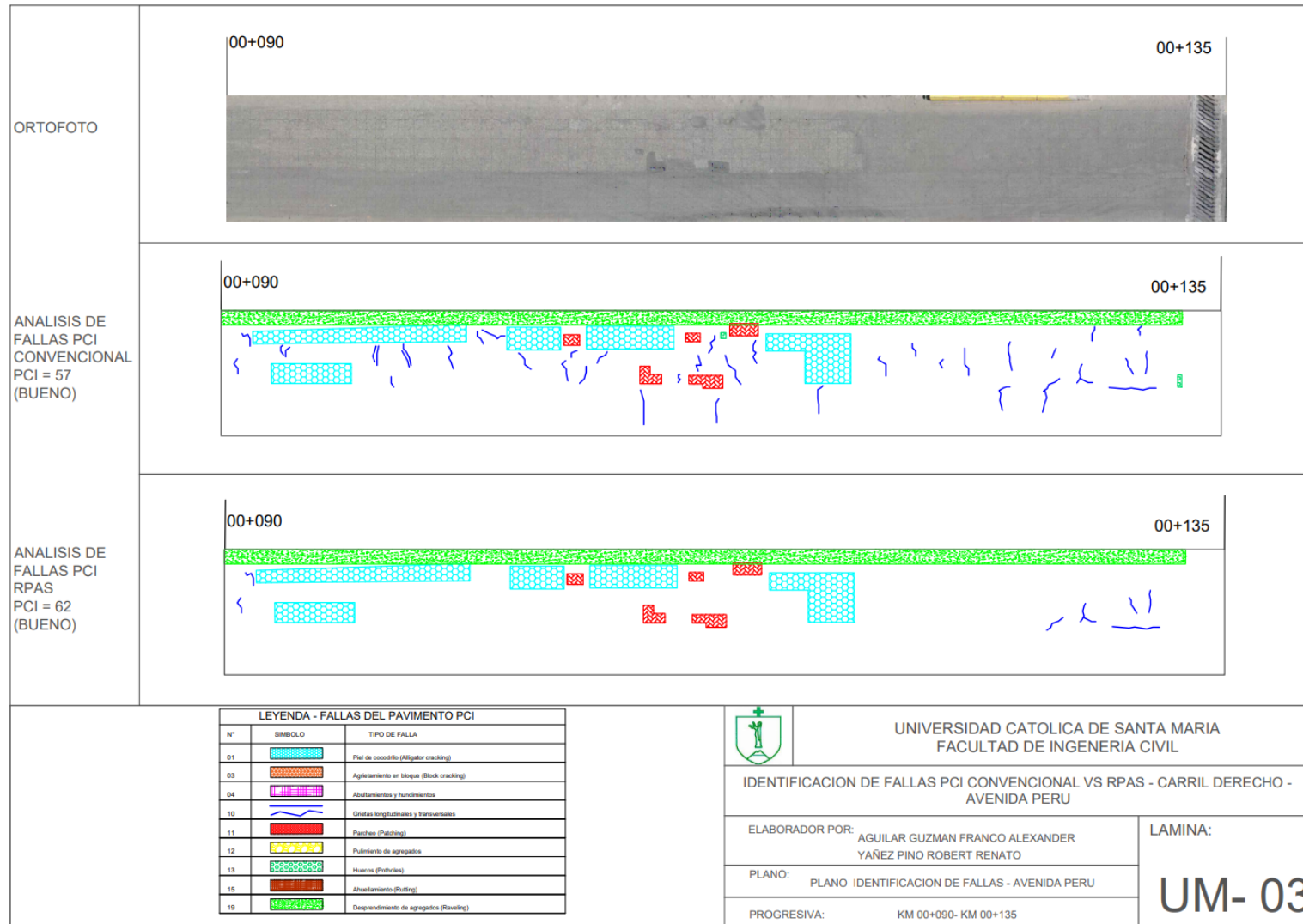
UM 01 (00+000-00+045)



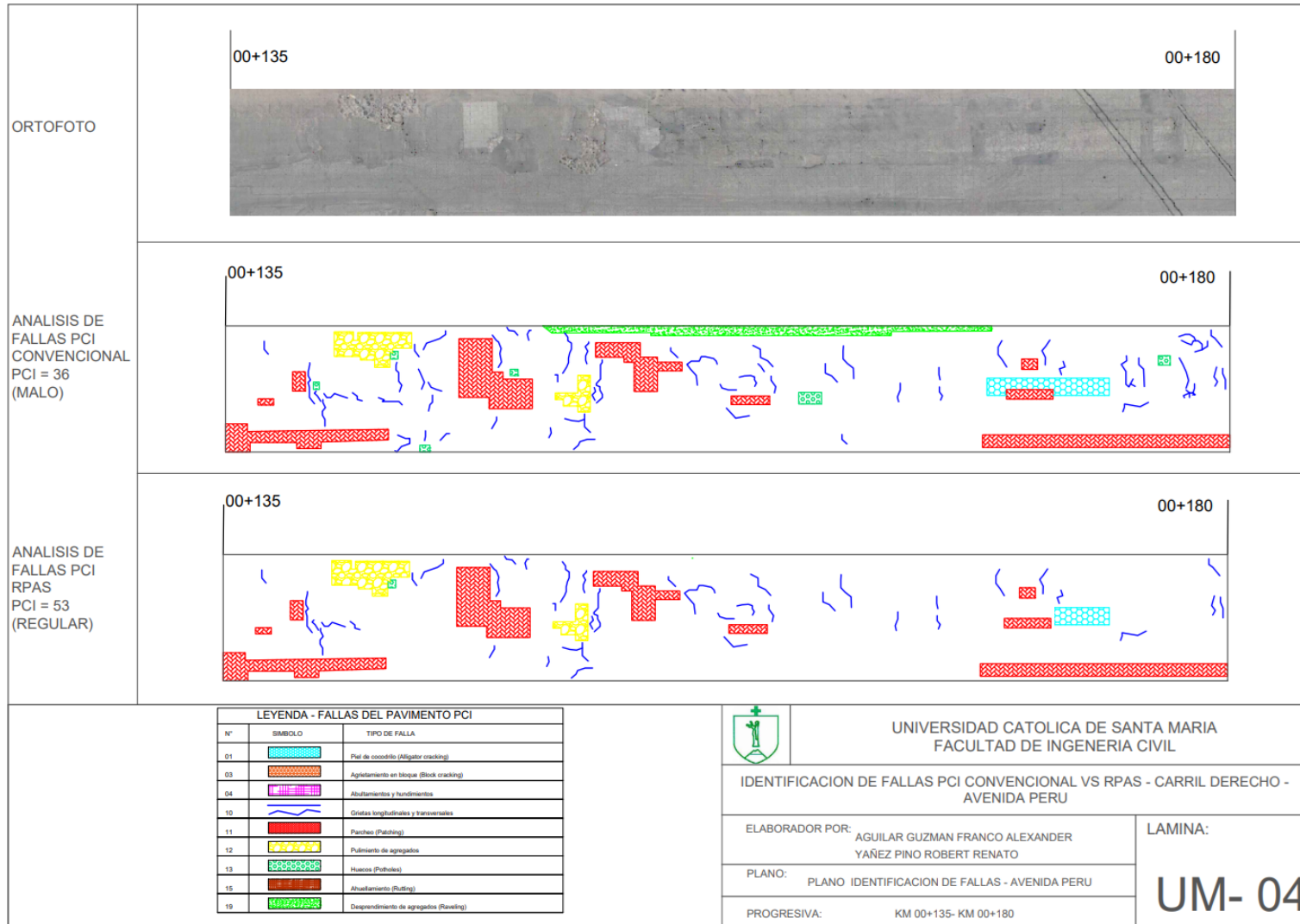
UM 02 (00+045-00+090)



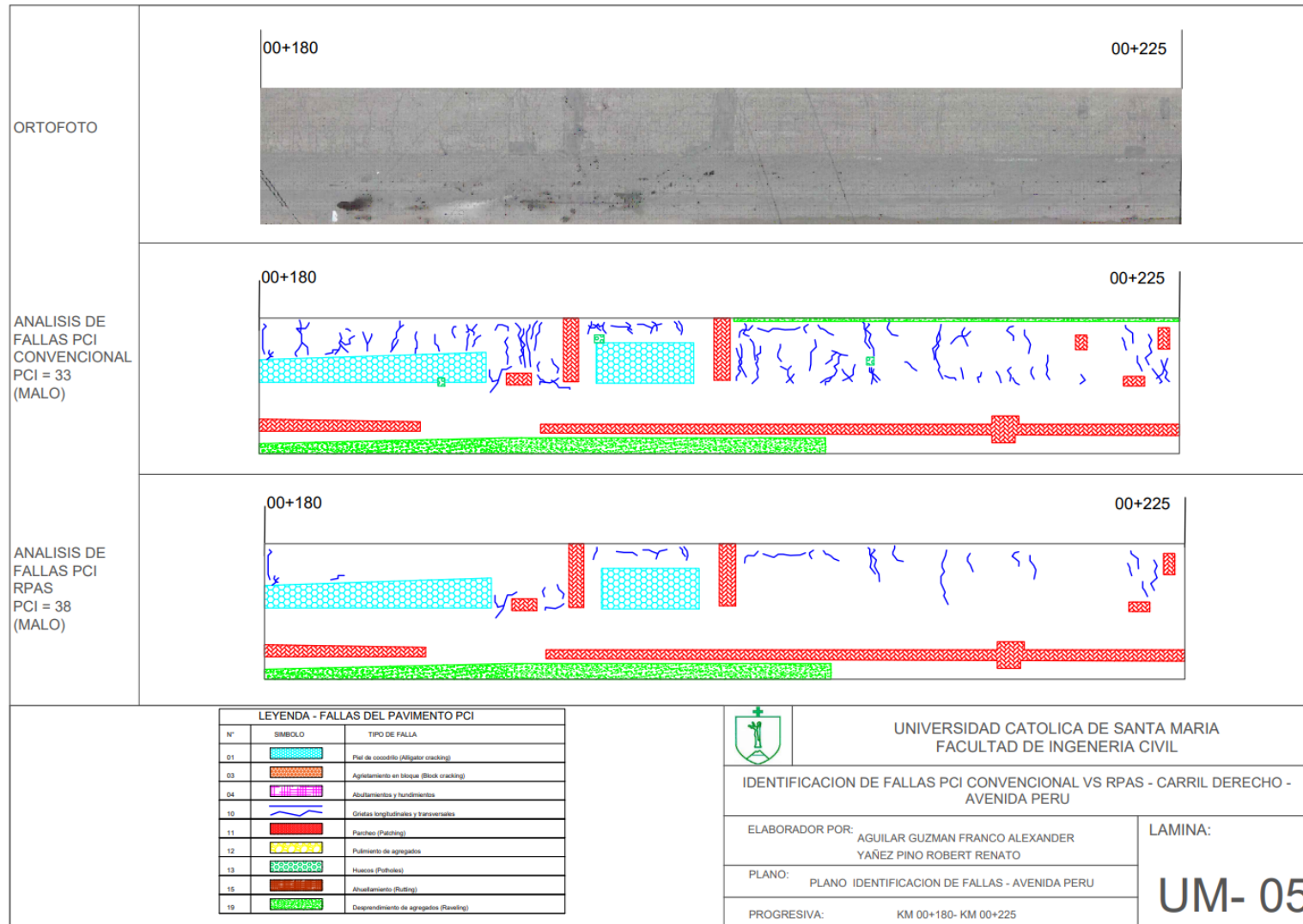
UM 03 (00+090-00+135)



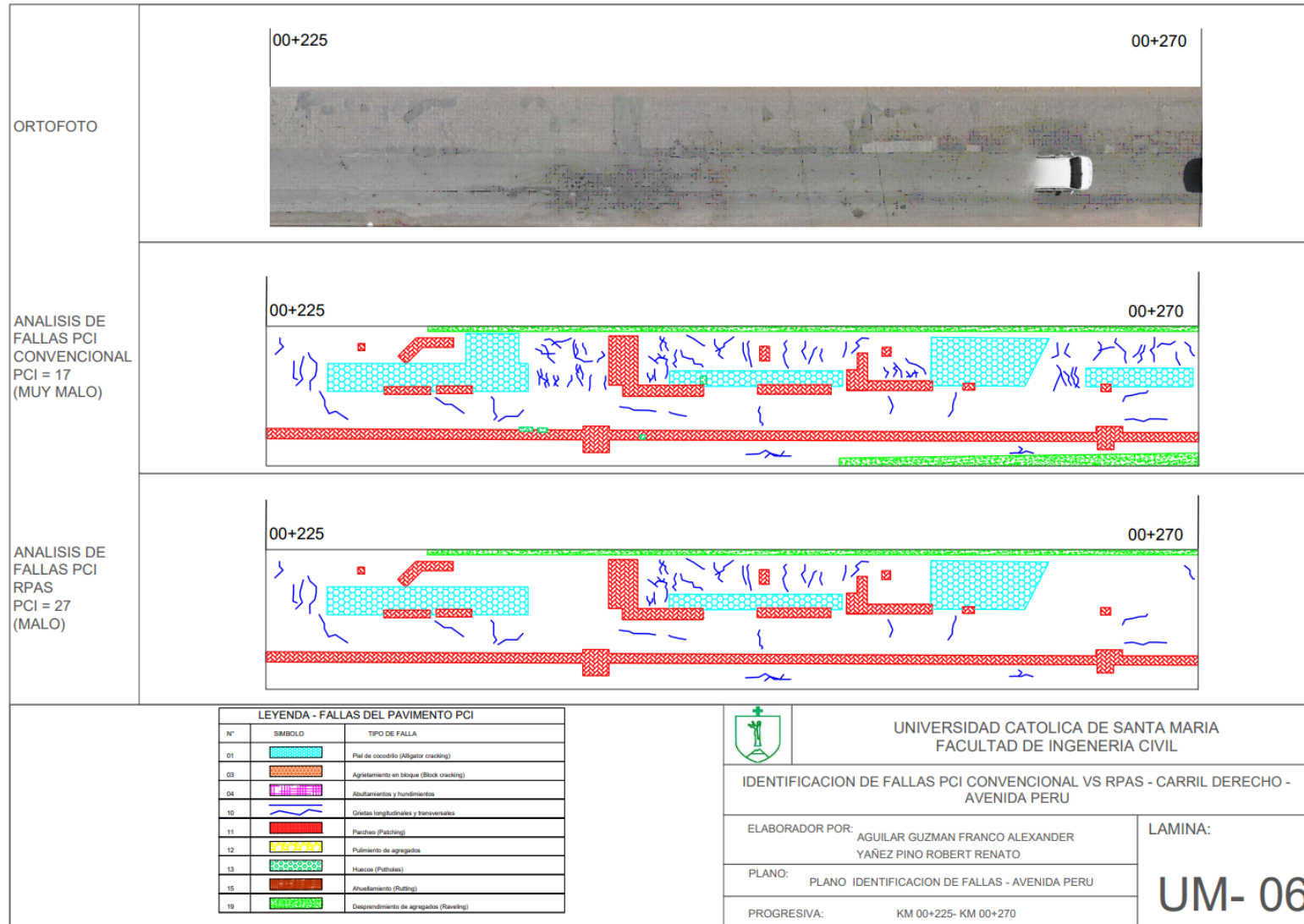
UM 04 (00+135-00+180)



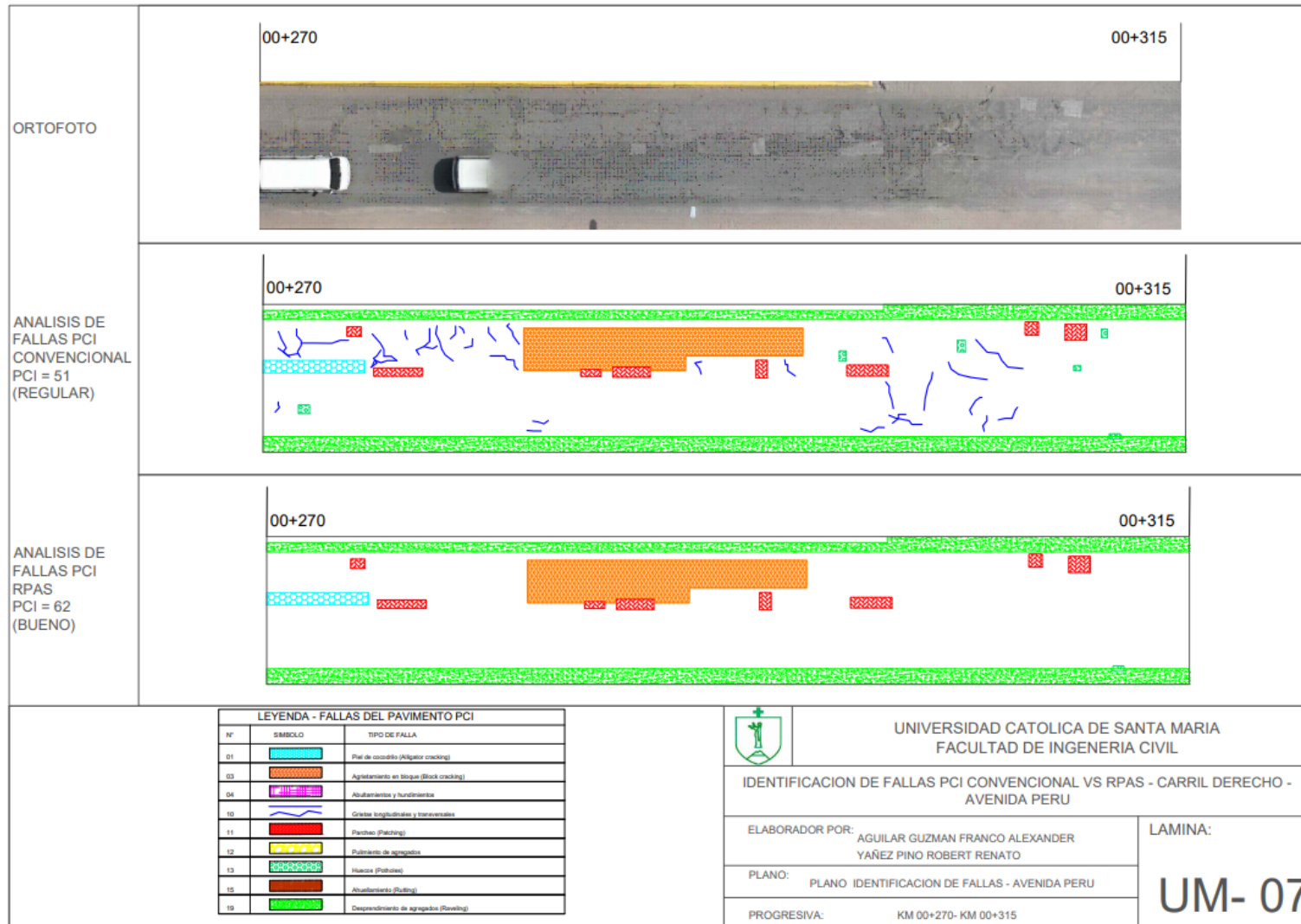
UM 05 (00+180-00+225)



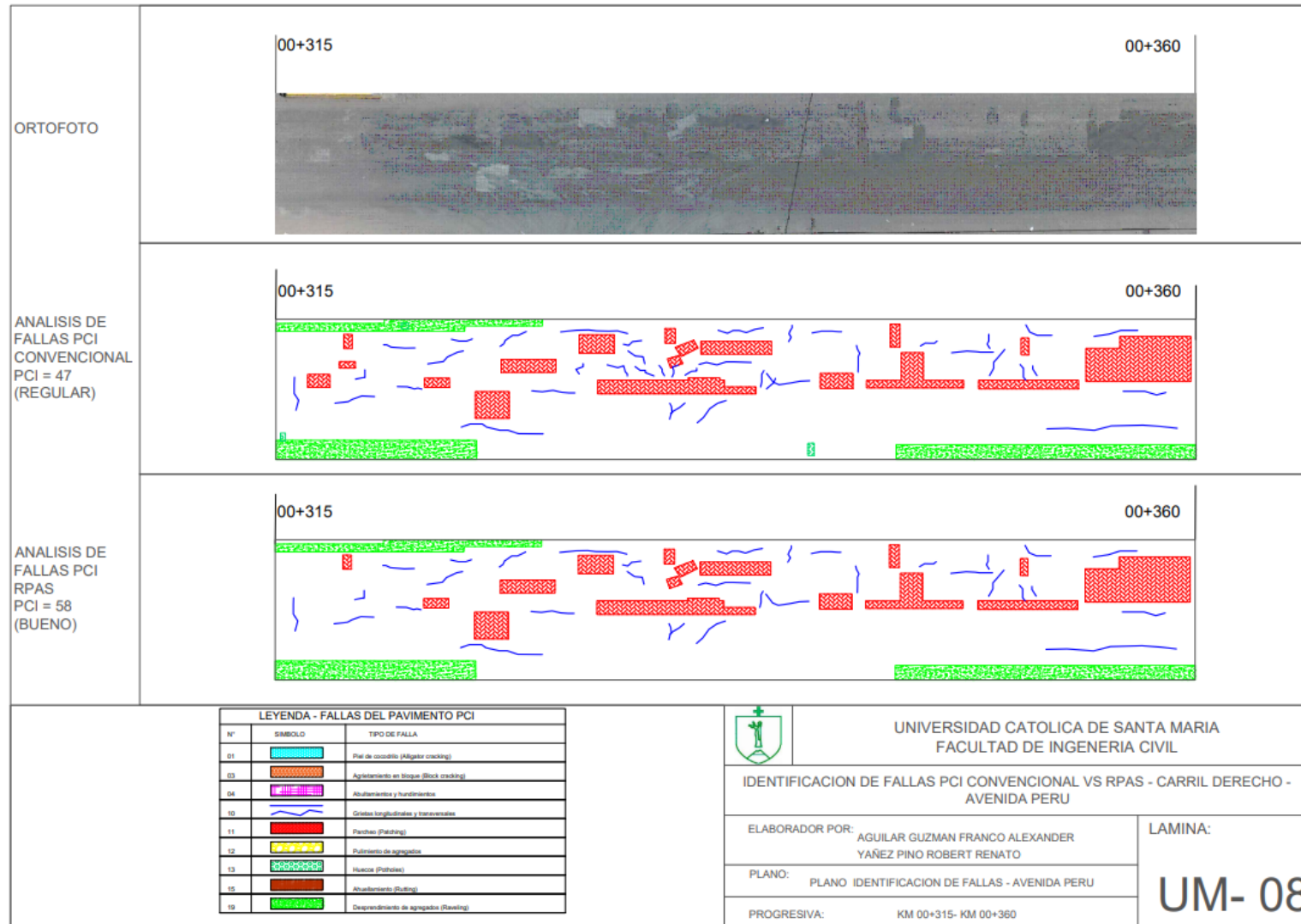
UM 06 (00+225-00+270)



UM 07 (00+270-00+315)



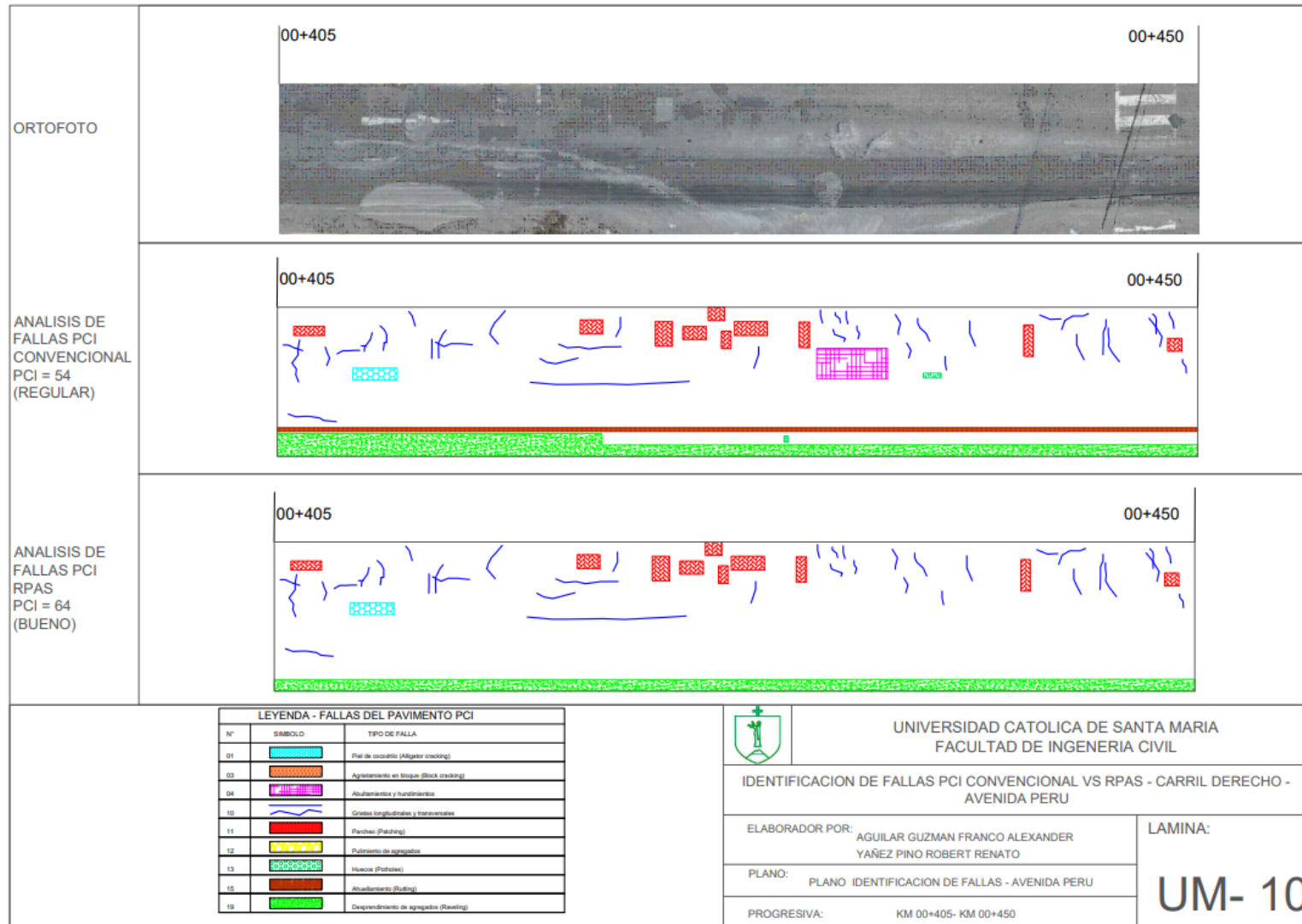
UM 08 (00+315-00+360)



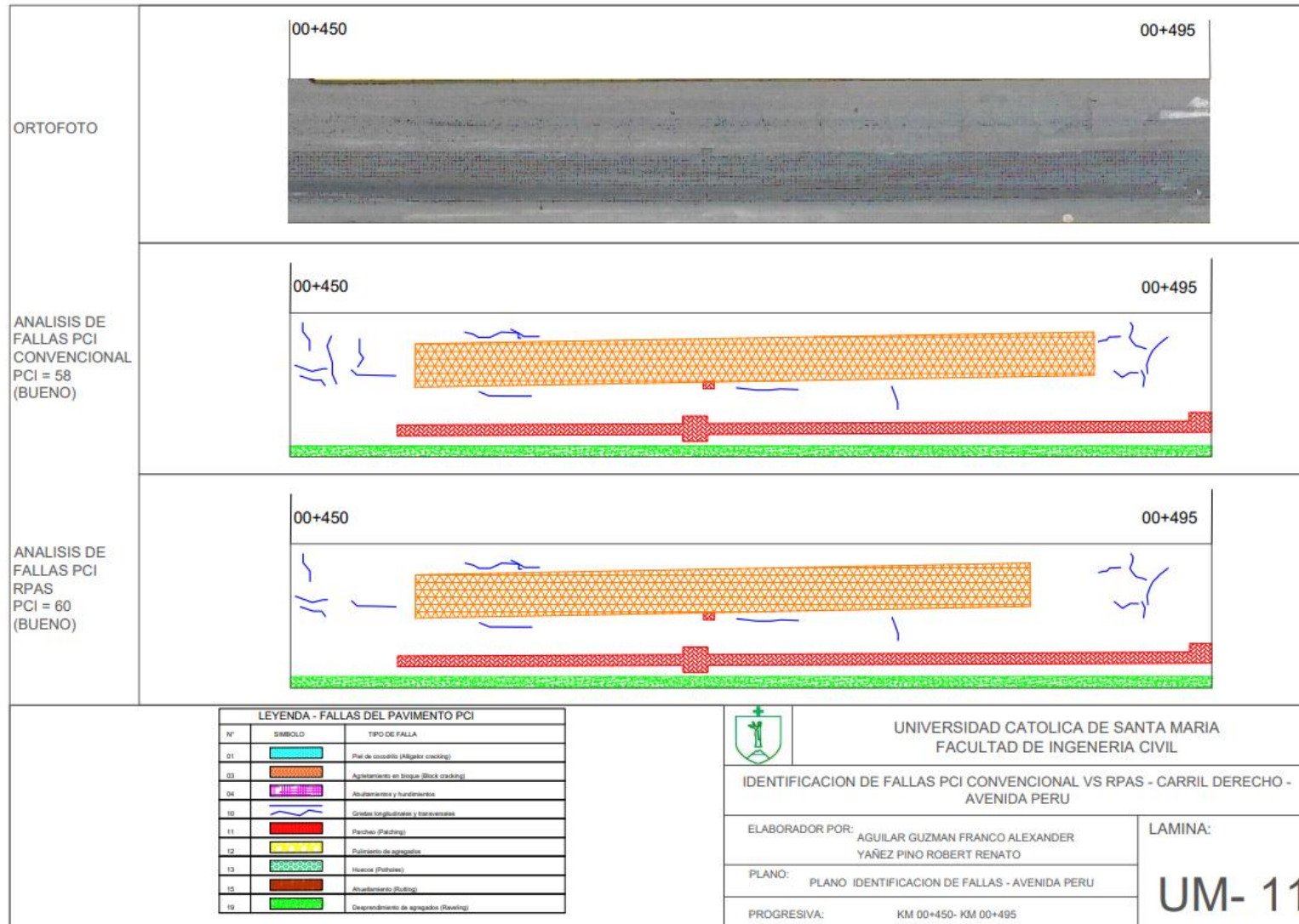
UM 09 (00+360-00+405)



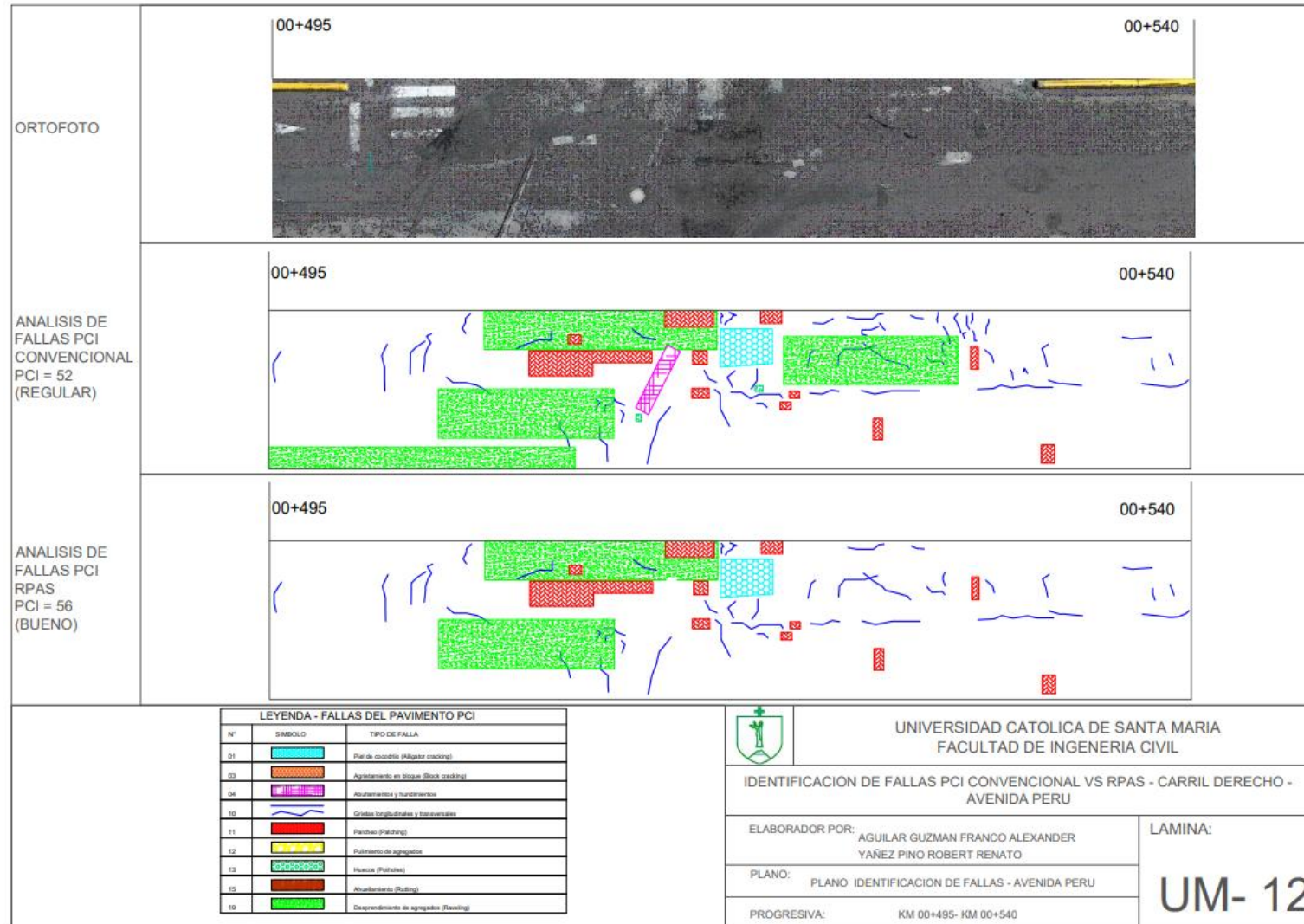
UM 10 (00+405-00+450)



UM 11 (00+450-00+495)



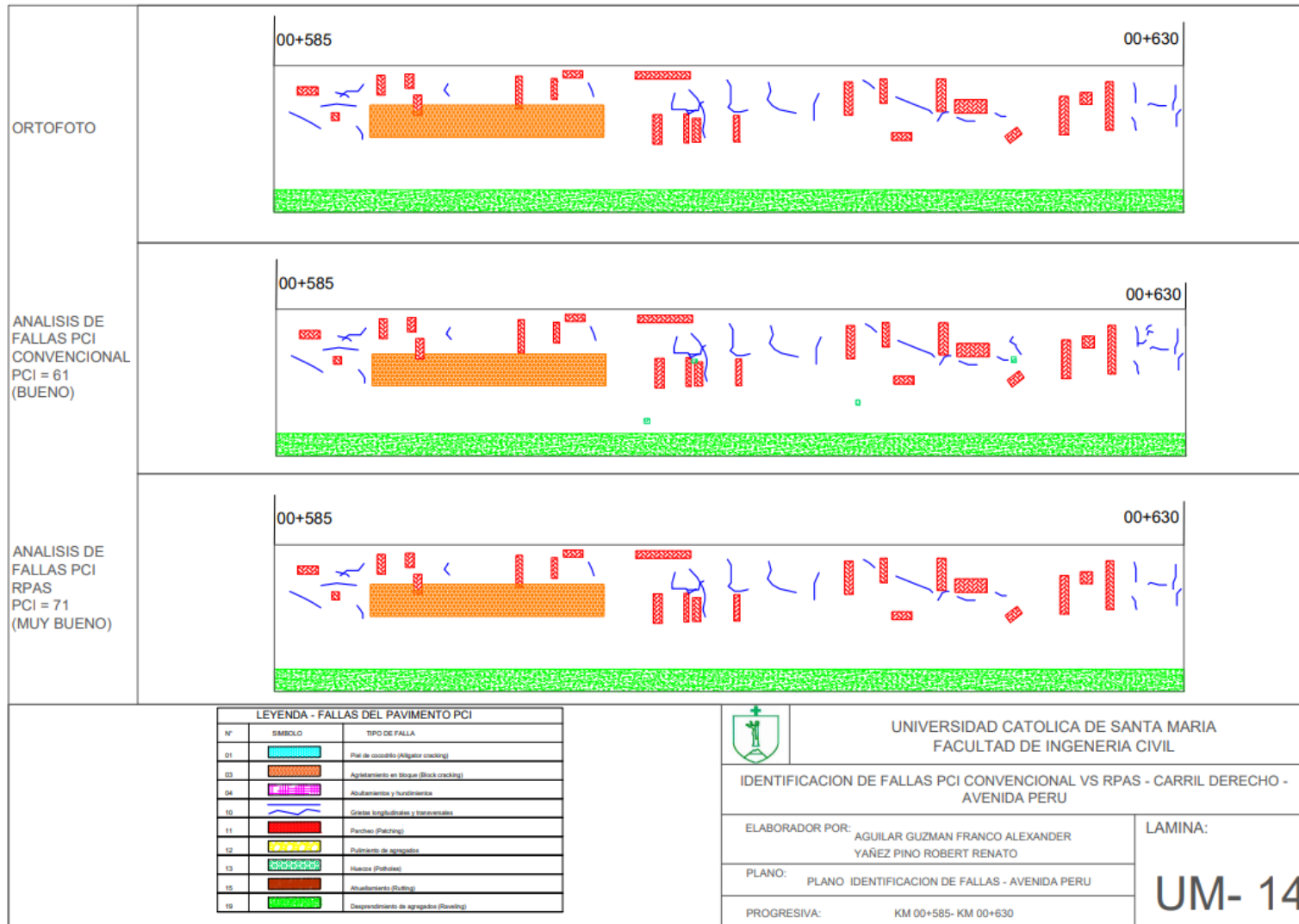
UM 12 (00+495-00+540)



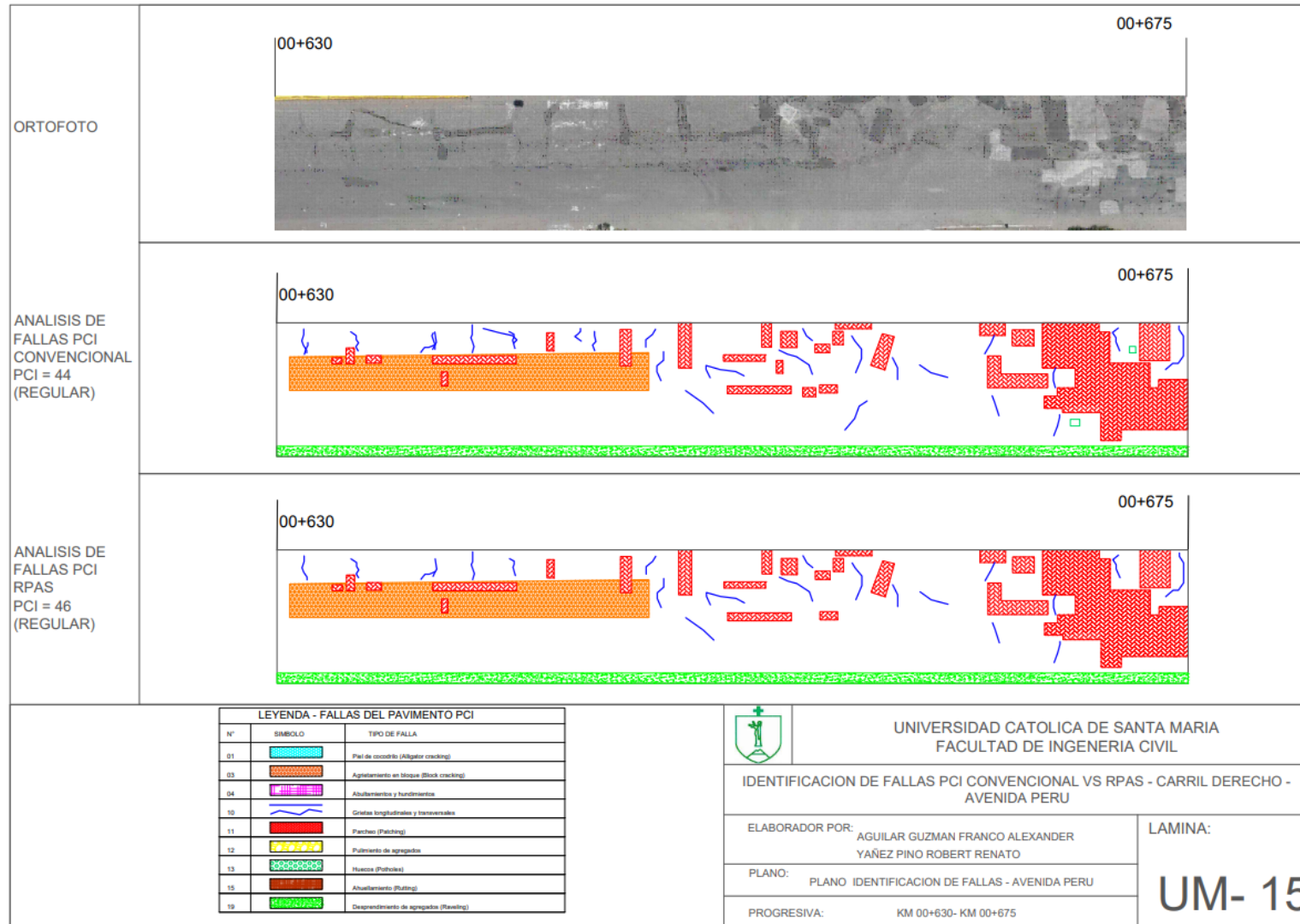
UM 13 (00+540-00+585)



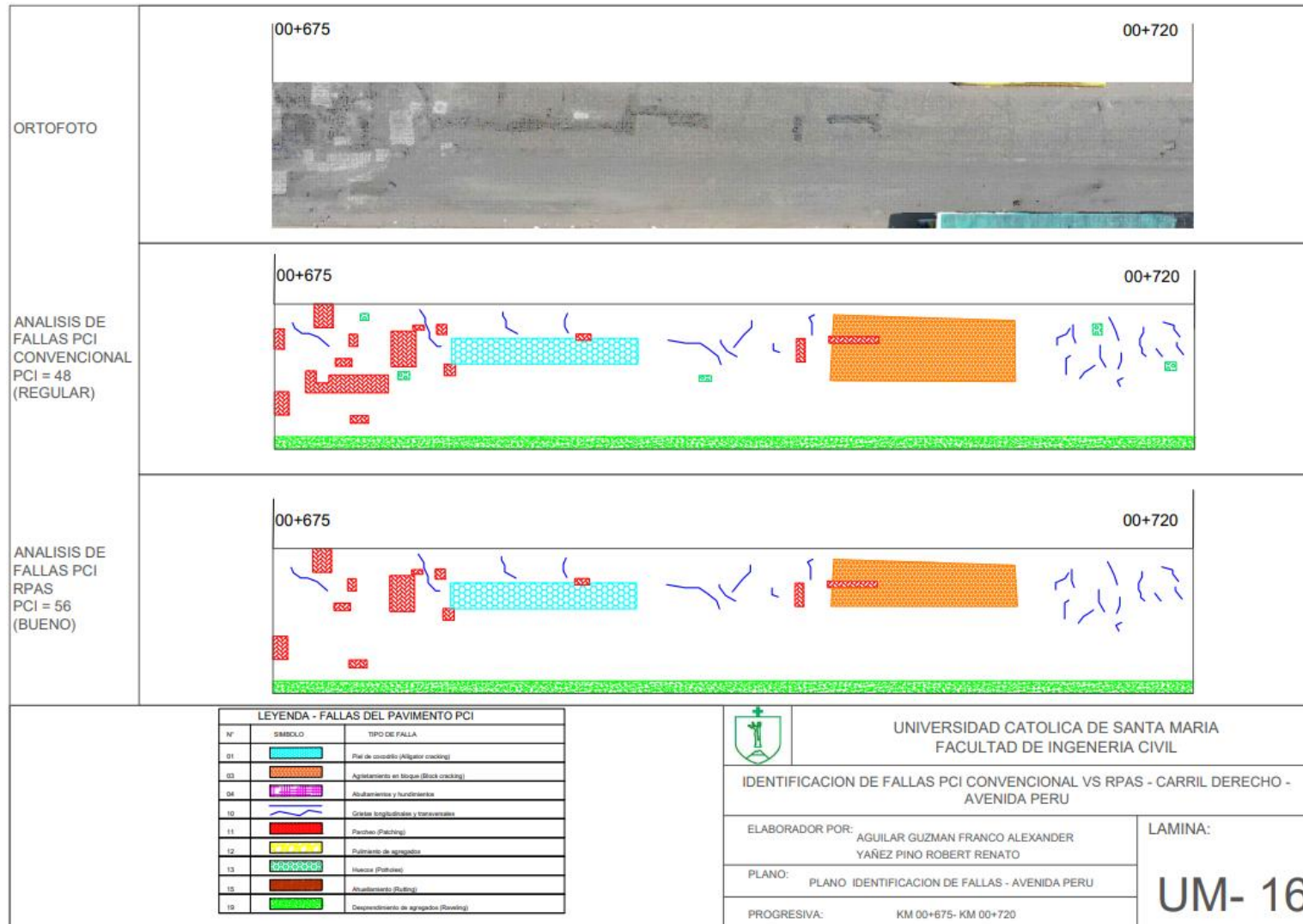
UM 14 (00+585-00+630)



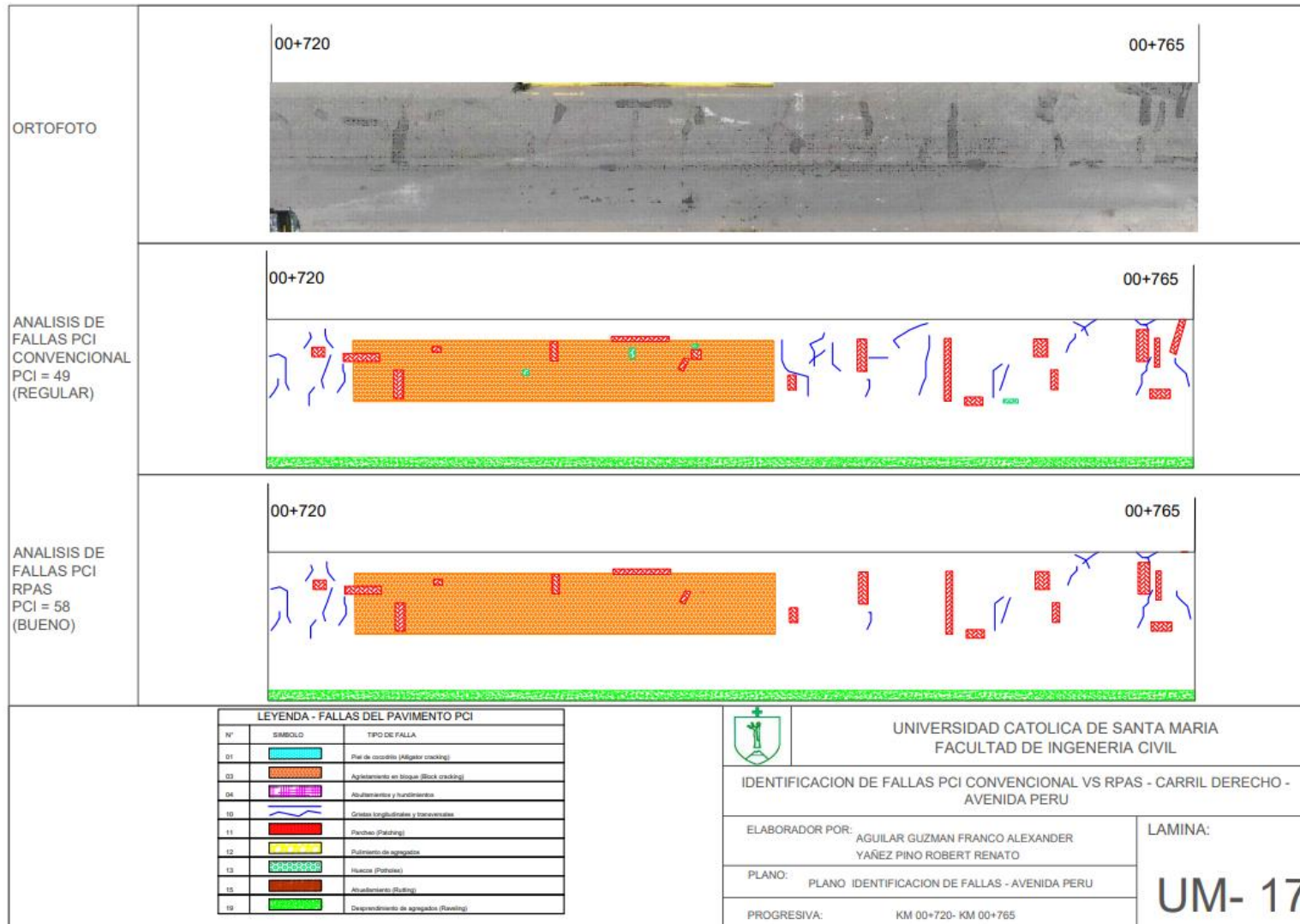
UM 15 (00+630-00+675)



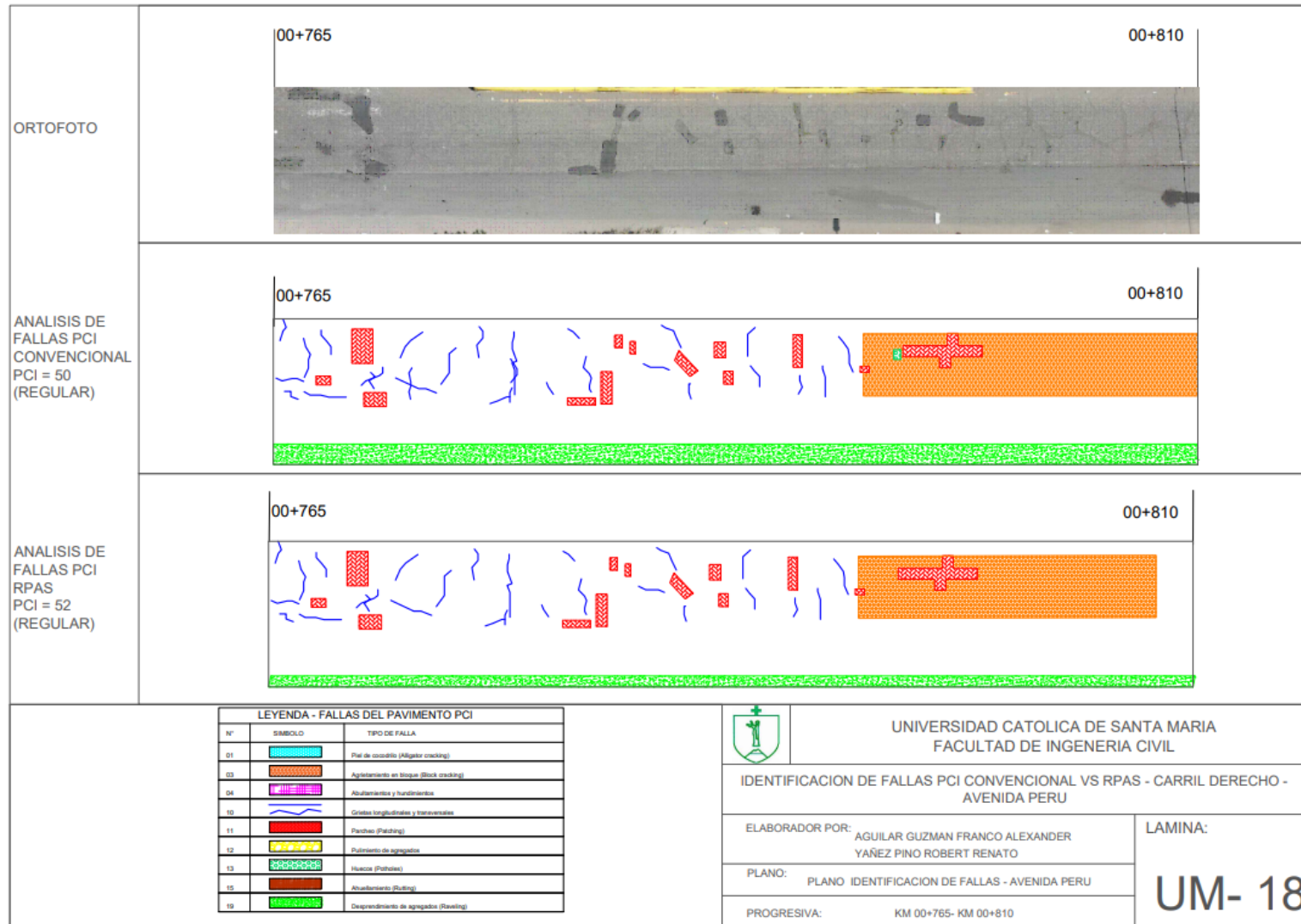
UM 16 (00+675-00+720)



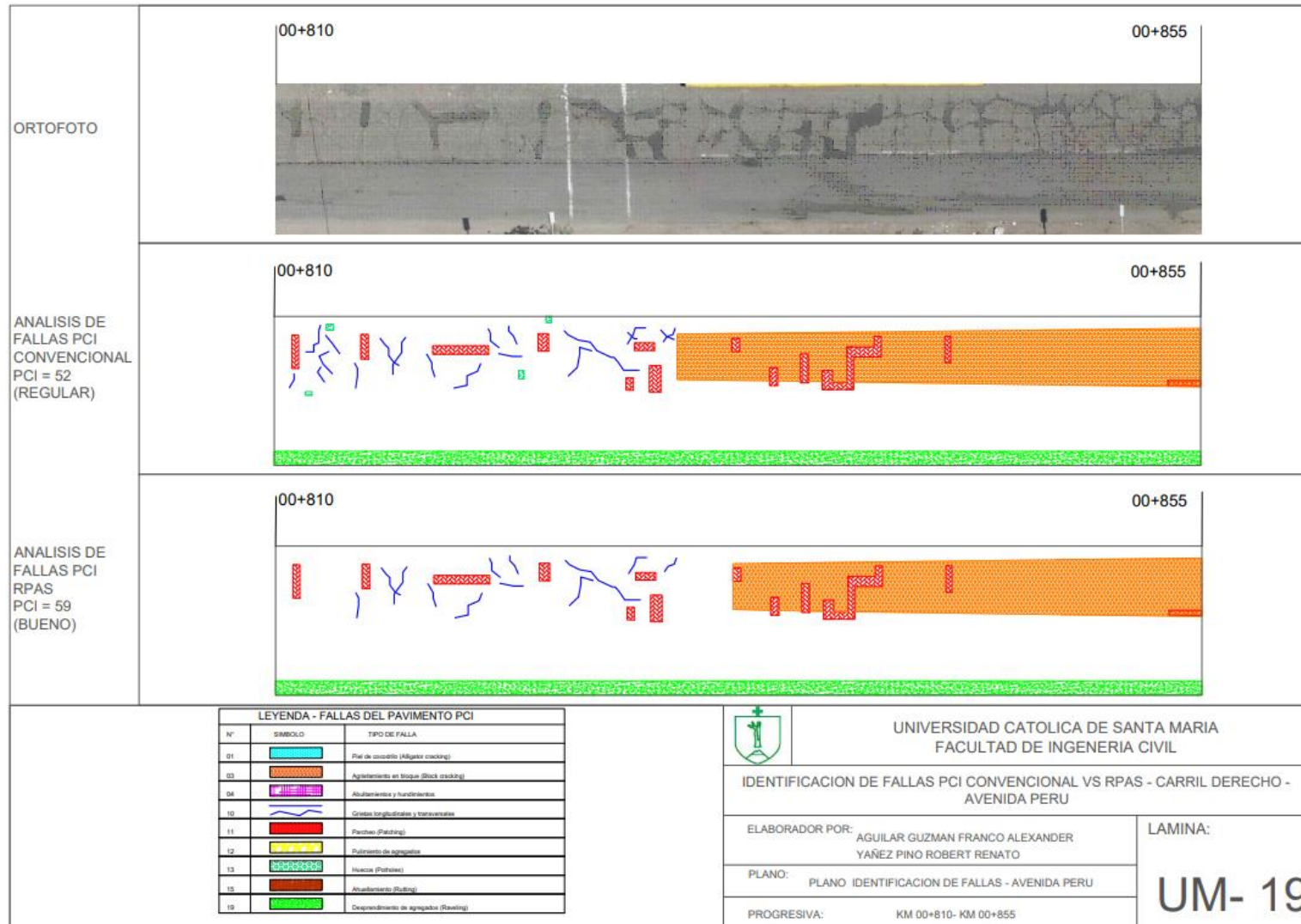
UM 17 (00+720-00+765)



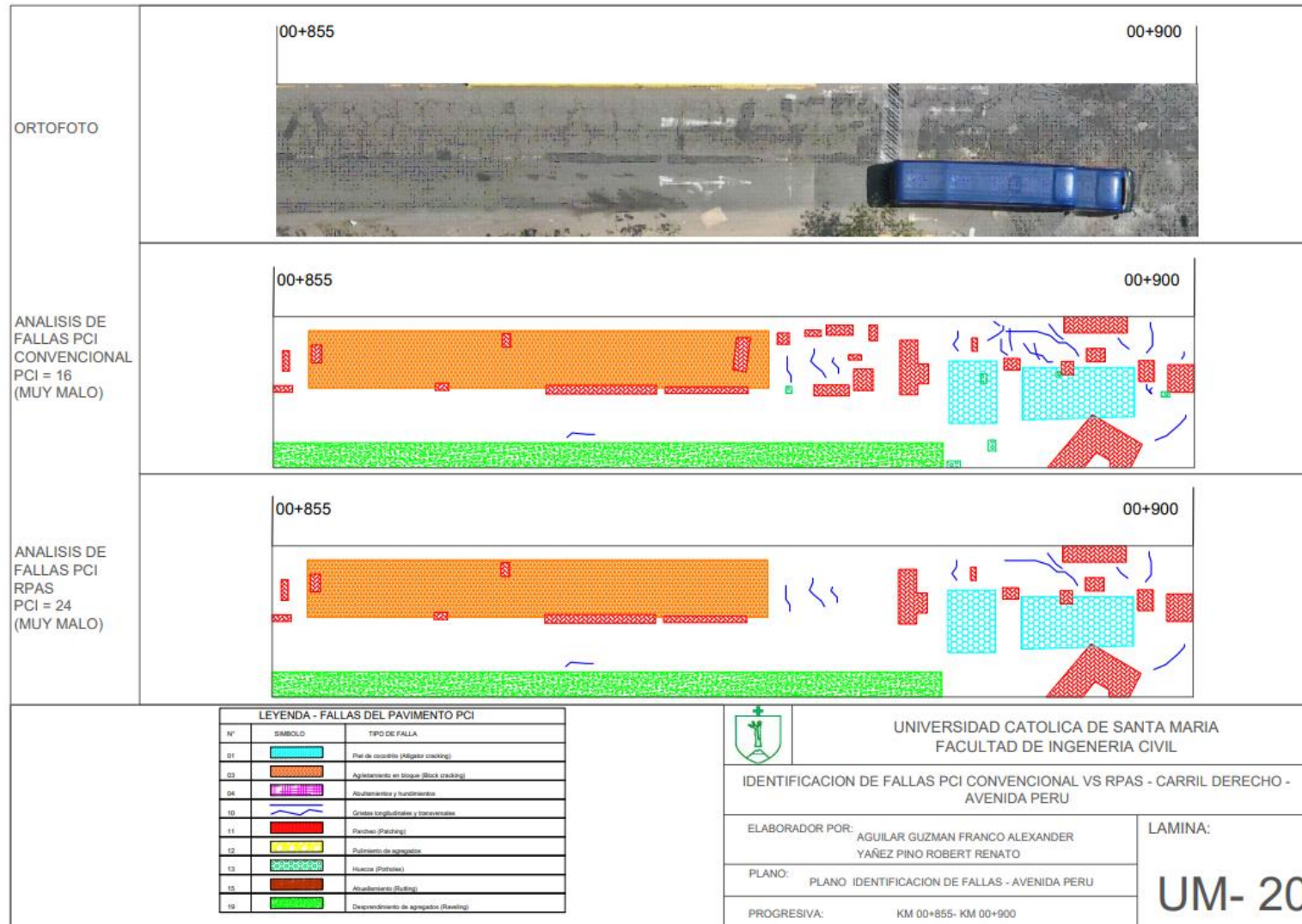
UM 18 (00+765-00+810)



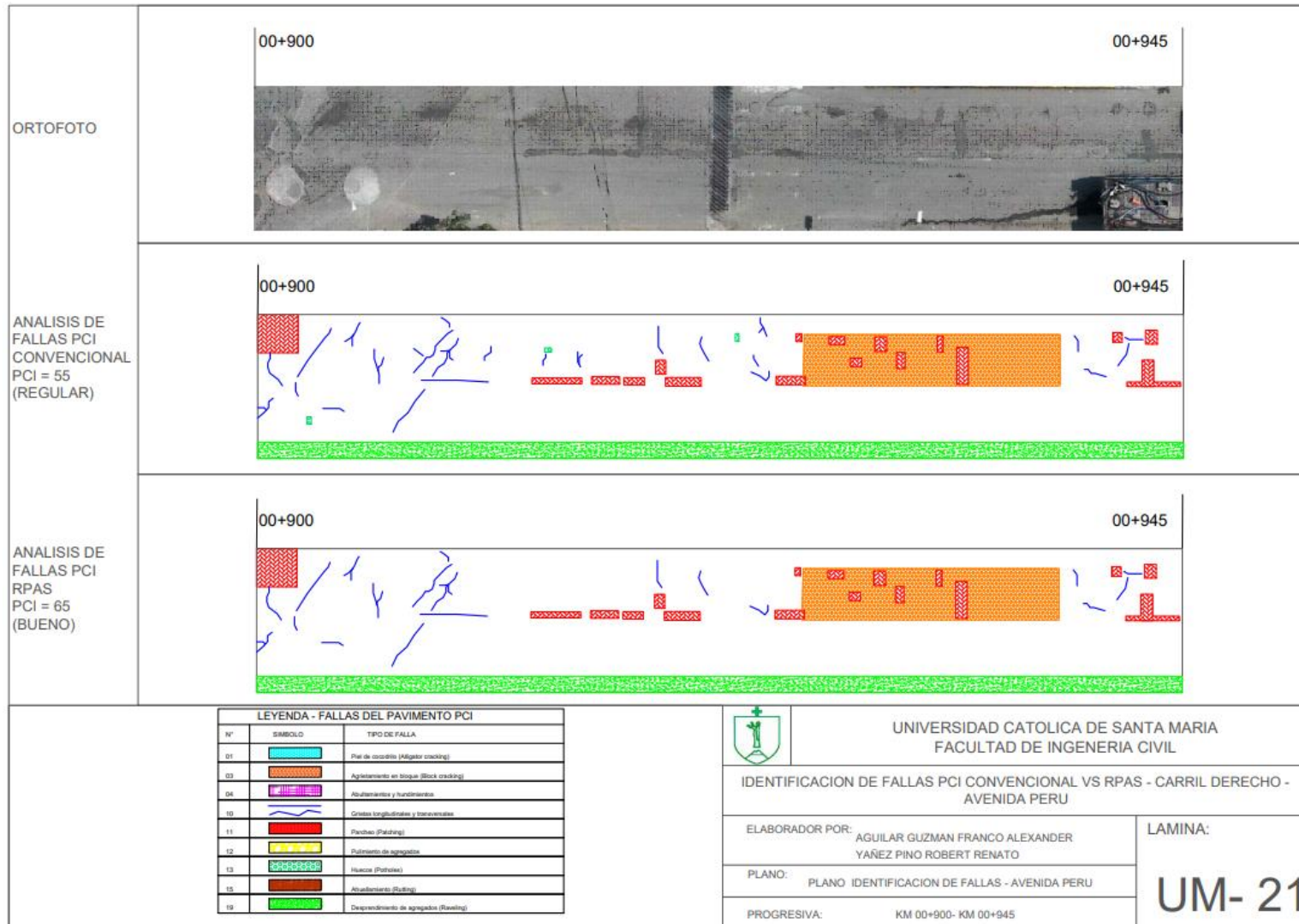
UM 19 (00+810-00+855)



UM 20 (00+855-00+900)



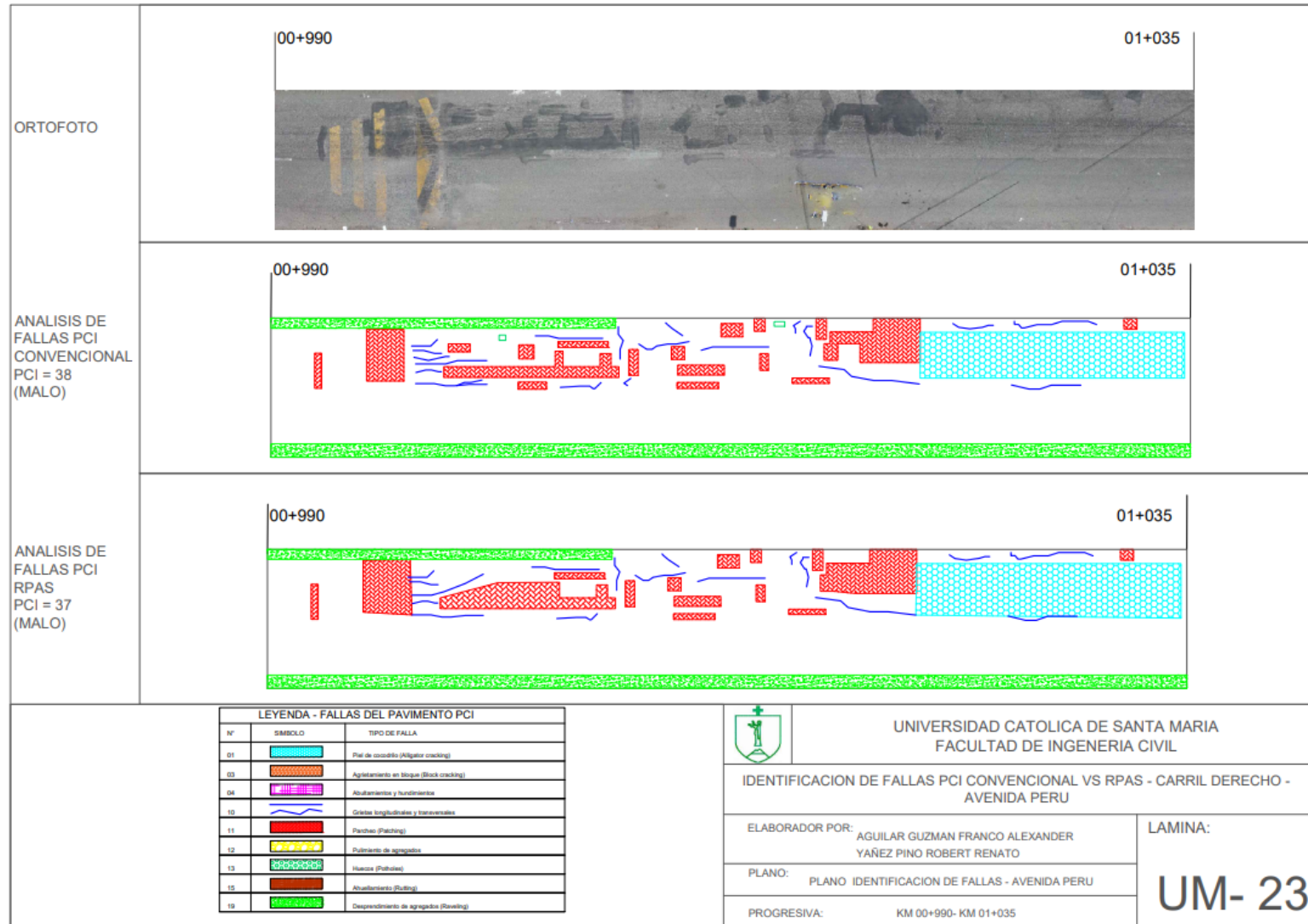
UM 21 (00+900-00+945)



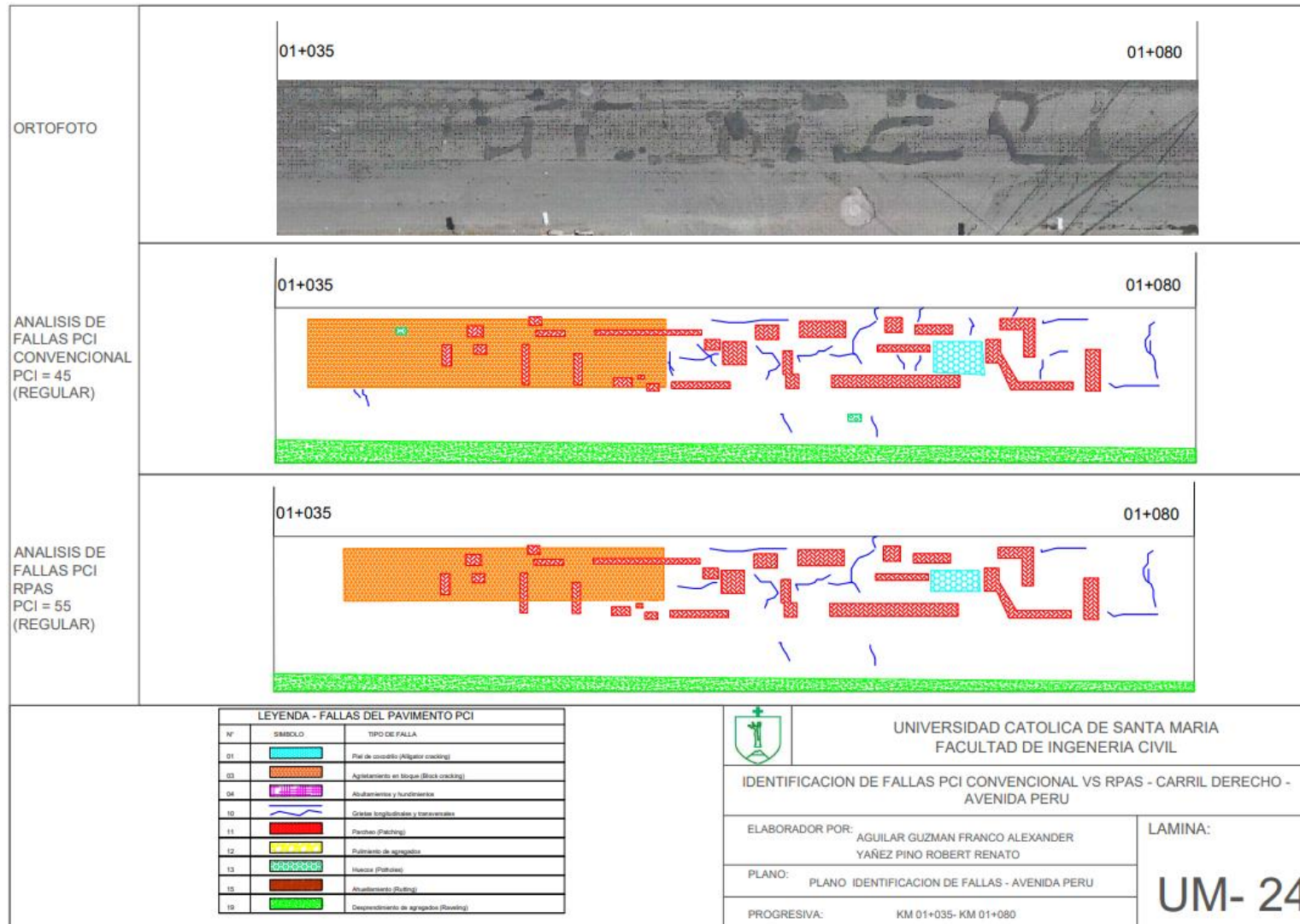
UM 22 (00+945-00+990)



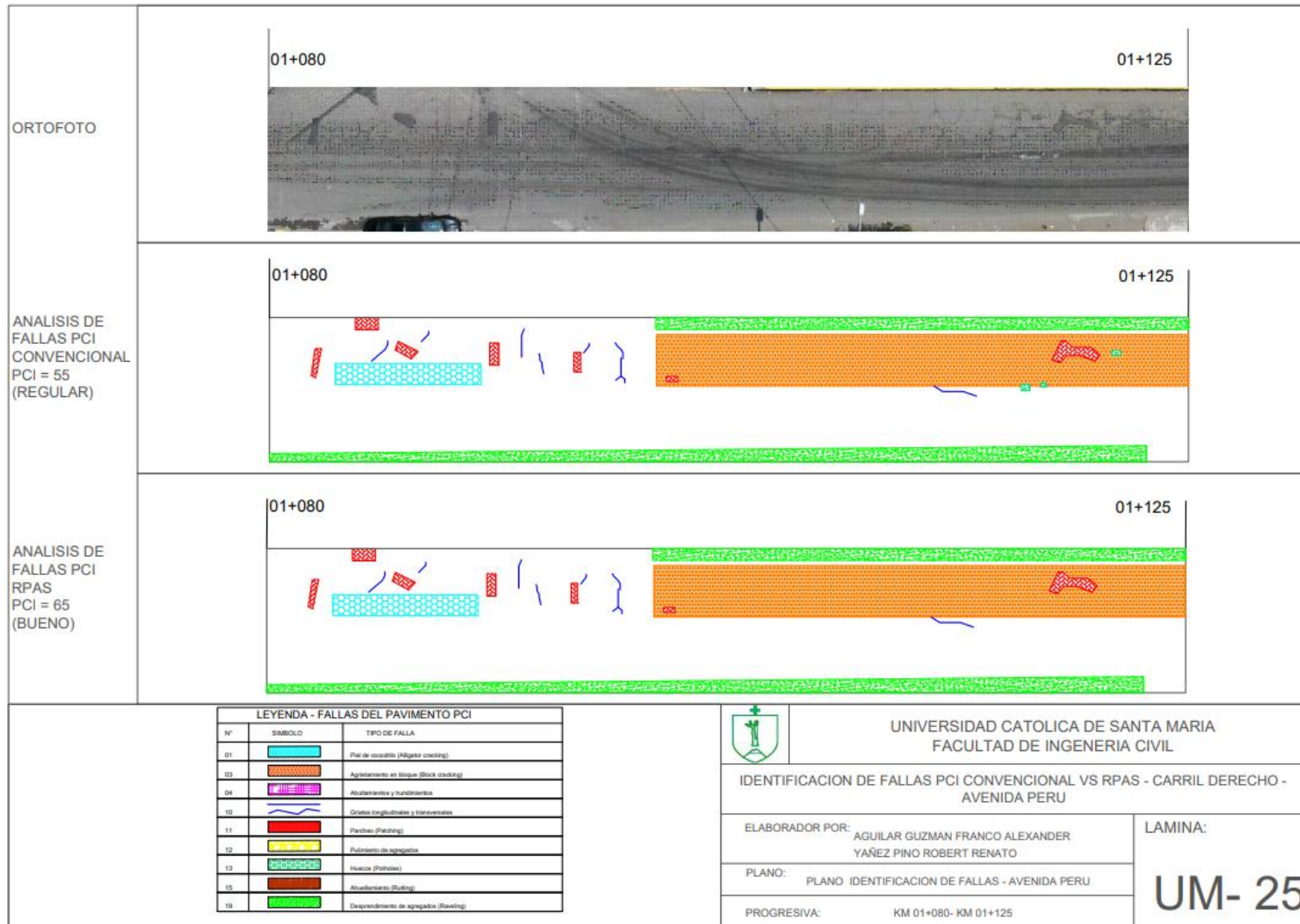
UM 23 (00+990-01+035)



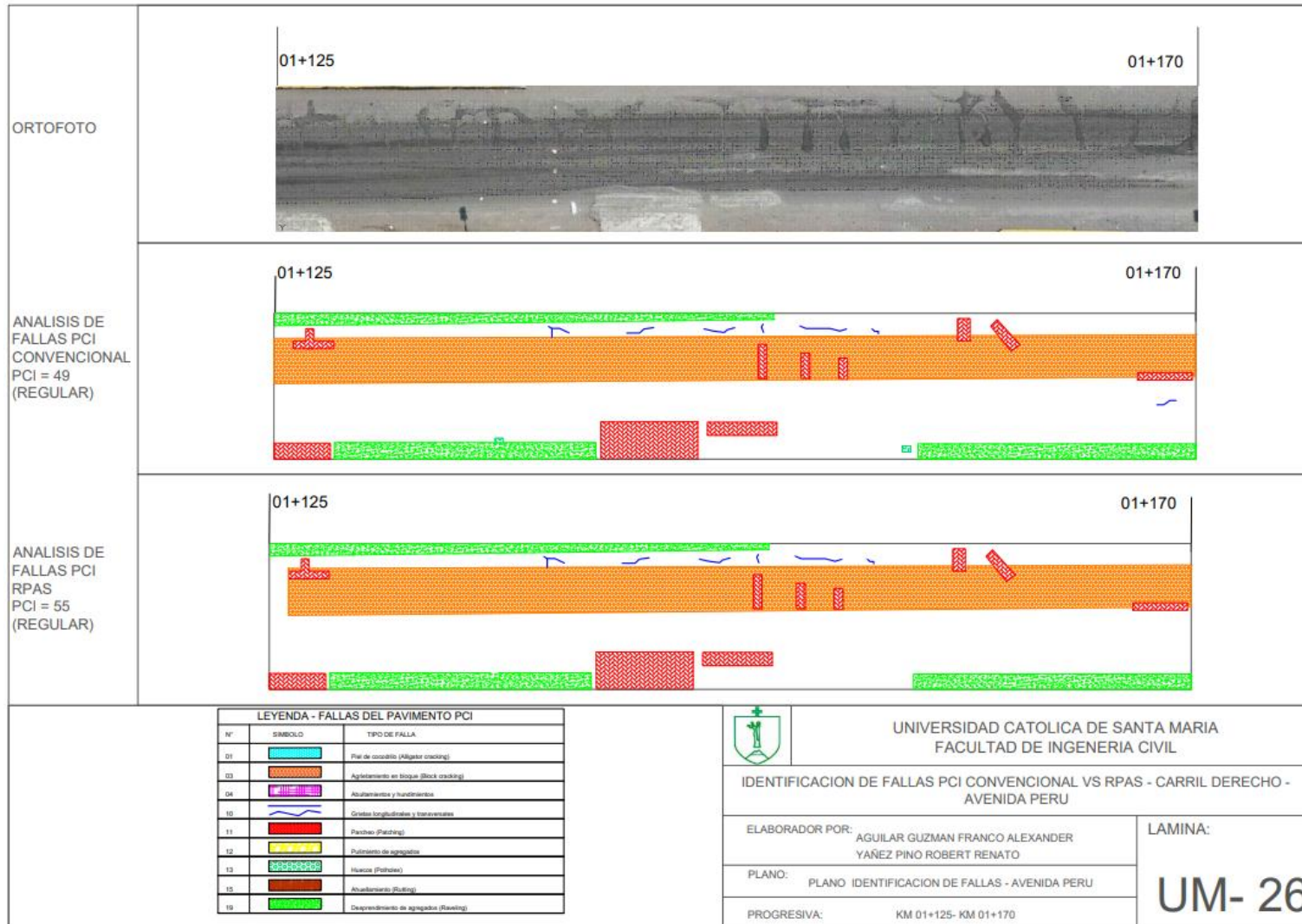
UM 24 (01+035-01+080)



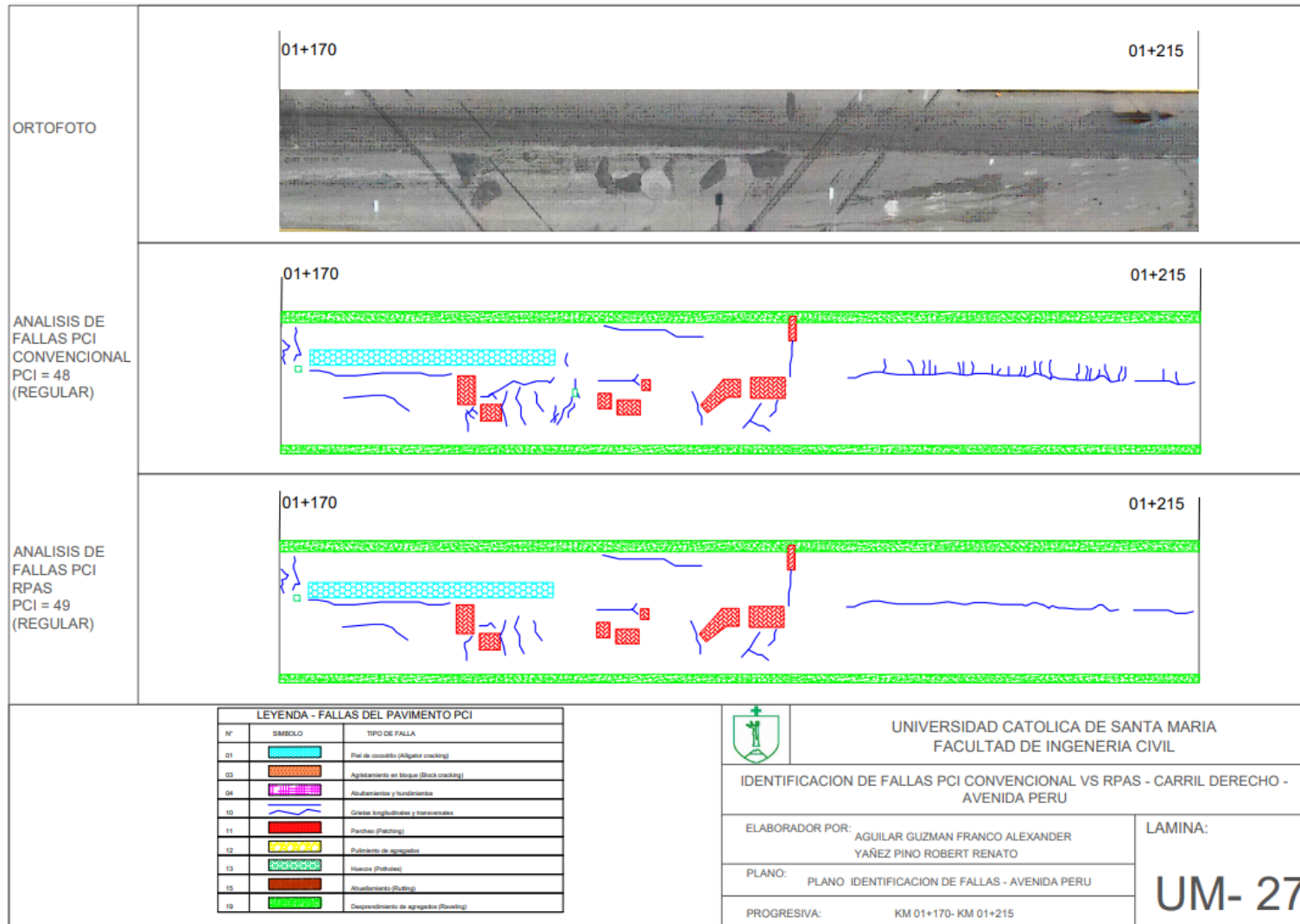
UM 25 (01+080-01+125)



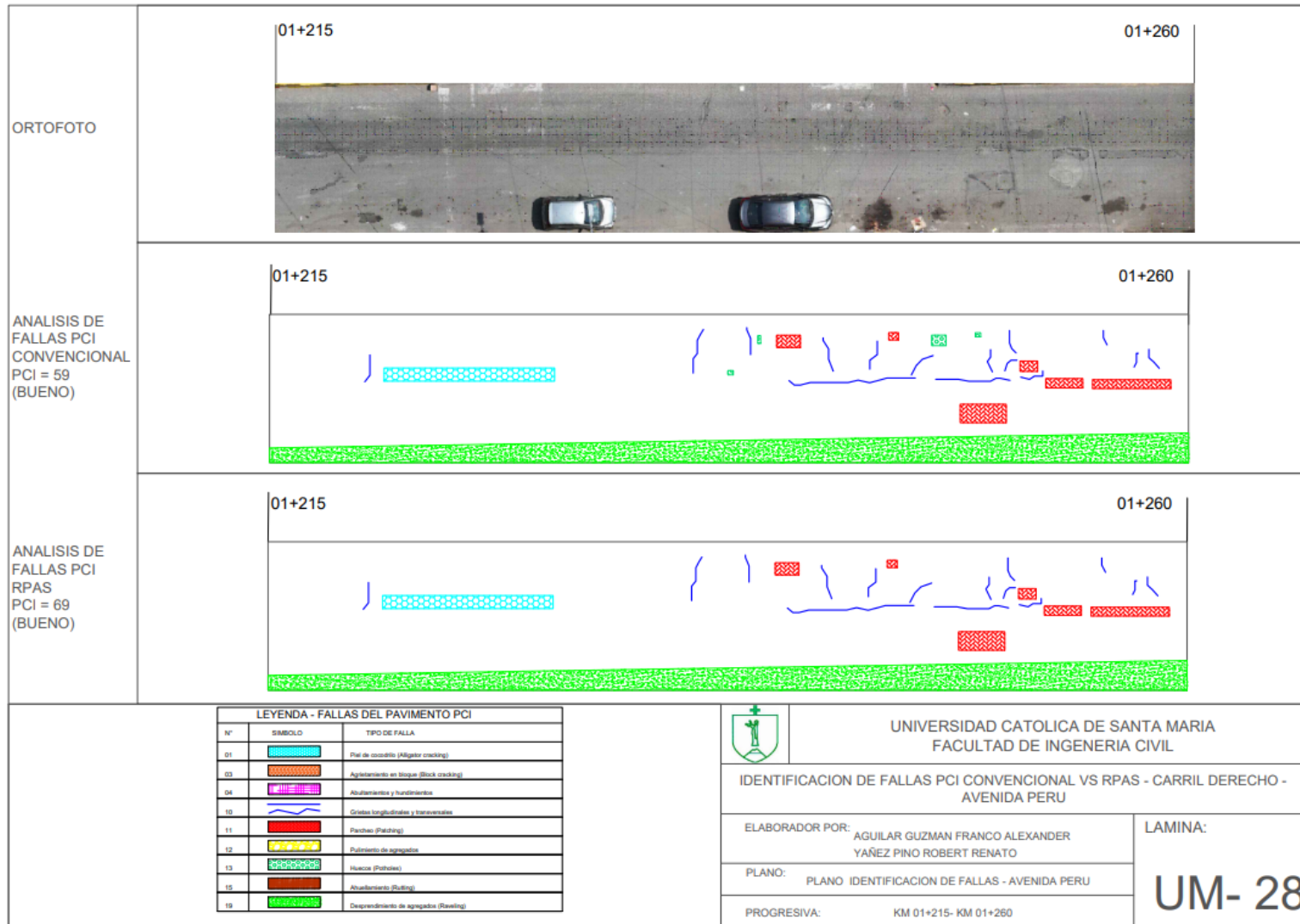
UM 26 (01+125-01+170)



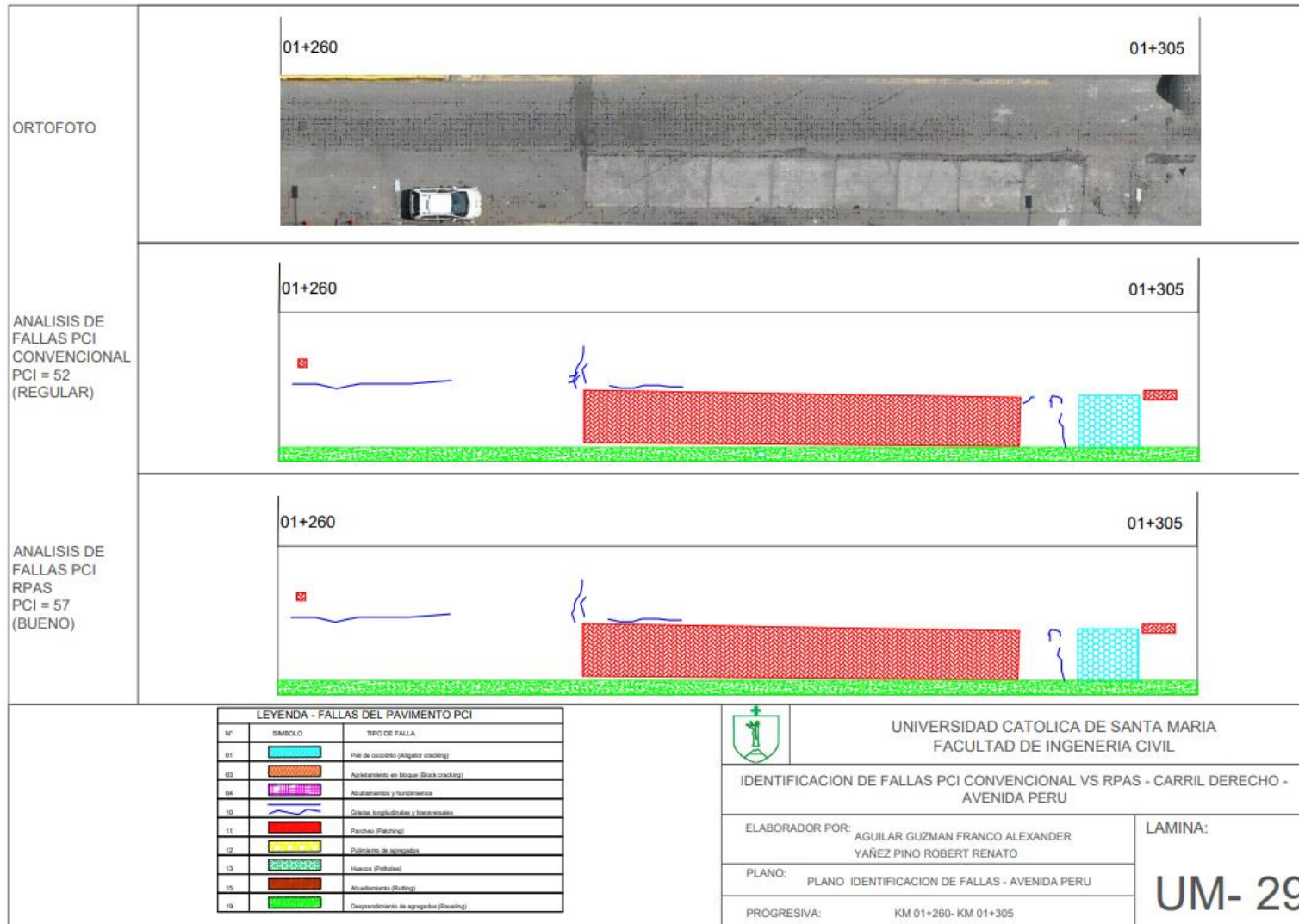
UM 27 (01+170-01+215)



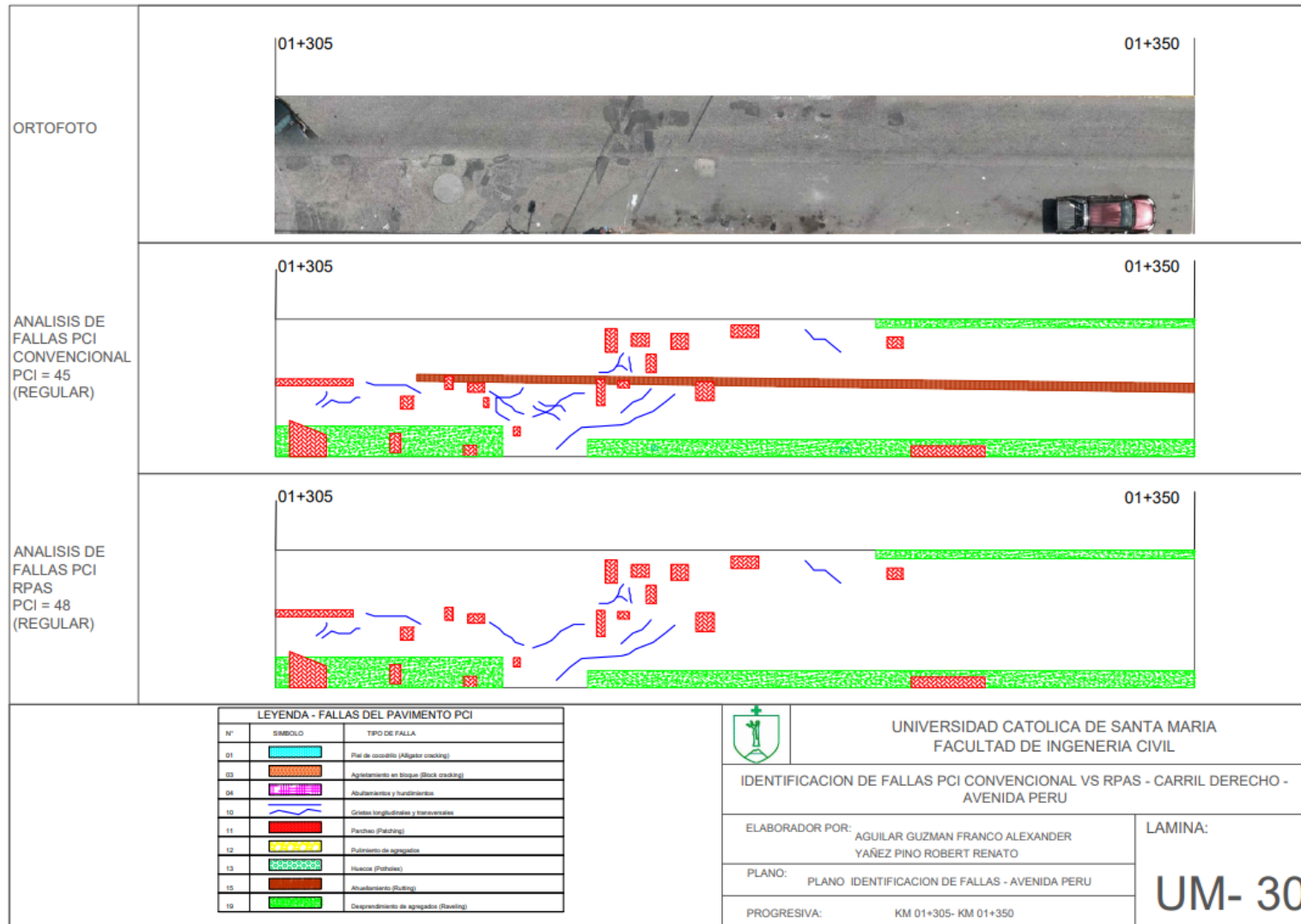
UM 28 (01+215-01+260)



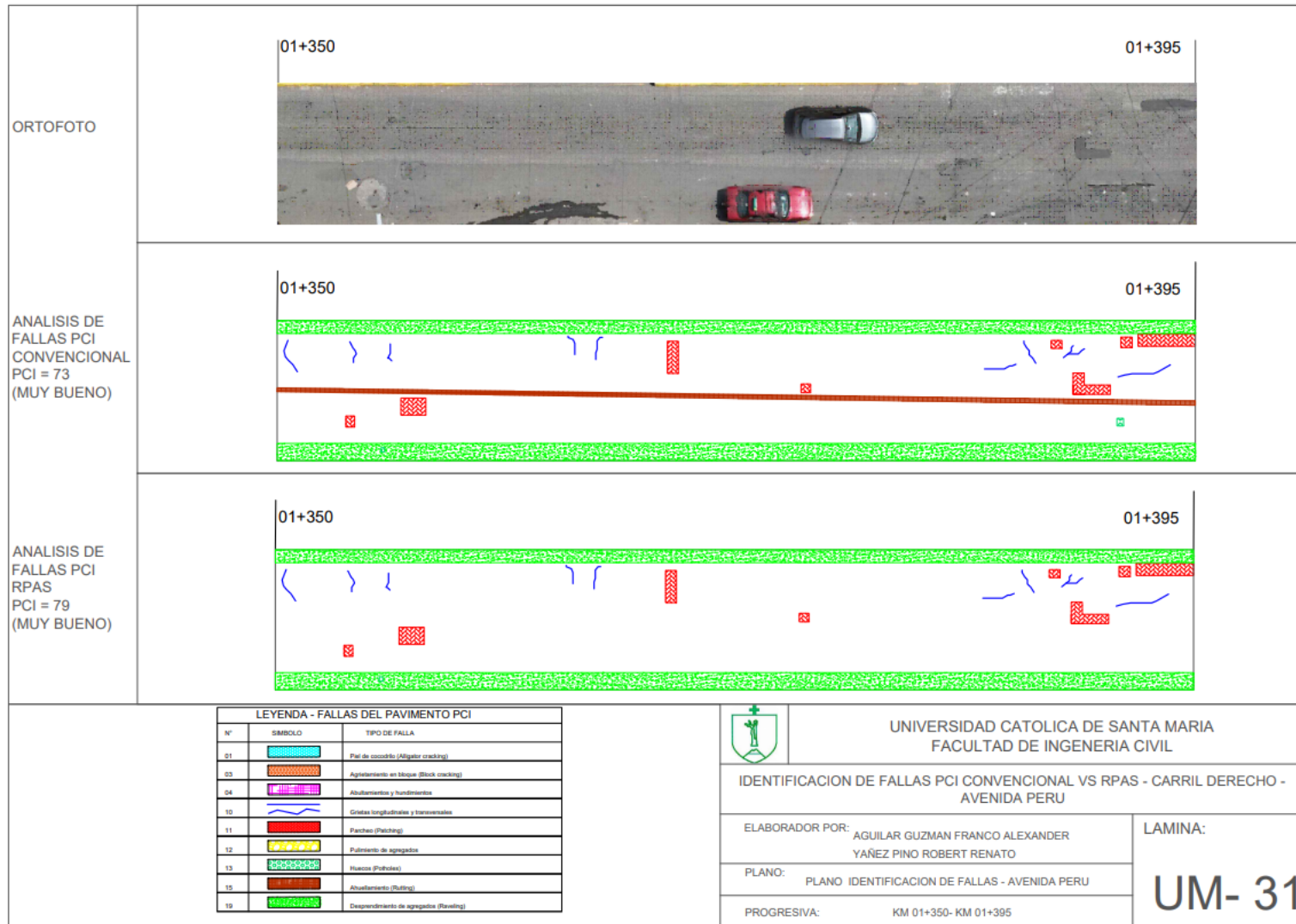
UM 29 (01+260-01+305)



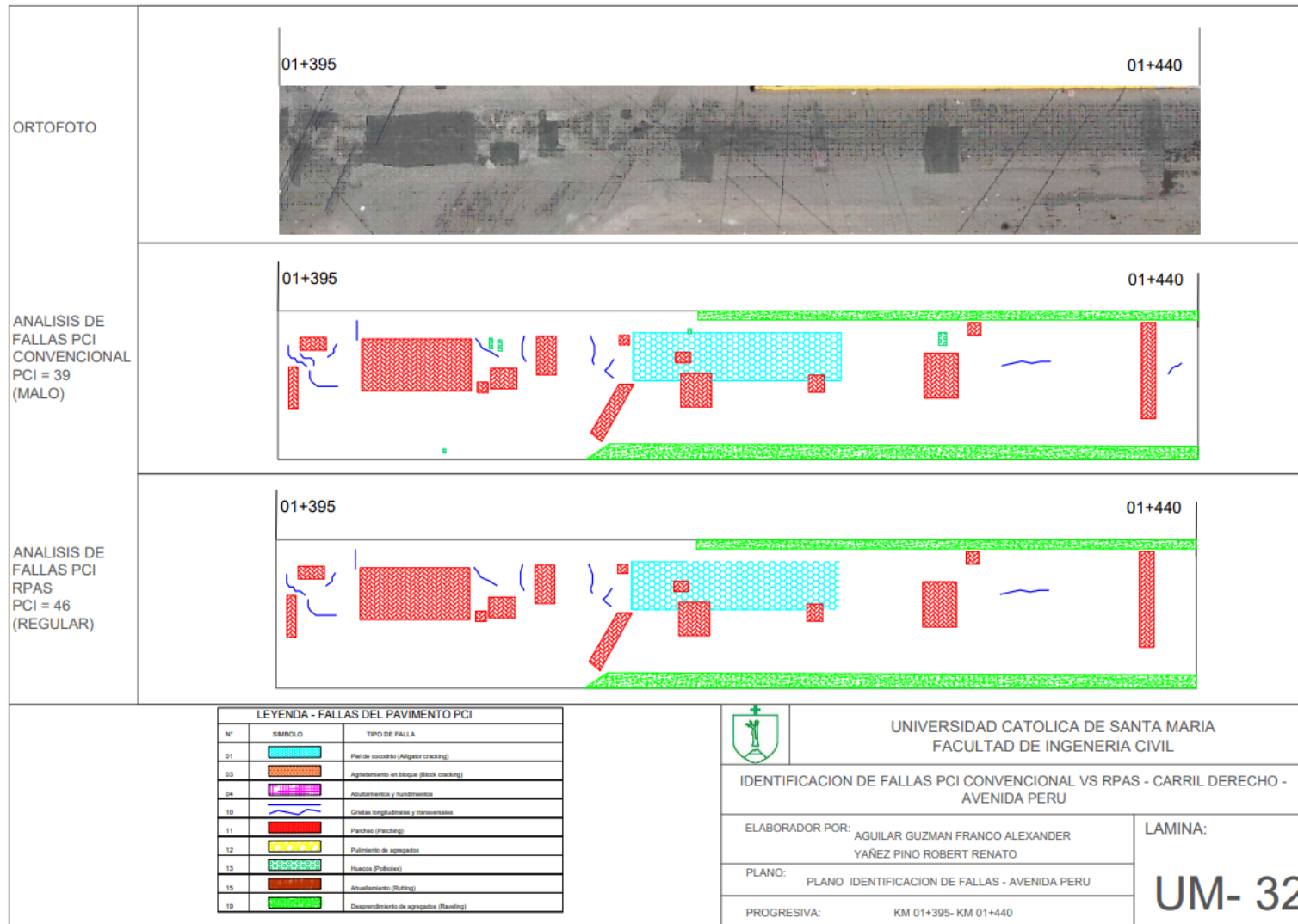
UM 30 (01+305-01+350)



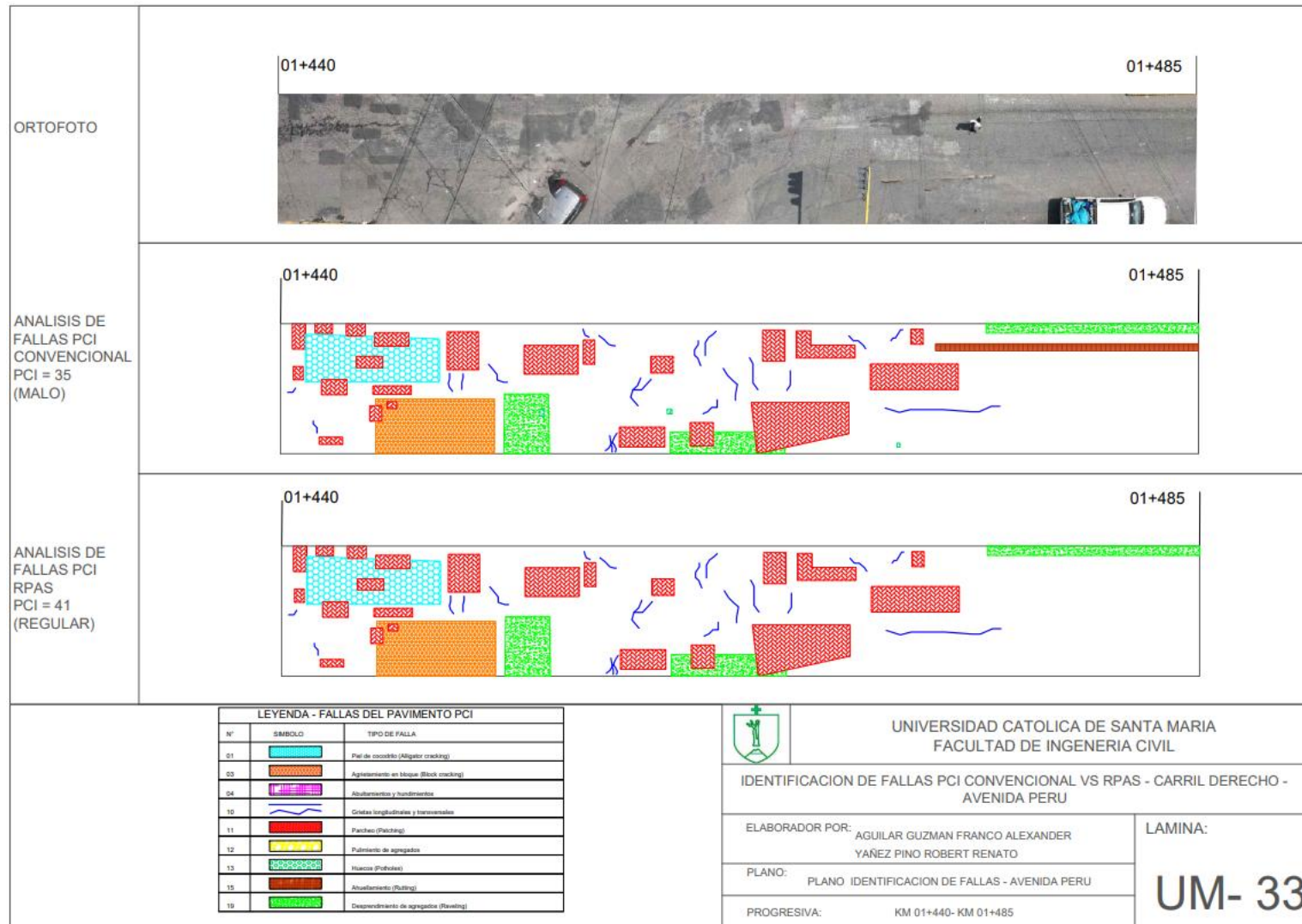
UM 31 (01+350-01+395)



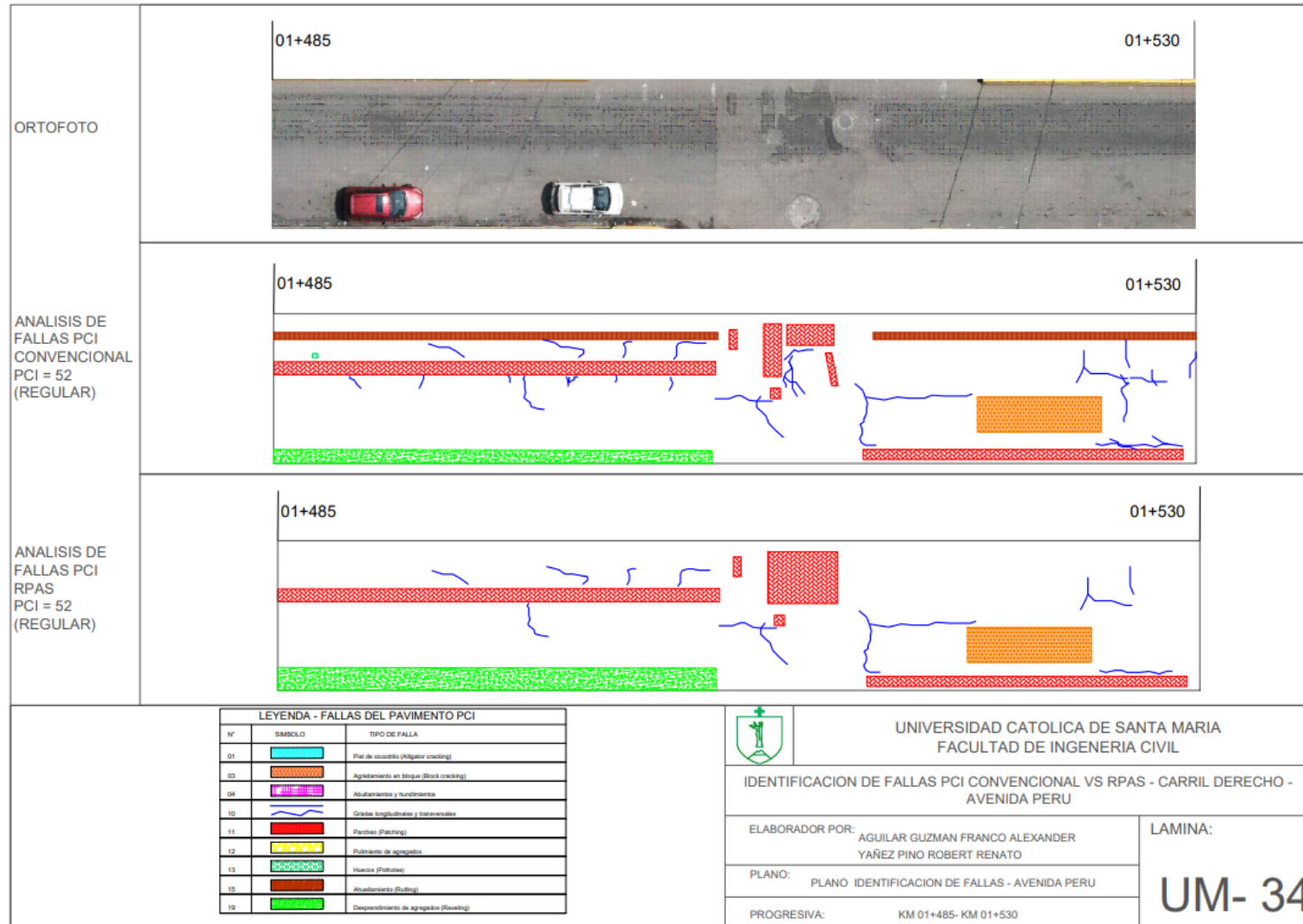
UM 32 (01+395-01+440)



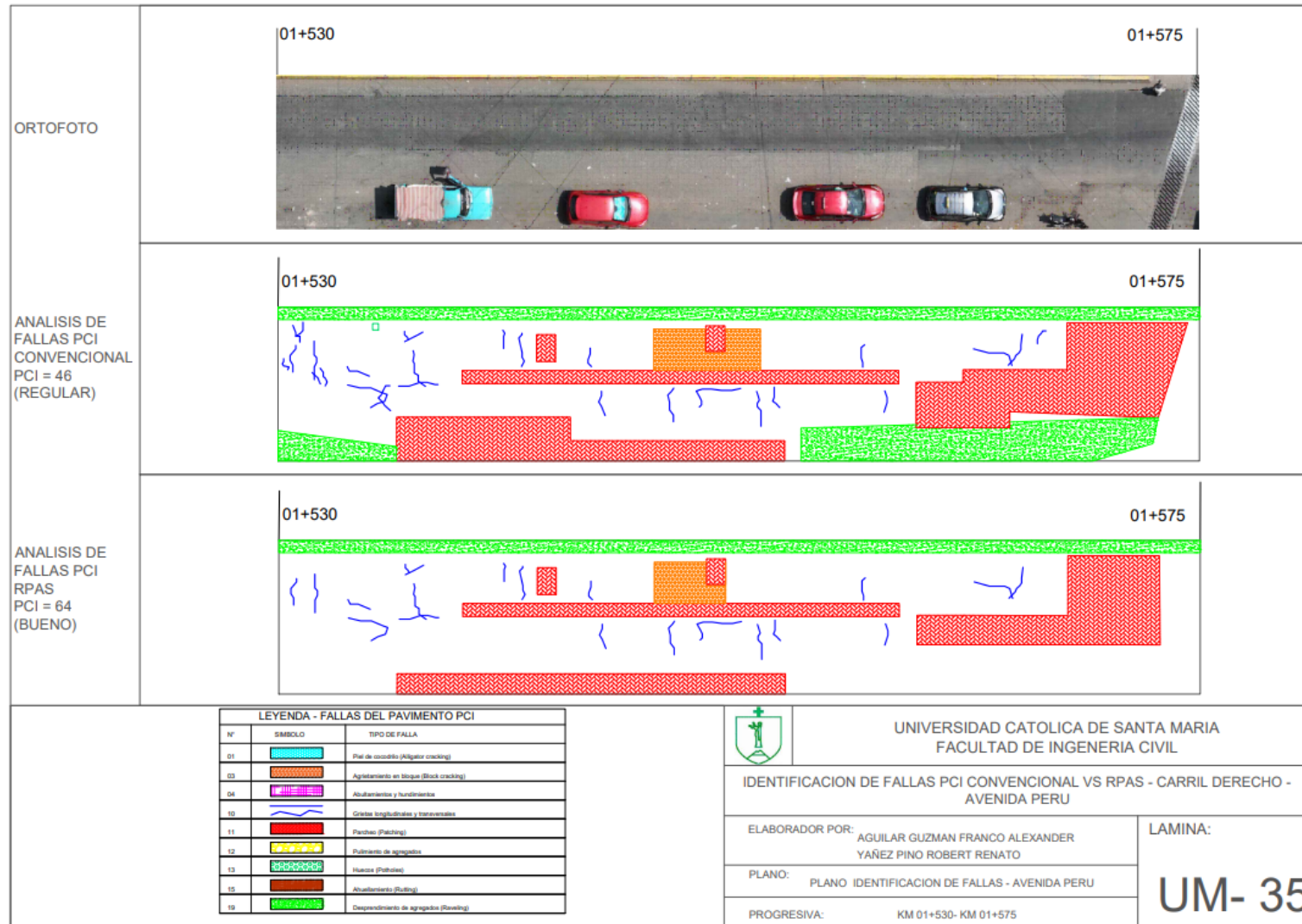
UM 33 (01+440-01+485)



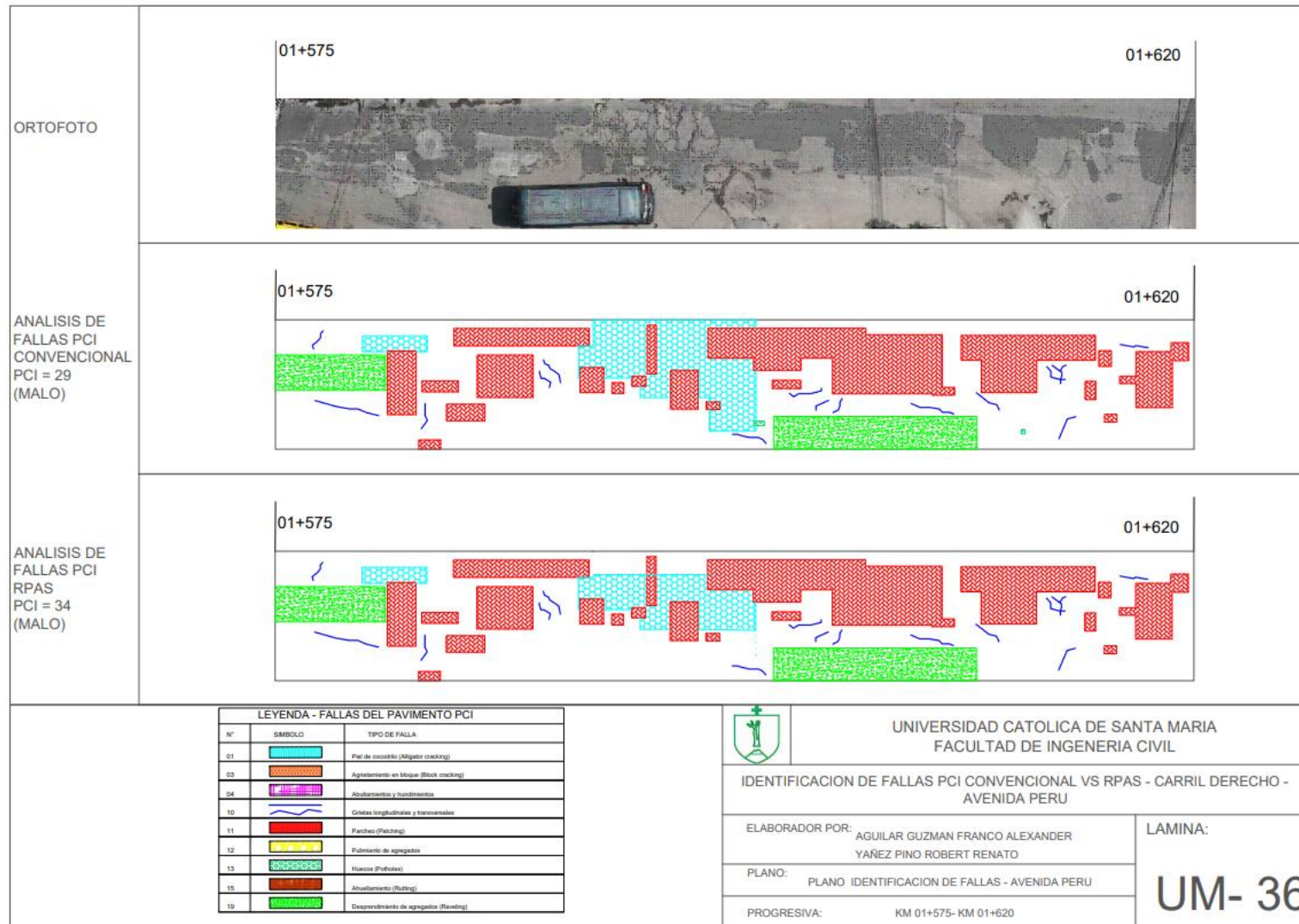
UM 34 (01+485-01+530)



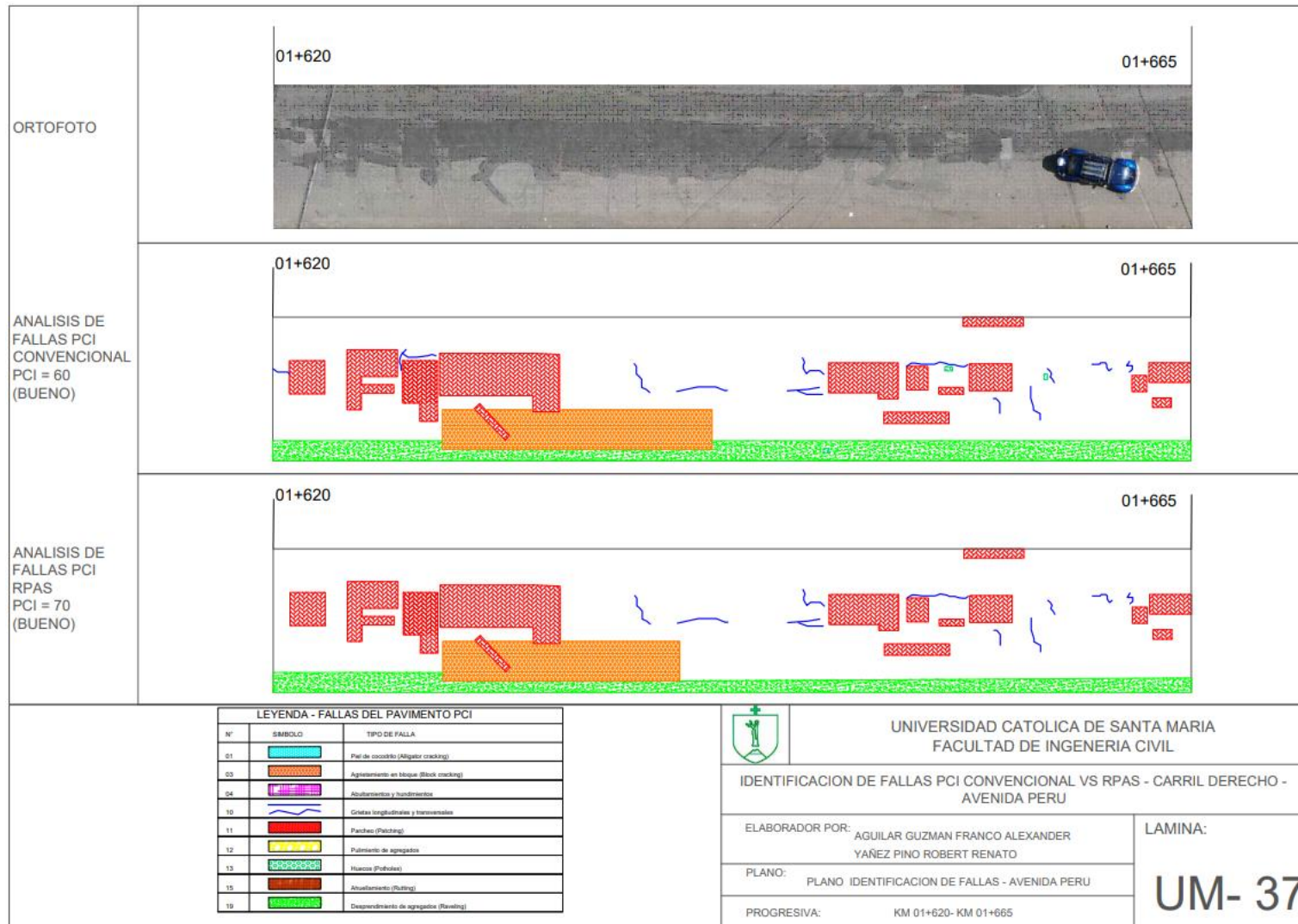
UM 35 (01+530-01+575)



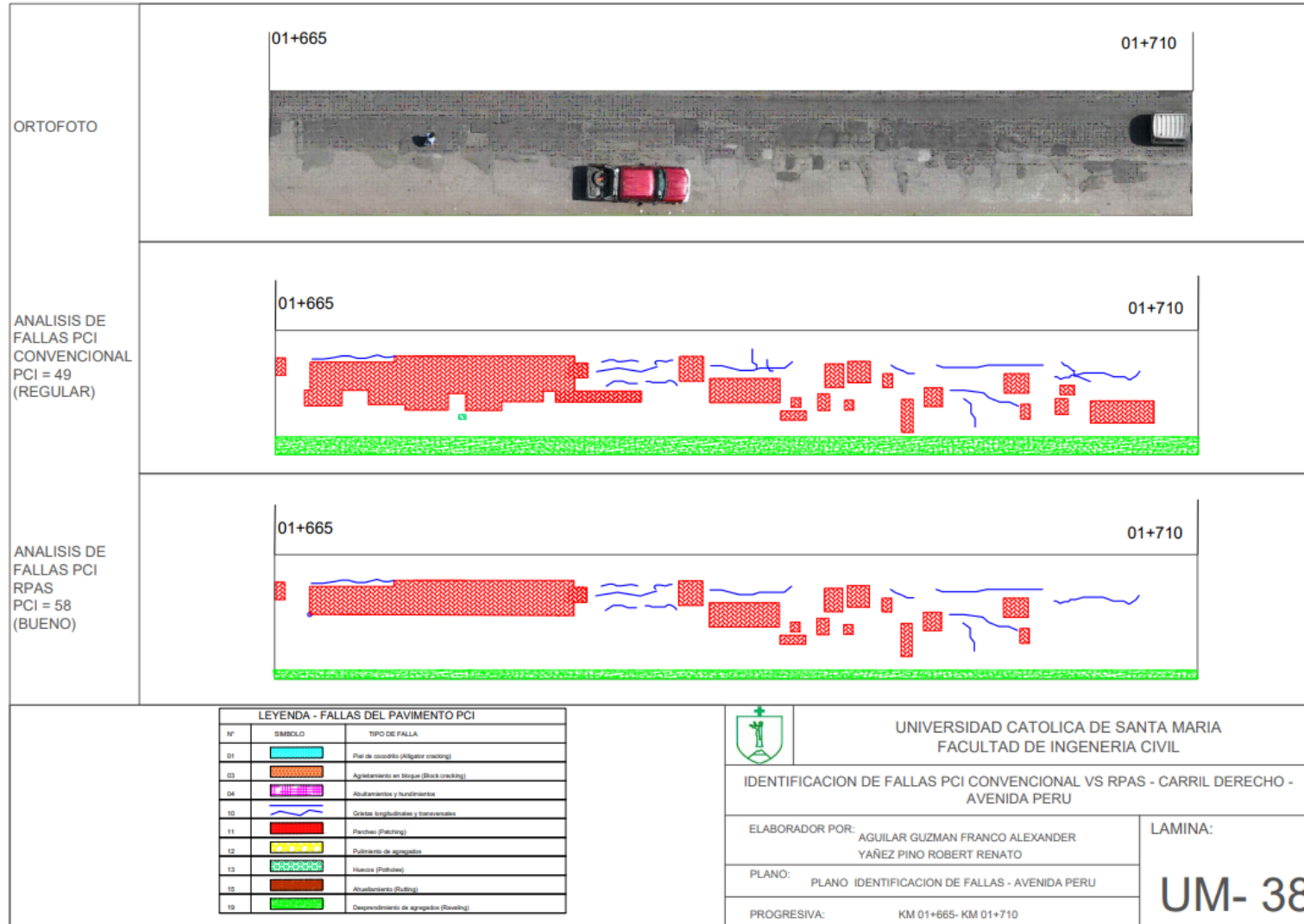
UM 36 (01+575-01+620)



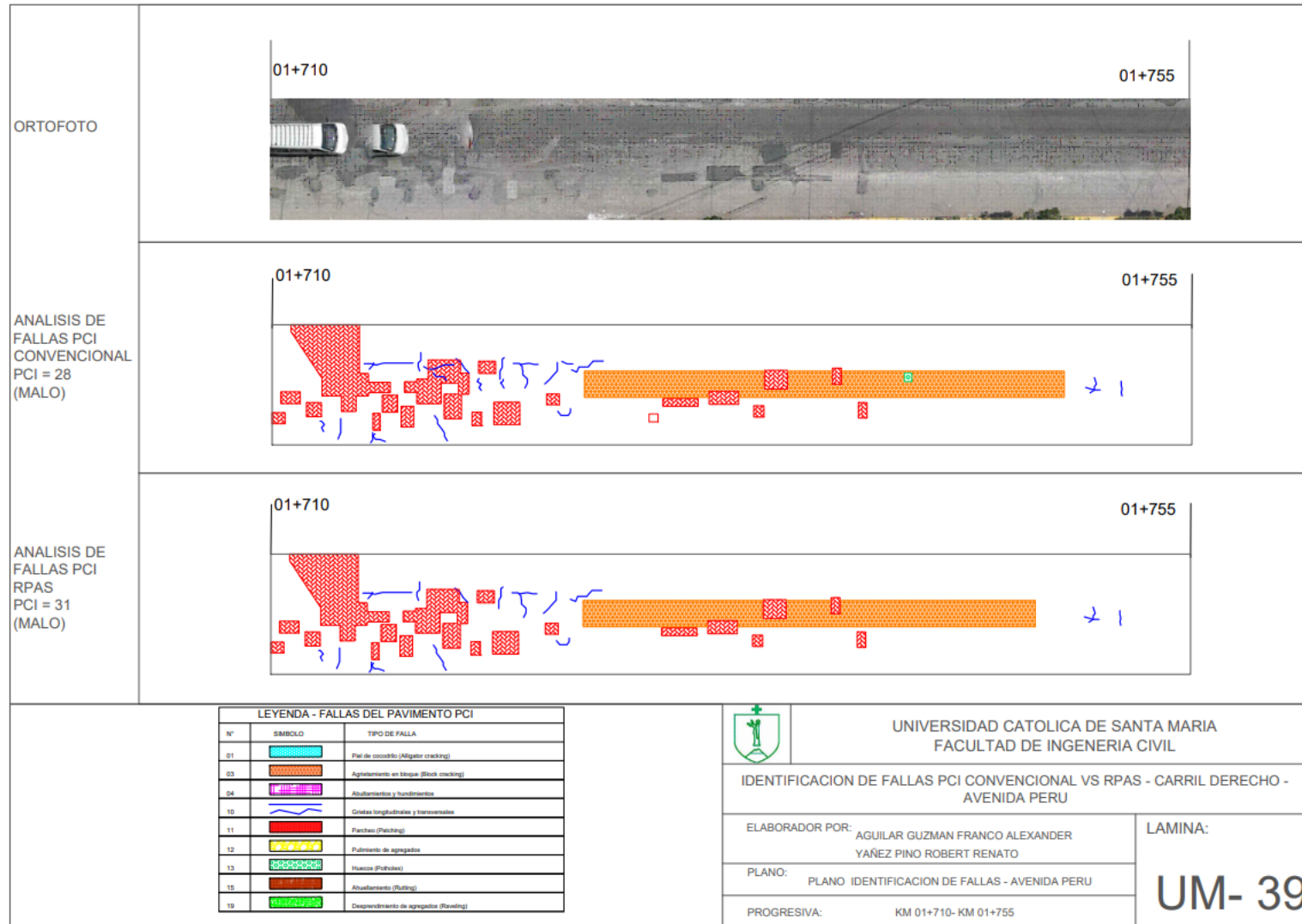
UM 37 (01+620-01+665)



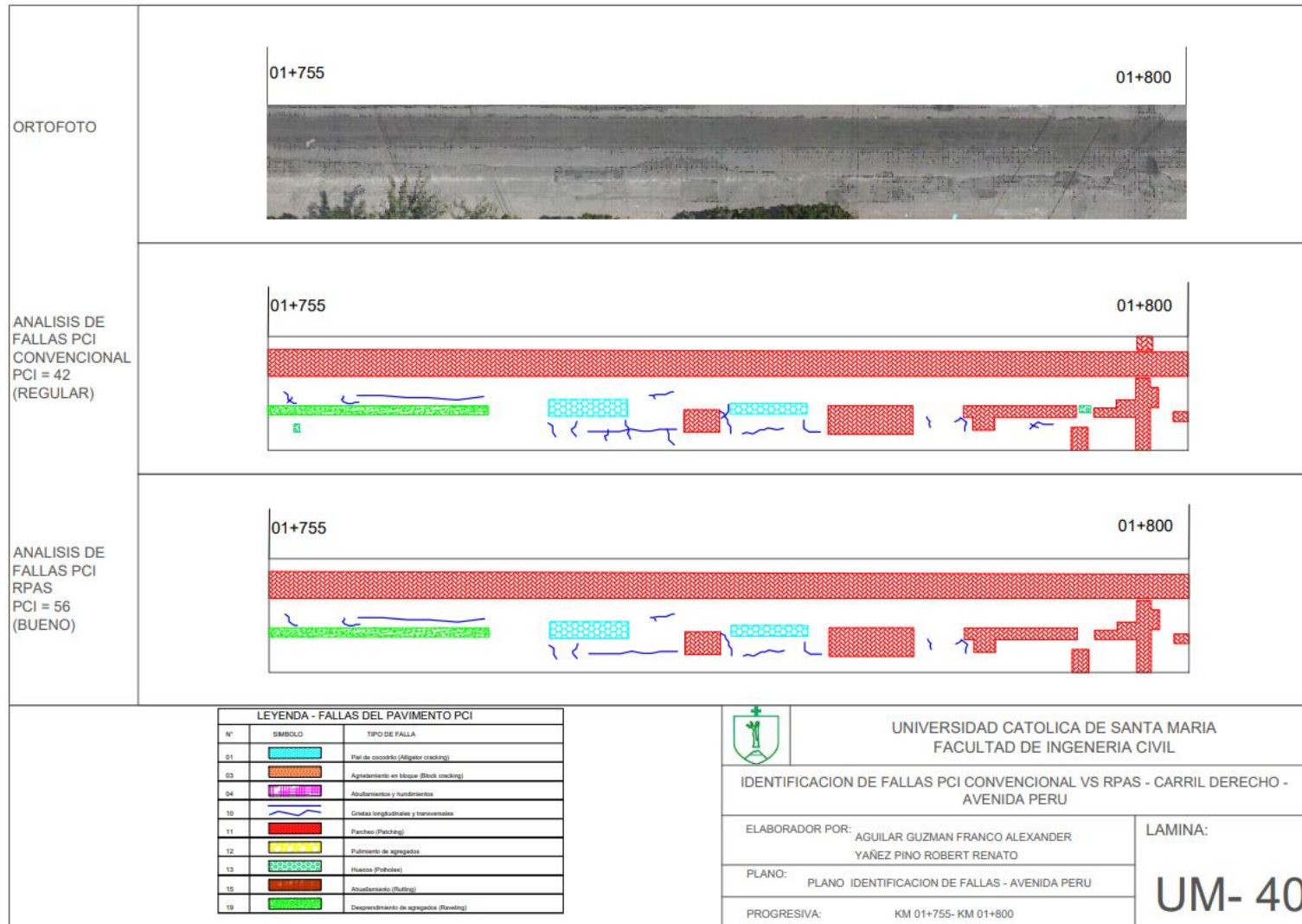
UM 38 (01+665-01+710)



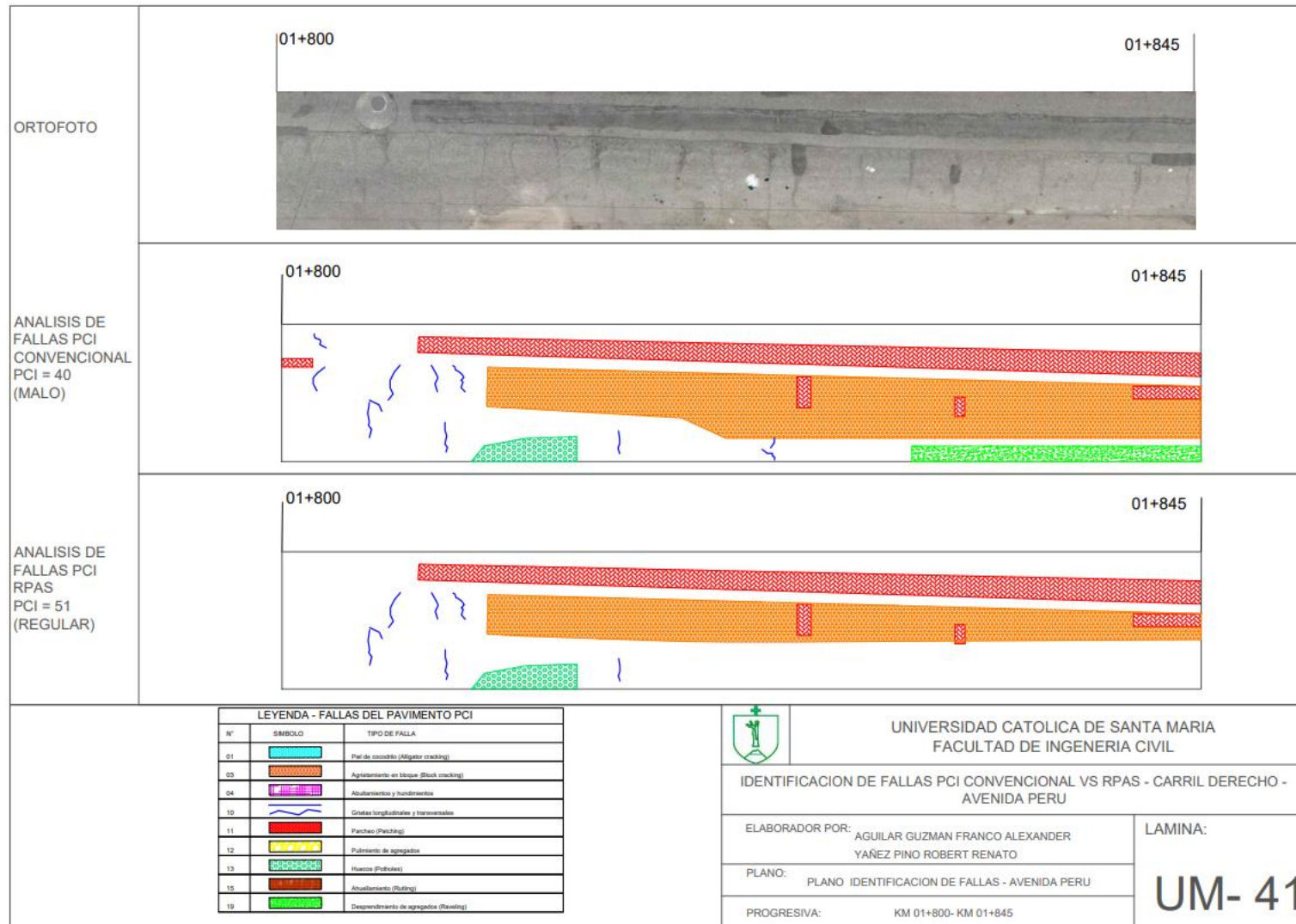
UM 39 (01+710-01+755)



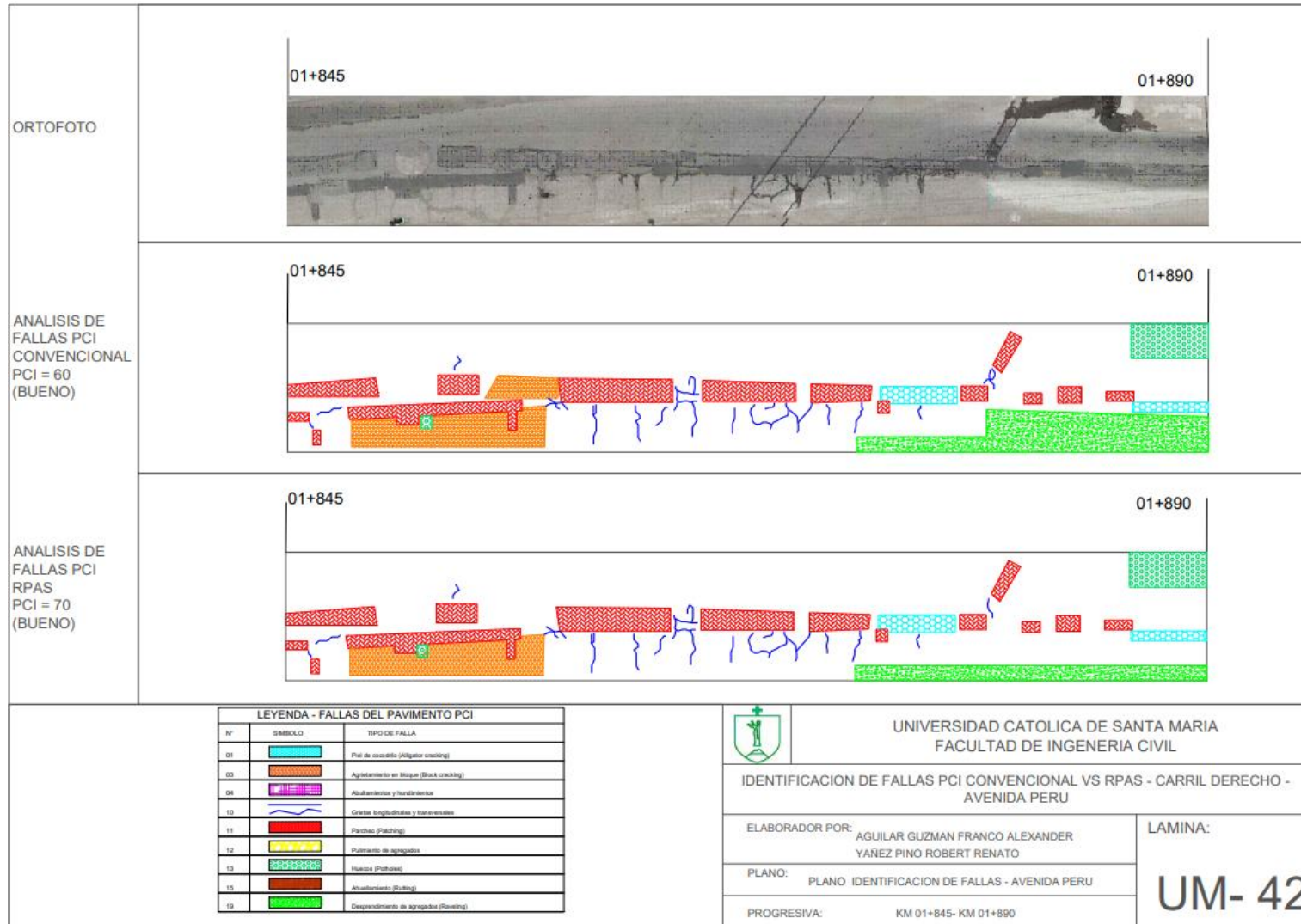
UM 40 (01+755-01+800)



UM 41 (01+800-01+845)



UM 42 (01+845-01+890)



Anexo 6. Resumen de deterioros y cantidades por unidad de muestreo

Metrado de fallas por UM – método convencional (ASTM D6433-20) – Carril izquierdo

UM	PROG. INICIAL	PROG. FINAL	1. Piel de cocodrilo (m ²)	3. Agriet. en bloque (m ²)	4. Abult. y hundim. (m ²)	10. Grietas long./transv. (m)	11. Parcheo (m ²)	12. Pulim. de agregados (m ²)	13. Huecos (und)	15. Ahuellamiento (m ²)	19. Despr. de agregados (m ²)
1	KM 00+000	KM 00+045	-	4.72	-	24.69	11.37	-	3	-	43.77
2	KM 00+045	KM 00+090	-	19.15	-	77.40	24.33	-	-	-	39.48
3	KM 00+090	KM 00+135	-	-	-	55.37	31.21	-	4	-	74.61
4	KM 00+135	KM 00+180	6.11	7.36	-	26.44	20.69	1.76	3	-	45.56
5	KM 00+180	KM 00+225	8.51	-	-	30.33	43.68	-	3	-	18.49
6	KM 00+225	KM 00+270	-	-	-	35.32	9.70	-	4	-	72.18
7	KM 00+270	KM 00+315	-	15.72	-	31.43	12.99	-	6	-	52.94
8	KM 00+315	KM 00+360	-	-	-	36.72	57.58	-	3	-	30.28
9	KM 00+360	KM 00+405	5.38	-	-	26.62	18.30	-	3	-	67.04
10	KM 00+405	KM 00+450	2.16	9.68	-	36.96	30.45	-	-	-	16.34
11	KM 00+450	KM 00+495	-	83.07	-	23.48	1.94	-	-	-	18.62
12	KM 00+495	KM 00+540	5.04	7.68	4.46	19.12	15.70	-	2	11.08	43.68
13	KM 00+540	KM 00+585	9.24	-	-	22.57	25.50	-	-	12.08	21.53
14	KM 00+585	KM 00+630	-	-	-	32.78	39.65	-	3	18.09	28.72
15	KM 00+630	KM 00+675	-	15.63	-	21.07	43.20	-	2	-	68.27

UM	PROG. INICIAL	PROG. FINAL	1. Piel de cocodrilo (m²)	3. Agriet. en bloque (m²)	4. Abult. y hundim. (m²)	10. Grietas long./transv. (m)	11. Parcheo (m²)	12. Pulim. de agregados (m²)	13. Huecos (und)	15. Ahuellamiento (m²)	19. Despr. de agregados (m²)
16	KM 00+675	KM 00+720	5.06	11.46	-	12.27	8.94	-	3	15.93	22.07
17	KM 00+720	KM 00+765	-	38.67	-	16.14	7.71	-	4	11.36	65.37
18	KM 00+765	KM 00+810	-	48.27	-	10.30	13.32	-	3	-	84.62
19	KM 00+810	KM 00+855	-	43.91	-	7.62	14.74	-	3	5.86	34.89
20	KM 00+855	KM 00+900	-	9.16	-	28.46	62.24	-	2	-	86.18
21	KM 00+900	KM 00+945	23.19	-	-	15.07	39.85	-	5	-	86.51
22	KM 00+945	KM 00+990	41.53	54.28	-	-	8.39	-	3	26.85	53.18
23	KM 00+990	KM 01+035	14.28	12.83	-	24.91	23.44	-	2	-	48.61
24	KM 01+035	KM 01+080	17.32	24.58	-	25.93	40.19	-	2	-	48.05
25	KM 01+080	KM 01+125	17.24	62.59	-	17.24	34.75	-	3	-	53.71
26	KM 01+125	KM 01+170	-	42.18	-	42.25	63.99	-	1	-	56.07
27	KM 01+170	KM 01+215	-	-	-	23.16	48.47	-	-	-	91.07
28	KM 01+215	KM 01+260	-	-	-	19.89	16.03	-	4	-	76.18
29	KM 01+260	KM 01+305	-	15.27	-	7.18	50.23	-	5	16.37	62.94
30	KM 01+305	KM 01+350	5.94	-	-	17.24	34.01	-	2	-	9.57
31	KM 01+350	KM 01+395	-	-	-	24.85	53.14	-	1	12.64	47.68
32	KM 01+395	KM 01+440	57.34	7.14	-	6.13	13.33	-	1	-	40.36

UM	PROG. INICIAL	PROG. FINAL	1. Piel de cocodrilo (m²)	3. Agriet. en bloque (m²)	4. Abult. y hundim. (m²)	10. Grietas long./transv. (m)	11. Parcheo (m²)	12. Pulim. de agregados (m²)	13. Huecos (und)	15. Ahuellamient o (m²)	19. Despr. de agregados (m²)
33	KM 01+440	KM 01+485	98.24	-	-	17.34	38.30	-	1	-	13.52
34	KM 01+485	KM 01+530	23.72	4.31	-	7.96	78.13	-	3	-	18.52
35	KM 01+530	KM 01+575	-	-	-	36.27	40.79	-	3	-	94.68
36	KM 01+575	KM 01+620	21.68	-	-	23.07	126.03	-	3	-	135.84
37	KM 01+620	KM 01+665	5.61	-	-	16.27	55.34	-	2	-	16.38
38	KM 01+665	KM 01+710	-	-	-	3.51	50.26	-	1	-	94.68
39	KM 01+710	KM 01+755	30.34	-	-	13.06	43.94	-	1	-	6.84
40	KM 01+755	KM 01+800	-	-	-	39.96	23.90	-	1	-	-
41	KM 01+800	KM 01+845	-	-	-	1.54	70.03	-	1	17.73	8.37
42	KM 01+845	KM 01+890	10.68	12.06	-	31.75	31.11	-	2	-	26.46
TOTAL			408.61	549.72	4.46	989.67	1,476.89	1.76	98	147.99	2,023.85

Metrado de fallas por UM – método convencional (ASTM D6433-20) – Carril derecho

UM	PROG. INICIAL	PROG. FINAL	1. Piel de cocodrilo (m ²)	3. Agriet. en bloque (m ²)	4. Abult. y hundim. (m ²)	10. Grietas long./transv . (m)	11. Parcheo (m ²)	12. Pulim. de agregados (m ²)	13. Huecos (und)	15. Ahuellamie nto (m ²)	19. Despr. de agregados (m ²)
1	KM 00+000	KM 00+045	21.07	-	-	11.93	-	-	-	-	164.95
2	KM 00+045	KM 00+090	3.82	13.81	-	13.62	-	-	-	-	106.62
3	KM 00+090	KM 00+135	21.84	-	-	21.99	2.73	-	2	-	80.14
4	KM 00+135	KM 00+180	7.94	-	-	34.81	61.17	7.06	6	-	13.29
5	KM 00+180	KM 00+225	26.82	-	-	21.29	57.68	-	3	-	35.08
6	KM 00+225	KM 00+270	64.37	-	-	25.10	57.00	-	4	-	46.81
7	KM 00+270	KM 00+315	3.17	26.97	-	9.41	8.18	-	6	-	65.35
8	KM 00+315	KM 00+360	-	-	-	37.01	40.79	-	3	-	24.91
9	KM 00+360	KM 00+405	-	-	-	18.43	27.47	-	3	14.35	42.00
10	KM 00+405	KM 00+450	1.34	-	2.38	22.41	3.87	-	2	7.64	25.57
11	KM 00+450	KM 00+495	-	43.81	-	26.26	24.45	-	-	-	52.96
12	KM 00+495	KM 00+540	3.48	-	4.36	34.29	7.75	-	2	-	73.64
13	KM 00+540	KM 00+585	-	35.48	-	30.59	17.45	-	2	-	26.24
14	KM 00+585	KM 00+630	-	19.76	-	4.81	7.93	-	4	-	58.34
15	KM 00+630	KM 00+675	-	28.94	-	20.31	59.53	-	2	-	45.27
16	KM 00+675	KM 00+720	11.76	23.83	-	13.94	6.69	-	5	-	57.94
17	KM 00+720	KM 00+765	-	68.19	-	24.38	7.54	-	4	-	34.08
18	KM 00+765	KM 00+810	-	54.72	-	47.19	6.02	-	1	-	51.74
19	KM 00+810	KM 00+855	-	58.14	-	6.81	4.83	-	4	-	48.27
20	KM 00+855	KM 00+900	39.72	72.63	-	7.38	26.75	-	6	-	53.84
21	KM 00+900	KM 00+945	-	34.82	-	24.53	11.64	-	4	-	54.13
22	KM 00+945	KM 00+990	27.34	-	-	8.14	50.46	-	3	-	34.18
23	KM 00+990	KM 01+035	35.72	-	-	20.18	27.00	-	2	-	57.14
24	KM 01+035	KM 01+080	6.17	56.34	-	14.82	15.54	-	2	-	68.47

UM	PROG. INICIAL	PROG. FINAL	1. Piel de cocodrilo (m²)	3. Agriet. en bloque (m²)	4. Abult. y hundim. (m²)	10. Grietas long./transv . (m)	11. Parcheo (m²)	12. Pulim. de agregados (m²)	13. Huecos (und)	15. Ahuellamie nto (m²)	19. Despr. de agregados (m²)
25	KM 01+080	KM 01+125	10.84	68.27	-	4.08	4.79	-	3	-	53.71
26	KM 01+125	KM 01+170	-	78.35	-	2.81	11.75	-	2	-	36.29
27	KM 01+170	KM 01+215	15.38	-	-	43.81	6.31	-	2	-	86.41
28	KM 01+215	KM 01+260	7.58	-	-	20.77	6.04	-	4	-	68.25
29	KM 01+260	KM 01+305	7.24	-	-	12.16	60.32	-	1	-	43.27
30	KM 01+305	KM 01+350	-	-	-	21.38	30.64	-	2	19.34	78.64
31	KM 01+350	KM 01+395	-	-	-	7.48	6.94	-	2	9.45	87.94
32	KM 01+395	KM 01+440	26.93	-	-	6.35	33.70	-	5	-	43.84
33	KM 01+440	KM 01+485	17.06	15.18	-	18.52	45.23	-	3	4.29	27.68
34	KM 01+485	KM 01+530	-	9.15	-	36.81	46.56	-	1	14.18	21.64
35	KM 01+530	KM 01+575	-	7.29	-	18.07	107.75	-	1	-	51.09
36	KM 01+575	KM 01+620	28.64	-	-	14.58	77.29	-	2	-	17.83
37	KM 01+620	KM 01+665	-	23.68	-	16.24	48.30	-	3	-	48.21
38	KM 01+665	KM 01+710	-	-	-	15.08	79.46	-	1	-	84.27
39	KM 01+710	KM 01+755	37.25	-	-	8.04	58.81	-	1	-	-
40	KM 01+755	KM 01+800	8.63	-	-	20.19	72.64	-	2	-	5.72
41	KM 01+800	KM 01+845	-	64.28	-	3.54	41.60	-	1	-	10.58
42	KM 01+845	KM 01+890	9.62	15.54	-	26.77	33.64	-	2	-	21.84
TOTAL			443.73	819.18	6.74	796.31	1,304.24	7.06	108	69.25	2,108.17

Metrado de fallas por UM – método RPAS – Carril izquierdo

UM	PROG. INICIAL	PROG. FINAL	1. Piel de cocodrilo (m²)	3. Agriet. en bloque (m²)	4. Abult. y hundim. (m²)	10. Grietas long./transv. (m)	11. Parcheo (m²)	12. Pulim. de agregados (m²)	13. Huecos (und)	15. Ahuellamiento (m²)	19. Despr. de agregados (m²)
1	KM 00+000	KM 00+045	-	3.28	-	23.37	10.75	-	-	-	40.94
2	KM 00+045	KM 00+090	-	15.79	-	68.78	23.55	-	-	-	37.60
3	KM 00+090	KM 00+135	-	-	-	49.73	28.98	-	-	-	7.14
4	KM 00+135	KM 00+180	5.71	6.67	-	21.50	19.07	1.64	-	-	42.80
5	KM 00+180	KM 00+225	7.38	-	-	27.71	40.42	-	-	-	17.50
6	KM 00+225	KM 00+270	-	-	-	32.66	9.53	-	-	-	62.92
7	KM 00+270	KM 00+315	-	5.81	-	28.54	12.54	-	-	-	24.63
8	KM 00+315	KM 00+360	-	-	-	31.57	44.32	-	3	-	29.69
9	KM 00+360	KM 00+405	5.01	-	-	23.73	17.64	-	-	-	55.16
10	KM 00+405	KM 00+450	1.98	6.85	-	35.20	26.55	-	-	-	15.31
11	KM 00+450	KM 00+495	-	79.48	-	22.08	1.92	-	-	-	16.92
12	KM 00+495	KM 00+540	4.32	6.93	-	33.98	14.98	-	-	-	40.31
13	KM 00+540	KM 00+585	8.25	-	-	26.35	24.44	-	-	-	20.29
14	KM 00+585	KM 00+630	-	-	-	31.83	12.86	-	-	-	28.09
15	KM 00+630	KM 00+675	-	14.55	-	19.01	39.27	-	-	-	37.52
16	KM 00+675	KM 00+720	9.30	14.78	-	5.44	9.78	-	-	-	36.07
17	KM 00+720	KM 00+765	-	34.96	-	20.33	7.34	-	-	-	45.30
18	KM 00+765	KM 00+810	-	38.52	-	8.32	12.09	-	-	-	18.62
19	KM 00+810	KM 00+855	-	41.60	-	6.82	14.07	-	-	-	32.59
20	KM 00+855	KM 00+900	-	8.88	-	25.15	47.00	-	-	-	54.95
21	KM 00+900	KM 00+945	19.29	-	-	13.78	37.41	-	-	-	23.87
22	KM 00+945	KM 00+990	37.03	14.13	-	-	4.49	-	-	-	15.75
23	KM 00+990	KM 01+035	13.37	10.43	-	21.02	22.23	-	-	-	45.04
24	KM 01+035	KM 01+080	0.11	40.48	-	24.96	38.12	-	2	-	6.09

UM	PROG. INICIAL	PROG. FINAL	1. Piel de cocodrilo (m²)	3. Agriet. en bloque (m²)	4. Abult. y hundim. (m²)	10. Grietas long./transv. (m)	11. Parcheo (m²)	12. Pulim. de agregados (m²)	13. Huecos (und)	15. Ahuellamiento (m²)	19. Despr. de agregados (m²)
25	KM 01+080	KM 01+125	14.84	33.50	-	16.21	32.91	-	-	-	21.35
26	KM 01+125	KM 01+170	-	31.36	-	38.81	43.73	-	-	-	32.82
27	KM 01+170	KM 01+215	-	-	-	22.16	44.41	-	-	-	55.51
28	KM 01+215	KM 01+260	-	-	-	17.94	14.86	-	-	-	69.22
29	KM 01+260	KM 01+305	-	10.33	-	6.42	57.35	-	-	-	25.22
30	KM 01+305	KM 01+350	5.08	-	-	16.64	32.57	-	-	-	9.38
31	KM 01+350	KM 01+395	-	-	-	32.23	51.41	-	-	-	36.89
32	KM 01+395	KM 01+440	30.07	6.78	-	5.82	12.20	-	-	-	37.65
33	KM 01+440	KM 01+485	7.70	-	-	16.29	33.98	-	-	-	12.20
34	KM 01+485	KM 01+530	22.63	3.95	-	7.18	43.63	-	-	-	18.33
35	KM 01+530	KM 01+575	-	-	-	34.20	38.54	-	-	-	21.56
36	KM 01+575	KM 01+620	20.54	-	-	22.10	87.47	-	-	-	50.89
37	KM 01+620	KM 01+665	4.90	-	-	15.26	52.35	-	-	-	15.21
38	KM 01+665	KM 01+710	-	-	-	3.17	35.71	-	-	-	27.51
39	KM 01+710	KM 01+755	5.21	-	-	11.79	20.03	-	-	-	6.19
40	KM 01+755	KM 01+800	-	-	-	37.74	13.44	-	-	-	-
41	KM 01+800	KM 01+845	-	-	-	1.07	30.84	-	-	-	7.72
42	KM 01+845	KM 01+890	9.51	10.76	-	29.55	29.93	-	2	-	8.66
TOTAL			232.23	439.82	-	936.44	1,194.71	1.64	7	-	1,211.41

Metrado de fallas por UM – método RPAS – Carril derecho

UM	PROG. INICIAL	PROG. FINAL	1. Piel de cocodrilo (m ²)	3. Agriet. en bloque (m ²)	4. Abult. y hundim. (m ²)	10. Grietas long./tran sv. (m)	11. Parcheo (m ²)	12. Pulim. de agregados (m ²)	13. Huecos (und)	15. Ahuellamiento (m ²)	19. Despr. de agregados (m ²)
1	KM 00+000	KM 00+045	19.15	-	-	10.69	-	-	-	-	81.87
2	KM 00+045	KM 00+090	3.38	10.00	-	13.16	-	-	-	-	49.17
3	KM 00+090	KM 00+135	19.67	-	-	16.66	2.60	-	-	-	72.95
4	KM 00+135	KM 00+180	6.83	-	-	21.05	37.82	6.56	-	-	5.25
5	KM 00+180	KM 00+225	24.56	-	-	19.77	39.91	-	-	-	31.54
6	KM 00+225	KM 00+270	44.36	-	-	-	26.49	-	-	-	42.42
7	KM 00+270	KM 00+315	2.95	18.16	-	-	7.64	-	-	-	59.56
8	KM 00+315	KM 00+360	-	-	-	34.93	26.15	-	-	-	23.36
9	KM 00+360	KM 00+405	3.63	-	-	16.67	28.30	-	-	-	42.96
10	KM 00+405	KM 00+450	1.17	-	-	20.97	3.93	-	-	-	27.51
11	KM 00+450	KM 00+495	-	32.50	-	22.22	22.83	-	-	-	46.92
12	KM 00+495	KM 00+540	3.02	-	-	32.12	7.35	-	-	-	10.92
13	KM 00+540	KM 00+585	3.06	-	-	27.50	5.75	-	-	-	1.84
14	KM 00+585	KM 00+630	-	18.20	-	4.31	7.38	-	-	-	10.85
15	KM 00+630	KM 00+675	-	23.73	-	19.33	50.01	-	-	-	43.82
16	KM 00+675	KM 00+720	11.05	22.47	-	13.12	6.37	-	-	-	32.74

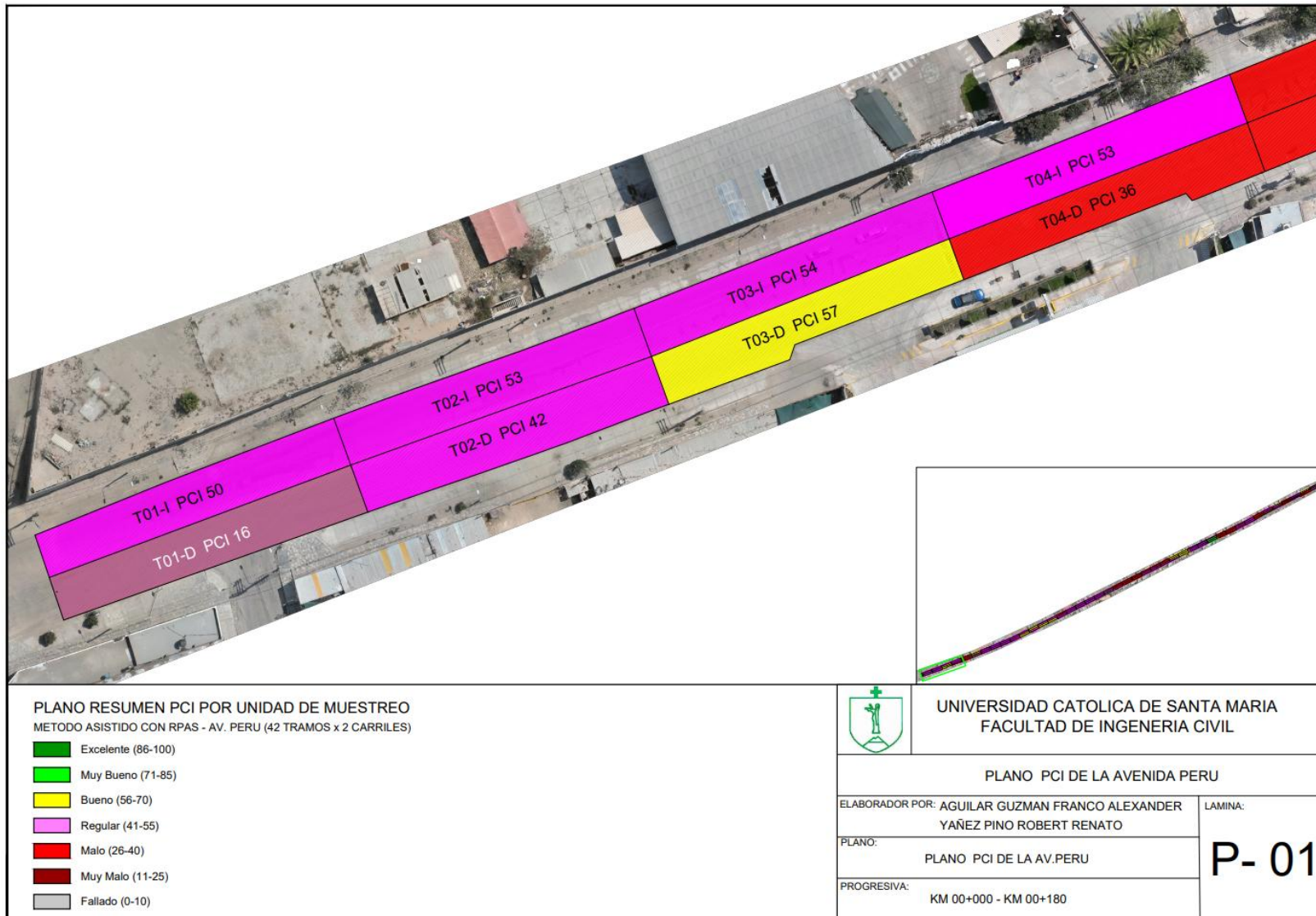
UM	PROG. INICIAL	PROG. FINAL	1. Piel de cocodrilo (m²)	3. Agriet. en bloque (m²)	4. Abult. y hundim. (m²)	10. Grietas long./tran sv. (m)	11. Parcheo (m²)	12. Pulim. de agregados (m²)	13. Huecos (und)	15. Ahuellamiento (m²)	19. Despr. de agregados (m²)
17	KM 00+720	KM 00+765	8.39	21.56	-	14.03	7.11	-	-	-	5.50
18	KM 00+765	KM 00+810	-	41.58	-	43.21	5.53	-	1	-	26.74
19	KM 00+810	KM 00+855	-	41.86	-	6.26	4.65	-	-	-	10.43
20	KM 00+855	KM 00+900	37.48	51.72	-	6.92	24.18	-	-	-	29.89
21	KM 00+900	KM 00+945	-	31.01	-	22.53	9.46	-	-	-	43.60
22	KM 00+945	KM 00+990	23.54	-	-	7.17	49.49	-	-	-	26.01
23	KM 00+990	KM 01+035	31.28	-	-	18.39	25.44	-	-	-	45.15
24	KM 01+035	KM 01+080	5.33	48.16	-	14.12	14.07	-	-	-	14.00
25	KM 01+080	KM 01+125	10.27	66.17	-	3.89	4.53	-	-	-	53.07
26	KM 01+125	KM 01+170	-	54.46	-	2.52	10.98	-	-	-	32.71
27	KM 01+170	KM 01+215	14.70	-	-	40.11	6.03	-	-	-	40.34
28	KM 01+215	KM 01+260	6.63	-	-	19.70	5.87	-	-	-	63.26
29	KM 01+260	KM 01+305	6.94	-	-	7.58	42.37	-	-	-	39.70
30	KM 01+305	KM 01+350	4.67	-	-	10.20	23.09	-	-	-	46.48
31	KM 01+350	KM 01+395	-	-	-	7.05	6.36	-	-	-	40.15
32	KM 01+395	KM 01+440	24.44	-	-	5.83	22.08	-	-	-	10.80
33	KM 01+440	KM 01+485	15.43	14.34	-	17.67	43.08	-	-	-	26.48

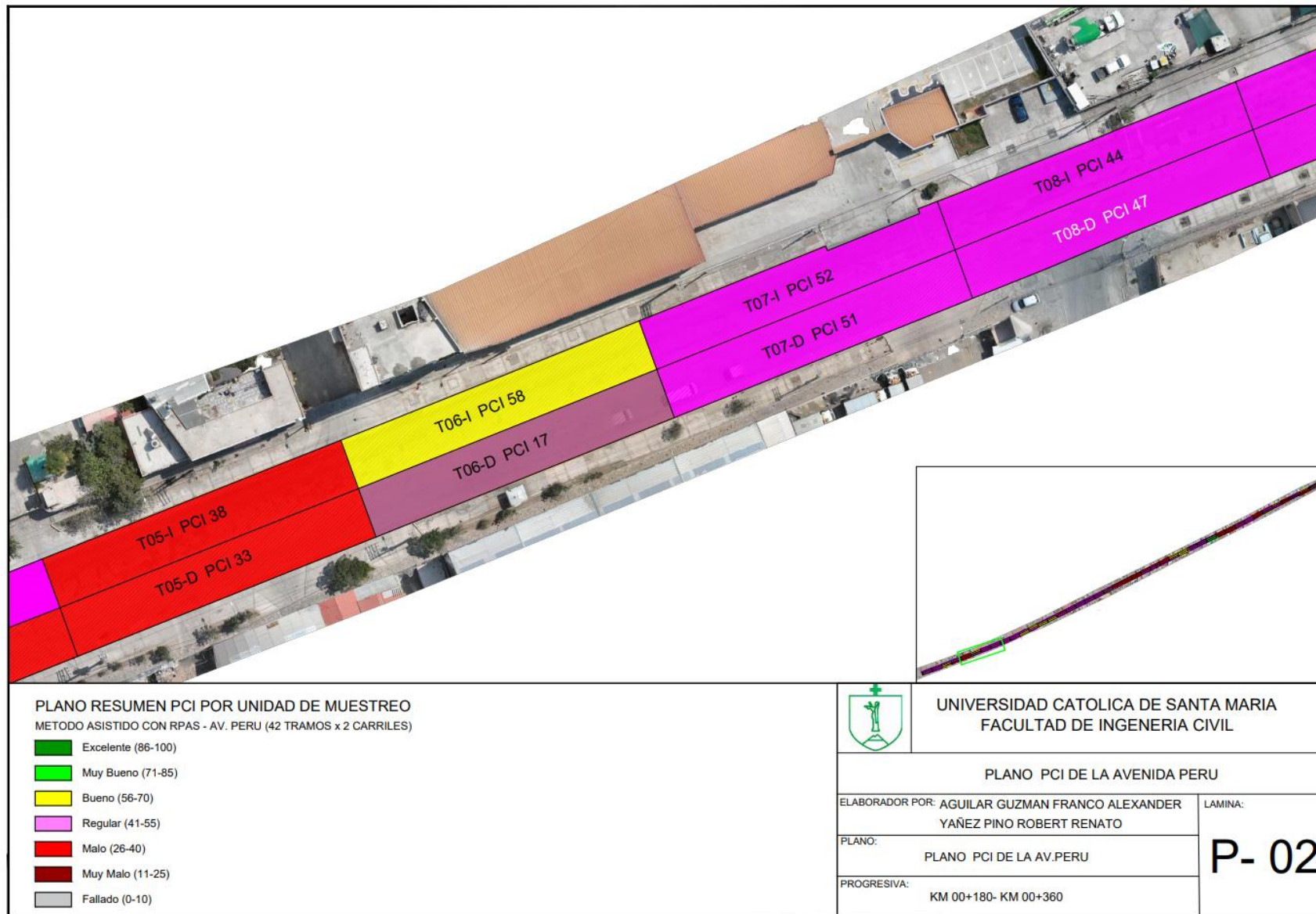
UM	PROG. INICIAL	PROG. FINAL	1. Piel de cocodrilo (m²)	3. Agriet. en bloque (m²)	4. Abult. y hundim. (m²)	10. Grietas long./tran sv. (m)	11. Parcheo (m²)	12. Pulim. de agregados (m²)	13. Huecos (und)	15. Ahuellamiento (m²)	19. Despr. de agregados (m²)
34	KM 01+485	KM 01+530	-	8.41	-	33.60	46.50	-	-	-	20.23
35	KM 01+530	KM 01+575	-	5.29	-	16.39	49.86	-	-	-	35.74
36	KM 01+575	KM 01+620	25.16	-	-	13.12	49.60	-	-	-	16.52
37	KM 01+620	KM 01+665	-	21.58	-	15.43	25.03	-	-	-	32.34
38	KM 01+665	KM 01+710	-	-	-	14.50	48.63	-	-	-	4.55
39	KM 01+710	KM 01+755	34.48	-	-	7.54	30.66	-	-	-	-
40	KM 01+755	KM 01+800	7.85	-	-	17.79	19.47	-	-	-	5.17
41	KM 01+800	KM 01+845	-	48.11	-	3.24	32.46	-	1	-	10.10
42	KM 01+845	KM 01+890	8.61	14.62	-	25.20	30.75	-	2	-	21.24
TOTAL			408.03	593.93	-	666.49	909.81	6.56	4	-	1,283.88

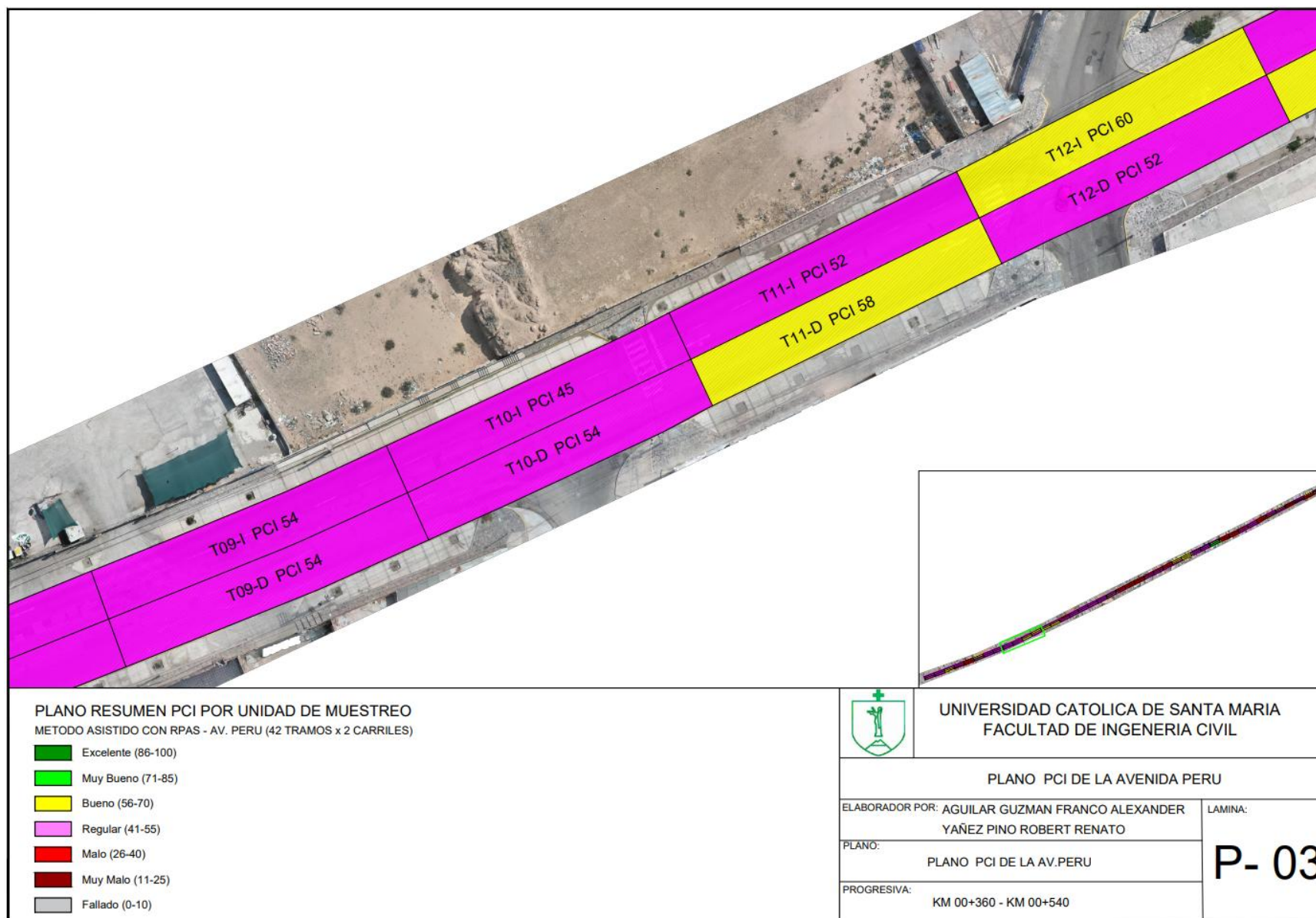
Resumen de deterioros – Av. Perú, Cerro Colorado Arequipa

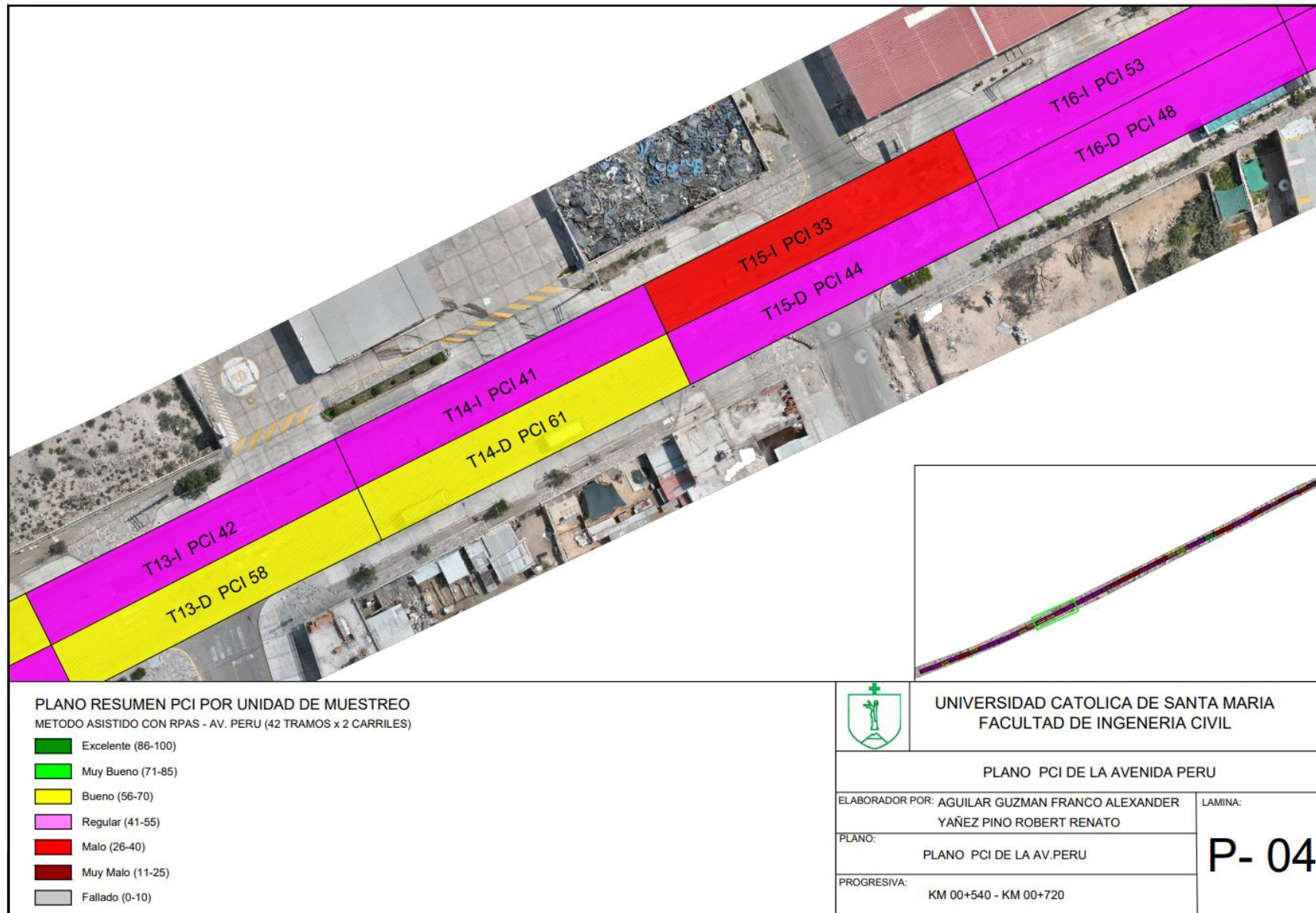
CRITERIOS PCI				MÉTODO CONVENCIONAL					MÉTODO RPAS					CAPACIDAD RPAS	OBSERVACIÓN CUALITATIVA
CÓD.	TIPO DE FALLA	UND.	SEV.	IZQ CANT.	TOTAL PARCIAL	DER CANT.	TOTAL PARCIAL	TOTAL	IZQ CANT.	TOTAL PARCIAL	DER CANT.	TOTAL PARCIAL	TOTAL		
1	Piel de cocodrilo	m²	L	222.72	408.61	40.26	443.73	852.34	103.83	232.19	43.26	408.03	640.22	ALTA	
			M	132.76		214.23			102.41		201.49			ALTA	
			H	53.13		189.24			25.95		163.28			ALTA	
3	Agrietamiento en bloque	m²	L	63.96	549.73	100.39	819.18	1,368.91	28.09	439.82	47.78	593.92	1,033.74	PARCIAL	Patrón poligonal identificado; extensión subdetectada por fisuras finas
			M	278.34		419.65			216.79		323.69			ALTA	
			H	207.43		299.14			194.94		222.45			ALTA	
4	Abultamientos y hundimientos	m²	L	4.46	4.46	4.36	6.74	11.20	—	—	—	—	—	NULA	Omitido: relieve no detectable en 2D
			M	—		2.38			—		—			NULA	Omitido: relieve no detectable en 2D
10	Grietas longitudinales y transversales	m	L	52.96	989.67	114.97	796.31	1,785.98	33.50	936.44	46.67	666.49	1,602.93	PARCIAL	Fisuras finas por debajo de la resolución; subdetección ~60–75%
			M	631.35		420.44			574.24		395.90			ALTA	
			H	305.36		260.90			328.70		223.92			ALTA	
11	Parcheo	m²	L	472.74	1,476.90	451.37	1,304.24	2,781.14	386.55	1,194.70	313.20	909.82	2,104.52	ALTA	
			M	1,004.16		852.87			808.15		596.62			ALTA	
12	Pulimento de agregados	m²	L	1.76	1.76	7.06	7.06	8.82	1.64	1.64	6.56	6.56	8.20	ALTA	
13	Huecos	und	L	91	98	104	108	206	—	7	—	4	11	NULA	Omitidos: diámetro y profundidad bajo la resolución
			M	5		1			5		1			ALTA	
			H	2		3			2		3			ALTA	
15	Ahuellamiento	m²	L	147.99	147.99	69.25	69.25	217.24	—	—	—	—	—	NULA	Omitido: daño en profundidad (eje Z)
19	Desprendimiento de agregados	m²	L	1,911.38	2,023.85	1,812.61	2,108.17	4,132.02	1,161.73	1,211.44	1,063.28	1,283.87	2,495.31	ALTA	
			M	68.90		122.49			25.60		117.61			ALTA	
			H	43.57		173.07			24.11		102.98			ALTA	

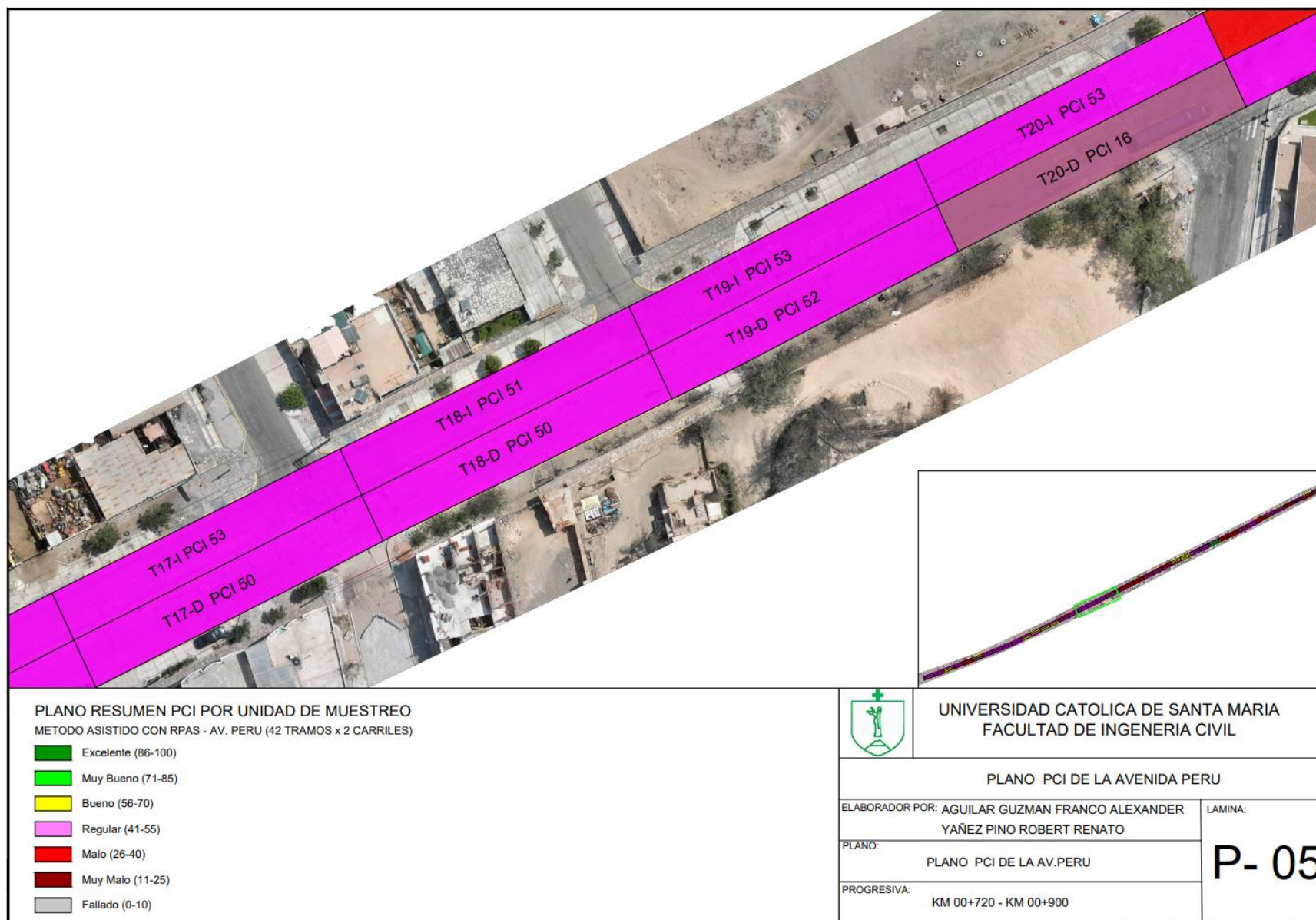
Anexo 7. Plano PCI Convencional – Avenida Perú

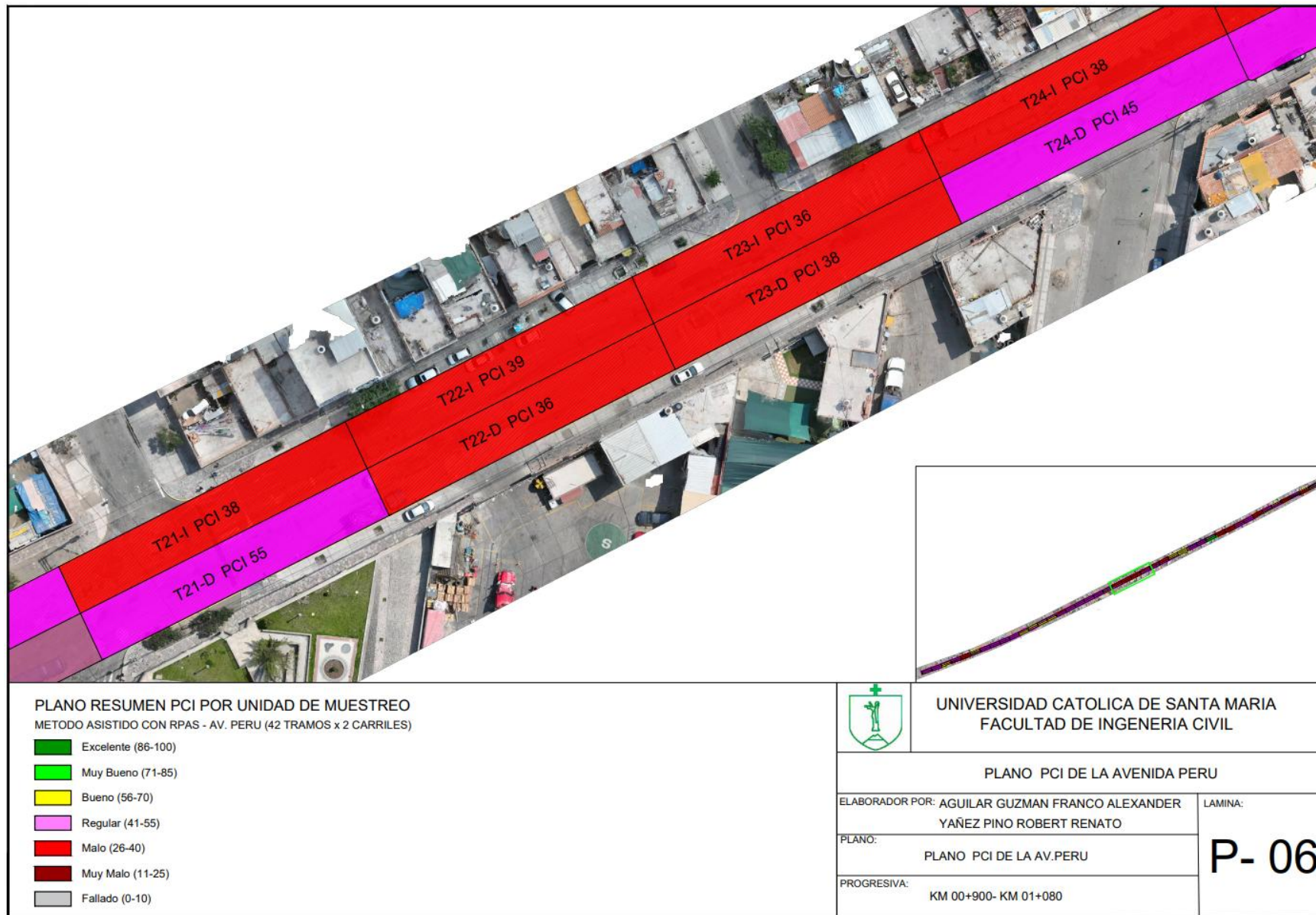


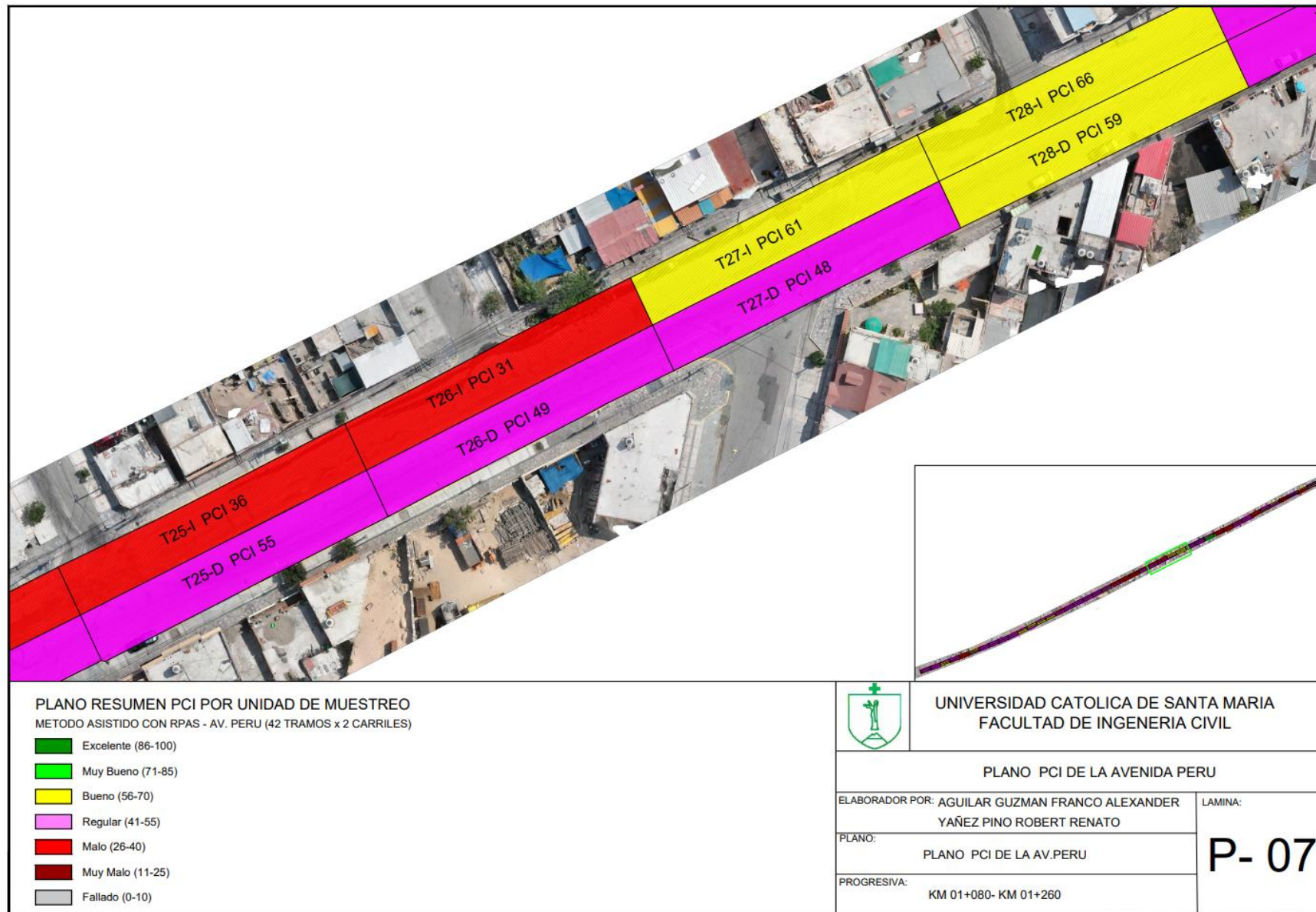




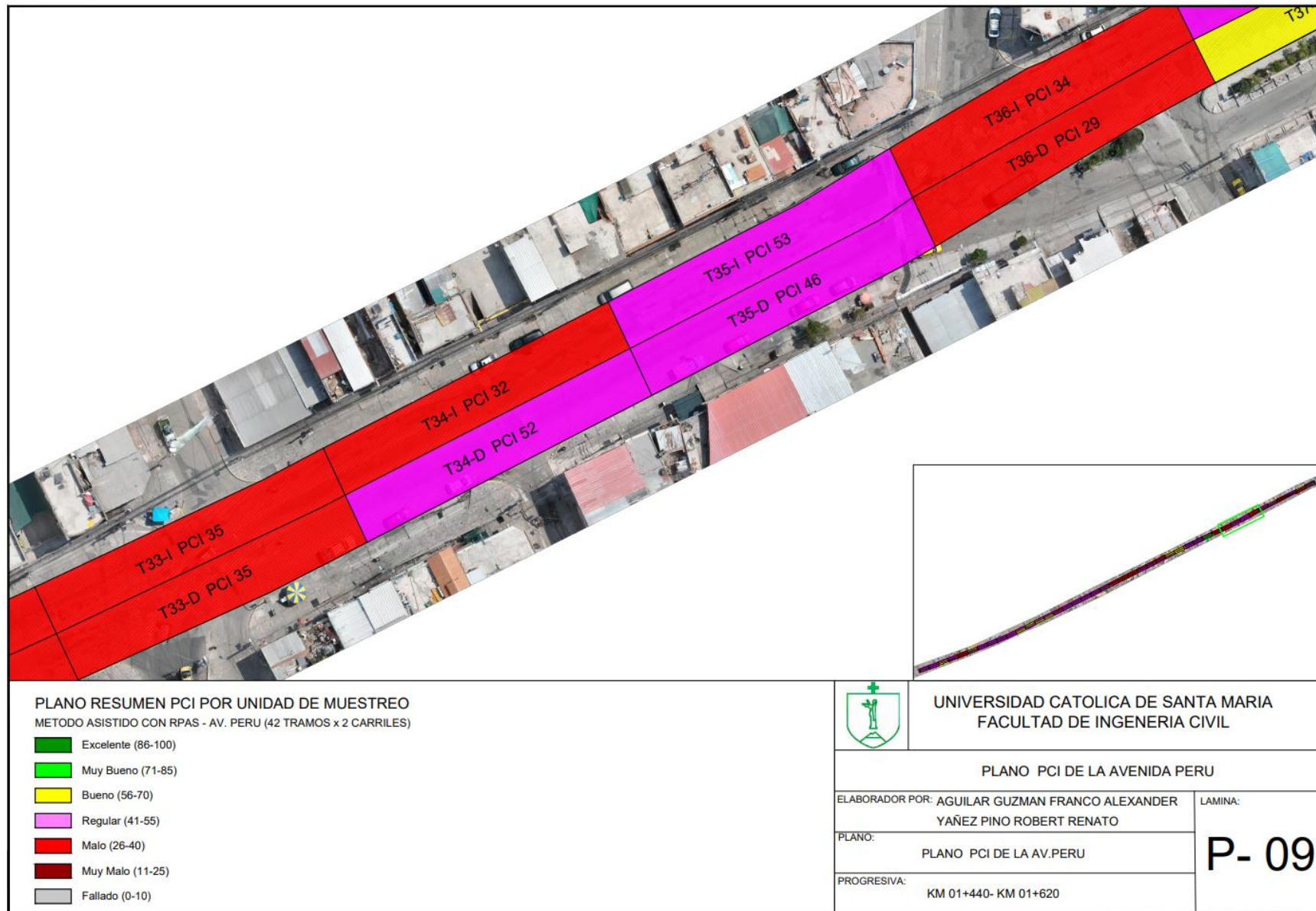


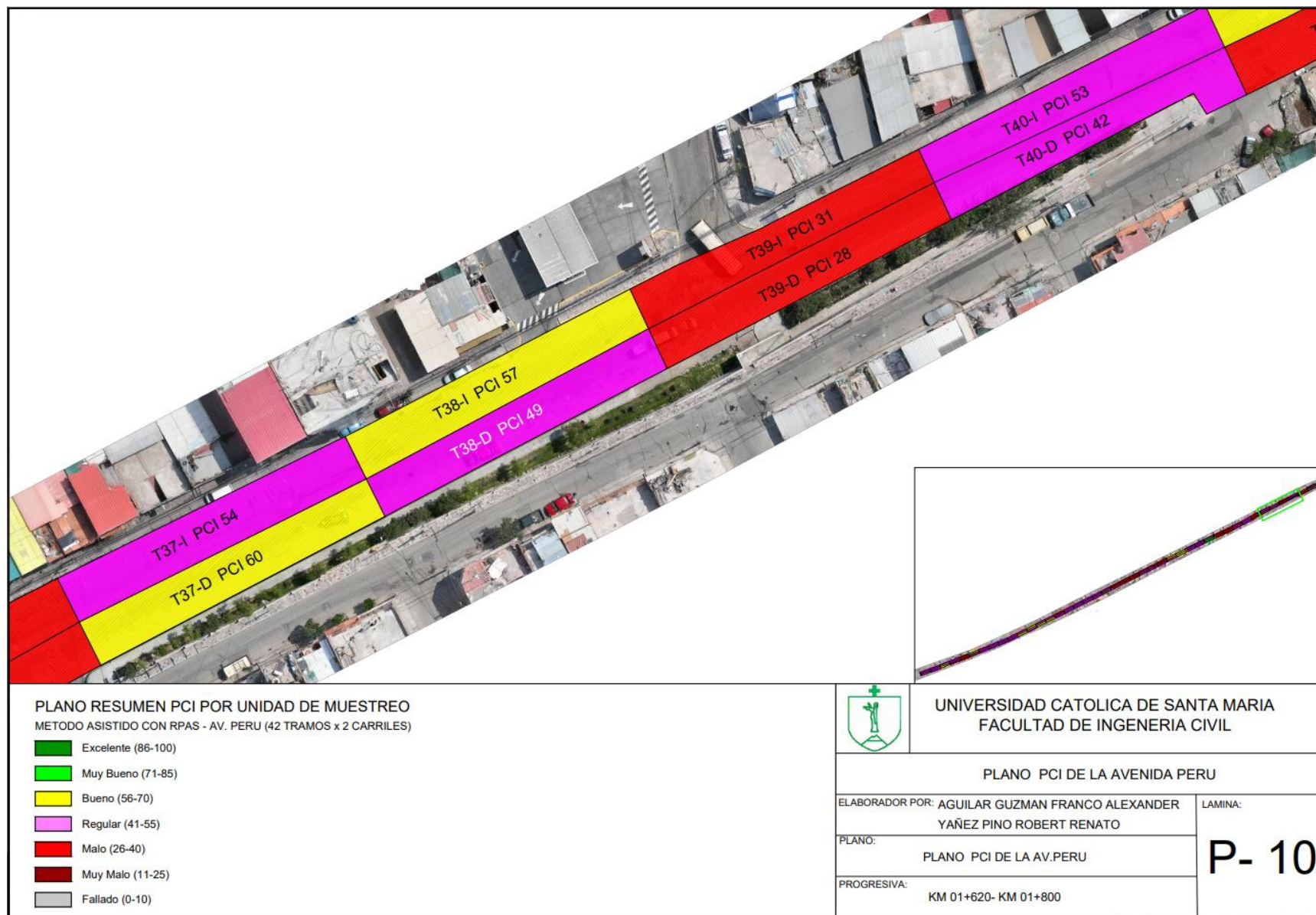


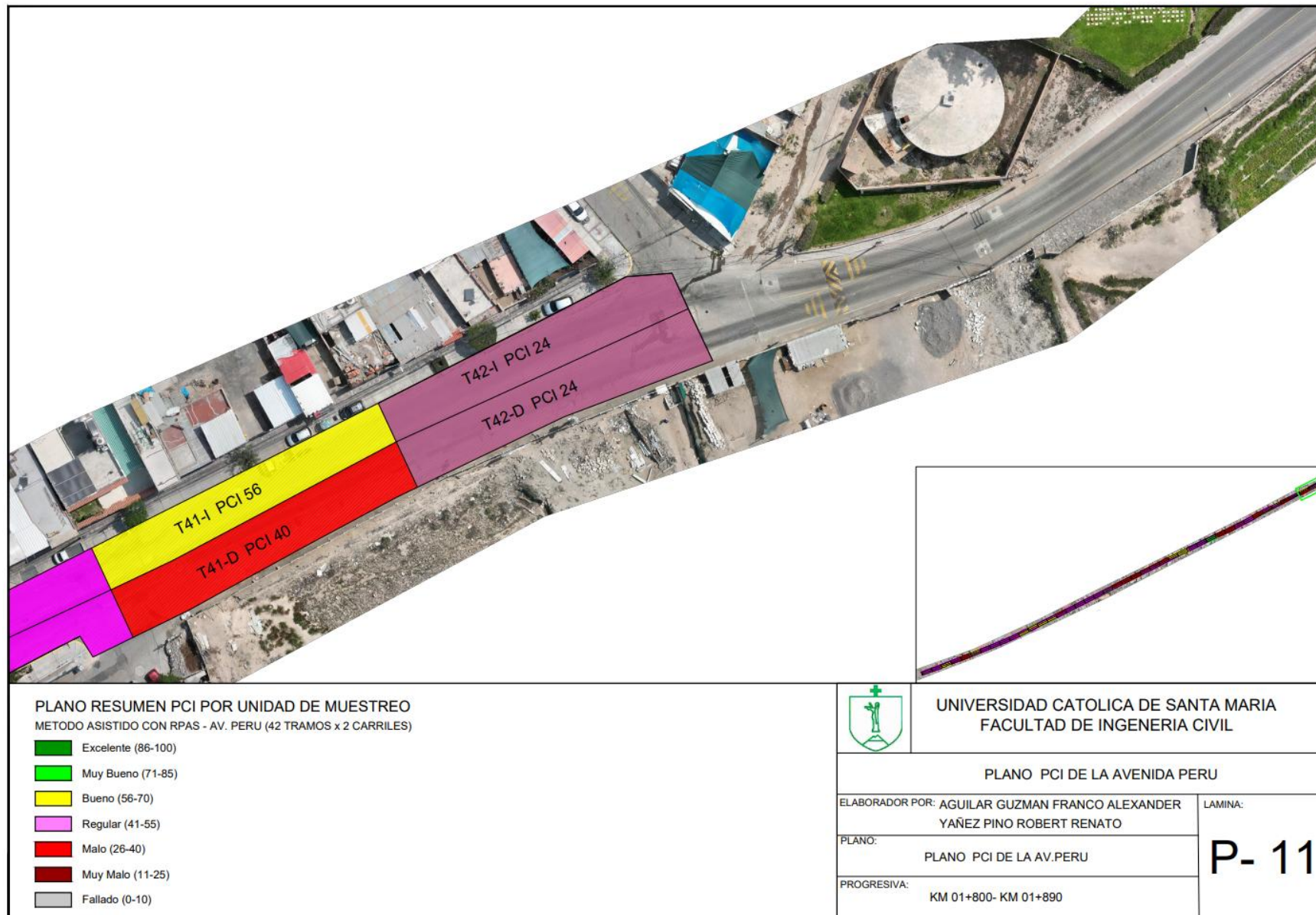




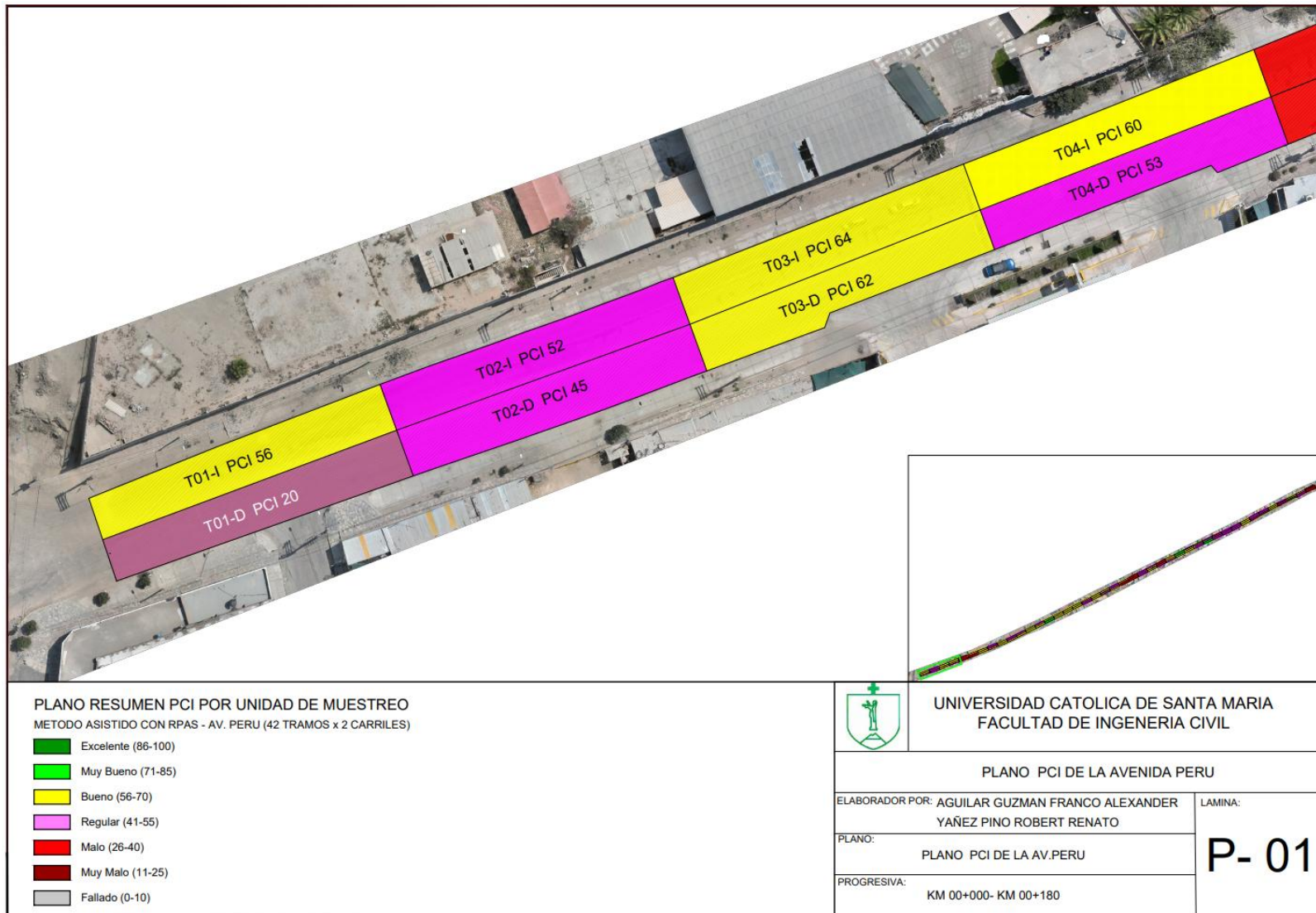


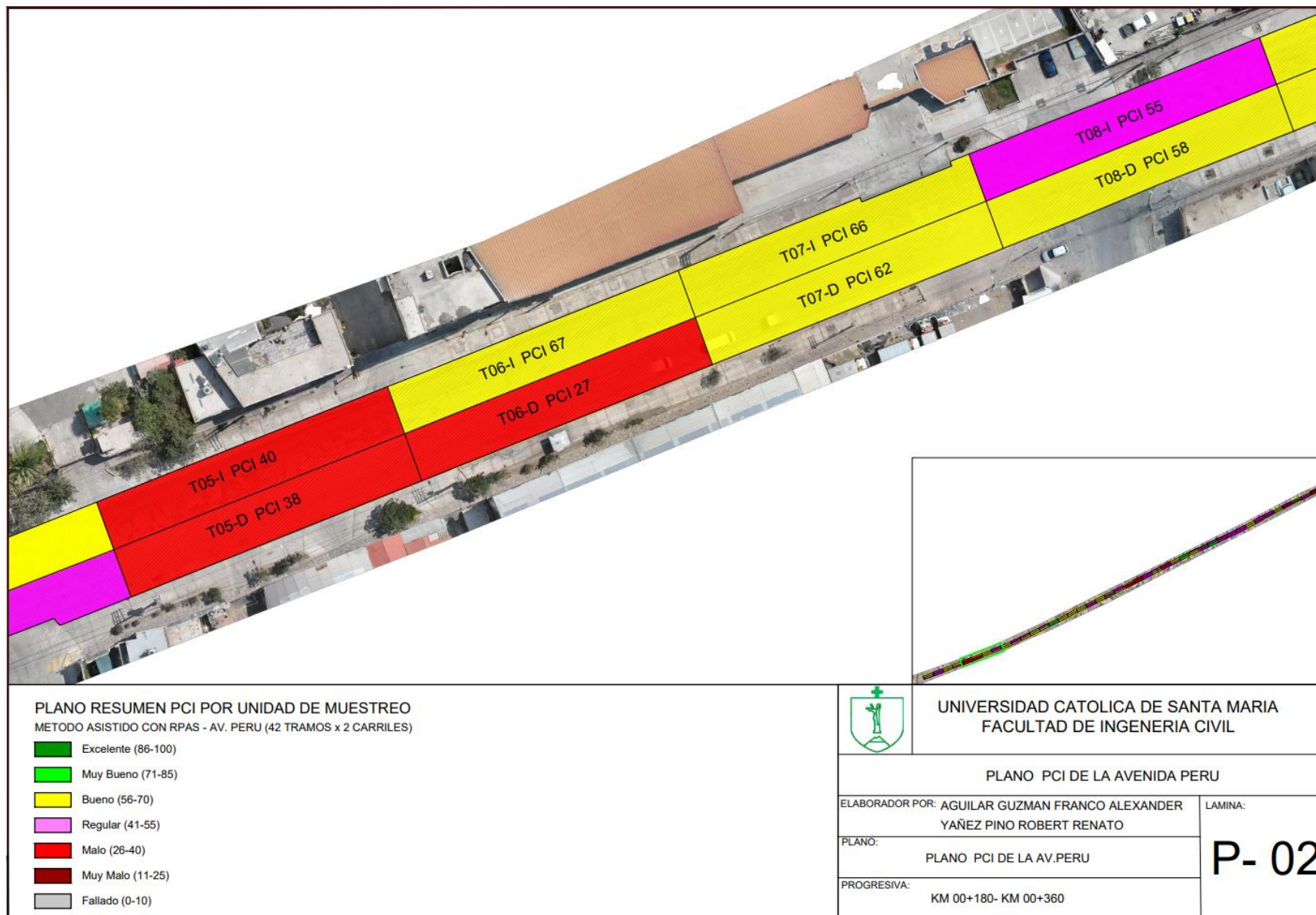


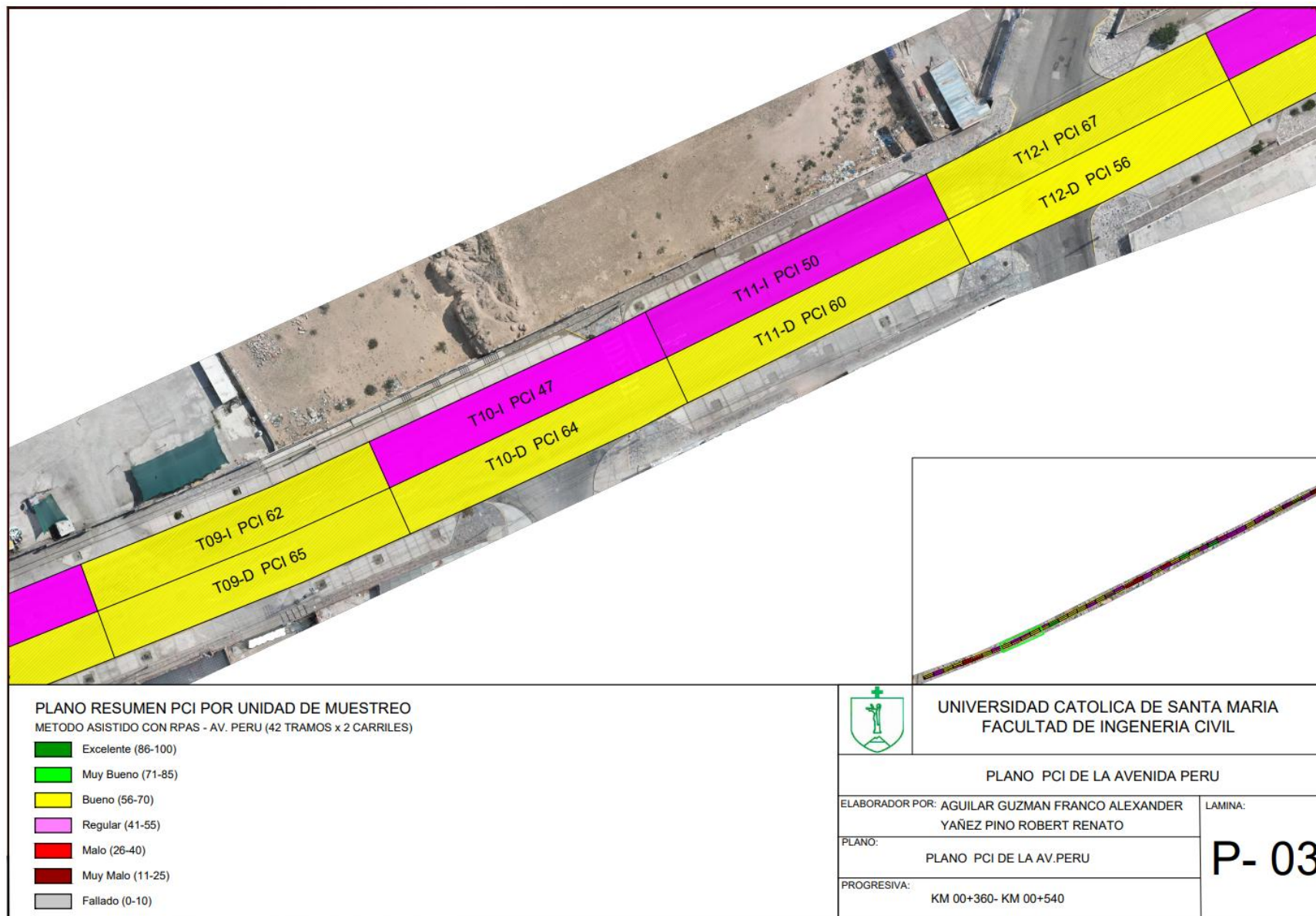


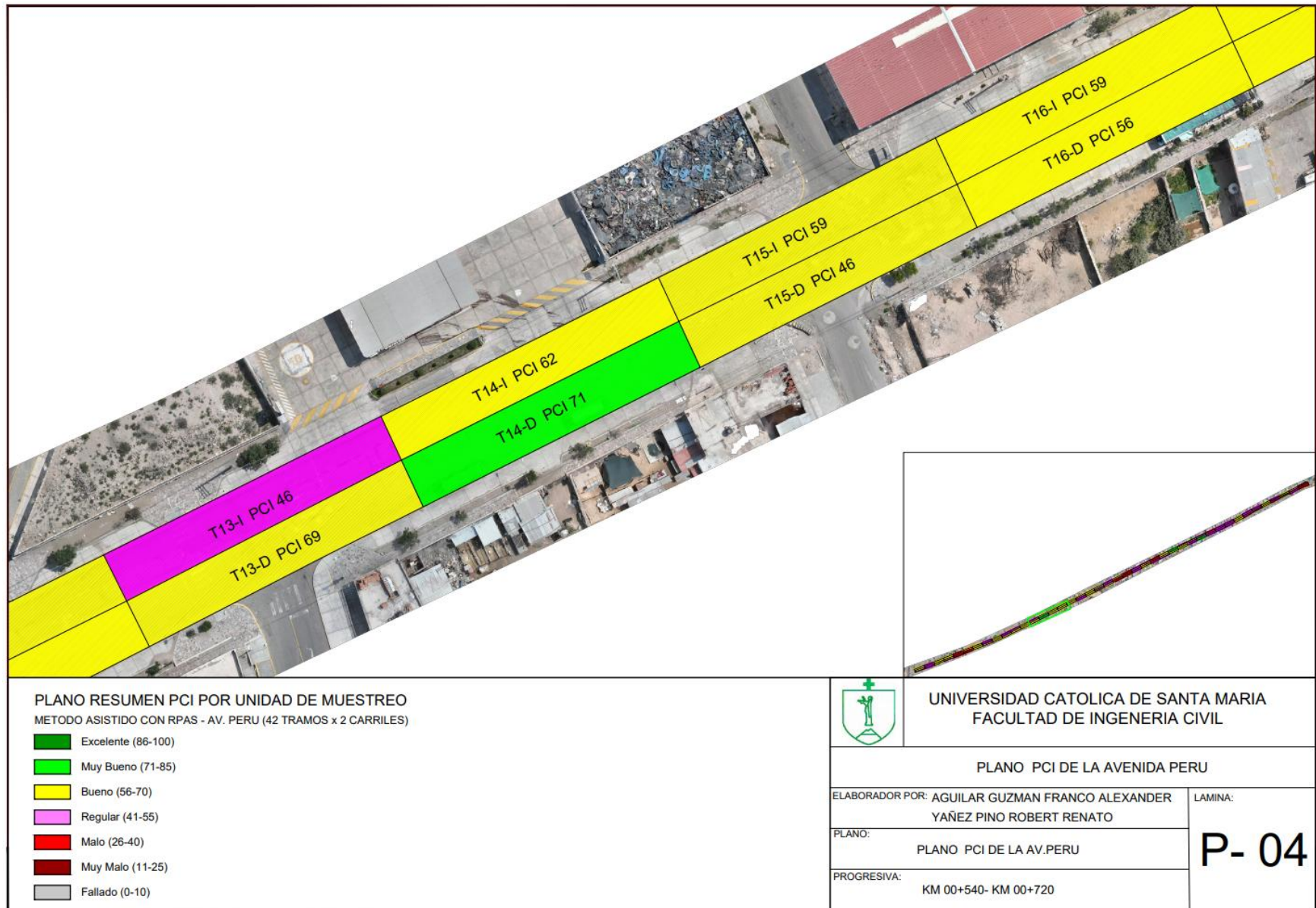


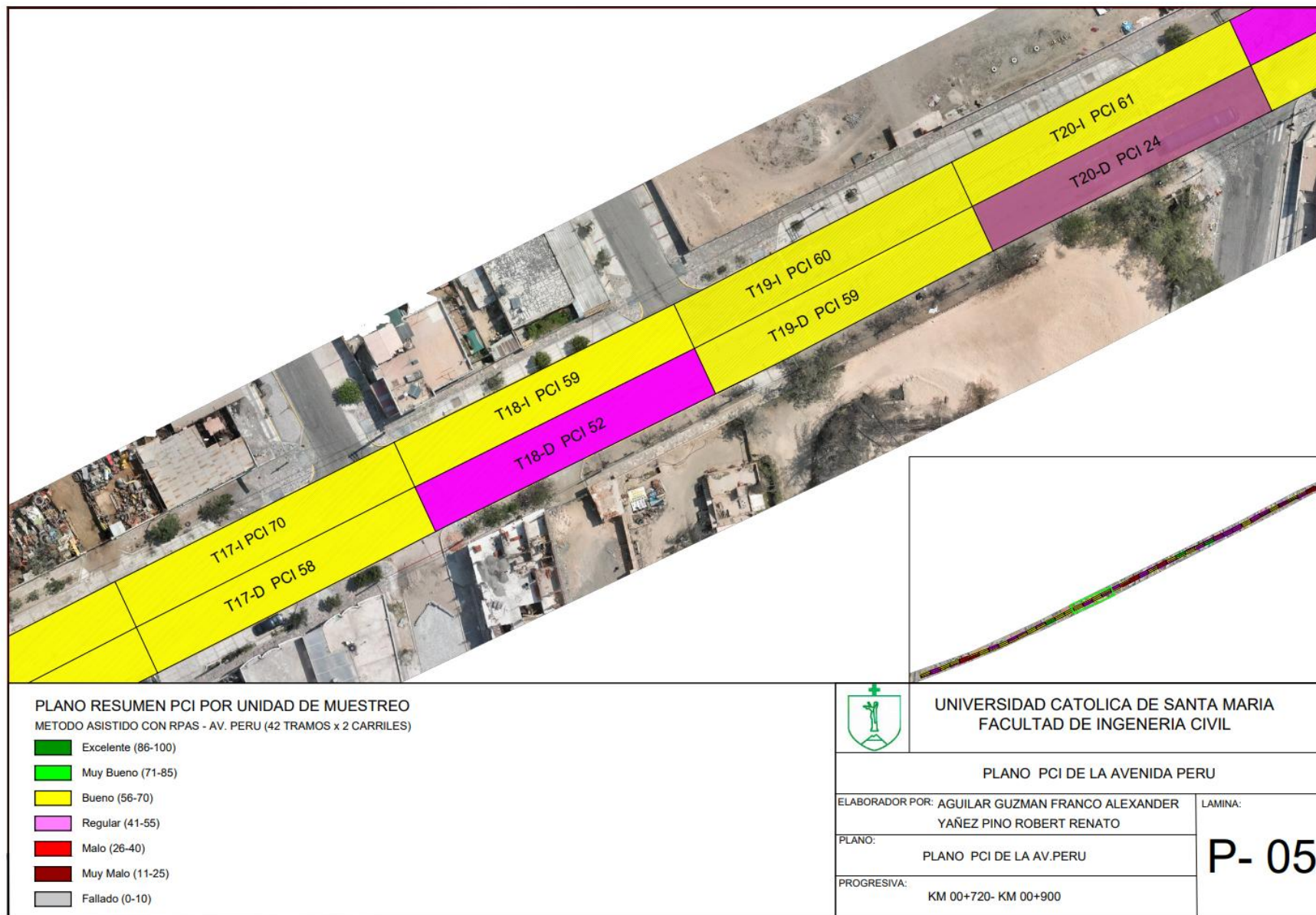
Anexo 8. Plano PCI RPAS – Avenida Perú

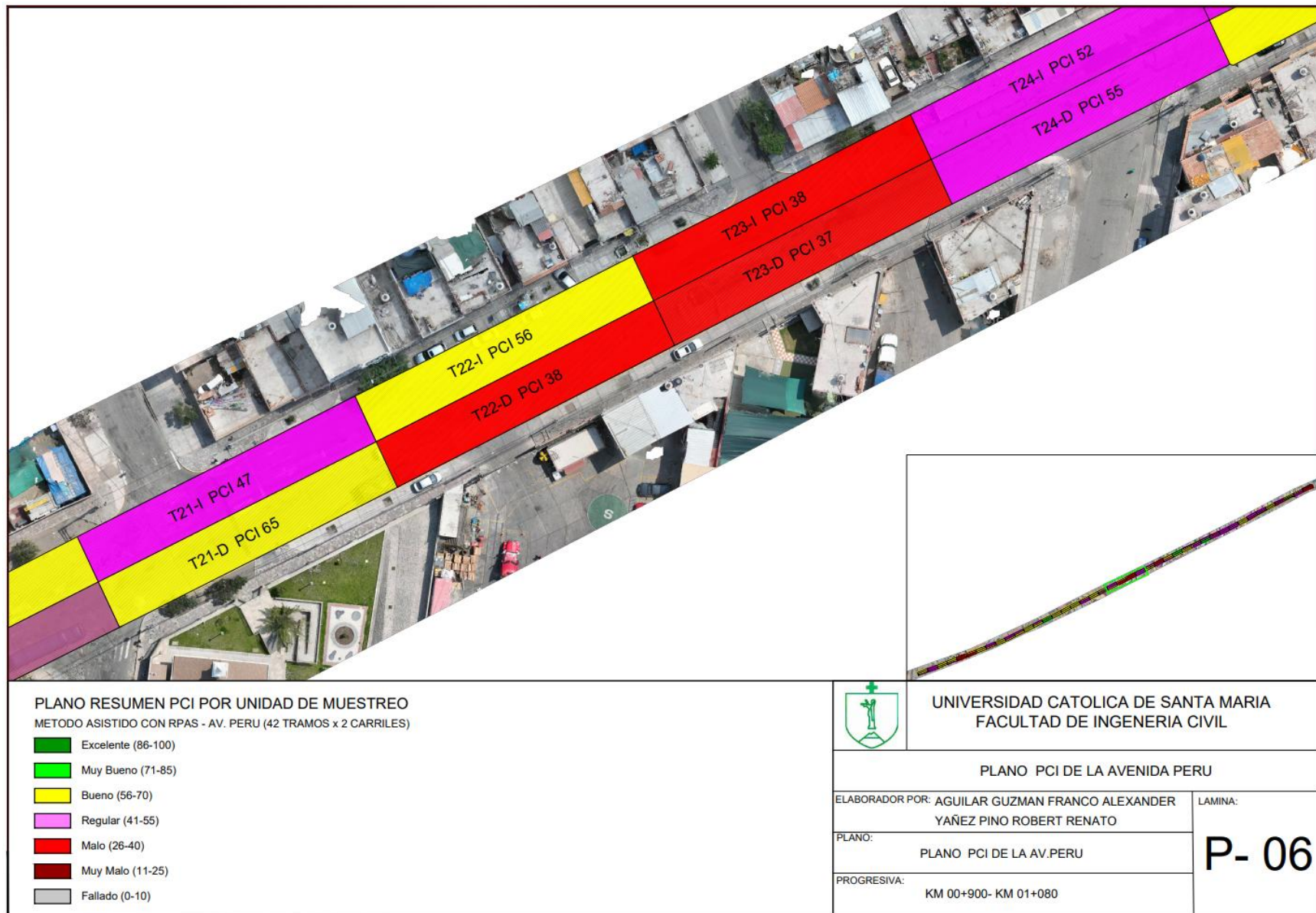


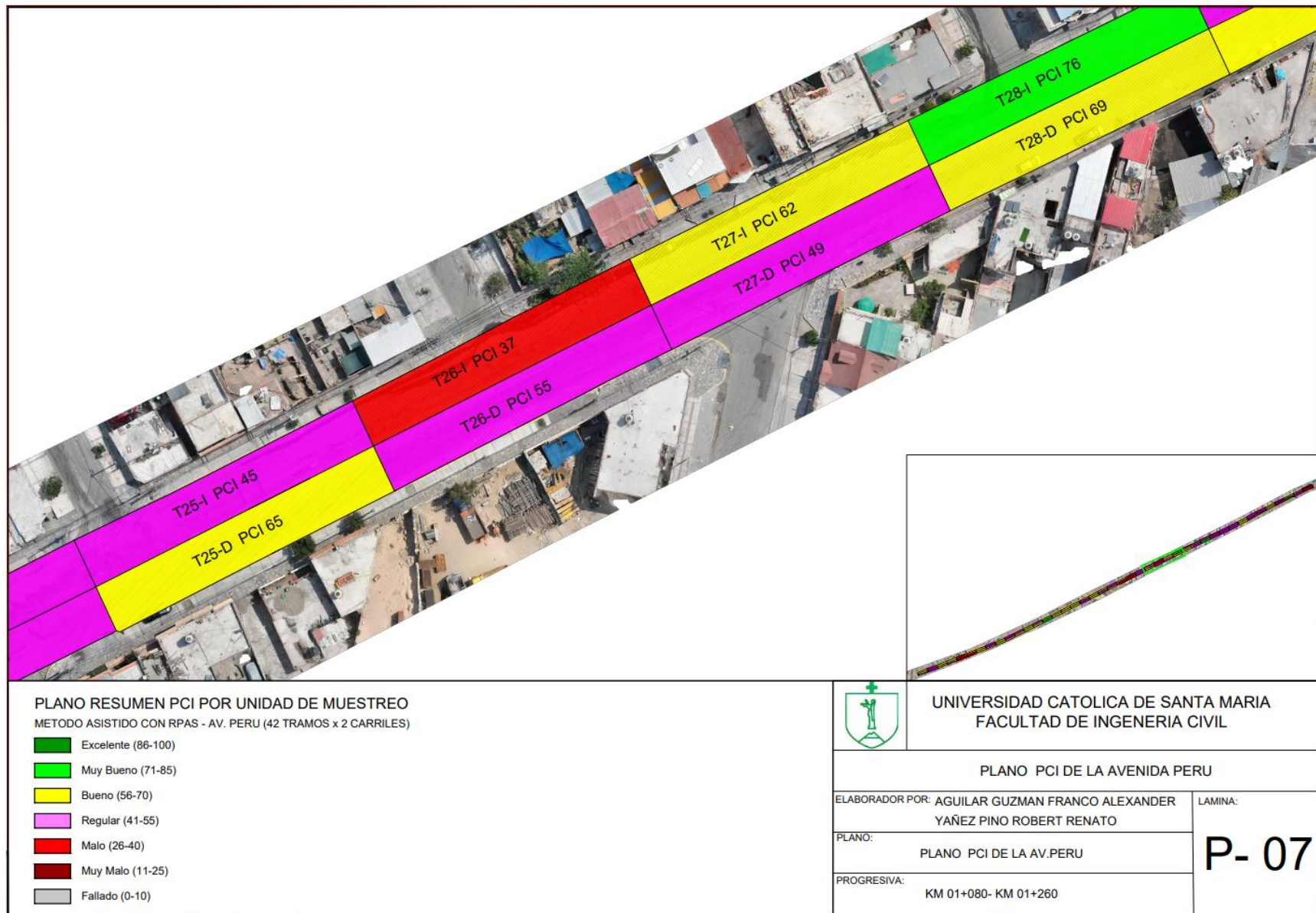


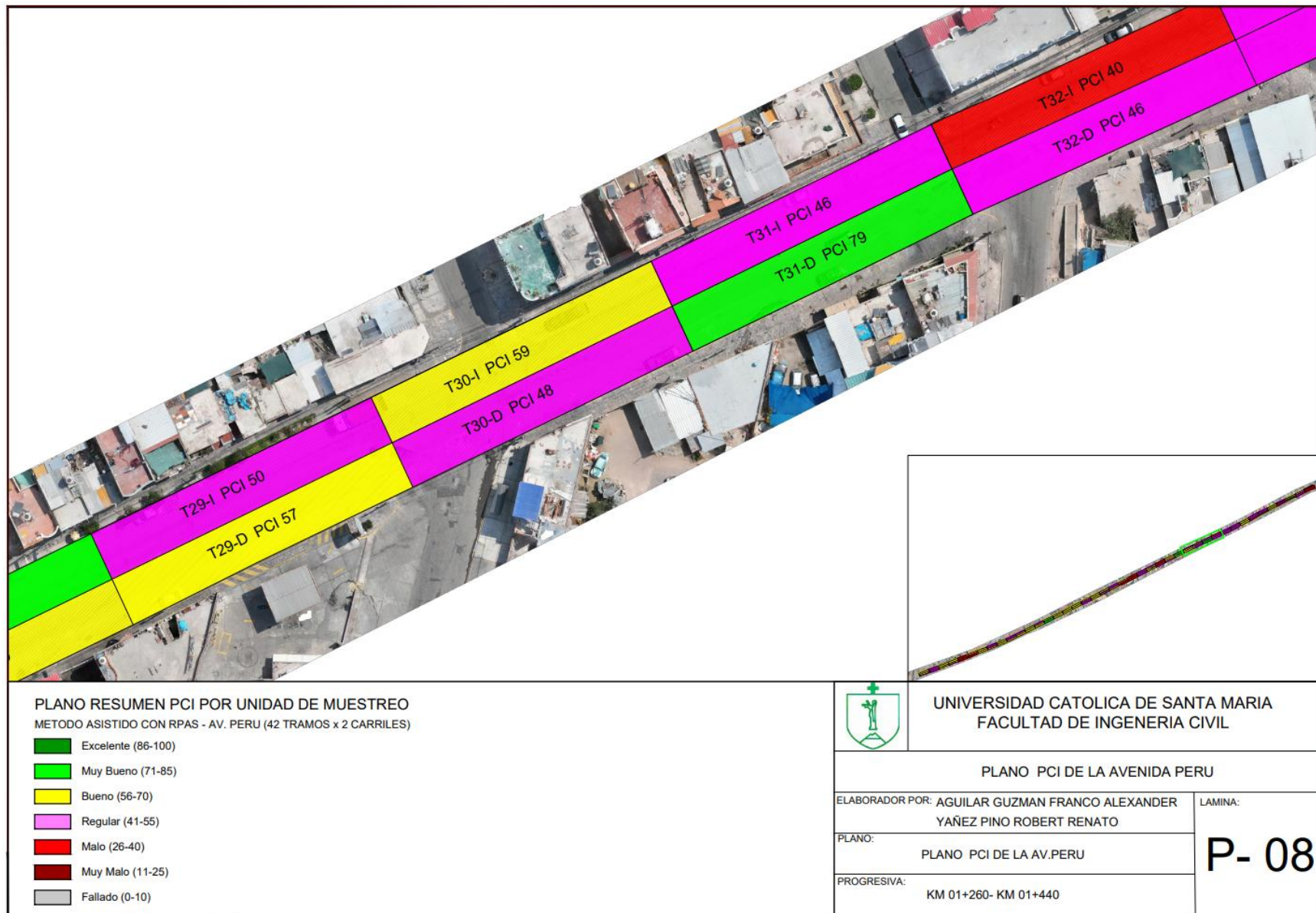


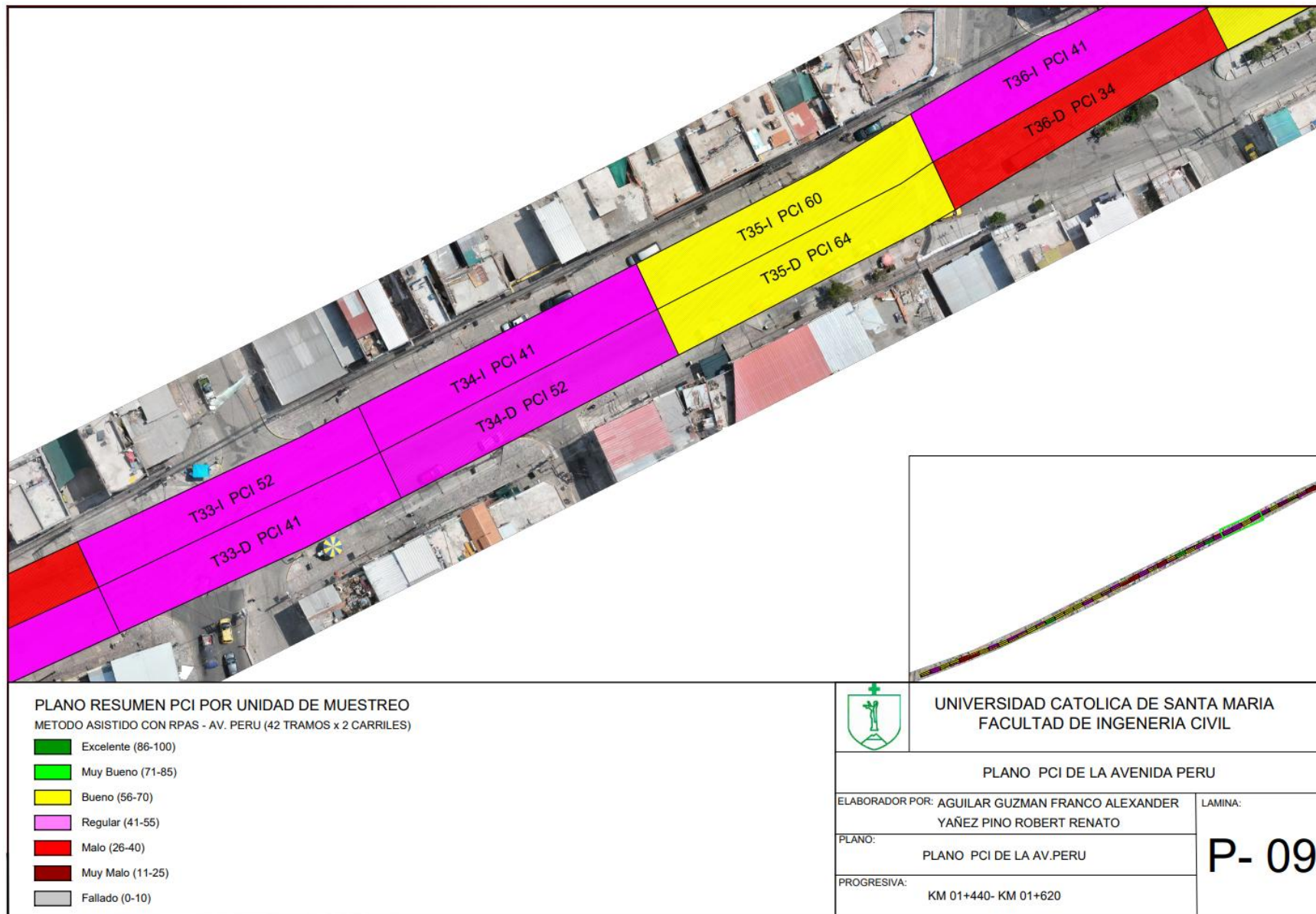


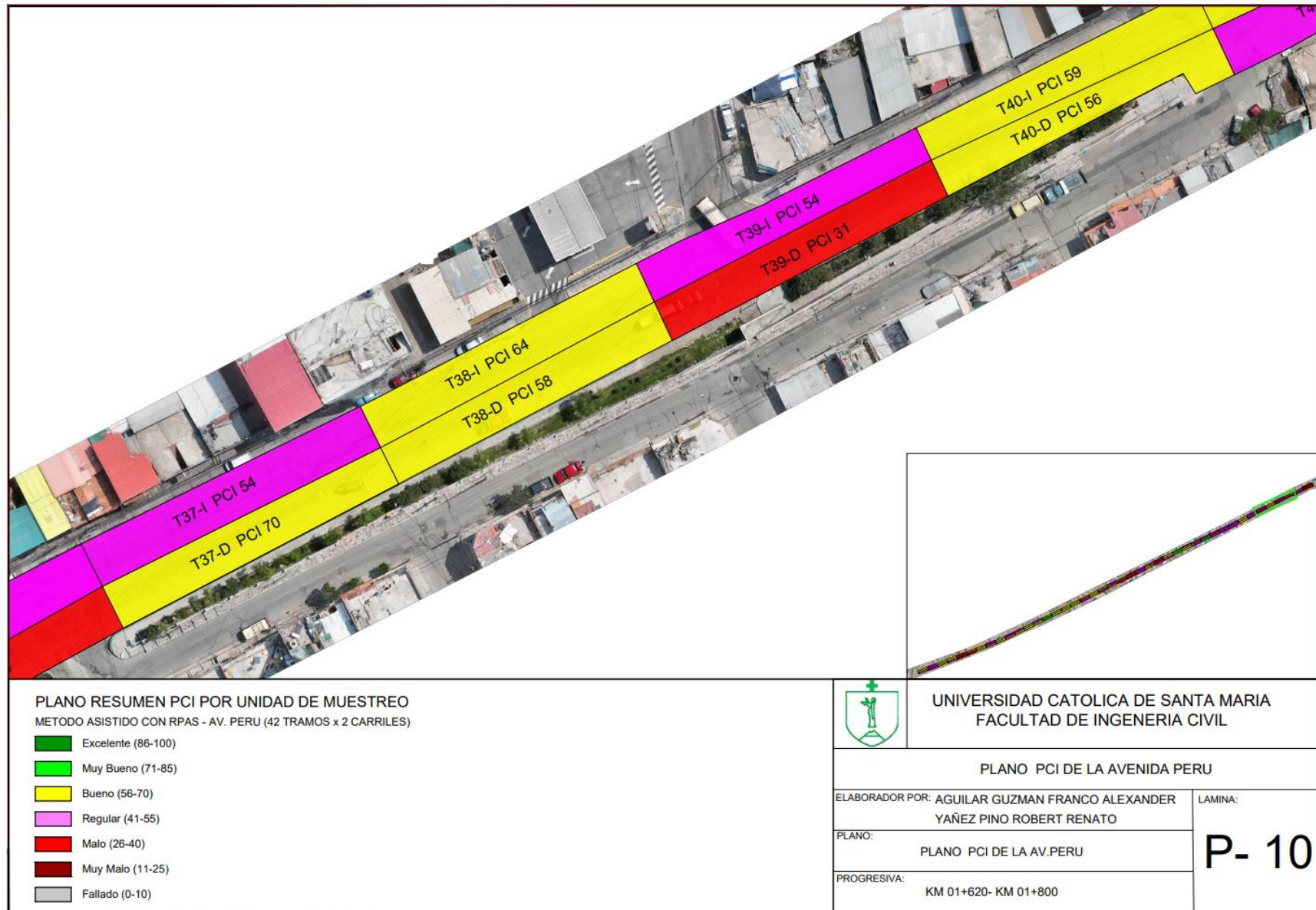


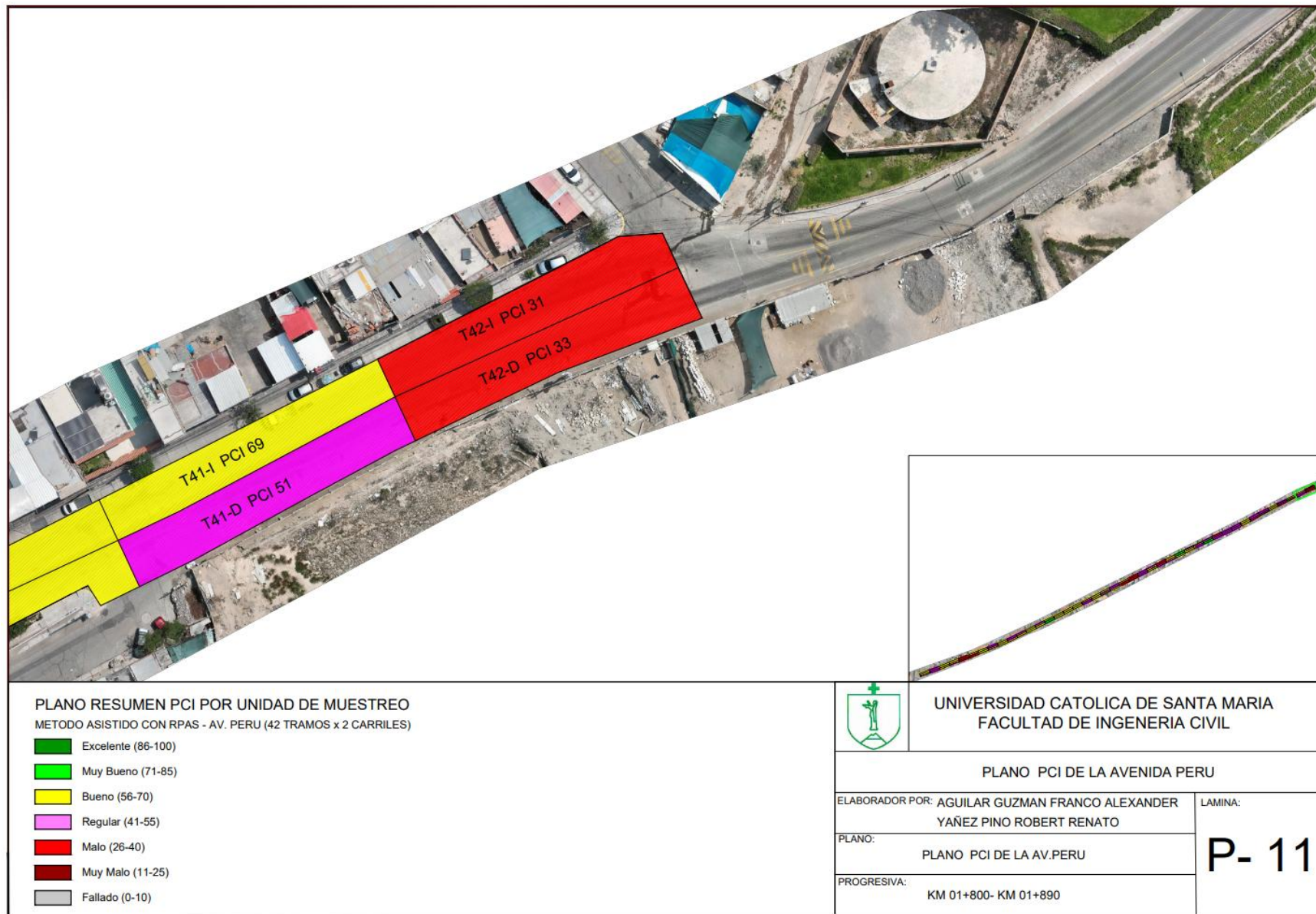












Anexo 9. Reporte de calidad y precisión de puntos de control

Quality Report



Display Quality Report as PDF

Online Support

Quality Report

Generated with Pix4Denterprise version 4.5.6

**Important:** Click on the different icons for:

 Help to analyze the results in the Quality Report

 Additional information about the sections



Click [here](#) for additional tips to analyze the Quality Report

Summary

Project	PROCESAMIENTO DE IMÁGENES DE LA AVENIDA PERU TESIS UCSM
Processed	2026-05-01 15:55:29
Camera Model Name(s)	M3E_12_3_5280x3956 (1581 F5PHDJ231H00N012N) (RGB)
Average Ground Sampling Distance (GSD)	1.04 cm / 0.41 in
Area Covered	0.069 km ² / 6.9002 ha / 0.03 sq. mi. / 17.0596 acres
Time for Initial Processing (without report)	20m:19s
Images	701
Images Processed	701 (100%)
GPS/Control Points Used	8 puntos de control (GPS)
Results	Sin errores

Quality Check

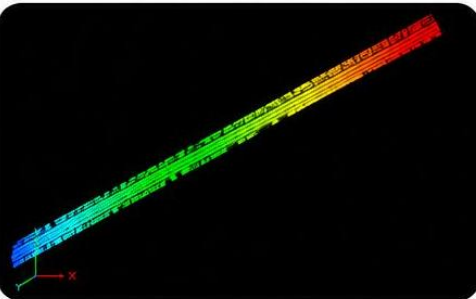
 Images	median of 59418 keypoints per image	
 Dataset	701 out of 701 images calibrated (100%), all images enabled, 8 blocks	
 Camera Optimization	0.24% relative difference between initial and optimized internal camera parameters	
 Matching	median of 15336.6 matches per calibrated image	
 Georeferencing	yes, 8 GCPs (3D), mean RMS error = 0.023 m	

Preview

Ortomosaico



Modelo de Elevación (DEM)





Proyecto: PROCESAMIENTO DE IMÁGENES DE LA AVENIDA PERU TESIS UCSM
Procesado: 2026-05-01 15:55:29
Software: Pix4Denterprise version 4.5.6
Sistema de coordenadas: WGS 84 / UTM zone 18S



GSD: 1.04 cm / 0.41 in
Área: 0.069 km² / 6.9002 ha / 0.03 sq. mi. / 17.0596 acres
Imágenes: 701 (100% calibradas)
Puntos de control (GCP): 8
Error medio (RMS): 0.023 m

? Ground Control Points



0 out of 8 check points have been labeled as inaccurate.



Check Point Name	Accuracy XYZ [m]	Error X [m]	Error Y [m]	Error Z [m]	Projection Error [pixel]	Verified/Marked
GCP1	0.020	-0.010	0.012	-0.045	0.041	3 / 3
GCP2	0.020	0.004	-0.033	-0.041	0.135	3 / 3
GCP3	0.020	0.014	-0.037	-0.007	0.032	3 / 3
GCP4	0.020	-0.003	0.006	-0.011	0.039	3 / 3
GCP5	0.020	-0.002	-0.004	-0.029	0.061	3 / 3
GCP6	0.020	-0.031	0.003	-0.055	0.100	3 / 3
GCP7	0.020	-0.004	-0.031	-0.024	0.065	3 / 3
GCP8	0.020	0.006	0.007	-0.018	0.048	3 / 3
Mean [m]	0.020	-0.003375	-0.009625	-0.028750		
Sigma [m]	0.020	0.013500	0.019125	0.016250		
RMS Error [m]	0.020	0.013899	0.021397	0.033017		



Localisation accuracy per GCP and mean errors in the three coordinate directions.
The last column counts the number of calibrated images where the GCP has been automatically verified vs. manually marked.



Proyecto: PROCESAMIENTO DE IMÁGENES DE LA AVENIDA PERU TESIS UCSM
Fecha de procesamiento: 2026-05-01 15:55:29
Software: Pix4Denterprise version 4.5.6
Sistema de coordenadas: WGS 84 / UTM zone 18S



GSD: 1.04 cm / 0.41 in
Área: 0.069 km² / 6.9002 ha / 0.03 sq. mi. / 17.0596 acres
Imágenes: 701 (100% calibradas)
Puntos de control (GCP): 8
Error medio (RMS): 0.023 m