

FACULTAD DE INGENIERÍA



Carrera de Ingeniería Civil

“EVALUACIÓN DE LA TERMOGRAFÍA Y LA RESISTIVIDAD ELÉCTRICA DE SUELOS COMO PROCEDIMIENTOS ADICIONALES PARA LA MEJORA EN LA PRECISIÓN DEL MÉTODO PCI DE LA AVENIDA TACNA DEL DISTRITO DE SAN MIGUEL”

Tesis para optar el título profesional de:

Ingeniero Civil

Autores:

Joe Willian Enriquez Vera
Jhonataan Flores Espinoza

Asesor:

Ing. Marko Aníbal Torres Flores

Lima - Perú

2021

DEDICATORIA

A mis padres y hermana que con su amor y
apoyo hacia mi hacen que todo sea posible.

J. Flores

A mi familia que con sus consejos y apoyo me
dan fuerzas para seguir por el camino correcto.

J. Enriquez

AGRADECIMIENTO

A nuestros profesores, compañeros de estudio y asesor
que ayudaron en la realización de esta investigación.

TABLA DE CONTENIDO

DEDICATORIA.....	2
AGRADECIMIENTO	3
ÍNDICE DE TABLAS.....	7
ÍNDICE DE FIGURAS.....	9
ÍNDICE DE ECUACIONES	12
RESUMEN.....	13
CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN.....	14
1.1. ANTECEDENTES	15
1.2. REALIDAD PROBLEMÁTICA.....	17
1.3. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	19
1.4. HIPÓTESIS	19
1.5. OBJETIVOS	20
1.6. JUSTIFICACIÓN DEL ESTUDIO	20
CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO	22
2.1. PAVIMENTO.....	22
2.1.1. <i>Pavimento Rígido</i>	22
2.1.2. <i>Pavimento Articulado</i>	23
2.1.3. <i>Pavimento Flexible</i>	23
2.2. MÉTODO PAVEMENT CONDITION INDEX (PCI)	25
2.2.1. <i>Definición</i>	25
2.2.2. <i>Instrumentos para el calculo</i>	26
2.2.3. <i>Tipos de fallas en pavimentos flexibles</i>	27
2.3. TERMOGRAFÍA	51
2.3.1. <i>Definición de termografía infrarroja</i>	51
2.3.2. <i>Materiales e instrumentos</i>	52

2.4.	RESISTIVIDAD DE SUELOS	53
2.4.1.	<i>Definición</i>	53
2.4.2.	<i>Medición de resistividad</i>	54
2.4.2.1.	Medición de resistividad con telurómetro	55
2.4.2.2.	Medición de resistividad con método de Wenner	56
2.4.2.3.	Medida de resistividad sobre pavimentos	58
CAPÍTULO III. MÉTODO		60
3.1.	TIPO DE INVESTIGACIÓN.....	60
3.2.	UBICACIÓN GEOGRÁFICA DEL ESTUDIO	60
3.2.1.	<i>Ubicación</i>	60
3.2.2.	<i>Área de influencia</i>	61
3.3.	POBLACIÓN Y MUESTRA DEL ESTUDIO.....	64
3.3.1.	<i>Población</i>	64
3.3.2.	<i>Muestra</i>	64
3.4.	METODOLOGÍA DE ESTUDIO	66
3.4.1.	<i>Diseño de Investigación</i>	66
3.4.2.	<i>Variables de estudio</i>	69
3.4.3.	<i>Recolección de datos</i>	70
3.4.4.	<i>Procesamiento y análisis de datos</i>	77
3.4.4.1.	Análisis de datos del método de PCI.....	78
3.4.4.2.	Análisis de datos de la termografía	82
3.4.4.3.	Análisis de datos de la resistividad eléctrica de suelos.....	94
CAPÍTULO IV. RESULTADOS.....		104
4.1.	FALLAS EN EL TRAMO DE ESTUDIO	104
4.1.1.	<i>Fallas identificadas con PCI convencional</i>	104
4.1.1.1.	Tipos de fallas existentes	104
4.1.1.2.	Porcentaje de fallas recurrentes.....	106
4.1.1.3.	Severidad de las fallas recurrentes	106
4.1.1.4.	Frecuencia de fallas en unidades de muestra	107

4.1.2. Fallas identificadas con termografía y resistividad	110
4.1.2.1. Tipos de fallas existentes	110
4.1.2.2. Porcentaje de fallas recurrentes.....	112
4.1.2.3. Severidad de las fallas recurrentes	113
4.1.2.4. Frecuencia de fallas en unidades de muestra	114
4.2. EVALUACIÓN DEL ÍNDICE PCI	119
4.2.1. Evaluación PCI convencional.....	119
4.2.1.1. Valor del PCI por Unidad de Muestra	119
4.2.1.2. Valor del PCI de la sección.....	120
4.2.2. Evaluación PCI corregido	121
4.2.2.1. Valor del PCI por Unidad de Muestra	122
4.2.2.2. Valor del PCI de la sección.....	123
4.3. EVALUACIÓN DE CONFIABILIDAD DE DATOS OBTENIDOS	124
CAPÍTULO V. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES	127
5.1. COMPARACIÓN DE RESULTADOS	127
5.2. DISCUSIÓN	130
5.3. CONCLUSIONES	131
5.4. RECOMENDACIONES	133
REFERENCIAS	135
ANEXOS.....	139

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1 RANGO DE CALIFICACIÓN DEL PCI.....	25
TABLA 2 TIPO DE FALLAS DEL PAVIMENTO FLEXIBLE	27
TABLA 3 NIVELES DE SEVERIDAD PARA HUECOS	43
TABLA 4 DATOS DE RESISTIVIDAD DE SUELOS	58
TABLA 5 LONGITUDES DE UNIDADES DE MUESTREO ASFÁLTICAS	64
TABLA 6 VARIABLES DE ESTUDIO	69
TABLA 7 TOMA DE DATOS PARA EL FORMATO PCI EN UM-01	78
TABLA 8 CONTRASTE PCI VS TERMOGRAFÍA EN FALLA PIEL DE COCODRILO1	87
TABLA 9 CONTRASTE PCI VS TERMOGRAFÍA EN FALLA PIEL DE COCODRILO 2	87
TABLA 10 CONTRASTE PCI VS TERMOGRAFÍA EN FALLA PIEL DE COCODRILO 3	88
TABLA 11 CONTRASTE PCI VS TERMOGRAFÍA EN FALLA HUECO	88
TABLA 12 CONTRASTE PCI VS TERMOGRAFÍA EN FALLA PARCHEO	89
TABLA 13 CONTRASTE PCI VS TERMOGRAFÍA EN FALLA HUECO 2	89
TABLA 14 CONTRASTE PCI VS TERMOGRAFÍA EN FALLA HUECO 3	90
TABLA 15 CONTRASTE PCI VS TERMOGRAFÍA EN FALLA AGRIETAMIENTO EN BLOQUE.....	90
TABLA 16 CONTRASTE PCI VS TERMOGRAFÍA EN FALLA HUECO 4	91
TABLA 17 CONTRASTE PCI VS TERMOGRAFÍA EN FALLA PIEL DE COCODRILO 4	91
TABLA 18 CONTRASTE PCI VS TERMOGRAFÍA EN FALLA GRIETA LONGITUDINAL	92
TABLA 19 FALLAS NUEVAS DETECTADAS POR TERMOGRAFÍA	93
TABLA 20 CONTRASTE PCI VS RESISTIVIDAD EN FALLA PIEL DE COCODRILO 1	94
TABLA 21 CONTRASTE PCI VS RESISTIVIDAD EN FALLA PIEL DE COCODRILO 2.....	95
TABLA 22 CONTRASTE PCI VS RESISTIVIDAD EN FALLA PIEL DE COCODRILO 3	95
TABLA 23 CONTRASTE PCI VS RESISTIVIDAD EN FALLA HUECO	96
TABLA 24 CONTRASTE PCI VS RESISTIVIDAD EN FALLA PARCHEO	96
TABLA 25 CONTRASTE PCI VS RESISTIVIDAD EN FALLA HUECO 2	97
TABLA 26 CONTRASTE PCI VS RESISTIVIDAD EN FALLA HUECO 3	98
TABLA 27 CONTRASTE PCI VS RESISTIVIDAD EN FALLA AGRIETAMIENTO EN BLOQUE	98
TABLA 28 CONTRASTE PCI VS RESISTIVIDAD EN FALLA HUECO 4	99
TABLA 29 CONTRASTE PCI VS RESISTIVIDAD EN FALLA PIEL DE COCODRILO 4	99
TABLA 30 CONTRASTE PCI VS RESISTIVIDAD EN FALLA GRIETA LONGITUDINAL	100

TABLA 31 RELACIÓN DEL ÍNDICE PCI CON LA RESISTIVIDAD.....	101
TABLA 32 RELACIÓN DEL ÍNDICE PCI MEJORADO CON LA RESISTIVIDAD	102
TABLA 33 RELACIÓN DEL ÍNDICE PCI, PCI MEJORADO Y LA RESISTIVIDAD	103
TABLA 34 TOTAL POR FALLA ESPECIFICA.....	104
TABLA 35 SEVERIDAD DE LAS FALLAS RECURRENTE.....	107
TABLA 36 TOTAL POR FALLA ESPECIFICA.....	111
TABLA 37 SEVERIDAD DE LAS FALLAS RECURRENTE.....	114
TABLA 38 CONDICIÓN DE PAVIMENTO POR UNIDAD DE MUESTRA	119
TABLA 39 VALOR PCI DE LA SECCIÓN EN ESTUDIO	121
TABLA 40 CONDICIÓN CORREGIDA DE PAVIMENTO POR UNIDAD DE MUESTRA.....	122
TABLA 41 VALOR PCI CORREGIDO DE LA SECCIÓN EN ESTUDIO	123
TABLA 42 COMPARACIÓN ÍNDICES PCI DE LA SECCIÓN EN ESTUDIO.....	127
TABLA 43 COMPARACIÓN ÍNDICES PCI DE LA SECCIÓN EN ESTUDIO.....	129

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1 VISTA AÉREA AV. TACNA.....	17
FIGURA 2 FALLA CRÍTICA EN AV. TACNA	18
FIGURA 3 FALLA EN REPARACIÓN EN AV. TACNA	18
FIGURA 4 SECCIÓN PAVIMENTO RÍGIDO	23
FIGURA 5 SECCIÓN PAVIMENTO ARTICULADO.....	23
FIGURA 6 SECCIÓN PAVIMENTO FLEXIBLE	24
FIGURA 7 FORMATO DE EXPLORACIÓN DE CONDICIÓN PARA PAVIMENTO FLEXIBLE	27
FIGURA 8 PIEL DE COCODRILO	30
FIGURA 9 EXUDACIÓN.....	31
FIGURA 10 AGRIETAMIENTO EN BLOQUE	33
FIGURA 11 ABULTAMIENTOS Y HUNDIMIENTOS	34
FIGURA 12 CORRUGACIÓN.....	35
FIGURA 13 DEPRESIÓN.....	36
FIGURA 14 GRIETAS DE BORDE	37
FIGURA 15 GRIETAS DE REFLEXIÓN DE JUNTA	38
FIGURA 16 DESNIVEL CARRIL/BERMA.....	39
FIGURA 17 GRIETA LONGITUDINAL/TRANSVERSAL	40
FIGURA 18 PARCHEO Y ACOMETIDAS DE SERVICIO	41
FIGURA 19 AGREGADO PULIDO	42
FIGURA 20 HUECOS.....	44
FIGURA 21 CRUCE DE VÍA FÉRREA.....	45
FIGURA 22 AHUELLAMIENTO	46
FIGURA 23 DESPLAZAMIENTO	47
FIGURA 24 GRIETAS PARABÓLICAS	48
FIGURA 25 HINCHAMIENTO	49
FIGURA 26 METEORIZACIÓN	50
FIGURA 27 CÁMARA TERMOGRÁFICA.....	52
FIGURA 28 TELURÓMETRO DE CUATRO TERMINALES.....	56
FIGURA 29 ESQUEMA DE DISPOSICIÓN DE ELECTRODOS.....	57
FIGURA 30 MEDIDA DE RESISTIVIDAD DEL TERRENO MEDIANTE PLACAS DE COBRE.....	59

FIGURA 31 AVENIDA TACNA CON SENTIDO DE TRANSITO	61
FIGURA 32 TRAFICO EN AVENIDA TACNA	62
FIGURA 33 FALTA DE MANTENIMIENTO EN VÍA	63
FIGURA 34 FALLA DE HUECO Y DESPLAZAMIENTO.....	63
FIGURA 35 DISTRIBUCIÓN DE PROGRESIVAS	66
FIGURA 36 PROCEDIMIENTO Y ANÁLISIS DE DATOS	68
FIGURA 37 UNIDAD DE MUESTRA UM-01	70
FIGURA 38 FORMATO MODIFICADO PARA TOMA DE DATOS PCI	71
FIGURA 39 CÁMARA INFRARROJA FLUKE TIS45	73
FIGURA 40 TOMA DE IMÁGENES TERMOGRÁFICAS.....	74
FIGURA 41 IMAGEN TERMOGRÁFICA VS IMAGEN EN ESPECTRO VISIBLE	74
FIGURA 42 TELURÓMETRO DIGITAL DE CUATRO TERMINALES MTD 20KWE	75
FIGURA 43 TELURÓMETRO, CABLES Y PLACAS DE COBRE	76
FIGURA 44 DISTRIBUCIÓN DE ELECTRODOS	77
FIGURA 45 VALOR DEDUCIDO DE AGRIETAMIENTO EN BLOQUE	79
FIGURA 46 VALORES DEDUCIDOS DEL TRAMO UM-01.....	80
FIGURA 47 CURVA DE CORRECCIÓN CDV	81
FIGURA 48 VALORES DEDUCIDOS DEL TRAMO UM-01.....	82
FIGURA 49 DIFERENCIAL DE TEMPERATURA FALLA AGRIETAMIENTO EN BLOQUE.....	83
FIGURA 50 DIFERENCIAL DE TEMPERATURA FALLA HUECO	84
FIGURA 51 DIFERENCIAL DE TEMPERATURA FALLA DE PARCHEO	85
FIGURA 52 DIFERENCIAL DE TEMPERATURA FALLA DE GRIETA LONGITUDINAL	86
FIGURA 53 PCI VS RESISTIVIDAD	101
FIGURA 54 PCI MEJORADO VS RESISTIVIDAD.....	102
FIGURA 55 PCI – PCI MEJORADO – RESISTIVIDAD	103
FIGURA 56 FRECUENCIA DE TIPO DE FALLA EN TRAMO	105
FIGURA 57 PORCENTAJE DE FALLAS	106
FIGURA 58 CANTIDAD DE FALLAS POR UNIDAD DE MUESTRA.....	107
FIGURA 59 RECURRENCIA DE FALLAS POR UNIDAD DE MUESTRA	108
FIGURA 60 FRECUENCIA DE TIPO DE FALLA EN TRAMO	112
FIGURA 61 PORCENTAJE DE FALLAS.....	113
FIGURA 62 CANTIDAD DE FALLAS POR UNIDAD DE MUESTRA.....	115
FIGURA 63 RECURRENCIA DE FALLAS POR UNIDAD DE MUESTRA	115
FIGURA 64 ÍNDICE PCI POR UNIDAD DE MUESTRA	120

FIGURA 65 ÍNDICE PCI CORREGIDO POR UNIDAD DE MUESTRA	123
FIGURA 66 DATOS CARGADOS EN SOFTWARE SPSS.....	125
FIGURA 67 PRUEBA DE NORMALIDAD EN SOFTWARE SPSS.....	125
FIGURA 68 PRUEBA T EN SOFTWARE SPSS.....	126
FIGURA 69 COMPARATIVA ÍNDICES PCI	128

ÍNDICE DE ECUACIONES

ECUACIÓN 1: LEY DE STEPHAN - BOLTZMANN	51
ECUACIÓN 2: CÁLCULO DE LA RESISTIVIDAD APARENTE	57
ECUACIÓN 3: CÁLCULO SIMPLIFICADO DE LA RESISTIVIDAD APARENTE.....	58
ECUACIÓN 4: CÁLCULO DEL NÚMERO MÍNIMO DE UNIDADES DE MUESTREO	64
ECUACIÓN 5: CÁLCULO DEL NÚMERO TOTAL DE UNIDADES DE MUESTREO	65
ECUACIÓN 6: CÁLCULO DEL NÚMERO MÁXIMO ADMISIBLE	80
ECUACIÓN 7: PCI DE LA SECCIÓN DEL PAVIMENTO.....	120

RESUMEN

Este trabajo de investigación tiene como objetivo principal el demostrar que usando procedimientos no destructivos adicionales, termografía y resistividad de suelos, se puede obtener un valor más confiable del método PCI convencional. Estos dos procedimientos serán usados de manera conjunta con el PCI convencional en la avenida Tacna que se usa como vía alterna de conexión entre los distritos de Magdalena y San Miguel. Para ese objetivo se tomaron 12 unidades de muestra de la totalidad de la avenida donde se aplicó el método PCI obteniendo un índice numérico que indica que el pavimento está en estado bueno. Sobre las mismas 12 unidades de muestra y tomando como base el PCI obtenido se aplica termografía y resistividad de suelos para confirmar la severidad y descubrir fallas no detectables a simple vista; con estos dos nuevos procedimientos aplicados se llegó a un índice numérico que indica que el estado del pavimento es malo. Con esto concluimos que ambos procedimientos no destructivos ayudan a mejorar la precisión del método PCI y con esta información se podrán tomar mejores decisiones de presupuesto y mantenimiento de parte de las autoridades locales.

Palabras clave: PCI, pavimento flexible, termografía, resistividad, condición superficial

CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN

Las vías de acceso forman parte de la infraestructura necesaria para la comunicación y desarrollo de la sociedad en la actualidad, permitiendo la movilidad de la ciudadanía y las demás actividades socio económicas. Por ese motivo es importante su cuidado para que mantengan el dinamismo de la sociedad moderna.

Debido al alto costo de mantenimiento las autoridades locales no realizan un monitoreo activo ni toman acciones preventivas para evitar el deterioro del pavimento, lo que conlleva a su deterioro con lo cual solo se puede tomar medidas correctivas que muchas veces ocasionan un malestar a la sociedad y gastos adicionales.

Existen varios métodos con los cuales se puede evaluar la condición de un pavimento existente y poder identificar fallas para proponer medidas correctivas; así tenemos al PCI (Pavement Condition Index) que es ampliamente usado por tener una metodología estandarizada y aceptado en varias partes del mundo como en la Sociedad Americana de Ensayo de Materiales.

Adicionalmente existen ensayos que son aplicados a otros campos de la investigación, así como en la construcción como lo son la termografía y la resistividad de suelos. En la presente tesis se aplicarán de manera adicional al PCI ensayos termográficos usando una cámara termográfica y también ensayos de resistividad de suelos por medio de un telurómetro para tener información adicional que nos permita un mejor análisis.

Con este trabajo queremos demostrar que usando ensayos adicionales a los tradicionales se puede tener un panorama más amplio y no solo recurrir a las medidas correctivas, sino que también con la información debidamente analizada se pueden tomar medidas preventivas lo cual ayudaría a las autoridades locales en su labor de cuidado de la infraestructura vial para el servicio de la sociedad.

1.1. Antecedentes

Para este trabajo de investigación se revisó trabajos que tratan la misma problemática a nivel nacional y regional:

(Rodríguez & Tacza, 2018) en su tesis “Evaluación de fallas mediante el método PCI y planteamiento de alternativas de intervención para mejorar la condición operacional del pavimento flexible en el carril segregado del corredor Javier Prado”; describen la importancia del mantenimiento y reparación de la superficie del pavimento flexible para facilitar el transporte. En el desarrollo de la tesis se usa el método de Índice de Condición de Pavimento (PCI) para determinar la condición superficial y funcional del tramo de pavimento en estudio, Finalmente plantean medidas correctivas para la rehabilitación de la carretera.

(Paucar, 2019) en su tesis “Evaluación de pavimentos flexibles y rígidos aplicando las metodologías de inspección visual de zonas y rutas en riesgo e índice de condición del pavimento para el mantenimiento vial, caso de la av. Floral y jr. Carabaya, Puno”; la cual tiene por objetivo evaluar la superficie de los pavimentos de la ciudad de Puno con las metodologías de Índice de Condición del Pavimento (PCI) e Inspección Visual de Zonas y Rutas en Riesgo (VIZIR) para el mantenimiento vial. Finalmente plantean mantenimiento rutinario que se tienen que realizar en un periodo más corto.

(Cubas, 2021) en su tesis “Uso de un dron para optimizar la evaluación superficial del pavimento flexible por el método PCI en la av. Los Conquistadores, distrito de San Isidro, lima – 2021”; la cual plantea el uso de procedimientos alternativos para la evaluación del PCI. Realiza un PCI tradicional y otro usando un dron que le facilita el trabajo en tiempo y dinero. Finalmente concluye que usando un dron se obtienen resultados confiables los cuales son semejantes al PCI tradicional.

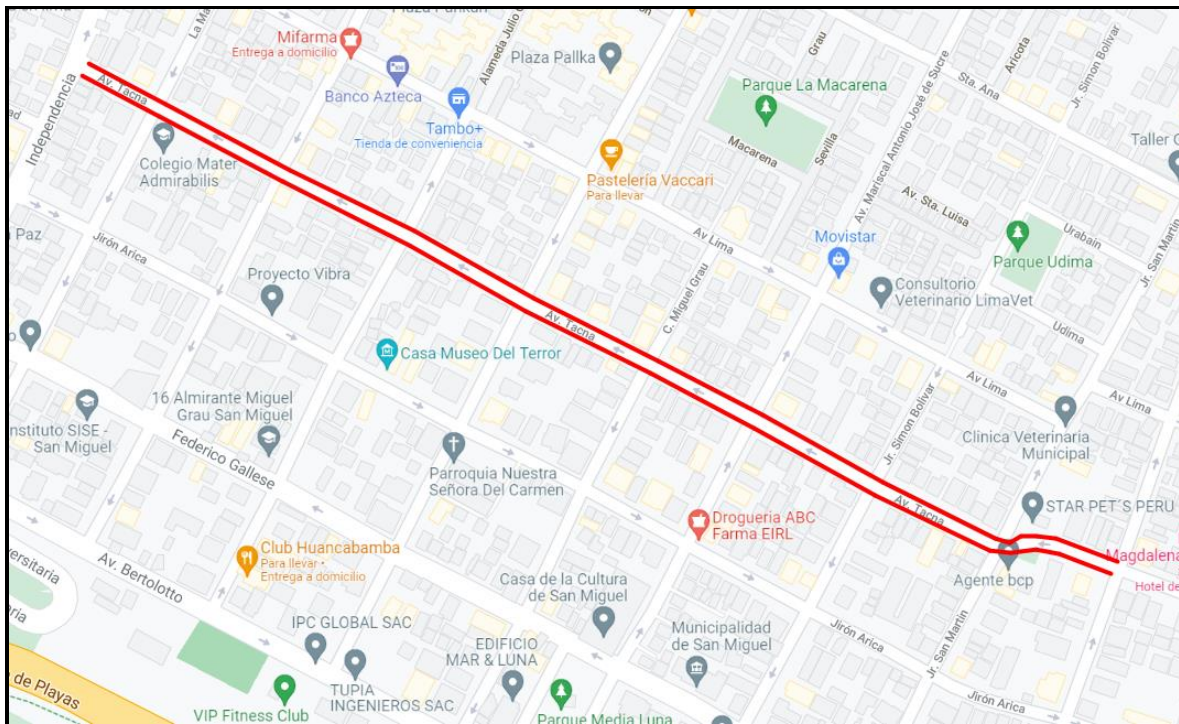
(Araujo & Cárdenas, 2016) en su tesis “Análisis de fisuras y grietas en pavimentos rígidos mediante resistividad eléctrica”; se plantea el uso de electricidad por medio de electrodos directamente en el pavimento para analizar el comportamiento del suelo donde se provocaron fisuras y grietas de consideración. Como conclusión se plantea que el uso de electricidad muestra daños y humedad en el pavimento lo cual conllevará a su deterioro.

(Pacara & Rocha & Ledezma, 2020) en su publicación de la revista ALCONPAT titulada como “Análisis de la variabilidad horaria para la detección de daños en pavimentos flexibles usando termografía infrarroja”; donde se plantea el uso de termografía en la detección de daños en pavimentos flexibles. Con el ensayo se pueden localizar áreas donde se puede provocar futuras fallas. Finalmente se demuestra que este ensayo obtiene datos de una manera no destructiva y con resultados positivos para el mantenimiento del pavimento.

1.2. Realidad problemática

En este trabajo enfocamos el estudio de la totalidad de la avenida Tacna en el tramo del jirón Yungay hasta la calle Independencia que pertenecen al distrito de San Miguel de la ciudad de Lima.

Figura 1
Vista aérea av. Tacna



Fuente: Elaboración propia adaptado de Google Maps

En la vía en estudio podemos observar diversas fallas en el pavimento las cuales se originaron por la falta de mantenimiento preventivo de las autoridades locales, que solo recurrieron a realizar arreglos correctivos luego de producirse el daño.

Figura 2

Falla crítica en av. Tacna



Fuente: Elaboración propia

Muchas de las reparaciones se realizaron de manera poco técnica o bajo poca supervisión por lo que en poco tiempo volvieron a evidenciar las fallas y la falta de prevención de daños en las vías.

Figura 3

Falla en reparación en av. Tacna



Fuente: Elaboración propia

Frente a esta problemática propondremos medidas las cuales ayudaran a las autoridades locales a tomar acciones preventivas antes del deterioro excesivo del pavimento como la reparación de las vías afectadas.

1.3. Formulación del Problema

Problema principal

¿Se puede mejorar la precisión del método del PCI mediante inspecciones de termografía y lectura de resistividad de suelos en la av. Tacna del distrito de San Miguel?

Problemas específicos

- ¿Ayuda la termografía a detectar nuevas fallas no visibles a simple vista en el pavimento flexible?
- ¿Se puede establecer una relación entre la resistividad eléctrica del suelo y las condiciones superficiales del pavimento?

1.4. Hipótesis

Hipótesis principal

Mediante la termografía y la resistividad de suelos se incrementa la precisión del método PCI en los pavimentos flexibles.

Hipótesis específicas

- El diferencial de temperatura, detectado con la termografía, en la superficie del pavimento flexible indica presencia de fallas.
- La resistividad eléctrica está relacionada con el índice PCI obtenido del pavimento flexible.

1.5. Objetivos

Objetivo principal

Establecer un procedimiento que puede mejorar la precisión del método PCI usando ensayos no destructivos como termografía y resistividad de suelos.

Objetivos específicos

- Demostrar que la termografía ayuda a detectar fallas no visibles a simple vista en el pavimento flexible.
- Relacionar las mediciones de resistividad con el índice del PCI para determinar las condiciones superficiales del pavimento flexible.

1.6. Justificación del estudio

Para este estudio presentamos las siguientes justificaciones:

- Para la avenida Tacna del distrito de San Miguel no se cuenta con ningún estudio previo ni con mantenimiento por parte de las autoridades locales, a pesar de que es una avenida importante donde circulan transporte público y privado conectando los distritos de Magdalena con San Miguel.
- En el estudio de fallas de pavimentos flexibles existen métodos convencionales ampliamente aceptados como lo es el PCI pero muy poco usando tecnologías o ensayos alternativos, como lo es la termografía y la resistividad de suelos, que permitan tener un panorama más amplio y con los resultados obtenidos permitirá aportar en la mejora continua de los pavimentos, aportando en caso se demuestre nuestra hipótesis.



- Otro punto a considerar es que se aplicaran ensayos no destructivos debido a que no requiere de una intrusión en la estructura en estudio, en el caso de termografía proporciona información de distribución de temperatura en una imagen en el rango infrarrojo y la resistividad eléctrica del sub suelo en que existe una relación con el tipo de litología, ya que nos da información sobre la estructura y composición del suelo, dependiendo del tipo de suelo y contenido de humedad.

CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO

2.1. Pavimento

De los diferentes conceptos de pavimentos tomaremos el siguiente que lo define de manera completa:

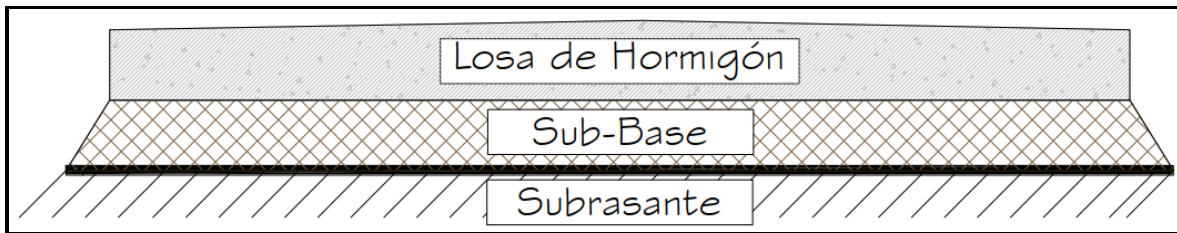
“Es una estructura que se encuentra constituida por un conjunto de capas superpuestas, relativamente horizontales, que se diseñan y se construyen técnicamente con materiales apropiados y adecuadamente compactados. Estas estructuras estratificadas se apoyan sobre la subrasante de la vía obtenida por el movimiento de tierras en el proceso de exploración y que han de restringir adecuadamente los esfuerzos que las cargas repetidas del tránsito le transmiten durante el periodo para el cual fue diseñada la estructura del pavimento” (Montejo, 2002).

Con un concepto definido podemos clasificar los pavimentos más comunes en la ciudad de Lima.

2.1.1. Pavimento Rígido

El pavimento rígido o pavimento hidráulico, es un pavimento en el cual su capa superior está compuesta por una losa de cemento hidráulico, la cual se encuentra apoyada sobre una capa de material denominada base o sobre la subrasante. En este tipo de pavimentos se pueden distinguir algunos tipos que son: hormigón simple con juntas con o sin barras de transferencia de carga, hormigón reforzado con juntas y barras de traspaso de cargas y hormigón continuamente reforzado (Armijos, 2009).

Figura 4
Sección pavimento rígido

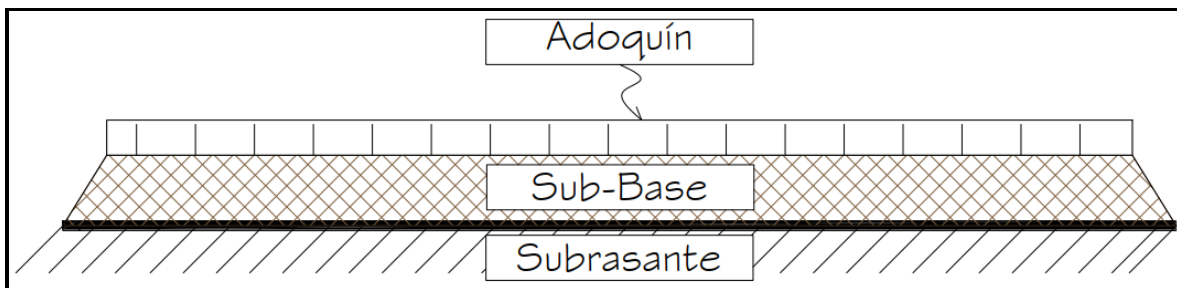


Fuente: Armijos (2009)

2.1.2. Pavimento Articulado

Es un pavimento cuya capa de rodadura se encuentra conformado por bloques de concreto prefabricado, que se denominan adoquines, que son iguales entre si y de un espesor uniforme. Se colocan sobre una capa delgada de arena la cual se encuentra sobre una capa granular o la subrasante (Armijos, 2009).

Figura 5
Sección pavimento articulado



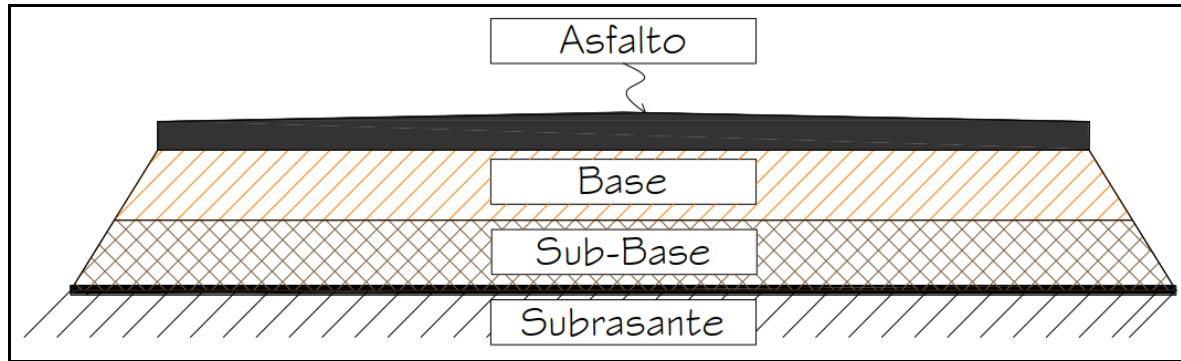
Fuente: Armijos (2009)

2.1.3. Pavimento Flexible

También llamado pavimento asfáltico, el pavimento flexible está conformado por una carpeta asfáltica en la superficie de rodamiento, la cual permite pequeñas deformaciones en las capas inferiores sin que la estructura falle. Luego, debajo de la carpeta, se encuentran la base granular y la capa de subbase, destinadas a distribuir y transmitir las cargas originadas por el tránsito.

Finalmente está la subrasante que sirve de soporte a las capas antes mencionadas (Rodríguez, 2009).

Figura 6
Sección pavimento flexible



Fuente: Armijos (2009)

El pavimento es una estructura de varias capas construida sobre la subrasante del camino para resistir y distribuir esfuerzos originados por los vehículos y mejorar las condiciones de seguridad y comodidad para el tránsito.” En la misma línea, en este manual se indica que “los pavimentos por lo general están conformados por las siguientes capas: capa de rodadura, base y subbase (MEF, 2015).

De este modo, en este mismo documento, se definen estas capas como:

- **La capa de rodadura:** es la parte superior de un pavimento, que puede ser de tipo bituminoso (flexible) o de concreto de cemento Portland (rígido) o de adoquines, cuya función es sostener directamente el tránsito (MEF, 2015).
- **La base:** es la capa inferior a la capa de rodadura, que tiene como principal función de sostener, distribuir y transmitir las cargas ocasionadas por el tránsito. Esta capa será de material granular drenante ($CBR \geq 80\%$) o será tratado con asfalto, cal o cemento (MEF, 2015).

- **La subbase:** es una capa de material especificado y con un espesor de diseño, el cual soporta a la base y a la carpeta. Además, se utiliza como capa de drenaje y controlador de la capilaridad del agua. Dependiendo del tipo de diseño y dimensionamiento del pavimento, esta capa puede obviarse. Esta capa puede ser de material granular (CBR \geq 40%) o tratada con asfalto, cal o cemento (MEF, 2015).

2.2. Método Pavement Condition Index (PCI)

2.2.1. Definición

El Índice de Condición de Pavimentos (PCI) constituye una evaluación y calificación de pavimentos flexibles y rígidos. El objetivo es obtener un índice de integridad que determina la condición operacional de la superficie con lo que se determinara el nivel de mantenimiento según su condición (Vásquez, 2002).

El PCI es un índice numérico que varía desde cero (0), para un pavimento fallado o en mal estado, hasta cien (100) para un pavimento en perfecto estado. En el Cuadro 1 se presentan los rangos de PCI con la correspondiente descripción cualitativa de la condición del pavimento (Vásquez, 2002).

Tabla 1
Rango de calificación del PCI

Rango	Clasificación
100 - 85	Excelente
85 - 70	Muy Bueno
70 - 55	Bueno
55 - 40	Regular
40 - 25	Malo
25 - 10	Muy Malo
10 - 0	Fallado

Fuente: Adaptación de Vásquez (2002)

El PCI no puede medir la capacidad estructural ni la medida directa de la resistencia al deslizamiento o rugosidad. Proporciona una base objetiva y racional para determinar la necesidad de conservación y reparación y sus prioridades (ASTM D6433, 2018).

En esta tesis trataremos el análisis completo de pavimentos flexibles por ser el tema de estudio; el método PCI completo se encontrará en los anexos de este trabajo. ANEXO 1

2.2.2. Instrumentos para el calculo

Para realizar la evaluación del PCI se necesitan materiales e instrumentos sencillos:

- Cinta métrica de 10 metros para las fallas de menos dimensión.
- Cinta métrica de 20 metros para medir las fallas de mayor dimensión y unidades de muestra.
- Rueda de odómetro manual para determinar la ubicación de las fallas a lo largo del pavimento.
- Libreta para tomar nota de las mediciones y las observaciones del pavimento a analizar.
- Cámara fotográfica para el registro grafico de las fallas detectadas.
- Hoja de datos de campo para registrar la información obtenida de la inspección visual.

Figura 7
Formato de exploración de condición para pavimento flexible

EXPLORACIÓN DE LA CONDICIÓN POR UNIDAD DE MUESTREO				ESQUEMA		
ZONA	ABSCISA INICIAL	UNIDAD DE MUESTREO				
<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>				
CÓDIGO VÍA	ABSCISA FINAL	ÁREA MUESTREO (m ²)				
<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>				
INSPECCIONADA POR		FECHA				
<input type="text"/>		<input type="text"/>				
No.	Daño	No.	Daño			
1	Piel de cocodrilo.	11	Parqueo.			
2	Exudación.	12	Pulimento de agregados.			
3	Agrietamiento en bloque.	13	Huecos.			
4	Abultamientos y hundimientos.	14	Cruce de vía férrea.			
5	Corrugación.	15	Ahuellamiento.			
6	Depresión.	16	Desplazamiento.			
7	Grieta de borde.	17	Grieta parabólica (slippage)			
8	Grieta de reflexión de junta.	18	Hinchamiento.			
9	Desnivel carril / berma.	19	Desprendimiento de agregados.			
10	Grietas long y transversal.					
Daño	Severidad	Cantidades parciales		Total	Densidad (%)	Valor deducido

Fuente: Vásquez (2002)

2.2.3. Tipos de fallas en pavimentos flexibles

Podemos clasificar las 19 fallas de los pavimentos flexibles en 4 categorías como vemos a continuación:

Tabla 2
Tipo de fallas del pavimento flexible

Falla pavimento flexible			
Fisuras y grietas	Deformaciones superficiales	Desprendimientos	Otas fallas
Piel de cocodrilo	Abultamiento y hundimientos	Huecos	Exudación
Agrietamiento en bloque	Corrugación	Desprendimiento de agregados	Pulimento de agregados
Grieta de borde	Depresión		Desnivel carril/berma
Grieta de reflexión de junta	Ahuellamiento		Parqueo y acometidas
Grietas longitudinales y transversales	Desplazamiento		
Cruce de vía férrea	Hinchamiento		
Grietas parabólicas			

Fuente: Adaptación de Rodríguez (2009)

A continuación, se presenta una guía general de ayuda para establecer el grado de severidad de la calidad de tránsito, manejando un vehículo a velocidad de operación normal.

- **L (Low: Bajo):** Se perciben las vibraciones en el vehículo (por ejemplo, por corrugaciones) pero no es necesaria una reducción de velocidad en aras de la comodidad o la seguridad; o los abultamientos o hundimientos individuales causan un ligero rebote del vehículo, pero creando poca incomodidad (Vásquez, 2002).
- **M (Medium: Medio):** Las vibraciones en el vehículo son significativas y se requiere alguna reducción de la velocidad en aras de la comodidad y la seguridad; o los abultamientos o hundimientos individuales causan un rebote significativo, creando incomodidad (Vásquez, 2002).
- **H (High: Alto):** Las vibraciones en el vehículo son tan excesivas que debe reducirse la velocidad de forma considerable en aras de la comodidad y la seguridad; o los abultamientos o hundimientos individuales causan un excesivo rebote del vehículo, creando una incomodidad importante o un alto potencial de peligro o daño severo al vehículo (Vásquez, 2002).

La calidad de tránsito se determina recorriendo la sección de pavimento en un automóvil de tamaño estándar a la velocidad establecida por el límite legal. (Vásquez, 2002)

Explayaremos el concepto de cada falla del pavimento flexibles a continuación:

1. Grieta piel de cocodrilo

Las grietas de fatiga o piel de cocodrilo son una serie de grietas interconectadas cuyo origen

es la falla por fatiga de la capa de rodadura asfáltica bajo acción repetida de las cargas de tránsito. El agrietamiento se inicia en el fondo de la capa asfáltica (o base estabilizada) donde los esfuerzos y deformaciones unitarias de tensión son mayores bajo la carga de una rueda. Inicialmente, las grietas se propagan a la superficie como una serie de grietas longitudinales paralelas. Después de repetidas cargas de tránsito, las grietas se conectan formando polígonos con ángulos agudos que desarrollan un patrón que se asemeja a una malla de gallinero o a la piel de cocodrilo. Generalmente, el lado más grande de las piezas no supera los 0.60 m.

La piel de cocodrilo se considera como un daño estructural importante y usualmente se presenta acompañado por ahuellamiento (Vásquez, 2002).

Niveles de severidad

- L (Low: Bajo): Grietas finas capilares y longitudinales que se desarrollan de forma paralela con unas pocas o ninguna interconectadas. Las grietas no están descascaradas, es decir, no presentan rotura del material a lo largo de los lados de la grieta (Vásquez, 2002).
- M (Medium: Medio): Desarrollo posterior de grietas piel de cocodrilo del nivel L, en un patrón o red de grietas que pueden estar ligeramente descascaradas (Vásquez, 2002).
- H (High: Alto): Red o patrón de grietas que ha evolucionado de tal forma que las piezas o pedazos están bien definidos y descascarados los bordes. Algunos pedazos pueden moverse bajo el tránsito (Vásquez, 2002).

Medida

Se miden en metros cuadrados (m²) de área afectada. La mayor dificultad en la medida de este tipo de daño radica en que, a menudo, dos o tres niveles de severidad coexisten en un área deteriorada. Si estas porciones pueden ser diferenciadas con facilidad, deben

medirse y registrarse separadamente. De lo contrario, toda el área deberá ser calificada en el mayor nivel de severidad presente (Vásquez, 2002).

Opciones de reparación

- L: No se hace nada, sello superficial. Sobrecarpeta.
- M: Parcheo parcial o en toda la profundidad (Full Depth). Sobrecarpeta. Reconstrucción
- H: Parcheo parcial o Full Depth. Sobrecarpeta. Reconstrucción.

Figura 8

Piel de cocodrilo



Fuente: Adaptación de ASTM D6433 (2018)

2. Exudación

La exudación es una película de material bituminoso en la superficie del pavimento, la cual forma una superficie brillante, cristalina y reflectora que usualmente llega a ser pegajosa. La exudación es originada por exceso de asfalto en la mezcla, exceso de aplicación de un sellante asfáltico o un bajo contenido de vacíos de aire. Debido a que el proceso de exudación no es reversible durante el tiempo frío, el asfalto se acumulará en la superficie (Vásquez, 2002).

Niveles de severidad.

- L: La exudación ha ocurrido solamente en un grado muy ligero y es detectable únicamente durante unos pocos días del año. El asfalto no se pega a los zapatos o a los vehículos (Vásquez, 2002).
- M: La exudación ha ocurrido hasta un punto en el cual el asfalto se pega a los zapatos y vehículos únicamente durante unas pocas semanas del año (Vásquez, 2002).
- H: La exudación ha ocurrido de forma extensa y gran cantidad de asfalto se pega a los zapatos y vehículos al menos durante varias semanas al año (Vásquez, 2002).

Medida

Se mide en metros cuadrados (m²) de área afectada. Si se contabiliza la exudación no deberá contabilizarse el pulimento de agregados (Vásquez, 2002).

Opciones de reparación

- L: No se hace nada.
- M: Se aplica arena / agregados y cilindrado.
- H: Se aplica arena / agregados y cilindrado (precalentando si fuera necesario).

Figura 9

Exudación



Fuente: Adaptación de ASTM D6433 (2018)

3. Agrietamiento en bloque

Las grietas en bloque son grietas interconectadas que dividen el pavimento en pedazos aproximadamente rectangulares. Los bloques pueden variar en tamaño de 0.30 m x 0.3 m a 3.0 m x 3.0 m. Las grietas en bloque se originan principalmente por la contracción del concreto asfáltico y los ciclos de temperatura (Vásquez, 2002).

Normalmente ocurre sobre una gran porción del pavimento, pero algunas veces aparecerá únicamente en áreas sin tránsito. Este tipo de daño difiere de la piel de cocodrilo en que este último forma pedazos más pequeños, de muchos lados y con ángulos agudos. También, a diferencia de los bloques, la piel de cocodrilo es originada por cargas repetidas de tránsito y, por lo tanto, se encuentra únicamente en áreas sometidas a cargas vehiculares (Vásquez, 2002).

Niveles de severidad.

- L: Bloques definidos por grietas de baja severidad, como se define para grietas longitudinales y transversales (Vásquez, 2002).
- M: Bloques definidos por grietas de severidad media (Vásquez, 2002).
- H: Bloques definidos por grietas de alta severidad (Vásquez, 2002).

Medida

Se mide en metros cuadrados (m²) de área afectada. Generalmente, se presenta un solo nivel de severidad en una sección de pavimento; sin embargo, cualquier área de la sección de pavimento que tenga diferente nivel de severidad deberá medirse y anotarse separadamente (Vásquez, 2002).

Opciones de reparación

- L: Sellado de grietas con ancho mayor a 3.0 mm. Riego de sello.
- M: Sellado de grietas, reciclado superficial. Escarificado en caliente y sobrecarpeta.

- H: Sellado de grietas, reciclado superficial. Escarificado en caliente y sobrecarpeta.

Figura 10

Agrietamiento en bloque



Fuente: Adaptación de ASTM D6433 (2018)

4. Abultamientos y hundimientos

Los abultamientos son pequeños desplazamientos hacia arriba localizados en la superficie del pavimento. Se diferencian de los desplazamientos, pues estos últimos son causados por pavimentos inestables (Vásquez, 2002).

Los hundimientos son desplazamientos hacia abajo, pequeños y abruptos, de la superficie del pavimento. Las distorsiones y desplazamientos que ocurren sobre grandes áreas del pavimento, causando grandes o largas depresiones en el mismo (Vásquez, 2002).

Niveles de severidad

- L: Los abultamientos o hundimientos originan una calidad de tránsito de baja severidad (Vásquez, 2002).
- M: Los abultamientos o hundimientos originan una calidad de tránsito de severidad media (Vásquez, 2002).
- H: Los abultamientos o hundimientos originan una calidad de tránsito de severidad alta (Vásquez, 2002).

Medida

Se miden en metros lineales (m). Si aparecen en un patrón perpendicular al flujo del tránsito y están espaciadas a menos de 3.0 m, el daño se llama corrugación. Si el abultamiento ocurre en combinación con una grieta, ésta también se registra (Vásquez, 2002).

Opciones de reparación

L: No se hace nada.

M: Reciclado en frío. Parcheo profundo o parcial.

H: Reciclado (fresado) en frío. Parcheo profundo o parcial. Sobrecarpeta.

Figura 11

Abultamientos y hundimientos



Fuente: Adaptación de ASTM D6433 (2018)

5. Corrugación

La corrugación es una serie de cimas y depresiones muy próximas que ocurren a intervalos bastante regulares, usualmente a menos de 3.0 m. Las cimas son perpendiculares a la dirección del tránsito. Este tipo de daño es usualmente causado por la acción del tránsito combinada con una carpeta o una base inestables (Vásquez, 2002).

Niveles de severidad

- L: Corrugaciones producen una calidad de tránsito de baja severidad (Vásquez, 2002).
- M: Corrugaciones producen una calidad de tránsito de mediana severidad (Vásquez, 2002).
- H: Corrugaciones producen una calidad de tránsito de alta severidad (Vásquez, 2002).

Medida

Se mide en metros cuadrados (m²) de área afectada (Vásquez, 2002).

Opciones de reparación

L: No se hace nada.

M: Reconstrucción.

H: Reconstrucción

Figura 12

Corrugación



Fuente: Adaptación de ASTM D6433 (2018)

6. Depresión

Son áreas localizadas de la superficie del pavimento con niveles ligeramente más bajos que el pavimento a su alrededor. En el pavimento seco las depresiones pueden ubicarse gracias a las manchas causadas por el agua almacenada. Las depresiones son formadas por el asentamiento de la subrasante o por una construcción incorrecta (Vásquez, 2002).

Niveles de severidad.

- L: 13.0 a 25.0 mm (Vásquez, 2002).
- M: 25.0 a 51.0 mm (Vásquez, 2002).
- H: Más de 51.0 mm (Vásquez, 2002).

Medida

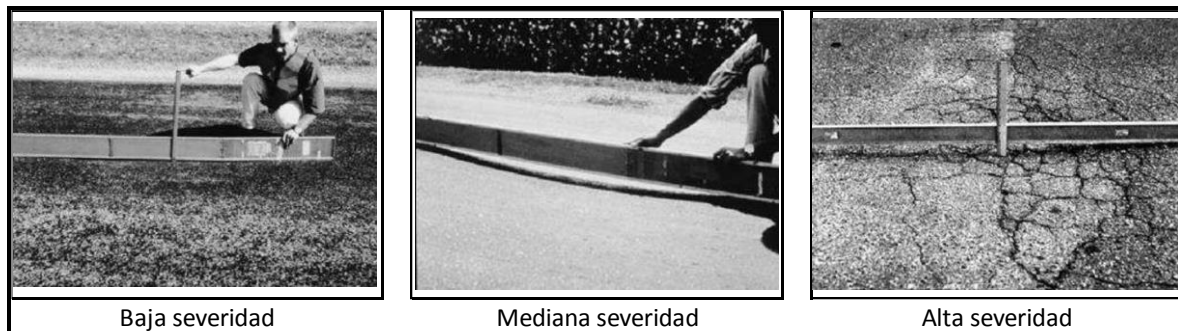
Se mide en metros cuadrados (m²) del área afectada (Vásquez, 2002).

Opciones de reparación

- L: No se hace nada.
- M: Parcheo superficial, parcial o profundo.
- H: Parcheo superficial, parcial o profundo.

Figura 13

Depresión



Fuente: Adaptación de ASTM D6433 (2018)

7. Grietas de borde

Las grietas de borde son paralelas y, generalmente, están a una distancia entre 0.30 y 0.60 m del borde exterior del pavimento. Este daño se acelera por las cargas de tránsito y puede originarse por debilitamiento, debido a condiciones climáticas, de la base o de la subrasante próximas al borde del pavimento (Vásquez, 2002).

Niveles de severidad.

- L: Agrietamiento bajo o medio sin fragmentación o desprendimiento (Vásquez, 2002).
- M: Grietas medias con algo de fragmentación y desprendimiento (Vásquez, 2002).
- H: Considerable fragmentación o desprendimiento a lo largo del borde.

Medida

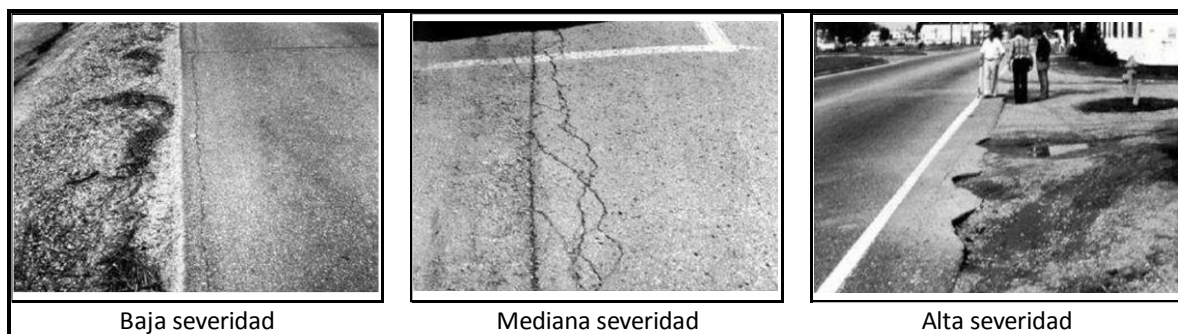
La grieta de borde se mide en metros lineales (m) (Vásquez, 2002).

Opciones de reparación

- L: No se hace nada. Sellado de grietas con ancho mayor a 3 mm
- M: Sellado de grietas. Parcheo parcial - profundo.
- H: Parcheo parcial – profundo.

Figura 14

Grietas de borde



Fuente: Adaptación de ASTM D6433 (2018)

8. Grietas de reflexión de junta

Este daño ocurre solamente en pavimentos con superficie asfáltica construidos sobre una losa de concreto de cemento Pórtland. Estas grietas son causadas principalmente por el movimiento de la losa de concreto de cemento Pórtland, inducido por temperatura o humedad, bajo la superficie de concreto asfáltico (Vásquez, 2002).

Niveles de Severidad

- L: Grieta sin relleno de ancho menor que 10.0 mm (Vásquez, 2002).
- M: Grieta sin relleno con ancho entre 10.0 mm y 76.0 mm (Vásquez, 2002).
- H: Grietas sin relleno de más de 76.0 mm (Vásquez, 2002).

Medida

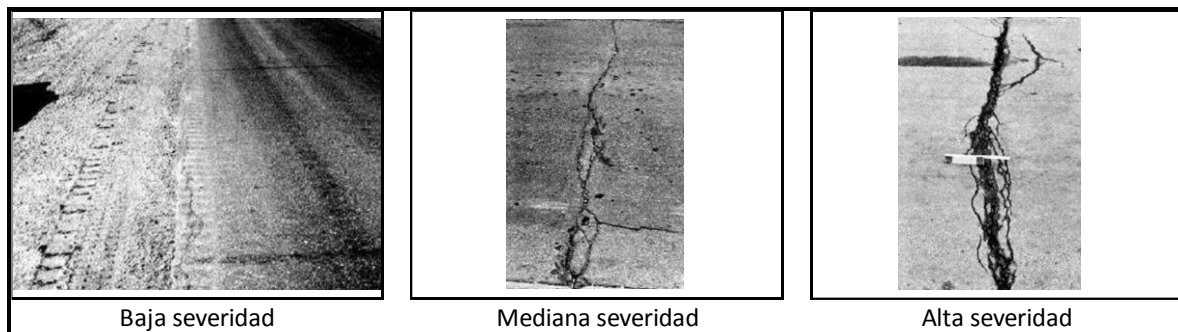
La grieta de reflexión de junta se mide en metros lineales (m). La longitud y nivel de severidad de cada grieta debe registrarse por separado (Vásquez, 2002).

Opciones de Reparación.

- L: Sellado para anchos superiores a 3.00 mm.
- M: Sellado de grietas. Parcheo de profundidad parcial.
- H: Parcheo de profundidad parcial. Reconstrucción de la junta.

Figura 15

Grietas de reflexión de junta



Fuente: Adaptación de ASTM D6433 (2018)

9. Desnivel carril/berma

El desnivel carril / berma es una diferencia de niveles entre el borde del pavimento y la berma. Este daño se debe a la erosión de la berma, el asentamiento berma o la colocación de sobrecarpetas en la calzada sin ajustar el nivel de la berma (Vásquez, 2002).

Niveles de severidad.

- L: La diferencia en elevación entre el borde del pavimento y la berma está entre 25.0 y 51.0 mm (Vásquez, 2002).
- M: La diferencia está entre 51.0 mm y 102.0 mm (Vásquez, 2002).
- H: La diferencia en elevación es mayor que 102.00 mm (Vásquez, 2002).

Medida

El desnivel carril / berma se mide en metros lineales (m) (Vásquez, 2002).

Opciones de reparación

L, M, H: Renivelación de las bermas para ajustar al nivel del carril.

Figura 16

Desnivel carril/berma



Fuente: Adaptación de ASTM D6433 (2018)

10. Grietas longitudinal/transversal

Las grietas longitudinales son paralelas al eje del pavimento o a la dirección de construcción y pueden ser causadas por una junta de carril del pavimento pobremente construida; contracción de la superficie de concreto asfáltico debido a bajas temperaturas o al endurecimiento del asfalto o al ciclo diario de temperatura o una grieta de reflexión causada por el agrietamiento bajo la capa de base (Vásquez, 2002).

Niveles de Severidad

- L: Grieta sin relleno de ancho menor que 10.0 mm (Vásquez, 2002).
- M: Grieta sin relleno de ancho entre 10.0 mm y 76.0 mm (Vásquez, 2002).
- H: Grieta sin relleno de más de 76.0 mm de ancho (Vásquez, 2002).

Medida

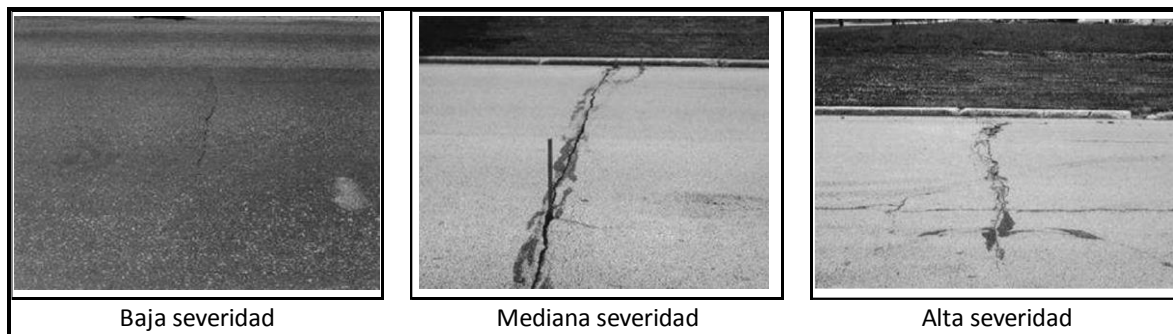
Las grietas longitudinales y transversales se miden en metros lineales (m) (Vásquez, 2002).

Opciones de reparación

- L: No se hace nada. Sellado de grietas de ancho mayor que 3.0 mm.
- M: Sellado de grietas.
- H: Sellado de grietas. Parcheo parcial.

Figura 17

Grieta longitudinal/transversal



Fuente: Adaptación de ASTM D6433 (2018)

11. Parcheo y acometidas de servicio

Un parche es un área de pavimento la cual ha sido remplazada con material nuevo para reparar el pavimento existente. Un parche se considera un defecto no importa que tan bien se comporte. Por lo general se encuentra alguna rugosidad está asociada con este daño (Vásquez, 2002).

Niveles de Severidad.

- L: El parche está en buena condición buena y es satisfactorio. La calidad del tránsito se califica como de baja severidad o mejor (Vásquez, 2002).
- M: El parche está moderadamente deteriorado o la calidad del tránsito se califica como de severidad media (Vásquez, 2002).
- H: El parche está muy deteriorado o la calidad del tránsito se califica como de alta severidad. Requiere pronta sustitución (Vásquez, 2002).

Medida.

Los parches se miden en metros cuadrados (m²) de área afectada. Si una cantidad importante de pavimento ha sido reemplazada, no se debe registrar como un parche sino como un nuevo pavimento (Vásquez, 2002).

Opciones de reparación

- L: No se hace nada.
- M: No se hace nada. Sustitución del parche.
- H: Sustitución del parche.

Figura 18

Parcheo y acometidas de servicio



Fuente: Adaptación de ASTM D6433 (2018)

12. Pulimientos de agregados

Este daño es causado por la repetición de cargas de tránsito. Cuando el agregado en la superficie se vuelve suave al tacto, la adherencia con las llantas del vehículo se reduce considerablemente. Este tipo de daño se indica cuando el valor de un ensayo de resistencia al deslizamiento es bajo o ha caído significativamente desde una evaluación previa (Vásquez, 2002).

Niveles de severidad.

No se define ningún nivel de severidad. Sin embargo, el grado de pulimento deberá ser significativo antes de ser incluido en una evaluación de la condición y contabilizado como defecto (Vásquez, 2002).

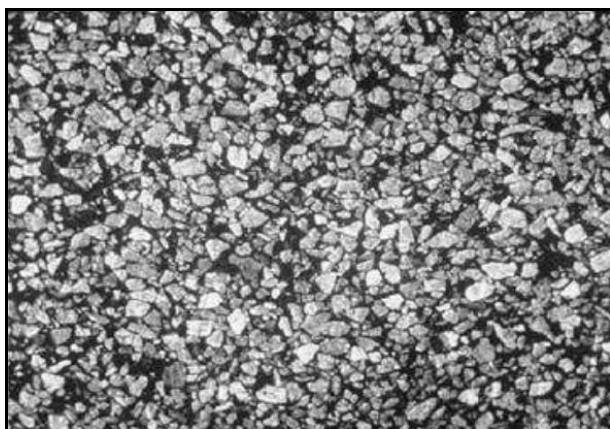
Medida

Se mide en metros cuadrados (m²) (Vásquez, 2002).

Opciones de reparación

L, M, H: No se hace nada. Tratamiento superficial. Sobrecarpeta. Fresado y sobrecarpeta.

Figura 19
Agregado pulido



Fuente: ASTM D6433 (2018)

13. Huecos

Los huecos son depresiones pequeñas en la superficie del pavimento, usualmente con diámetros menores que 0.90 m y con forma de tazón. El crecimiento de los huecos se acelera por la acumulación de agua dentro del mismo. Los huecos se producen cuando el tráfico arranca pequeños pedazos de la superficie del pavimento. La desintegración del pavimento progresa debido a mezclas pobres en la superficie, puntos débiles de la base o la subrasante, o porque se ha alcanzado una condición de piel de cocodrilo de severidad alta. Cuando los huecos son producidos por piel de cocodrilo de alta severidad deben registrarse como huecos, no como meteorización (Vásquez, 2002).

Niveles de severidad

Tabla 3
Niveles de severidad para huecos

Profundidad máxima del hueco	Diámetro medio (mm)		
	102 a 203 mm	203 a 457 mm	457 a 762 mm
12.7 a 25.4 mm	L	L	M
> 25.4 a 50.8 mm	L	M	H
> 50.8 mm	M	M	H

Fuente: Adaptación de Vásquez (2002)

Medida

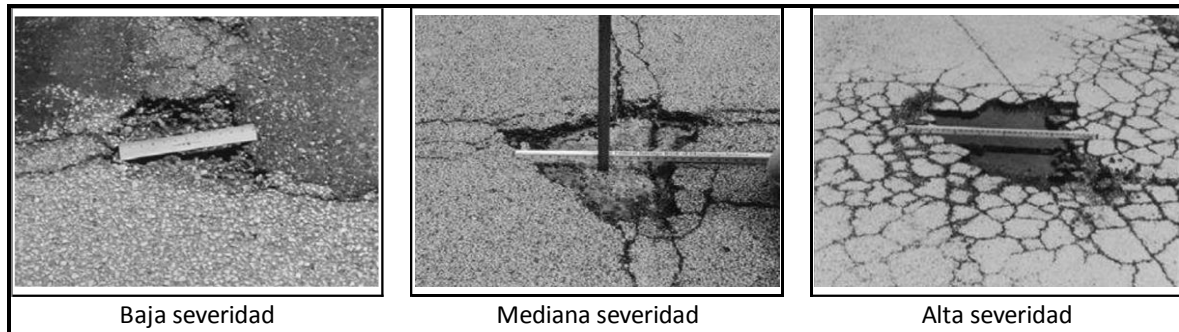
Los huecos se miden contando aquellos que sean de severidades baja, media y alta, y registrándolos separadamente (Vásquez, 2002).

Opciones de reparación

- L: No se hace nada. Parcheo parcial o profundo.
- M: Parcheo parcial o profundo.
- H: Parcheo profundo.

Figura 20

Huecos



Fuente: Adaptación de ASTM D6433 (2018)

14. Cruce de vía férrea

Los defectos asociados al cruce de vía férrea son depresiones o abultamientos alrededor o entre los rieles (Vásquez, 2002).

Niveles de severidad

- L: El cruce de vía férrea produce calidad de tránsito de baja severidad (Vásquez, 2002).
- M: El cruce de vía férrea produce calidad de tránsito de severidad media (Vásquez, 2002).
- H: El cruce de vía férrea produce calidad de tránsito de severidad alta (Vásquez, 2002).

Medida

El área del cruce se mide en metros cuadrados (m²) de área afectada. Cualquier abultamiento considerable causado por los rieles debe registrarse como parte del cruce (Vásquez, 2002).

Opciones de reparación

- L: No se hace nada.
- M: Parcheo superficial o parcial de la aproximación. Reconstrucción del cruce.

- H: Parcheo superficial o parcial de la aproximación. Reconstrucción del cruce.

Figura 21

Cruce de vía férrea



Fuente: Adaptación de ASTM D6433 (2018)

15. Ahuellamiento

El ahuellamiento es una depresión en la superficie de las huellas de las ruedas. El ahuellamiento se deriva de una deformación permanente en cualquiera de las capas del pavimento o la subrasante, usualmente producida por consolidación o movimiento lateral de los materiales debidos a la carga del tránsito (Vásquez, 2002).

Niveles de severidad

- L: 6.0 a 13.0 mm (Vásquez, 2002).
- M: >13.0 mm a 25.0 mm (Vásquez, 2002).
- H: > 25.0 mm (Vásquez, 2002).

Medida

El ahuellamiento se mide en metros cuadrados (m²) de área afectada y su severidad está definida por la profundidad media de la huella (Vásquez, 2002).

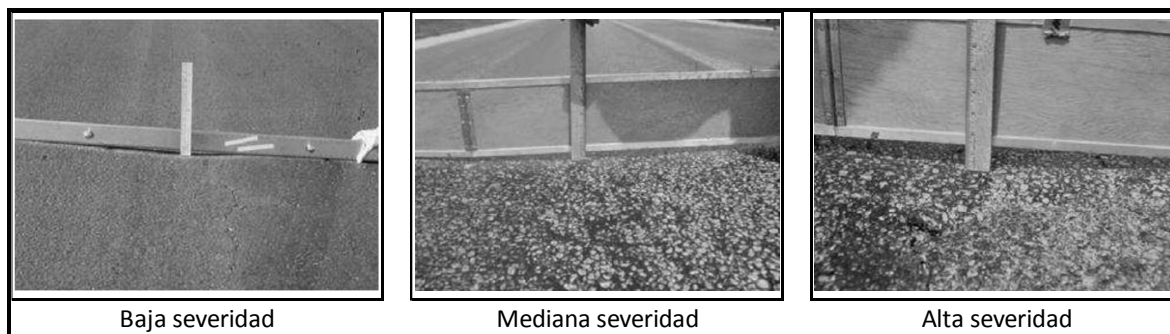
Opciones de reparación

- L: No se hace nada. Fresado y sobrecarpeta.

- M: Parcheo superficial, parcial o profundo. Fresado y sobrecarpeta.
- H: Parcheo superficial, parcial o profundo. Fresado y sobrecarpeta.

Figura 22

Ahuellamiento



Fuente: Adaptación de ASTM D6433 (2018)

16. Desplazamiento

El desplazamiento es un corrimiento longitudinal y permanente de un área localizada de la superficie del pavimento producido por las cargas del tránsito. Cuando el tránsito empuja contra el pavimento, produce una onda corta y abrupta en la superficie. La longitud de los pavimentos de concreto de cemento Pórtland se incrementa causando el desplazamiento (Vásquez, 2002).

Niveles de severidad

- L: El desplazamiento causa calidad de tránsito de baja severidad (Vásquez, 2002).
- M: El desplazamiento causa calidad de tránsito de severidad media (Vásquez, 2002).
- H: El desplazamiento causa calidad de tránsito de alta severidad (Vásquez, 2002).

Medida

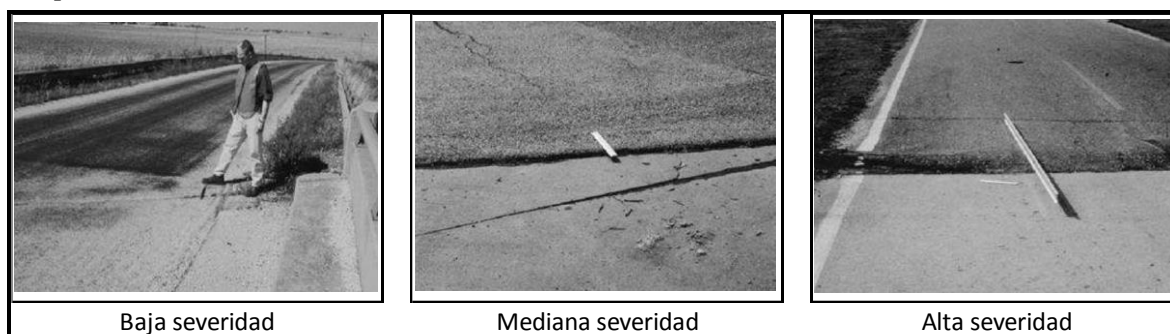
Los desplazamientos se miden en metros cuadrados (m²) de área afectada. Los desplazamientos que ocurren en parches se consideran para el inventario de daños como parches, no como un daño separado (Vásquez, 2002).

Opciones de reparación

- L: No se hace nada. Fresado.
- M: Fresado. Parcheo parcial o profundo.
- H: Fresado. Parcheo parcial o profundo.

Figura 23

Desplazamiento



Fuente: Adaptación de ASTM D6433 (2018)

17. Grietas parabólicas (slippage)

Las grietas parabólicas son producidas cuando las ruedas que frenan o giran inducen el deslizamiento o la deformación de la superficie del pavimento. Usualmente, este daño ocurre en presencia de una mezcla asfáltica de baja resistencia, o de una liga pobre entre la superficie y la capa siguiente en la estructura de pavimento (Vásquez, 2002).

Nivel de severidad

- L: Ancho promedio de la grieta menor que 10.0 mm (Vásquez, 2002).
- M: Ancho promedio de la grieta entre 10.0 mm y 38.0 mm (Vásquez, 2002).
- H: Ancho promedio de la grieta mayor que 38.0 mm (Vásquez, 2002).

Medida

El área asociada con una grieta parabólica se mide en metros cuadrados (m²) y se califica según el nivel de severidad más alto presente en la misma (Vásquez, 2002).

Opciones de reparación

- L: No se hace nada. Parcheo parcial.
- M: Parcheo parcial.
- H: Parcheo parcial.

Figura 24

Grietas parabólicas



Fuente: Adaptación de ASTM D6433 (2018)

18. Hinchamiento

El hinchamiento se caracteriza por un pandeo hacia arriba de la superficie del pavimento una onda larga y gradual con una longitud mayor que 3.0 m. El hinchamiento puede estar acompañado de agrietamiento superficial (Vásquez, 2002).

Nivel de severidad

- L: El hinchamiento causa calidad de tránsito de baja severidad (Vásquez, 2002).
- M: El hinchamiento causa calidad de tránsito de severidad media (Vásquez, 2002).
- H: El hinchamiento causa calidad de tránsito de alta severidad (Vásquez, 2002).

Medida

El hinchamiento se mide en metros cuadrados (m²) de área afectada (Vásquez, 2002).

Opciones de reparación

- L: No se hace nada.
- M: No se hace nada. Reconstrucción.
- H: Reconstrucción.

Figura 25
Hinchamiento



Fuente: ASTM D6433 (2018)

19. Meteorización/desprendimiento de agregados

La meteorización y el desprendimiento son la pérdida de la superficie del pavimento debida a la pérdida del ligante asfáltico y de las partículas sueltas de agregado. Este daño indica que, o bien el ligante asfáltico se ha endurecido de forma apreciable, o que la mezcla presente es de pobre calidad (Vásquez, 2002).

Niveles de severidad

- L: Han comenzado a perderse los agregados o el ligante. En algunas áreas la superficie ha comenzado a deprimirse. En el caso de derramamiento de aceite, puede verse la

mancha del mismo, pero la superficie es dura y no puede penetrarse con una moneda (Vásquez, 2002).

- M: Se han perdido los agregados o el ligante. La textura superficial es moderadamente rugosa y ahuecada. En el caso de derramamiento de aceite, la superficie es suave y puede penetrarse con una moneda (Vásquez, 2002).
- H: Se han perdido de forma considerable los agregados o el ligante. La textura superficial es muy rugosa y severamente ahuecada. Las áreas ahuecadas tienen diámetros menores que 10.0 mm y profundidades menores que 13.0 mm; áreas ahuecadas mayores se consideran huecos. En el caso de derramamiento de aceite, el ligante asfáltico ha perdido su efecto ligante y el agregado está suelto (Vásquez, 2002).

Medida

La meteorización y el desprendimiento se miden en metros cuadrados (m²) de área afectada (Vásquez, 2002).

Opciones de reparación

- L: No se hace nada. Sello superficial. Tratamiento superficial.
- M: Sello superficial. Tratamiento superficial. Sobrecarpeta.
- H: Tratamiento superficial. Sobrecarpeta. Reciclaje. Reconstrucción.

Figura 26

Meteorización



Fuente: Adaptación de ASTM D6433 (2018)

2.3. Termografía

2.3.1. Definición de termografía infrarroja

La radiación térmica es el tipo de radiación electromagnética que compete a la transferencia de calor y es emitida como consecuencia de las transiciones de energía de moléculas, átomos y electrones. La intensidad de la radiación infrarroja emitida por un cuerpo dependerá de la temperatura a la cual se encuentra la superficie, de esta manera, se considera que todo cuerpo cuya temperatura se encuentre por encima del cero absoluto (0 K) emite radiación infrarroja (Rocha, 2017).

La energía térmica irradiada por un objeto se expresará en función de la energía emitida por un radiador perfecto llamado cuerpo negro o ideal (Cengel, 2003).

El ojo humano puede ver la radiación en el espectro electromagnético entre 0.4 – 0.7 μm (espectro visible), la banda infrarroja va de 0.9 – 14 μm , siendo necesarios equipos para su detección (Cengel, 2003).

Las cámaras termográficas destinadas para inspección trabajan en la banda infrarroja. La relación entre la radiación electromagnética y la temperatura se explica a través de la ley de Stephan – Boltzmann (Baggathiappan, 2013).

Ecuación 1: Ley de Stephan - Boltzmann

$$W = \sigma^* \varepsilon^* T^4$$

Donde,

W es la intensidad de la radiación (w/m²),

σ es la Constante de Stephan – Boltzmann (5.67*10⁻⁸ W/m²*K⁴),

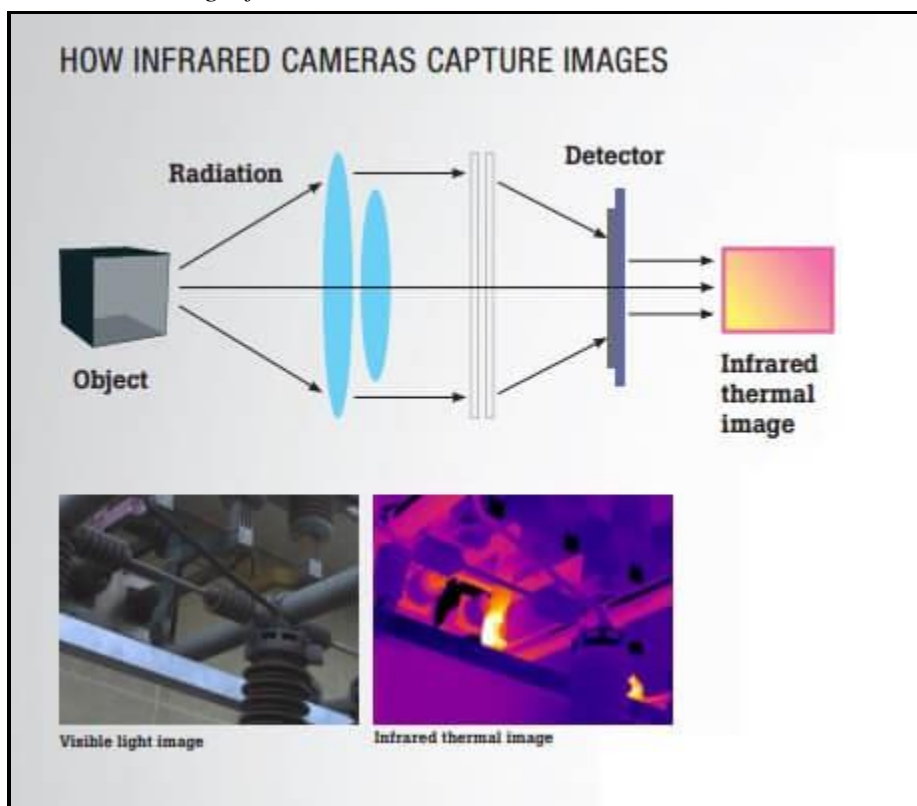
ε es la emisividad de la superficie

T es la temperatura medida (K).

2.3.2. Materiales e instrumentos

Según los conceptos explicados, para la medición se usará una cámara termográfica que permita registrar las variaciones de temperatura.

Figura 27
Cámara termográfica



Fuente: <https://www.windpowerengineering.com/>

- Las cámaras termográficas detectan la radiación infrarroja que emite cada objeto para poder ser mostradas en un espectro visible (colores).
- La radiación infrarroja tiene una relación cercana a la temperatura, por eso es posible la detección de temperatura usando esa relación.

- Es importante recordar que el espectro infrarrojo no es visible al ojo humano y por eso se pueden hacer las mediciones durante la noche en ausencia de luz.

2.4. Resistividad de suelos

2.4.1. Definición

La resistividad del suelo es la propiedad que tiene éste, para conducir electricidad, es conocida además como la resistencia específica del terreno. En su medición, se promedia los efectos de las diferentes capas que componen el terreno bajo estudio, ya que estos no suelen ser uniforme en su composición, obteniéndose lo que se denomina resistividad aparente, que para efectos prácticos llamaremos resistividad del terreno y es expresada en ohm-m.

La resistividad del terreno varía ampliamente a lo largo y ancho del globo terrestre, está determinado por: Sales solubles, composición propia del terreno, Estratigrafía, Granulometría, Estado higrométrico, temperatura y compactación. (Araujo & Cárdenas, 2016)

Sales Solubles

La resistividad del suelo es determinada principalmente por una cantidad de electrolitos, esto es por la cantidad de humedad, minerales y sales disueltas. Como ejemplo para valores de 1% (por peso) de sal (NaCl) o mayores, la resistividad es prácticamente la misma, pero para valores menores de esa cantidad, la resistividad es muy alta.

Un suelo de arcilla tiene una resistividad de 40-500 ohm-m, la resistividad de un terreno rocoso es de 5000 ohm-m o más alta.

Granulometría

Influye bastante sobre la porosidad y el poder retenedor de humedad, por lo que la resistividad de la grava es mayor que el de la arena y esta a su vez mayor que el de la arcilla.

Estado higrométrico

El contenido de agua y humedad influyen en forma apreciable. Su valor varío con el clima, época del año, profundidad y nivel freático, la resistividad del suelo se eleva considerablemente cuando el contenido de humedad se reduce menos al 15% del peso de este. Pero, un mayor contenido de humedad del 15% mencionado, causa que la resistividad sea prácticamente constante.

Temperatura

A medida que desciende la temperatura aumenta la resistencia del terreno y este aumento se nota aún más al llegar a 0°C , hasta el punto que, a medida que es mayor la cantidad de agua en estado de congelación, se va reduciendo el movimiento de los electrolitos los cuales influyen en la resistividad de la tierra.

Compactación

La resistencia del terreno disminuye al aumentar la compactación del mismo.

2.4.2. Medición de resistividad

La resistividad del terreno se mide fundamentalmente para encontrar la profundidad y grueso de la roca en estudios geofísicos, así como para encontrar los puntos óptimos para localizar la red de tierras de una subestación, sistema electrónico, planta generadora o transmisora de radiofrecuencia. Asimismo, puede ser empleada para indicar el grado de corrosión de tuberías subterráneas. (Araujo & Cárdenas, 2016)

En general, los lugares con resistividad baja tienden a incrementar la corrosión.

2.4.2.1. Medición de resistividad con telurómetro

Para medir la resistividad del suelo se requiere de un telurómetro o Megger de tierras de cuatro terminales.

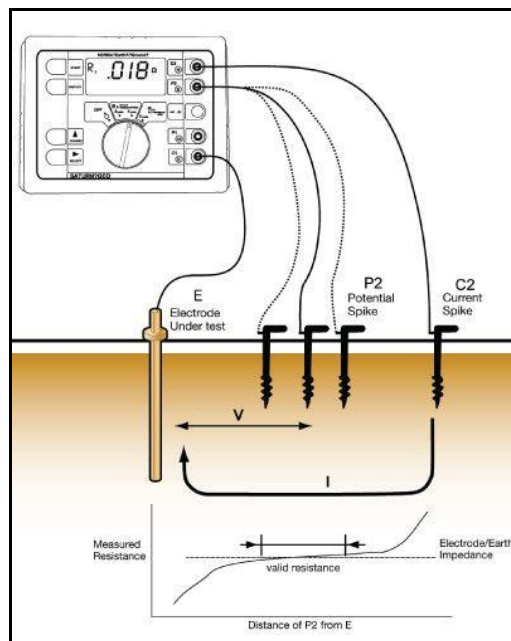
Los aparatos de mayor uso, de acuerdo a su principio de operación, pueden ser de 2 tipos: del tipo de compensación de equilibrio en cero y el de lectura directa.

Un aparato inteligente, lleva conductores blindados, coaxiales, tiene sistemas de filtraje, de análisis y mide lo que halla, pero esa información la analiza, la filtra y luego la deduce. Por ejemplo, para hacer una medición manda una señal de 100 Hz y mide; luego manda otra señal de 150 Hz y vuelve a medir y puede seguir enviando otras altas frecuencias hasta que los valores van siendo similares, forma una estadística y obtiene un promedio.

Los telurómetros tienen cuatro terminales 2 de corriente (C1, C2) y 2 de potencial (P1, P2) y están numerados en el aparato C1 P1 P2 C2.

Como la medición obtenida es común encontrar valores muy dispares, causados por la geología del terreno, por lo que es una práctica común de una tabla con lecturas, el eliminar los valores que estén 50% arriba o abajo del promedio aritmético de todos los valores capturados. (Araujo & Cárdenas, 2016)

Figura 28
Telurómetro de Cuatro Terminales



Fuente: <https://electrotec.pe/>

2.4.2.2. Medición de resistividad con método de Wenner

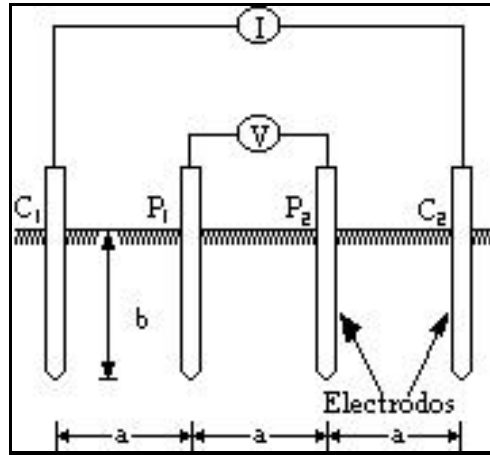
En 1915, el Dr. Frank Wenner del U.S. Bureau of Standards desarrolló la teoría de este método de prueba, y la ecuación que lleva su nombre.

Con objeto de medir la resistividad del suelo se hace necesario insertar los 4 electrodos en el suelo. Los cuatro electrodos se colocan en línea recta y a una misma profundidad de penetración, las mediciones de resistividad dependerán de la distancia entre electrodos y de la resistividad del terreno, y por el contrario no dependen en forma apreciable del tamaño y del material de los electrodos, aunque sí dependen de la clase de contacto que se haga con la tierra.

El principio básico de este método es la inyección de una corriente directa o de baja frecuencia a través de la tierra entre dos electrodos C1 y C2 mientras que el potencial que aparece se mide entre dos electrodos P1 y P2. Estos electrodos están enterrados en línea recta y a igual separación entre ellos. La razón V/I es conocida como la resistencia aparente. La resistividad

aparente del terreno es una función de esta resistencia y de la geometría del electrodo. (Cruz & Quispilaya, 2018)

Figura 29
Esquema de disposición de electrodos



Fuente: Norma técnica RA6-014 (2008)

En la figura se observa esquemáticamente la disposición de los electrodos, en donde la corriente se inyecta a través de los electrodos exteriores y el potencial se mide a través de los electrodos interiores. La resistividad aparente está dada por la siguiente expresión:

Ecuación 2: Cálculo de la resistividad aparente

$$\rho = \frac{4\pi R a}{\left(1 + \frac{2a}{\sqrt{a^2 + 4b^2}} - \frac{2a}{\sqrt{4a^2 + 4b^2}}\right)}$$

Donde:

ρ : resistividad aparente del terreno en ohmios metro.

R: resistencia eléctrica medida en ohmios.

a: distancia entre electrodos adyacentes en metros.

b: profundidad de enterramiento de los electrodos en metros.

Si la distancia enterrada (B) es pequeña comparada con la distancia de separación entre electrodos (A). O sea $A > 20B$, la siguiente fórmula simplificada se puede aplicar:

Ecuación 3: Cálculo simplificado de la resistividad aparente

$$\rho = 2\pi AR$$

La resistividad obtenida como resultado de las ecuaciones representa la resistividad promedio de un hemisferio de terreno de un radio igual a la separación de los electrodos.

Como ejemplo, si la distancia entre electrodos A es de 3 metros, B es 0.15 m y la lectura del instrumento es de 0.43 ohms, la resistividad promedio del terreno a una profundidad de 3 metros, es de 8.141 ohm-m según la fórmula completa y de 8.105 ohms-m según la fórmula simplificada. (Linares, 2016)

Tabla 4
Datos de resistividad de suelos

Datos de resistividad de suelos típicos	
Material	Resistividad (ohm-metro)
Asfalto seco	2x10e6 - 30x10e6
Asfalto mojado	10000 - 6x10e6
Permafrost	3500 - 4000
Concreto seco	1200 - 2800
Concreto mojado	21 - 100
Compuesto GAP seco	0.032
Compuesto GAP con 30% de agua en masa	0.015

Fuente: Adaptación de Linares (2016)

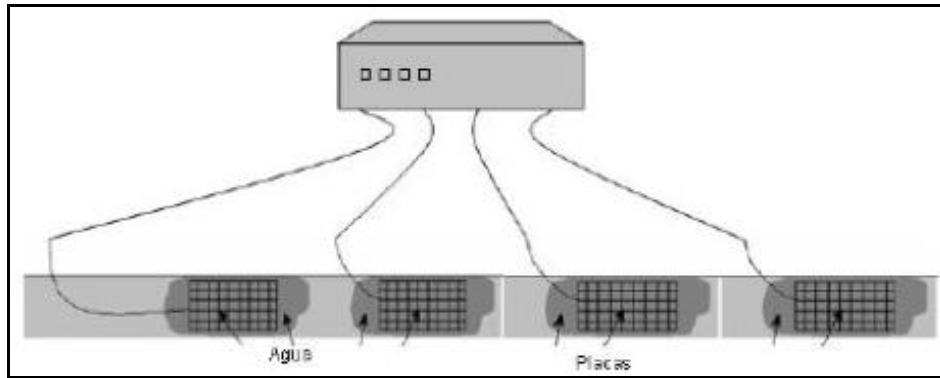
2.4.2.3. Medida de resistividad sobre pavimentos

Cuando la medición de la resistividad del suelo se tiene que realizarse en pavimentos, los cuales para evitar dañar el pavimento con el hincado de los electrodos, se puede usar placas de cobre

para reemplazar los electrodos y agua para remojar el punto donde serán ubicadas. (Norma técnica RA6-014, 2008)

Figura 30

Medida de resistividad del terreno mediante placas de cobre



Fuente: Norma técnica RA6-014 (2008)

Los procedimientos de este tipo de medición se encuentran indicado en la ASTM D 3633-98 “Standard Test Method For Electrical Resistivity of Membrane – Pavement Systems”

Las placas de cobre deberán ser dispuestas a la misma distancia en que se colocaría los electrodos auxiliares de acuerdo al método Wenner.

CAPÍTULO III. MÉTODO

3.1. Tipo de investigación

La presente tesis corresponde a una investigación descriptiva, debido a que busca establecer una descripción lo más completa posible de una situación y según los datos analizados es del tipo cuantitativo, por la recolección de datos para elaborar la medición numérica y analizar estadísticamente los patrones del pavimento, utilizando métodos de PCI, termografía y resistividad.

El diseño de investigación es el no experimental, porque mediante inspecciones oculares se verifico los fenómenos en su forma natural para luego ser analizados sin manipular las variables que este conlleva, al ser una investigación que recopila los datos en un momento definido.

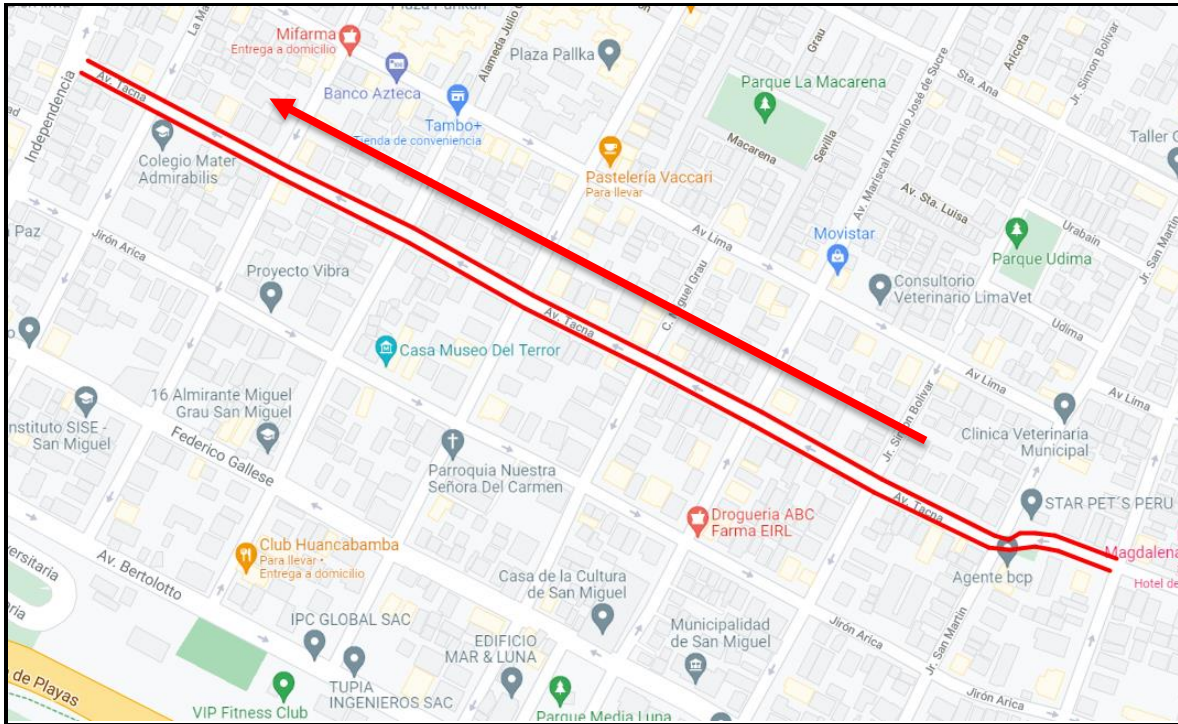
La muestra es de tipo no probabilístico, donde se ha identificado una vía de pavimento flexible en la ciudad de Lima distrito de San Miguel, para poder cumplir con los objetivos planteados, en donde se evaluó un kilómetro de la vía.

3.2. Ubicación geográfica del estudio

3.2.1. Ubicación

El tramo en estudio en esta investigación comprende la totalidad de la avenida Tacna en el distrito de San Miguel, la cual cuenta con 9 cuadras y 874 m de extensión en su totalidad. Esta avenida es de un solo sentido que va de sentido sureste a sentido noroeste según los puntos cardinales y une los distritos de Magdalena con San Miguel.

Figura 31
Avenida Tacna con sentido de tránsito



Fuente: Elaboración propia adaptado de Google Maps

3.2.2. Área de influencia

La avenida en estudio comprende una vía importante que conecta los distritos de Magdalena con San Miguel con tránsito de vehículos particulares y de transporte público. Al tener una zonificación urbana residencial es una vía estrecha (6m de ancho) que inicialmente fue planeada para vehículos particulares, pero al estar directamente conectada al mercado de Magdalena se convirtió en una ruta propicia para el retorno al distrito de San Miguel (conexión alterna de av. Brasil con av. Universitaria) lo que circulan vehículos de transporte público e inclusive vehículos de transporte de carga, es así que el alto tránsito y el poco mantenimiento conllevaron a su deterioro.

Figura 32
Trafico en avenida Tacna



Fuente: Elaboración propia

Figura 33

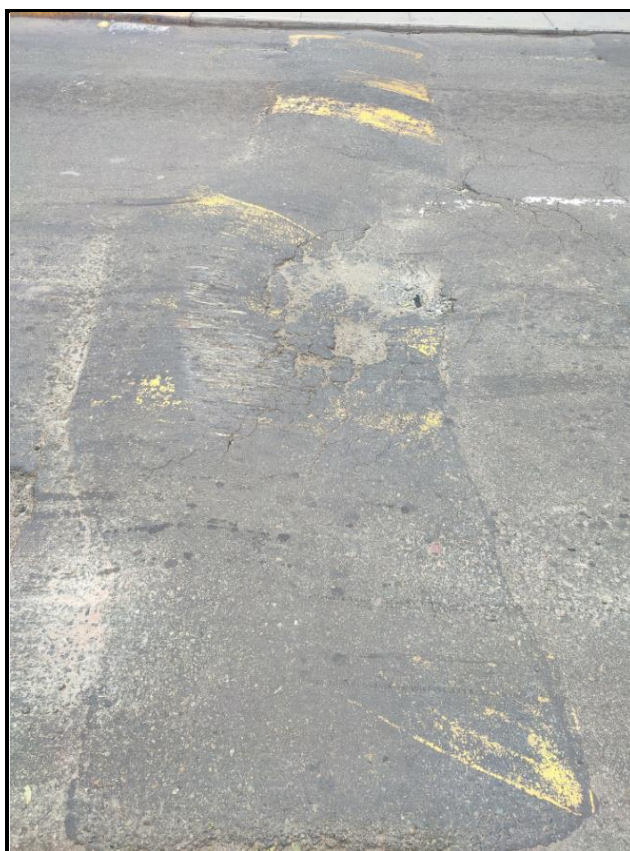
Falta de mantenimiento en vía



Fuente: Elaboración propia

Figura 34

Falla de hueco y desplazamiento



Fuente: Elaboración propia

3.3. Población y muestra del estudio

3.3.1. Población

En esta investigación tenemos como población la avenida Tacna desde el Jirón Yungay hasta la calle Independencia en el distrito de San Miguel; que cuenta con 9 cuadras, 874 m de longitud y 6 m de ancho.

3.3.2. Muestra

Como parte de la investigación es usar el método PCI, para eso se tomarán unidades de muestra a lo largo de la avenida que deben cumplir con la condición de estar en un rango de un área de $230.0 \pm 93.0 \text{ m}^2$.

Tabla 5
Longitudes de unidades de muestreo asfálticas

Ancho de calzada (m)	Longitud de la unidad de muestreo (m)
5.0	46.0
5.5	41.8
6.0	38.3
6.5	35.4
7.3 (máximo)	31.5

Fuente: Adaptación de Vásquez (2002)

Tomando el criterio de la Tabla 5, tenemos que para la vía en estudio debemos tomar tramos de 38 m que, en manera conjunta con los 6 m de ancho, cubren unos 228 m² que también cumplen la condición inicial planteada. Es así que se tienen N=23 muestras a lo largo de la vía.

Ecuación 4: Cálculo del número mínimo de unidades de muestreo

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

Donde:

n: Número mínimo de unidades de muestreo a evaluar.

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

e: Error admisible en el estimativo del PCI de la sección ($e = 5\%$)

s: Desviación estándar del PCI entre las unidades.

Ahora aplicando la Ecuación 4, tenemos como resultado $n=9$ lo cual nos indica que tenemos que evaluar 9 muestras de las 23 indicadas.

Ecuación 5: Cálculo del número total de unidades de muestreo

$$i = \frac{N}{n}$$

Donde:

N: Número total de unidades de muestreo disponible.

n: Número mínimo de unidades para evaluar.

i: Intervalo de muestreo, se redondea al número entero inferior.

Finalmente aplicando la Ecuación 5, obtenemos que $i=2$, lo cual nos indica que deben elegir las muestras intercalas cada 2 unidades.

Para tener un mejor análisis tomaremos 12 muestras de las 23 indicadas, distribuidas de la siguiente manera:

Figura 35
Distribución de progresivas

0+00	0+38	0+76	0+114	0+152	0+190	0+228	0+266	0+304
UM-01		UM-02		UM-03		UM-04		
0+304	0+342	0+380	0+418	0+456	0+494	0+532	0+570	0+608
UM-05		UM-06		UM-07		UM-08		
0+608	0+646	0+684	0+722	0+760	0+798	0+836	0+874	
UM-09		UM-10		UM-11		UM-12		

Fuente: Elaboración propia

3.4. Metodología de estudio

3.4.1. Diseño de Investigación

Esta investigación se realizará en 4 etapas, de las cuales las 3 iniciales son ejecutadas en campo y la última de análisis y comparación, las cuales presentamos a continuación:

- La primera etapa será aplicar el método PCI en la avenida en estudio, con lo cual se recopilará información sobre la inspección visual.

Técnica: Metodología PCI

Materiales: Formato recopilación de datos para pavimento flexible

Cámara fotográfica

Cinta métrica de 10 y 20 metros.

- En la segunda etapa se usará una cámara termográfica con la cual se tomará imágenes sobre las fallas detectadas visualmente con el PCI. De esta manera se verán las variaciones de temperatura y detección de posibles nuevas fallas.

Técnica: Medición termográfica

Materiales: Cámara termográfica

- En la tercera etapa se harán mediciones con un telurómetro sobre las nuevas fallas detectadas por la termografía para analizar su comportamiento a nivel de resistividad eléctrica y poder determinar un comportamiento y dar una conclusión.

Técnica: Medición de resistividad eléctrica

Materiales: Telurómetro

Cables y placas de cobre

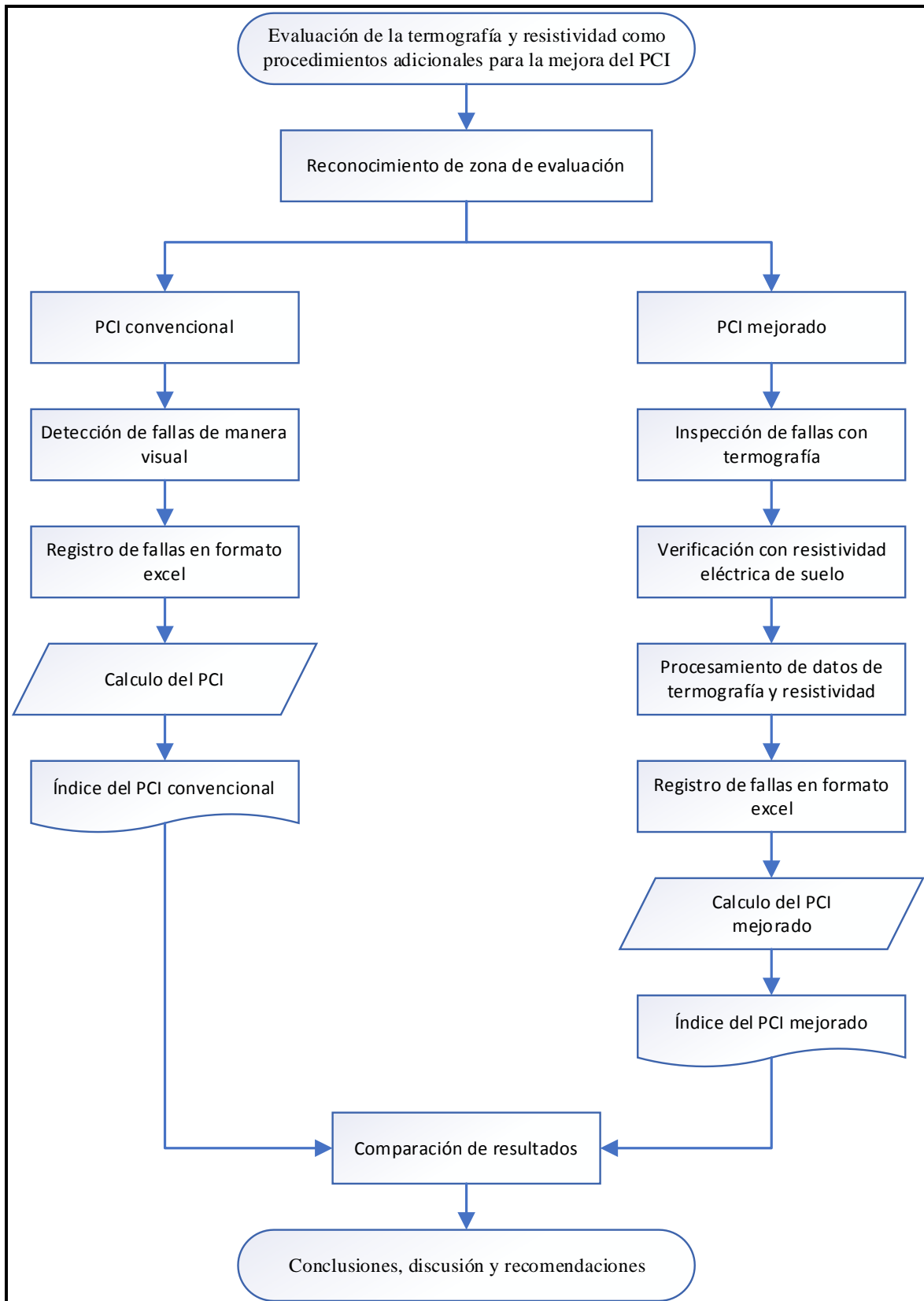
- En la cuarta etapa se tomarán todos los datos obtenidos con las 3 etapas previas y se realizara el análisis correspondiente para poder dar las conclusiones y recomendaciones que respondan a los objetivos de esta investigación.

Técnica: Análisis de información

Materiales: Datos de las 3 etapas previas

Equipo de computo

Figura 36
Procedimiento y análisis de datos



Fuente: Elaboración propia

3.4.2. Variables de estudio

Tabla 6

Variables de estudio

VARIABLES	DIMENSIÓN	DEFINICIÓN	INDICADOR	UNIDAD DE MEDIDA	INSTRUMENTO DE INVESTIGACIÓN
Variable independiente					
Ensayos no destructivos: Son ensayos con los cuales no se afectan o destruyen la estructura en estudio.	Termografía	Evaluación mediante ensayos no destructivos del deterioro físico del pavimento teniendo en cuenta las fallas establecidas, para así poder tener un diagnóstico más preciso y proponer mejoras de acuerdo a la necesidad de cada falla.	Identificación de las fallas con Diferencial de temperatura Resistividad Eléctrica de un tramo del pavimento	Grados centígrados (°C)	Cámara Termográfica
	Resistividad eléctrica del suelo		Índice PCI mejorado	Ohm Severidad PCI	Telurómetro Formato físico de registro
Variable dependiente					
Condición superficial: Se evalúa la condición superficial del pavimento flexible a simple vista.	Método PCI	Mediante la aplicación del método de PCI, se busca determinar el deterioro de los pavimentos, es por ello la importancia del método para tener conocimiento el tipo de fallas se encuentran y poder determinar el mantenimiento adecuado.	Identificar las fallas del pavimento in situ Índice PCI convencional Determinar la condición actual del pavimento flexible	Severidad de las fallas determinadas PCI convencional	Observación directa Información Visual (tablas)

Fuente: Elaboración propia

3.4.3. Recolección de datos

Basados en el diseño de la investigación, se tendrán 3 etapas de recolección de datos para poder tener información para poder realizar el análisis que corresponde y finalmente indicar los resultados.

Recolección datos PCI:

Luego de obtenidos los datos de la muestra (según sección 3.3.2.) se comienza con la inspección visual, toma de registro fotográfico y medición con la cinta métrica.

Figura 37
Unidad de muestra UM-01



Fuente: Elaboración propia adaptado de Google Maps

Tomamos la unidad de muestra UM-01 de 38 m de longitud y 228 m², usaremos los siguientes materiales para la recolección de datos:

Recolección datos de Termografía:

Según Kylili et al. (2014), la termografía es usada en el ámbito de la ingeniería civil como herramienta de análisis y su aplicación se limita a la localización de anomalías térmicas.

Las anomalías térmicas observadas y tomadas fueron de la muestra de pavimento obtenida en el PCI para poder realizar una comparación, obteniendo un diferencial de temperatura entre la falla detectada y el resto del pavimento en buenas condiciones, lo que permite detectar de manera gráfica (de acuerdo a una paleta de colores siendo la más oscura un sector de menor temperatura y la zona roja el sector de mayor temperatura); también permite el estudio de la disposición constructiva, y poder diferenciar el tipo de procedimiento de reparaciones a realizar.

Para poder garantizar un buen estado de conservación, el estudio se describe:

- Primero se tomaron datos geométricos y termográficos.
- Luego se recolecto, analizo y comparo los datos obtenidos en campo, comparando el número de fallas encontradas entre el PCI y la toma de termografía.

Para estas mediciones se usará una cámara termográfica Fluke modelo TiS45

Figura 39
Cámara infrarroja Fluke TiS45



Fuente: <https://www.fluke.com>

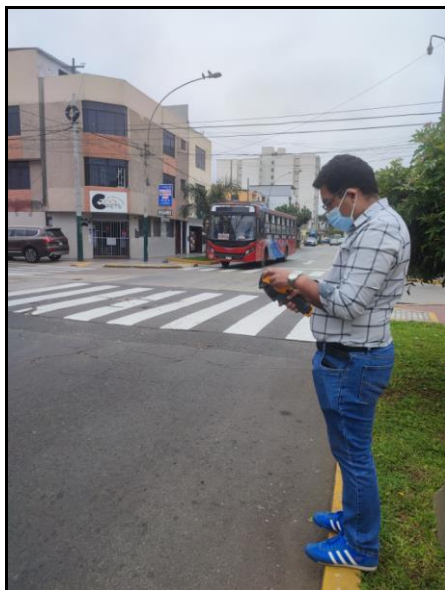
Características principales:

- Imágenes de calidad: resolución de 160 x 120 (19 200 píxeles)
- Profundidad de campo de 257:1
- Rango de medida de temperatura de -20 °C a 350 °C (-4 °F a 662 °F)
- Cámara digital de rendimiento industrial de 5 megapíxeles
- Las características completas están en el Anexo 4

Para la toma de datos de termografía es importante que esta se dé entre las 10:00 am y las 2:00 pm esto para poder detectar la mayor temperatura de trabajo del pavimento.

A continuación, mostramos unas imágenes de la recolección de datos usando una cámara termográfica.

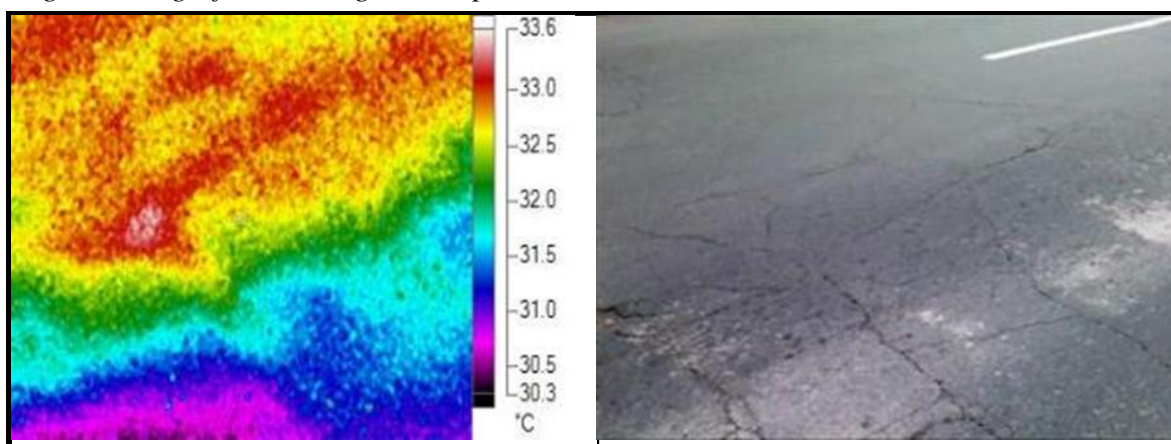
Figura 40
Toma de imágenes termográficas



Fuente: Elaboración propia

El análisis que realizaremos en esta tesis viene de hacer el contraste del PCI convencional con imágenes termográficas como vemos a continuación:

Figura 41
Imagen termográfica vs imagen en espectro visible



Fuente: Elaboración propia

Por último, se llegó a conclusiones sobre la confiabilidad de los datos obtenidos verificándolo con medición de resistividad del suelo.

Recolección datos Resistividad de Suelos:

Para medir la resistividad nos valimos de un instrumento llamado telurómetro de 4 sondas para proceder con el sondeo de la vía en estudio, luego se coloca los electrodos en posición de acuerdo al método Wenner, extendiendo los cables previamente demarcados con las distancias adecuadas, luego se verifica que los electrodos (placas de cobre) estén sobre el suelo aproximadamente 20 cm y para mejorar la lectura se humedecen las placas de cobre, luego se induce la corriente eléctrica y se toman los primeros valores de resistencia del terreno, los cuales son anotados en una planilla, luego se procede a mover los electrodos a la nueva posición y se vuelve a repetir el procedimiento hasta alcanzar la distancia elegida.

Para la toma de muestras descritas se usará un telurómetro digital MTD 20KWe:

Figura 42

Telurómetro digital de Cuatro Terminales MTD 20KWe



Fuente: <https://serprocomperu.com/>

Características principales:

- Resistencia de tierra 0-20 Ω ; 0-200 Ω ; 0-2.000 Ω ; 0-20 k Ω .
- Voltaje de tierra 0-200 V~.
- Frecuencia: 50 Hz / 60 Hz
- Las características completas están en el Anexo 5

También se usarán cables de cobre recubiertos y placas de cobre como mostramos a continuación:

Figura 43

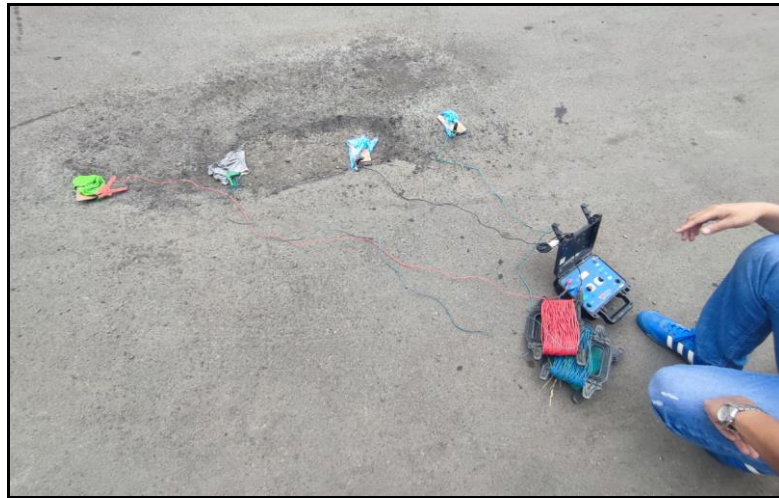
Telurómetro, cables y placas de cobre



Fuente: Elaboración propia

En la siguiente imagen podemos observar la distribución de los electrodos (placas de cobre), conectados al telurómetro con los respectivos cables:

Figura 44
Distribución de electrodos



Fuente: Elaboración propia

Para cada sector seleccionado se midió un valor de resistencia y se calculó a través de la relación. Los valores de resistividad obtenidos y los espaciamentos son guardados para posterior proceso y análisis.

Con la implementación de estos métodos realizamos una verificación de confiabilidad y eficiencia en la cuantificación de fallas, logrando obtener información que nos ayudara a verificar el PCI y tener una idea clara de los procedimientos de reparación necesarios del pavimento.

3.4.4. Procesamiento y análisis de datos

Luego de obtener los datos de la evaluación de la superficie del pavimento por medio del método de PCI, las imágenes termográficas y las medidas de resistividad eléctrica del suelo; procederemos al contraste de la información para poder demostrar la hipótesis que planteamos que es que la termografía y la resistividad de suelos ayudan a que mejore la precisión en el índice de PCI para toma de mejores decisiones en el mantenimiento correctivo y preventivo del pavimento flexible.

3.4.4.1. Análisis de datos del método de PCI

Utilizando el formato de la Figura 38, en la unidad de muestra UM-01 observamos las siguientes fallas:

Tabla 7

Toma de datos para el formato PCI en UM-01

Numero	Falla	Unidad	Severidad	Cantidad	
3	Agrietamiento en bloque	m2	Alta	6.0	
13	Huecos	und	Media	1.0	
11	Parqueo y acometidas de servicio	m2	Media	3.0	1.0
1	Grieta piel de cocodrilo	m2	Media	2.8	
17	Grietas parabólicas	m2	Media	2.0	
19	Desprendimiento de agregados	m2	Media	1.0	
7	Grietas de borde	m	Baja	3.0	

Fuente: Elaboración propia

Se obtiene la cantidad total de la suma de las cantidades parciales por tipo de falla.

Obtenemos la densidad del porcentaje que representa la suma total del área de la muestra (228 m²) con una regla de 3 simple.

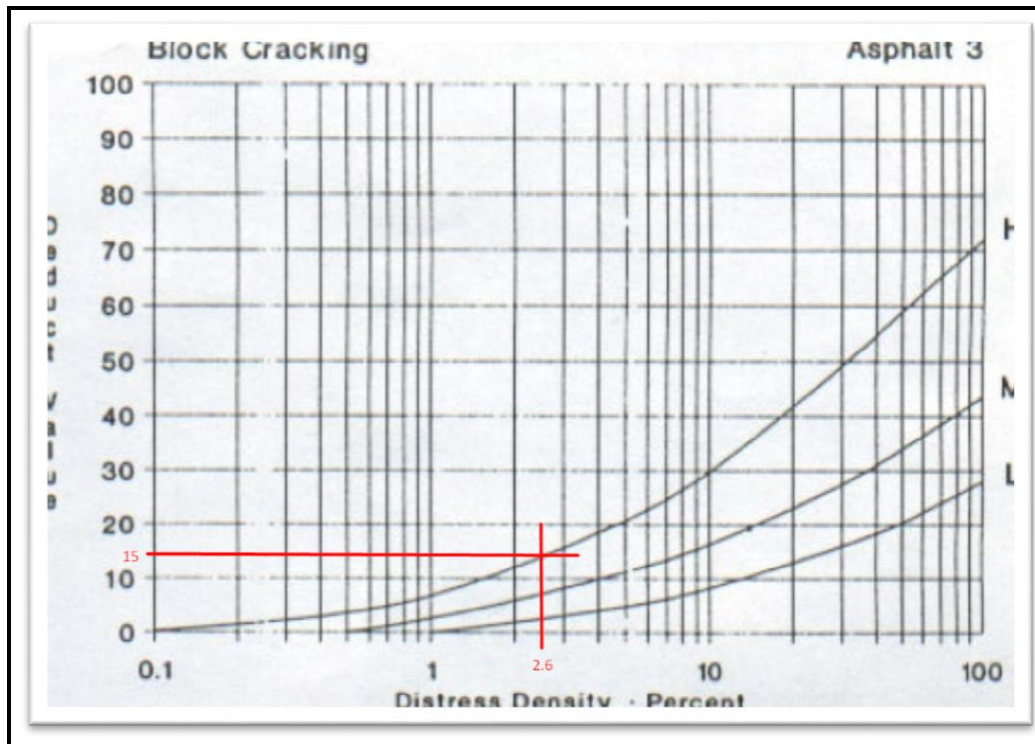
$$Densidad (\%) = (6.0/228) \times 100\% = 2.6$$

Con la densidad obtenida se continua con el cálculo del valor deducido, para lo cual nos apoyaremos con la curva correspondiente a la falla identificada.

Como ejemplo tomamos la primera falla con los siguientes datos

Agrietamiento en bloque; severidad ALTA; densidad de 2.6 %

Figura 45
Valor deducido de Agrietamiento en bloque



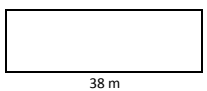
Fuente: ASTM (2007)

De la intersección de los valores en la curva se obtiene que el Valor deducido es 15.

Siguiendo la misma metodología mostrada, se hace lo mismo con todas las fallas detectadas en el tramo en estudio; para eso se van llenando los valores deducidos en el formato mostrado en la Figura 46.

Figura 46

Valores deducidos del tramo UM-01

EVALUACIÓN DEL ÍNDICE DE CONDICIÓN DEL PAVIMENTO (PCI)										
PAVIMENTO SUPERFICIE ASFÁLTICA										
HOJA DE REGISTRO										
NOMBRE DE VIA:	Av Tacna		UNIDAD DE MUESTRA:	UM-01	6 m					
SECCION DE VIA:	Jr Yungay - Cal Independencia		LONGITUD DE MUESTRA (m):	38						
PROGRESIVA INICIAL:	0+00		ANCHO DE MUESTRA (m):	6						
PROGRESIVA FINAL:	0+38		AREA DE MUESTREO:	228						
EVALUADORES:	Joe William Enriquez Vera		FECHA DE EVALUACION:	24/10/2021			38 m			
	Jhonataan Flores Espinoza									
TIPO DE FALLAS										
1. Grieta piel de cocodrilo (m2)	6. Depresión (m2)	11. Parcheo y acometidas de servicio (m2)	16. Desplazamiento (m2)							
2. Exudación (m2)	7. Grietas de borde (m)	12. Pulimientos y agregados (m2)	17. Grietas parabólicas (m2)							
3. Agrietamiento en bloque (m2)	8. Grietas de reflexión de junta (m)	13. Huecos (und)	18. Hinchamiento (m2)							
4. Abultamientos y hundimientos (m)	9. Desnivel carril/berma (m)	14. Cruce de vía férrea (m2)	19. Desprendimiento de agregados (m2)							
5. Corrugación (m2)	10. Grietas longitudinal/transversal (m)	15. Ahuellamientos (m2)								
FALLA	SEVERIDAD	CANTIDADES PARCIALES						TOTAL	DENSIDAD (%)	VALOR DEDUCIDO
3	H	6.0					6.0	2.6	15.0	
13	M	1.0					1.0	0.4	18.0	
11	M	3.0	1.0				4.0	1.8	13.0	
1	M	2.8					2.8	1.2	13.0	
17	M	2.0					2.0	0.9	11.0	
19	M	1.0					1.0	0.4	8.0	
7	L	3.0					3.0	1.3	3.5	
								TOTAL VD		81.5

Fuente: Elaboración propia

Ordenamos lo valores deducidos 18, 15, 13, 13, 11, 8, 3.5 para poder calcular el número máximo admisible de valores deducidos m tal como se indica en la Ecuación 6.

Ecuación 6: Cálculo del número máximo admisible

$$m_i = 1.00 + \frac{9}{98} (100 - HDV_i)$$

Donde:

m_i : Número máximo admisible de “valores deducidos”, incluyendo fracción, para la unidad de muestreo i .

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

Tomamos el valor más alto de los valores deducidos $HDV=18$ y aplicamos la ecuación mencionada:

$$m = 1 + \frac{9}{98} (100 - 18) = 8.53$$

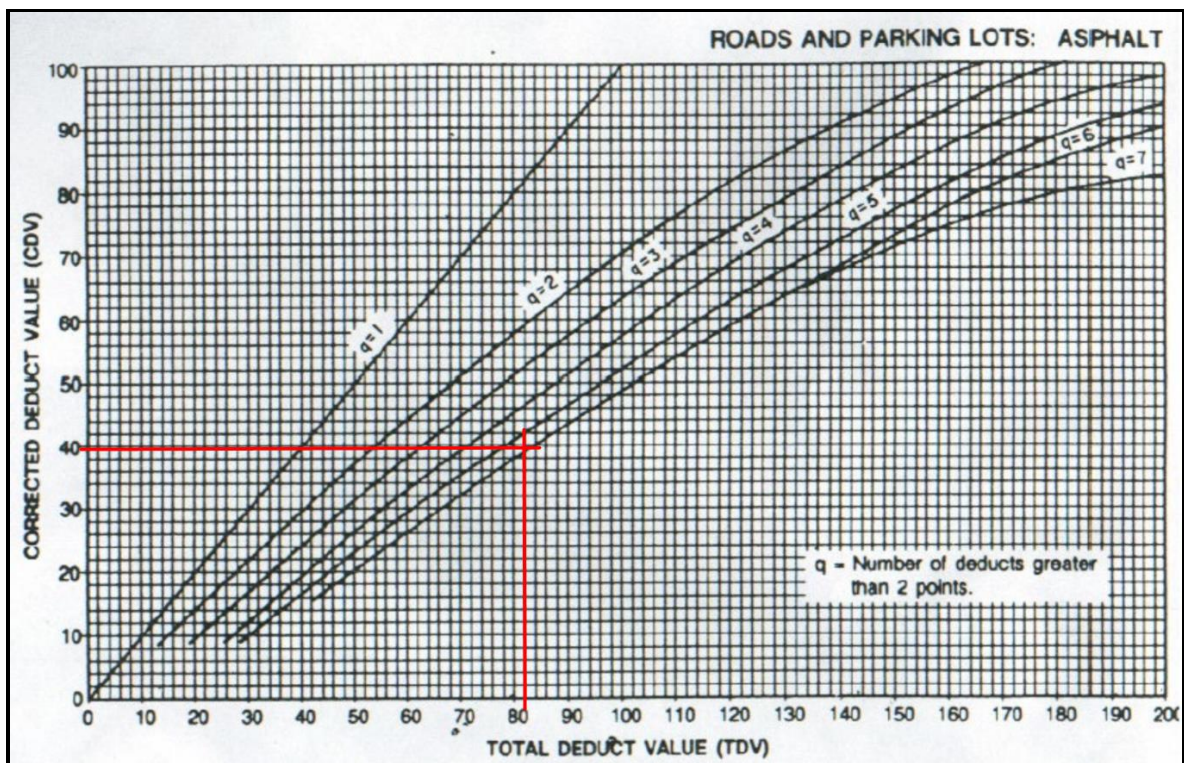
Debido a que no se tiene valores deducidos menores que 2 y el máximo admisible es 8 en su parte entera, se tomaran los 7 valores para el análisis.

Se ordena de manera descendente de izquierda a derecha los valores deducidos y se suman obteniendo 81.5; al cual se le asigna un valor de $q=7$.

Se repite la misma operación, pero se va reemplazando en valor mas bajo de los valores deducidos por 2 de manera progresiva hasta llegar al valor $q=1$.

Tomaremos como ejemplo el primer valor de 81.5 y $q=7$ con los cuales intersecamos en la siguiente figura:

Figura 47
Curva de corrección CDV



Fuente: Elaboración propia

Según la curva obtenemos que el valor corregido CDV es de 40.

Se repite el mismo proceso para los demás valores según muestra la siguiente Figura:

Figura 48

Valores deducidos del tramo UM-01

N	VALORES DEDUCIDOS							TOTAL	q	CVD
1	18.0	15.0	13.0	13.0	11.0	8.0	3.5	81.5	7	40
2	18.0	15.0	13.0	13.0	11.0	8.0	2.0	80.0	6	41
3	18.0	15.0	13.0	13.0	11.0	2.0	2.0	74.0	5	42
4	18.0	15.0	13.0	13.0	2.0	2.0	2.0	65.0	4	36
5	18.0	15.0	13.0	2.0	2.0	2.0	2.0	54.0	3	34
6	18.0	15.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	43.0	2	32
7	18.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	30.0	1	30
									MAX CDV	42

Fuente: Elaboración propia

De todos los valores de CDV elegimos el mayor que es 42 y finalmente calculamos el PCI que sería la diferencia de 100 con el mayor valor de CDV.

$$PCI_{UM-01} = 100 - 42 = 58$$

Según la *Tabla 1: Rango de calificación del PCI*, tenemos un tramo **BUENO**.

El cálculo para las demás secciones de análisis se realizará de la misma manera y estarán detalladas en el anexo de esta investigación.

3.4.4.2. Análisis de datos de la termografía

Para el análisis de las imágenes termográficas tendremos tres etapas las cuales describimos a continuación:

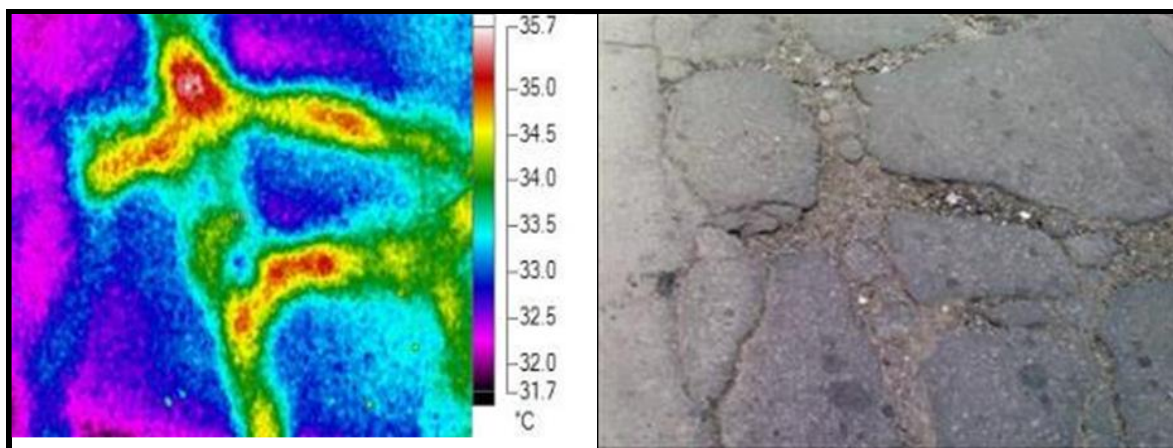
Etapas 1: Búsqueda de patrones térmicos

Se procederá con el contraste de las imágenes para identificar patrones que puedan relacionar las fallas detectadas a nivel visual con los diferenciales de temperatura.

En la imagen mostrada en la Figura 49 podemos ver la falla de agrietamiento en bloque que muestra las grietas en nivel alto (High) con una temperatura mayor al resto del pavimento.

Figura 49

Diferencial de temperatura falla agrietamiento en bloque



Fuente: Elaboración propia

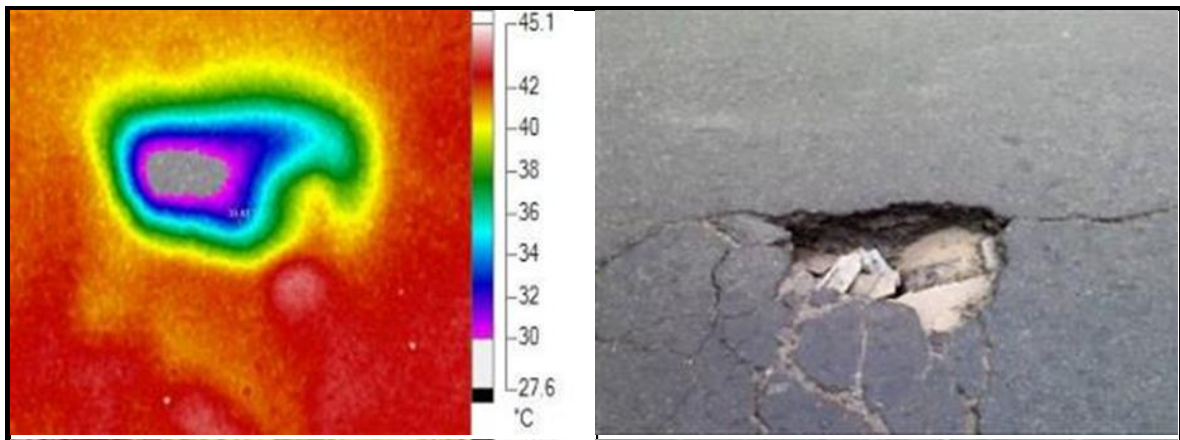
- Temperatura del pavimento (°C) : 32.29
- Temperatura de la falla (°C) : 34.39
- Diferencial de temperatura (°C) : 2.1

Con lo que podemos deducir que para fallas de severidad alta (High) se tiene un diferencial de temperatura como mínimo de 2.1 °C.

En la imagen mostrada en la Figura 50 podemos ver la falla de hueco que muestra las grietas en nivel alto (High) con una temperatura menor al resto del pavimento.

Figura 50

Diferencial de temperatura falla hueco



Fuente: Elaboración propia

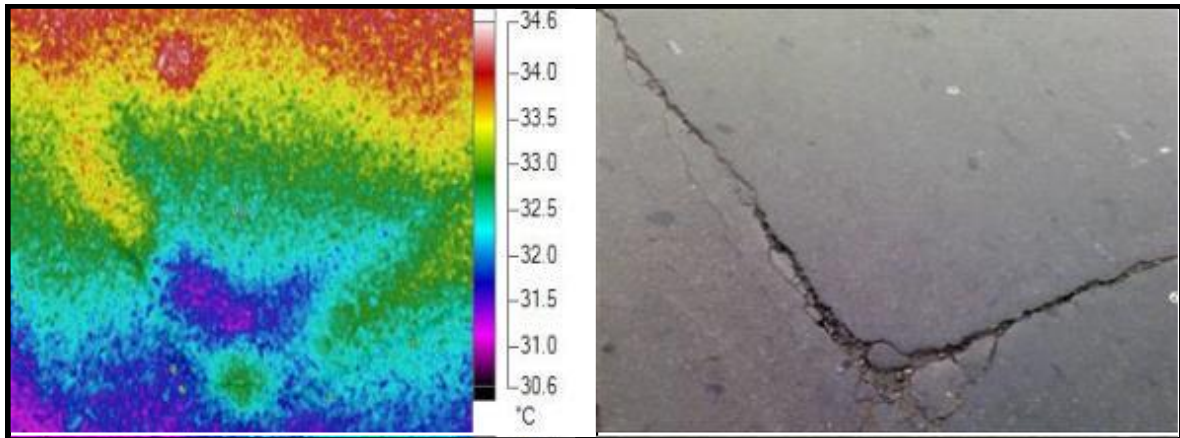
- Temperatura del pavimento (°C) : 44.9
- Temperatura de la falla (°C) : 27.79
- Diferencial de temperatura (°C) : 17.11

En este caso debido a que un hueco con severidad alta es la ausencia total de pavimento, entonces hay un diferencial de temperatura alto, que está por encima de los 10 °C.

En la imagen mostrada en la Figura 51 podemos ver la falla de parcheo que muestra las grietas en nivel medio (Medium) con una temperatura menor al resto del pavimento.

Figura 51

Diferencial de temperatura falla de parcheo



Fuente: Elaboración propia

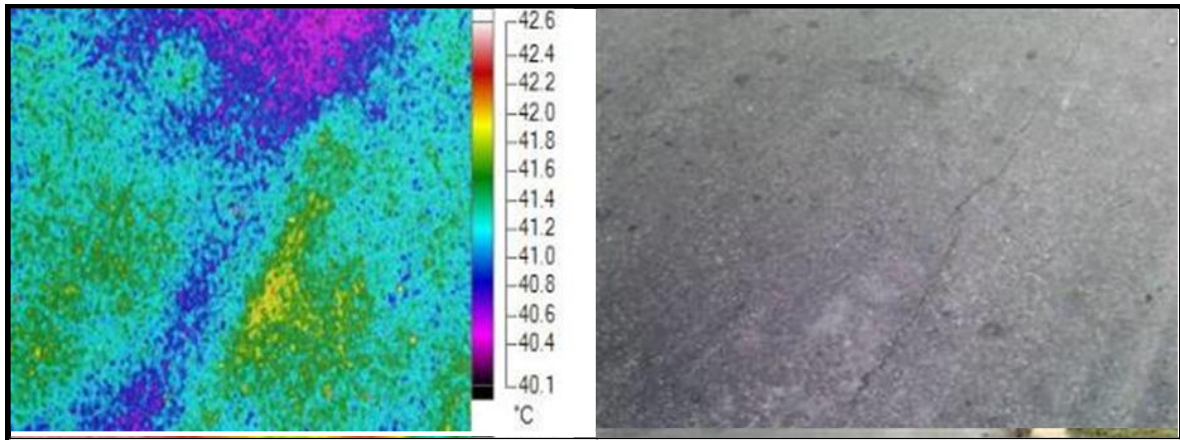
- Temperatura del pavimento (°C) : 35.54
- Temperatura de la falla (°C) : 30.58
- Diferencial de temperatura (°C) : 3.96

Podemos deducir que en las fallas con severidad media (Medium) se tiene un diferencial de temperatura del orden de 4 °C.

En la imagen mostrada en la Figura 52 podemos ver la falla de grieta longitudinal que muestra las grietas en nivel bajo (Low) con una temperatura menor al resto del pavimento.

Figura 52

Diferencial de temperatura falla de grieta longitudinal



Fuente: Elaboración propia

- Temperatura del pavimento (°C) : 41.6
- Temperatura de la falla (°C) : 40
- Diferencial de temperatura (°C) : 1.6

Podemos deducir que en las fallas con severidad baja (Low) se tiene un diferencial de temperatura del orden de 1.5 °C.

Entonces por medio de la termografía se pueden detectar los mismos errores que por el método visual del PCI así como su severidad.

Etapa 2: Contraste de patrones térmicos con análisis PCI

En esta etapa haremos el contraste de los datos obtenidos por inspección visual simple y las imágenes térmicas, eso debido a que notamos que en algunas tomas con la cámara termográfica se encontraron fallas con una severidad mayor a las descritas en el análisis del PCI.

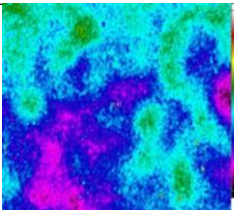

Es así que encontramos 11 fallas de severidad diferente las cuales mostramos a continuación:

Mejora en precisión PCI de falla 1:

Tenemos el siguiente cuadro comparativo:

Tabla 8

Contraste PCI vs Termografía en falla piel de cocodrilo 1

UM	Falla PCI	Temp. 1	Temp. 2	Dif. Temp.	Foto termografía	Foto espectro visible	Severidad PCI	Severidad Termografía
UM-02	1	40.14	44.32	4.18			M	H

Fuente: Elaboración propia

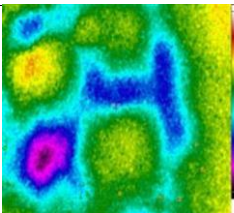

En el tramo UM-02 teníamos una falla tipo Piel de Cocodrilo con severidad M (Medium), pero con ayuda de la termografía podemos ver que es una falla de severidad H (High) de acuerdo al diferencial de temperatura.

Mejora en precisión PCI de falla 2:

Tenemos el siguiente cuadro comparativo:

Tabla 9

Contraste PCI vs Termografía en falla piel de cocodrilo 2

UM	Falla PCI	Temp. 1	Temp. 2	Dif. Temp.	Foto termografía	Foto espectro visible	Severidad PCI	Severidad Termografía
UM-03	1	36.76	43.43	6.67			L	M

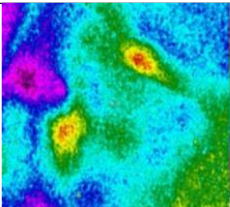

Fuente: Elaboración propia

En el tramo UM-03 teníamos una falla tipo Piel de Cocodrilo con severidad L (Low), pero con ayuda de la termografía podemos ver que es una falla de severidad M (Medium) de acuerdo al diferencial de temperatura.

Mejora en precisión PCI de falla 3:

Tenemos el siguiente cuadro comparativo:

Tabla 10
Contraste PCI vs Termografía en falla piel de cocodrilo 3

UM	Falla PCI	Temp. 1	Temp. 2	Dif. Temp.	Foto termografía	Foto espectro visible	Severidad PCI	Severidad Termografía
UM-04	1	40.71	44.85	4.14			M	H

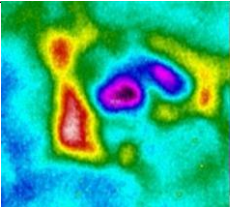

Fuente: Elaboración propia

En el tramo UM-04 teníamos una falla tipo Piel de Cocodrilo con severidad M (Medium), pero con ayuda de la termografía podemos ver que es una falla de severidad H (High) de acuerdo al diferencial de temperatura.

Mejora en precisión PCI de falla 4:

Tenemos el siguiente cuadro comparativo:

Tabla 11
Contraste PCI vs Termografía en falla hueco

UM	Falla PCI	Temp. 1	Temp. 2	Dif. Temp.	Foto termografía	Foto espectro visible	Severidad PCI	Severidad Termografía
UM-05	13	29.82	36.45	6.63			M	H

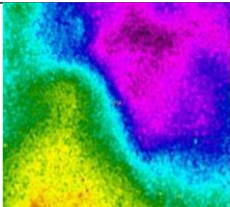

Fuente: Elaboración propia

En el tramo UM-05 teníamos una falla tipo hueco con severidad M (Medium), pero con ayuda de la termografía podemos ver que es una falla de severidad H (High) de acuerdo al diferencial de temperatura.

Mejora en precisión PCI de falla 5:

Tenemos el siguiente cuadro comparativo:

Tabla 12
Contraste PCI vs Termografía en falla parcheo

UM	Falla PCI	Temp. 1	Temp. 2	Dif. Temp.	Foto termografía	Foto espectro visible	Severidad PCI	Severidad Termografía
UM-05	11	38.83	45.06	6.23			L	M

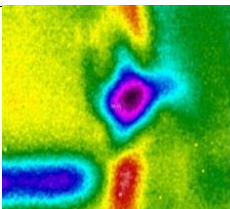
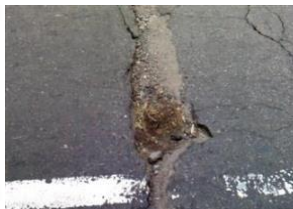
Fuente: Elaboración propia

En el tramo UM-05 teníamos una falla tipo parcheo con severidad L (Low), pero con ayuda de la termografía podemos ver que es una falla de severidad M (Medium) de acuerdo al diferencial de temperatura.

Mejora en precisión PCI de falla 6:

Tenemos el siguiente cuadro comparativo:

Tabla 13
Contraste PCI vs Termografía en falla hueco 2

UM	Falla PCI	Temp. 1	Temp. 2	Dif. Temp.	Foto termografía	Foto espectro visible	Severidad PCI	Severidad Termografía
UM-07	13	35.33	44.43	9.1			M	H

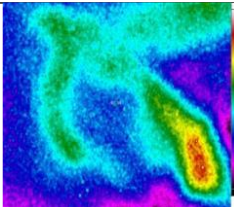

Fuente: Elaboración propia

En el tramo UM-07 teníamos una falla tipo hueco con severidad M (Medium), pero con ayuda de la termografía podemos ver que es una falla de severidad H (High) de acuerdo al diferencial de temperatura.

Mejora en precisión PCI de falla 7:

Tenemos el siguiente cuadro comparativo:

Tabla 14
Contraste PCI vs Termografía en falla hueco 3

UM	Falla PCI	Temp. 1	Temp. 2	Dif. Temp.	Foto termografía	Foto espectro visible	Severidad PCI	Severidad Termografía
UM-09	13	39.78	44.64	4.86			M	H

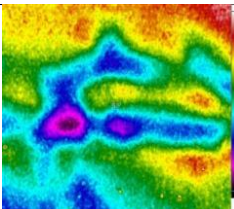

Fuente: Elaboración propia

En el tramo UM-09 teníamos una falla tipo hueco con severidad M (Medium), pero con ayuda de la termografía podemos ver que es una falla de severidad H (High) de acuerdo al diferencial de temperatura.

Mejora en precisión PCI de falla 8:

Tenemos el siguiente cuadro comparativo:

Tabla 15
Contraste PCI vs Termografía en falla agrietamiento en bloque

UM	Falla PCI	Temp. 1	Temp. 2	Dif. Temp.	Foto termografía	Foto espectro visible	Severidad PCI	Severidad Termografía
UM-10	3	34.43	40.53	6.1			M	H

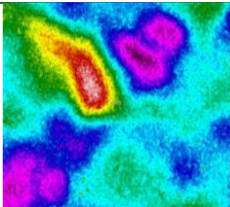

Fuente: Elaboración propia

En el tramo UM-10 teníamos una falla tipo agrietamiento en bloque con severidad M (Medium), pero con ayuda de la termografía podemos ver que es una falla de severidad H (High) de acuerdo al diferencial de temperatura.

Mejora en precisión PCI de falla 9:

Tenemos el siguiente cuadro comparativo:

Tabla 16
Contraste PCI vs Termografía en falla hueco 4

UM	Falla PCI	Temp. 1	Temp. 2	Dif. Temp.	Foto termografía	Foto espectro visible	Severidad PCI	Severidad Termografía
UM-11	13	39	43.96	4.96			L	M

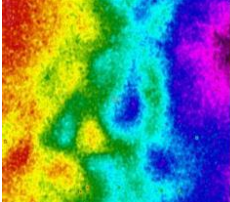

Fuente: Elaboración propia

En el tramo UM-11 teníamos una falla tipo hueco con severidad L (Low), pero con ayuda de la termografía podemos ver que es una falla de severidad M (Medium) de acuerdo al diferencial de temperatura.

Mejora en precisión PCI de falla 10:

Tenemos el siguiente cuadro comparativo:

Tabla 17
Contraste PCI vs Termografía en falla piel de cocodrilo 4

UM	Falla PCI	Temp. 1	Temp. 2	Dif. Temp.	Foto termografía	Foto espectro visible	Severidad PCI	Severidad Termografía
UM-12	1	34.06	39.23	5.17			M	H

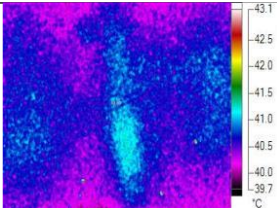

Fuente: Elaboración propia

En el tramo UM-12 teníamos una falla tipo Piel de Cocodrilo con severidad M (Medium), pero con ayuda de la termografía podemos ver que es una falla de severidad H (High) de acuerdo al diferencial de temperatura.

Mejora en precisión PCI de falla 11:

Tenemos el siguiente cuadro comparativo:

Tabla 18
Contraste PCI vs Termografía en falla grieta longitudinal

UM	Falla PCI	Temp. 1	Temp. 2	Dif. Temp.	Foto termografía	Foto espectro visible	Severidad PCI	Severidad Termografía
UM-12	10	39.72	43.04	3.32			L	M

Fuente: Elaboración propia

En el tramo UM-12 teníamos una falla tipo grieta longitudinal con severidad M (Medium), pero con ayuda de la termografía podemos ver que es una falla de severidad H (High) de acuerdo al diferencial de temperatura.

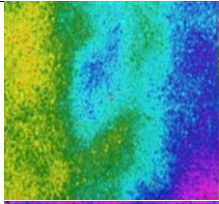

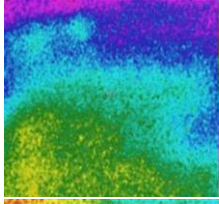
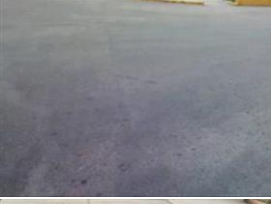
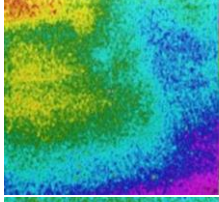

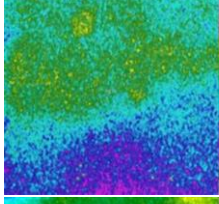

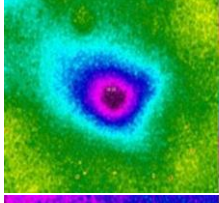
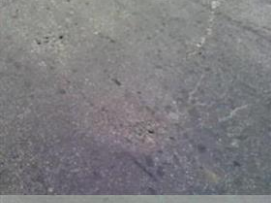
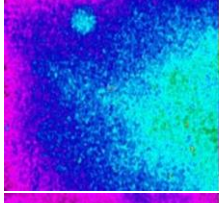

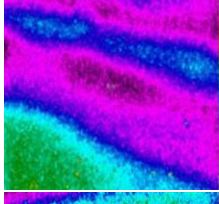

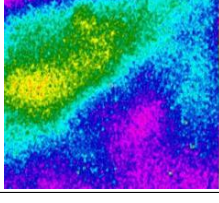
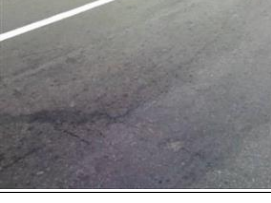
Es importante mencionar que estas nuevas severidades detectadas serán usadas en un nuevo cálculo del PCI mejorando la precisión para el respectivo mantenimiento

Etapa 3: Búsqueda de nuevas fallas por termografía

En esta etapa identificamos fallas nuevas que no fueron detectadas por medio de la inspección a simple vista, pero fueron detectadas por la cámara térmica y confirmadas volviendo a revisar de manera más cuidadosa de manera física/visual.

Se identificaron 8 fallas que presentamos a continuación:

Tabla 19
Fallas nuevas detectadas por termografía

Nro	UM	Falla PCI	Temp. 1	Temp. 2	Dif. Temp.	Foto termografía	Foto espectro visible	Severidad Termografía	Medida resistividad
1	UM-01	2	36.77	41.26	4.49			L	19211
2	UM-03	6	41.38	45.85	4.47			L	19638
3	UM-03	6	37.52	41.38	3.86			L	18641
4	UM-04	4	36.71	39.45	2.74			L	19547
5	UM-06	13	37.98	44.59	6.61			L	12582
6	UM-06	6	29.29	32.13	2.84			L	19549
7	UM-09	15	35.36	39.14	3.78			M	12672
8	UM-10	19	40.2	43.04	2.84			L	12882

Fuente: Elaboración propia

Con los datos de las nuevas fallas obtenidas se procederá a realizar un nuevo cálculo del PCI, considerando además la corrección de severidad de fallas obtenidas en la Etapa 2 (Contraste de patrones térmicos con análisis PCI) del análisis de datos realizado.

3.4.4.3. Análisis de datos de la resistividad eléctrica de suelos

En esta parte de análisis realizamos una medición con el telurómetro a las fallas en donde la cámara termográfica nos indicaba otro grado de severidad del pavimento y a las fallas nuevas encontradas con la termografía y que no fueron detectadas visualmente con la inspección del PCI.

Logrando tomar 19 lecturas, de las cuales 11 fueron para la confirmación del cambio de la severidad de las fallas encontradas en el PCI y 8 de las fallas detectadas únicamente con la cámara termográfica.

Es así que de las 11 fallas de severidad diferente encontradas con la termografía procedimos a una lectura de resistividad las cuales mostramos a continuación:

Verificación del cambio de severidad de falla 1:

Tenemos el siguiente cuadro comparativo:

Tabla 20
Contraste PCI vs Resistividad en falla piel de cocodrilo 1

UM	Falla	Severidad PCI	Severidad Termografía	Resistividad ohm-m	Comentario
UM-02	Piel de Cocodrilo 1	M	H	13,762	Valor < 20,000 ohm por humedad cerca de la falla

Fuente: Elaboración propia

En el tramo UM-02 teníamos una falla tipo Piel de Cocodrilo con severidad M (Medium), pero con ayuda de la resistividad podemos ver que es una falla de severidad H (High) de acuerdo

con la lectura obtenida que nos arroja un valor menor a 20,000 ohm-m que según tablas nos indica una resistividad baja para un pavimento flexible, confirmando la presencia de humedad en el pavimento.

Verificación del cambio de severidad de falla 2:

Tenemos el siguiente cuadro comparativo:

Tabla 21

Contraste PCI vs Resistividad en falla piel de cocodrilo 2

UM	Falla	Severidad PCI	Severidad Termografía	Resistividad ohm-m	Comentario
UM-03	Piel de Cocodrilo 2	L	M	12,439	Valor < 20,000 ohm por humedad cerca de la falla

Fuente: Elaboración propia

En el tramo UM-03 teníamos una falla tipo Piel de Cocodrilo con severidad L (Low), pero con ayuda de la resistividad podemos ver que es una falla de severidad M (Medium) de acuerdo con la lectura obtenida que nos arroja un valor menor a 20,000 ohm-m que según tablas nos indica una resistividad baja para un pavimento flexible, confirmando la presencia de humedad en el pavimento.

Verificación del cambio de severidad de falla 3:

Tenemos el siguiente cuadro comparativo:

Tabla 22

Contraste PCI vs Resistividad en falla piel de cocodrilo 3

UM	Falla	Severidad PCI	Severidad Termografía	Resistividad ohm-m	Comentario
UM-04	Piel de Cocodrilo 3	M	H	9,937	Valor < 20,000 ohm por humedad cerca de la falla

Fuente: Elaboración propia

En el tramo UM-04 teníamos una falla tipo Piel de Cocodrilo con severidad M (Medium), pero con ayuda de la resistividad podemos ver que es una falla de severidad H (High) de acuerdo con la lectura obtenida que nos arroja un valor menor a 20,000 ohm-m que según tablas nos indica una resistividad baja para un pavimento flexible, confirmando la presencia de humedad en el pavimento.

Verificación del cambio de severidad de falla 4:

Tenemos el siguiente cuadro comparativo:

Tabla 23

Contraste PCI vs Resistividad en falla hueco

UM	Falla	Severidad PCI	Severidad Termografía	Resistividad ohm-m	Comentario
UM-05	Hueco 1	M	H	14,629	Valor < 20,000 ohm por humedad cerca de la falla

Fuente: Elaboración propia

En el tramo UM-05 teníamos una falla tipo hueco con severidad M (Medium), pero con ayuda de la resistividad podemos ver que es una falla de severidad H (High) de acuerdo con la lectura obtenida que nos arroja un valor menor a 20,000 ohm-m que según tablas nos indica una resistividad baja para un pavimento flexible, confirmando la presencia de humedad en el pavimento.

Verificación del cambio de severidad de falla 5:

Tenemos el siguiente cuadro comparativo:

Tabla 24

Contraste PCI vs Resistividad en falla parcheo

UM	Falla	Severidad PCI	Severidad Termografía	Resistividad ohm-m	Comentario
UM-05	Falla en parcheo	L	M	12,763	Valor < 20,000 ohm por humedad cerca de la falla

Fuente: Elaboración propia

En el tramo UM-05 teníamos una falla tipo parcheo con severidad L (Low), pero con ayuda de la resistividad podemos ver que es una falla de severidad M (Medium) de acuerdo con la lectura obtenida que nos arroja un valor menor a 20,000 ohm-m que según tablas nos indica una resistividad baja para un pavimento flexible, confirmando la presencia de humedad en el pavimento, teniendo en cuenta que la humedad se genera netamente en el parcheo, suponiendo que las consecuencias no son propias del terreno si no por la humedad que genera el propio servicio que se encuentra debajo del pavimento.

Verificación del cambio de severidad de falla 6:

Tenemos el siguiente cuadro comparativo:

Tabla 25

Contraste PCI vs Resistividad en falla hueco 2

UM	Falla	Severidad PCI	Severidad Termografía	Resistividad ohm-m	Comentario
UM-07	Hueco 2	M	H	8,649	Valor < 20,000 ohm por humedad cerca de la falla

Fuente: Elaboración propia

En el tramo UM-07 teníamos una falla tipo hueco con severidad M (Medium), pero con ayuda de la resistividad podemos ver que es una falla de severidad H (High) de acuerdo con la lectura obtenida que nos arroja un valor menor a 20,000 ohm-m que según tablas nos indica una resistividad baja para un pavimento flexible, confirmando la presencia de humedad en el pavimento y más aún se puede apreciar que existe un afloramiento de humedad en la propia falla.

Verificación del cambio de severidad de falla 7:

Tenemos el siguiente cuadro comparativo:

Tabla 26

Contraste PCI vs Resistividad en falla hueco 3

UM	Falla	Severidad PCI	Severidad Termografía	Resistividad ohm-m	Comentario
UM-09	Hueco 3	M	H	18,757	Valor < 20,000 ohm por humedad cerca de la falla

Fuente: Elaboración propia

En el tramo UM-09 teníamos una falla tipo hueco con severidad M (Medium), pero con ayuda de la resistividad podemos ver que es una falla de severidad H (High) de acuerdo con la lectura obtenida que nos arroja un valor menor a 20,000 ohm-m que según tablas nos indica una resistividad baja para un pavimento flexible, confirmando un desplazamiento de humedad hacia la falla, lo que origina un esfuerzo estructural del pavimento.

Verificación del cambio de severidad de falla 8:

Tenemos el siguiente cuadro comparativo:

Tabla 27

Contraste PCI vs Resistividad en falla agrietamiento en bloque

UM	Falla	Severidad PCI	Severidad Termografía	Resistividad ohm-m	Comentario
UM-10	Agrietamiento en bloque	M	H	12,691	Valor < 20,000 ohm por humedad cerca de la falla

Fuente: Elaboración propia

En el tramo UM-10 teníamos una falla tipo agrietamiento en bloque con severidad M (Medium), pero con ayuda de la resistividad podemos ver que es una falla de severidad H (High) de acuerdo con la lectura obtenida que nos arroja un valor menor a 20,000 ohm-m que según tablas nos indica una resistividad baja para un pavimento flexible.

Verificación del cambio de severidad de falla 9:

Tenemos el siguiente cuadro comparativo:

Tabla 28

Contraste PCI vs Resistividad en falla hueco 4

UM	Falla	Severidad PCI	Severidad Termografía	Resistividad ohm-m	Comentario
UM-11	Hueco 4	L	M	12,136	Valor < 20,000 ohm por humedad cerca de la falla

Fuente: Elaboración propia

En el tramo UM-11 teníamos una falla tipo hueco con severidad L (Low), pero con ayuda de la resistividad podemos ver que es una falla de severidad M (Medium) de acuerdo con la lectura obtenida que nos arroja un valor menor a 20,000 ohm-m que según tablas nos indica una resistividad baja para un pavimento flexible.

Verificación del cambio de severidad de falla 10:

Tenemos el siguiente cuadro comparativo:

Tabla 29

Contraste PCI vs Resistividad en falla piel de cocodrilo 4

UM	Falla	Severidad PCI	Severidad Termografía	Resistividad ohm-m	Comentario
UM-12	Piel de Cocodrilo 4	M	H	8,582	Valor < 20,000 ohm por humedad cerca de la falla

Fuente: Elaboración propia

En el tramo UM-12 teníamos una falla tipo Piel de Cocodrilo con severidad M (Medium), pero con ayuda de la resistividad podemos ver que es una falla de severidad H (High) de acuerdo con la lectura obtenida que nos arroja un valor menor a 20,000 ohm-m que según tablas nos indica una resistividad baja para un pavimento flexible.

Verificación del cambio de severidad de falla 11:

Tenemos el siguiente cuadro comparativo:

Tabla 30
Contraste PCI vs Resistividad en falla grieta longitudinal

UM	Falla	Severidad PCI	Severidad Termografía	Resistividad ohm-m	Comentario
UM-12	Grieta longitudinal	L	M	13,983	Valor < 20,000 ohm por humedad cerca de la falla

Fuente: Elaboración propia

En el tramo UM-12 teníamos una falla tipo grieta longitudinal con severidad M (Medium), pero con ayuda de la resistividad podemos ver que es una falla de severidad H (High) de acuerdo con la lectura obtenida que nos arroja un valor menor a 20,000 ohm-m que según tablas nos indica una resistividad baja para un pavimento flexible.

Es importante mencionar que se verifica un incremento de severidad confirmada tanto con la termografía con la lectura de resistividad ocasionada en su mayoría por presencia de humedad en el pavimento, estas nuevas severidades detectadas serán usadas en un nuevo cálculo del PCI mejorando la precisión para el respectivo mantenimiento.

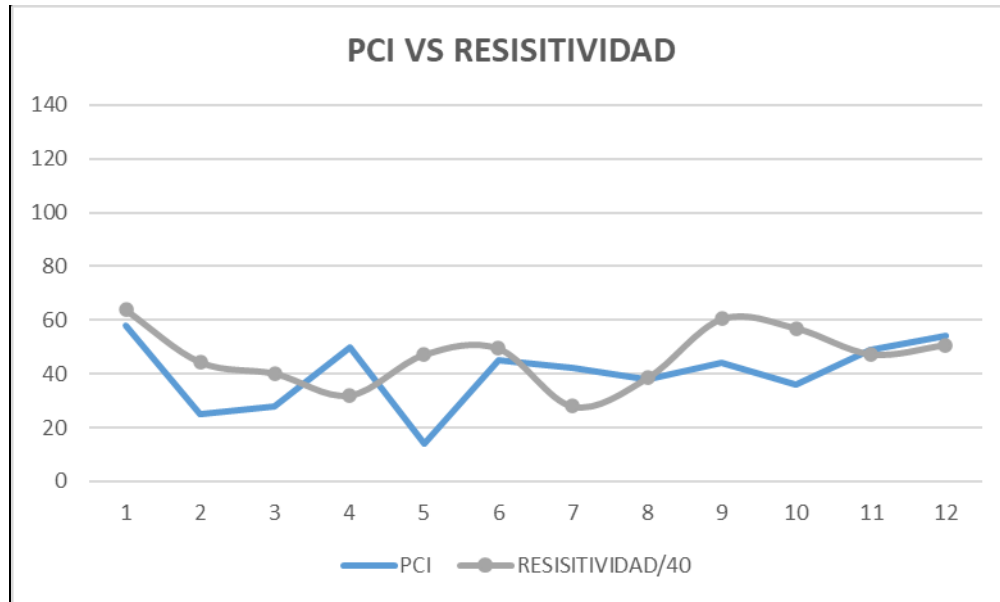
Con la información obtenida podemos establecer las siguientes relaciones:

Tabla 31
Relación del índice PCI con la resistividad

Tramo	PCI	Resistividad ohm-m	R/340	Error
UM-01	58	19784	63.8	9.1%
UM-02	25	13762	44.4	43.7%
UM-03	28	12439	40.1	30.2%
UM-04	50	9937	32.1	56.0%
UM-05	14	14629	47.2	70.3%
UM-06	45	15327	49.4	9.0%
UM-07	42	8649	27.9	50.5%
UM-08	38	11953	38.6	1.4%
UM-09	44	18757	60.5	27.3%
UM-10	36	17653	56.9	36.8%
UM-11	49	14683	47.4	3.5%
UM-12	54	15742	50.8	6.3%

Fuente: Elaboración propia

Figura 53
PCI vs resistividad



Fuente: Elaboración propia

Tabla 32

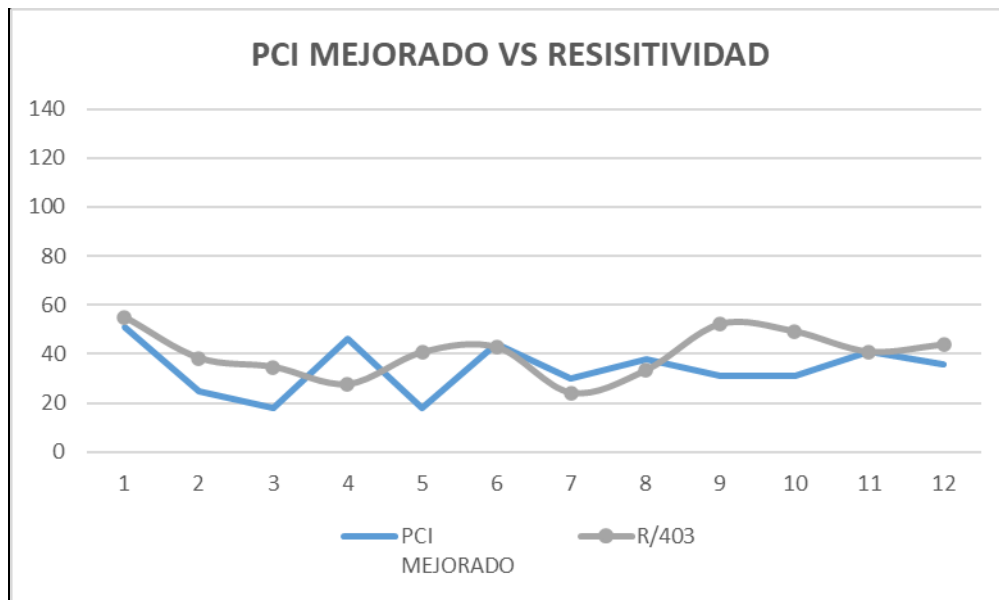
Relación del índice PCI mejorado con la resistividad

Tramo	PCI	Resistividad ohm-m	R/403	Error
UM-01	51	19784	55.0	7.2%
UM-02	25	13762	38.2	34.6%
UM-03	18	12439	34.6	47.9%
UM-04	46	9937	27.6	66.6%
UM-05	18	14629	40.6	55.7%
UM-06	44	15327	42.6	3.3%
UM-07	30	8649	24.0	24.9%
UM-08	38	11953	33.2	14.4%
UM-09	31	18757	52.1	40.5%
UM-10	31	17653	49.0	36.8%
UM-11	41	14683	40.8	0.5%
UM-12	36	15742	43.7	17.7%

Fuente: Elaboración propia

Figura 54

PCI mejorado vs resistividad



Fuente: Elaboración propia

Tabla 33

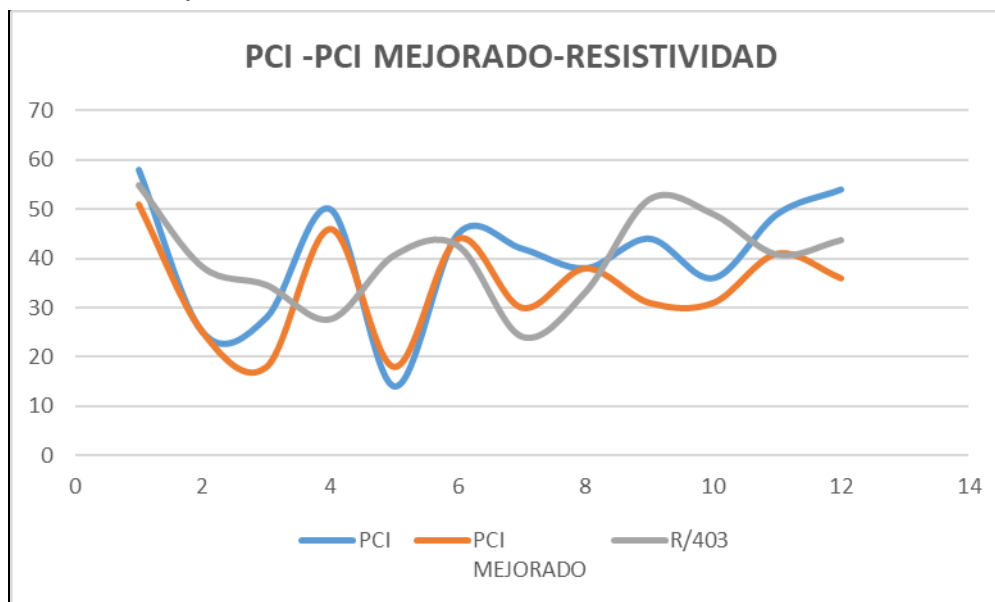
Relación del índice PCI, PCI mejorado y la resistividad

Tramo	PCI	PCI MEJORADO	R/403	Error
UM-01	58	51	55.0	14%
UM-02	25	25	38.2	0%
UM-03	28	18	34.6	56%
UM-04	50	46	27.6	9%
UM-05	14	18	40.6	22%
UM-06	45	44	42.6	2%
UM-07	42	30	24.0	40%
UM-08	38	38	33.2	0%
UM-09	44	31	52.1	42%
UM-10	36	31	49.0	16%
UM-11	49	41	40.8	20%
UM-12	54	36	43.7	50%

Fuente: Elaboración propia

Figura 55

PCI – PCI mejorado – Resistividad



Fuente: Elaboración propia

CAPÍTULO IV. RESULTADOS

A continuación, presentaremos los resultados obtenidos luego de aplicar el método PCI convencional en el tramo en estudio y los procedimientos adicionales de termografía y resistividad de suelos.

4.1. Fallas en el tramo de estudio

4.1.1. Fallas identificadas con PCI convencional

4.1.1.1. Tipos de fallas existentes

Al aplicar el PCI convencional a los 12 tramos en estudio obtenemos 11 de los 19 tipos de fallas que existen en los pavimentos flexibles según el procedimiento.

En este primer cuadro mostramos el total de la cantidad de los 11 tipos de fallas existentes con sus respectivas unidades.

Tabla 34
Total por falla específica

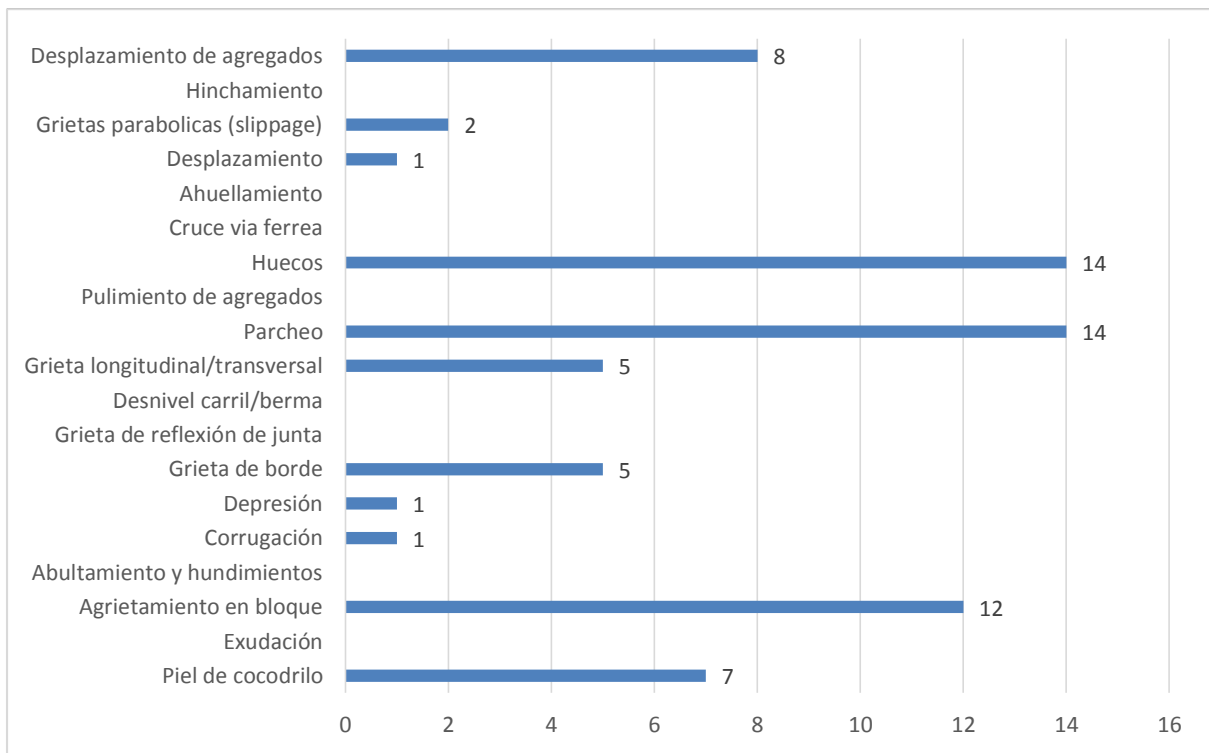
N°	Tipo de falla	Unidad	Total
1	Piel de cocodrilo	m ²	36.8
2	Exudación	m ²	-
3	Agrietamiento en bloque	m ²	160.8
4	Abultamiento y hundimientos	m	-
5	Corrugación	m ²	12.0
6	Depresión	m ²	3.0
7	Grieta de borde	m	11.5
8	Grieta de reflexión de junta	m	-
9	Desnivel carril/berma	m	-
10	Grieta longitudinal/transversal	m	42.0
11	Parqueo	m ²	42.1
12	Pulimiento de agregados	m ²	-
13	Huecos	und	25.2

14	Cruce vía férrea	m2	-
15	Ahuellamiento	m2	-
16	Desplazamiento	m2	4.5
17	Grietas parabólicas (slippage)	m2	5.0
18	Hinchamiento	m2	-
19	Desplazamiento de agregados	m2	18.9

Fuente: Elaboración propia

En este segundo cuadro podemos observar la frecuencia de cada tipo de falla en todo el tramo de estudio, considerando que se contabilizaron 70 fallas en su totalidad.

Figura 56
Frecuencia de tipo de falla en tramo



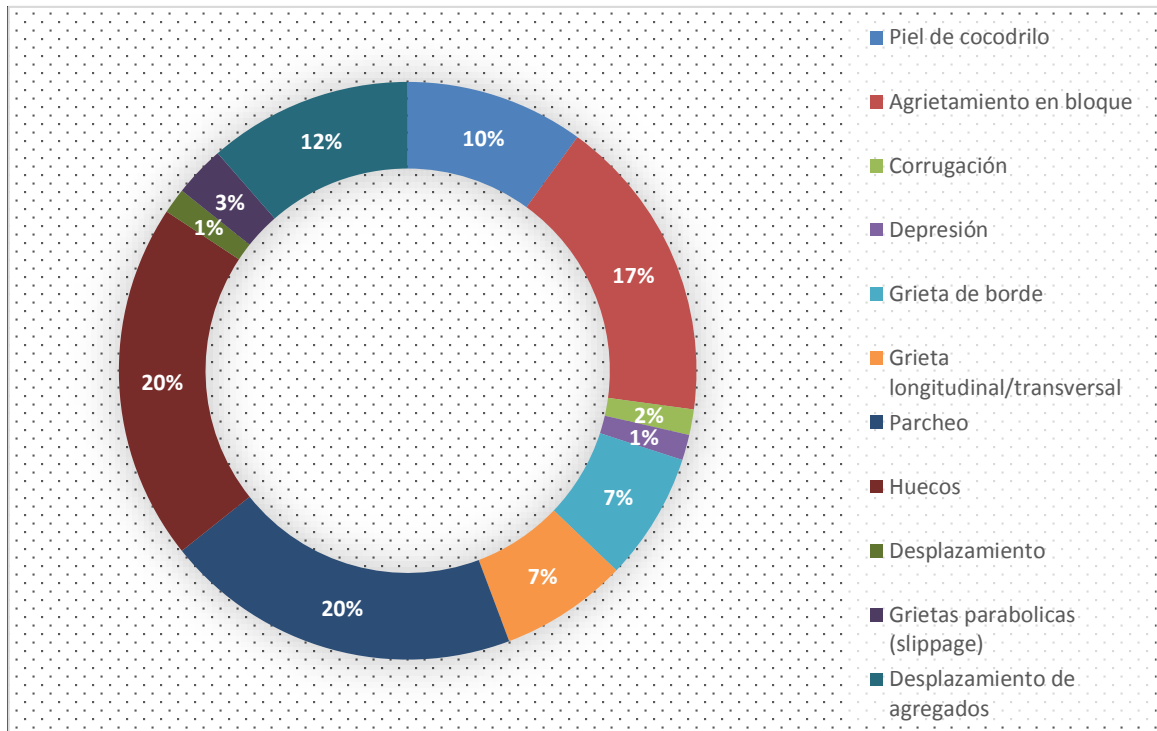
Fuente: Elaboración propia

Estas fallas fueron identificadas mediante inspección visual, que es parte fundamental en el procedimiento del método PCI.

4.1.1.2. Porcentaje de fallas recurrentes

Como se mencionó en la sección anterior, se contabilizaron en total 70 fallas y en base a estas elaboramos el siguiente grafico que muestra el porcentaje de recurrencia de las fallas detectadas:

Figura 57
Porcentaje de fallas



Fuente: Elaboración propia

4.1.1.3. Severidad de las fallas recurrentes

Considerando las fallas existentes ya identificadas, presentamos en el siguiente cuadro la cantidad de fallas clasificadas por severidad baja (L), media (M) y alta (H).

Tabla 35
Severidad de las fallas recurrentes

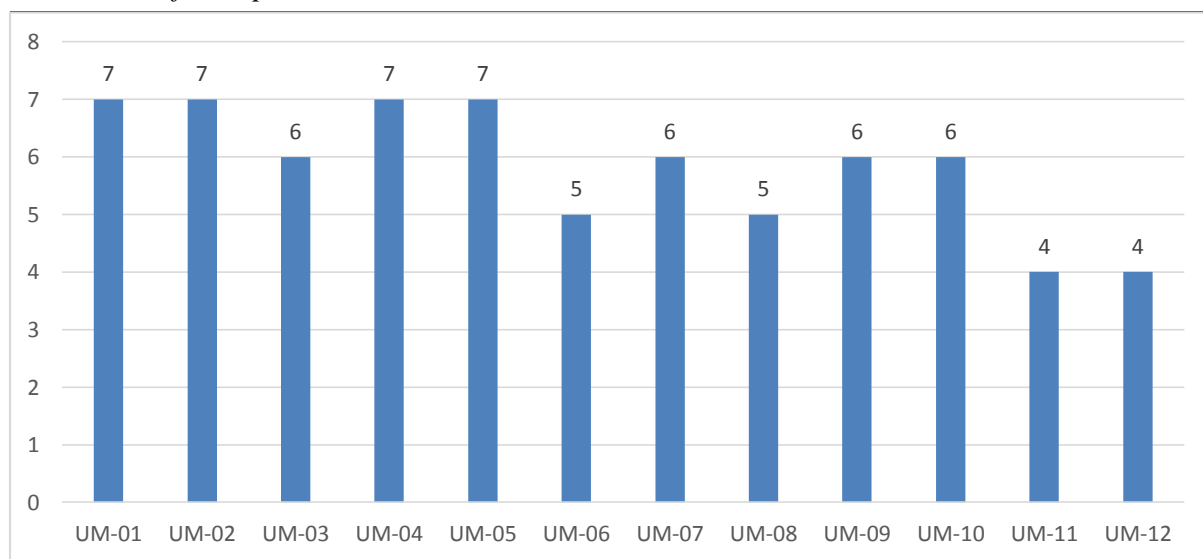
N°	Tipo de falla	Severidad		
		L	M	H
1	Piel de cocodrilo	1	4	2
3	Agrietamiento en bloque	0	3	9
5	Corrugación	1	0	0
6	Depresión	0	1	0
7	Grieta de borde	1	0	4
	Grieta			
10	longitudinal/transversal	3	1	1
11	Parqueo	5	7	2
13	Huecos	2	8	4
16	Desplazamiento	0	0	1
	Grietas parabólicas			
17	(slippage)	0	1	1
	Desplazamiento de			
19	agregados	0	2	6
	Total	13	27	30

Fuente: Elaboración propia

4.1.1.4. Frecuencia de fallas en unidades de muestra

En el siguiente cuadro mostramos el número de fallas por unidades de muestra, debemos tener en consideración que tenemos un total de 70 fallas y de 12 unidades de muestra.

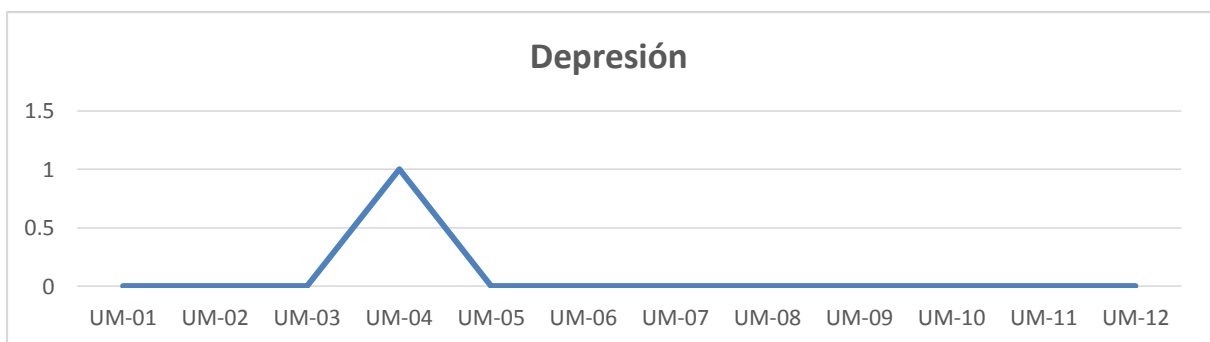
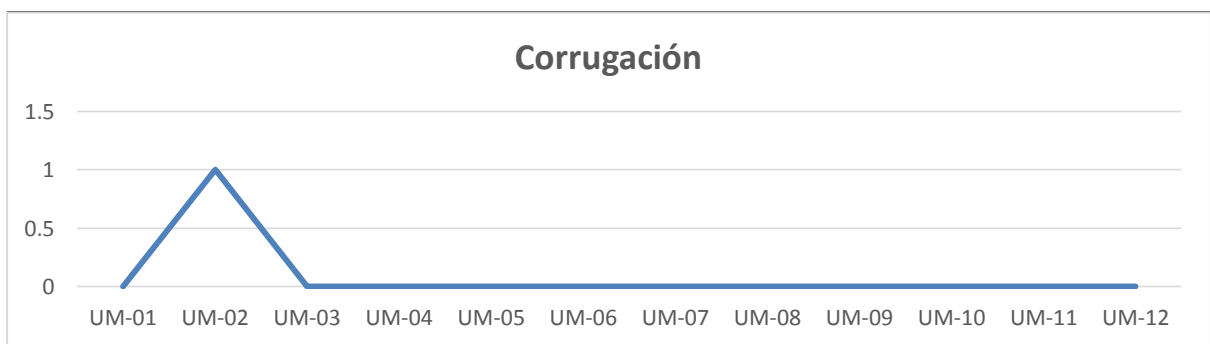
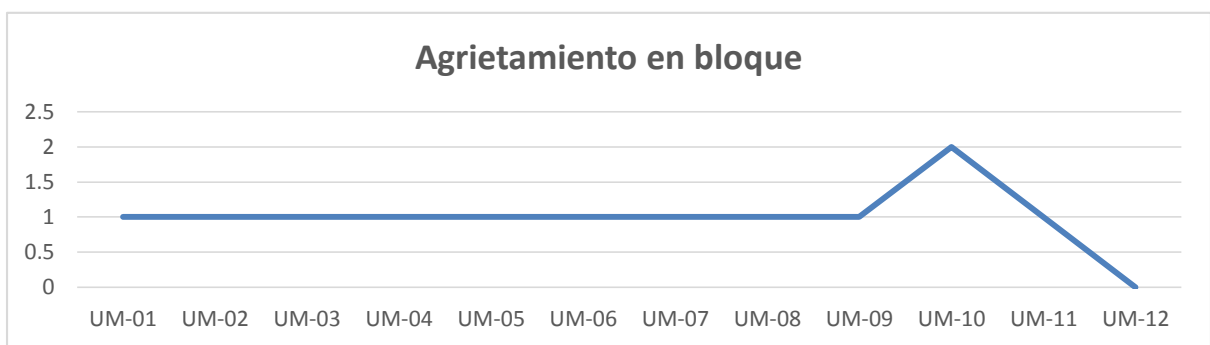
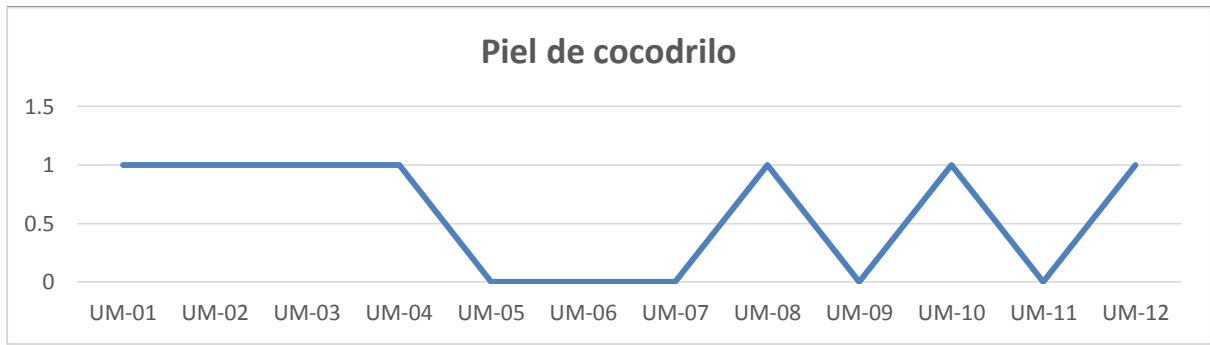
Figura 58
Cantidad de fallas por unidad de muestra

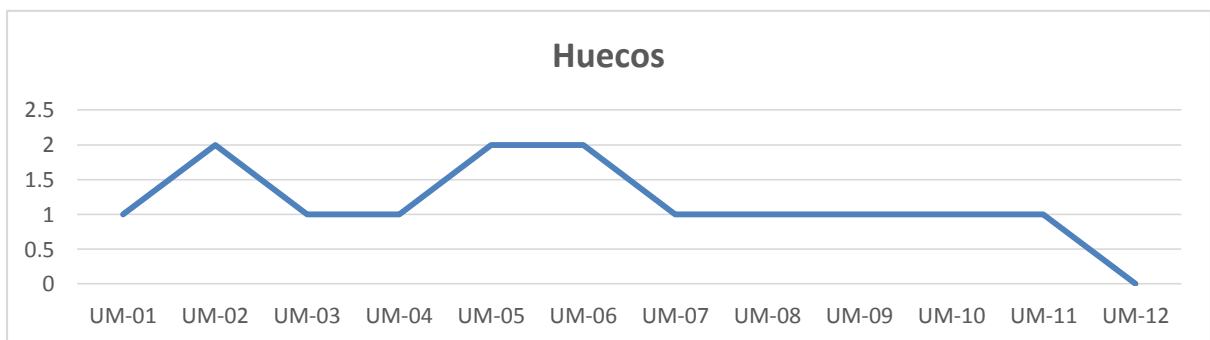
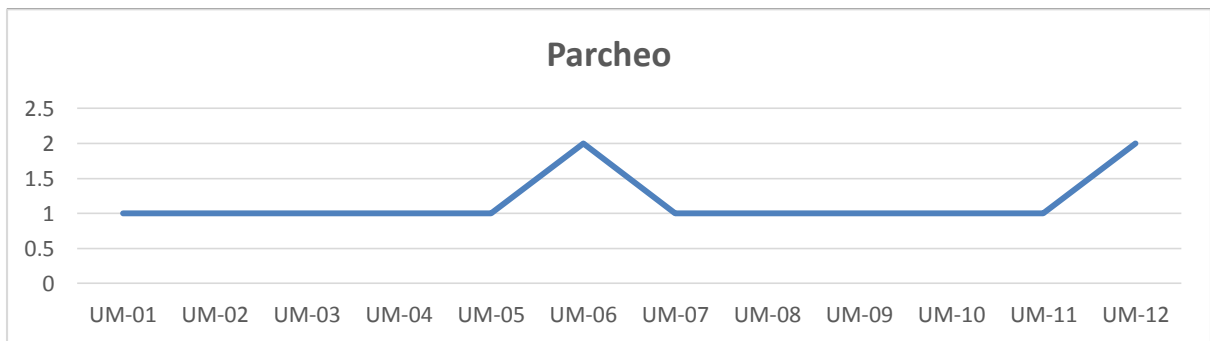
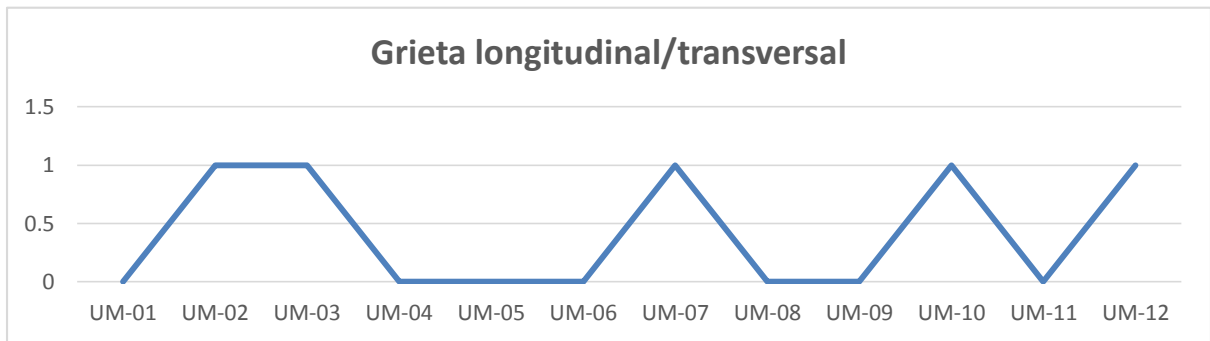
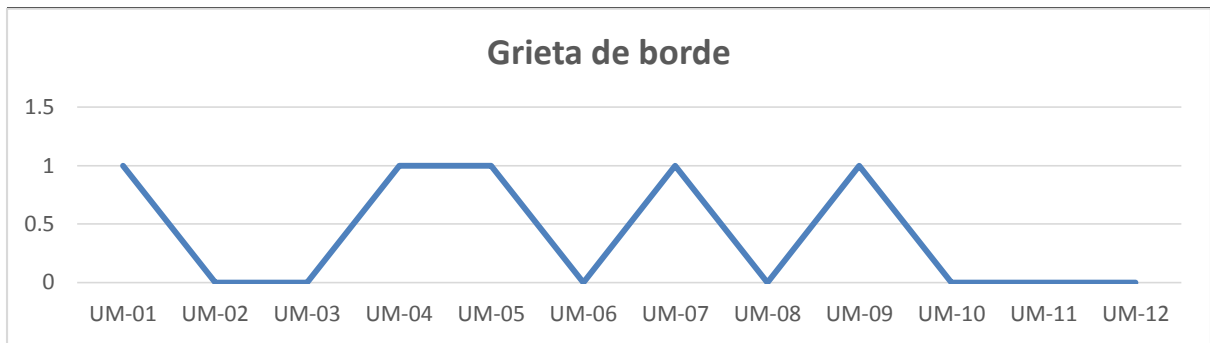


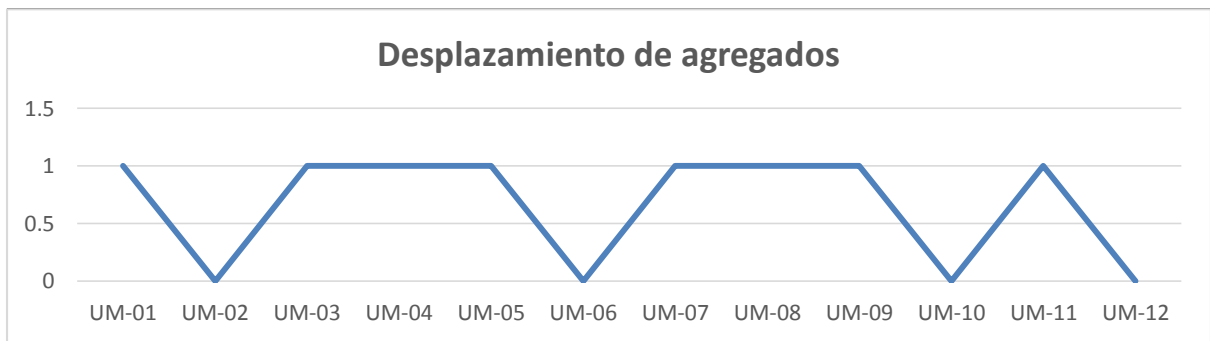
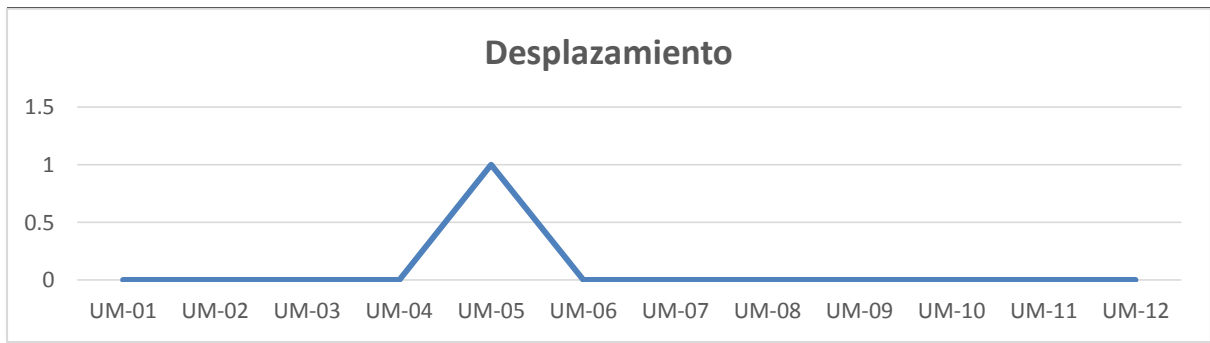
Fuente: Elaboración propia

Ahora mostraremos en los siguientes gráficos la recurrencia de fallas por unidad de muestra:

Figura 59
Recurrencia de fallas por unidad de muestra







Fuente: Elaboración propia

4.1.2. Fallas identificadas con termografía y resistividad

4.1.2.1. Tipos de fallas existentes

Adicionando los ensayos de termografía y resistividad de suelos al PCI convencional, encontramos que 11 fallas aumentan su severidad y pudimos identificar 8 fallas nuevas que fueron imperceptibles a simple vista en las 12 unidades de muestra del tramo en estudio.

En este primer cuadro mostramos el total de las 19 fallas identificadas con sus respectivas unidades. Se sombrea de verde los 3 tipos de fallas adicionales a las 11 ya identificadas con el PCI convencional.

Tabla 36
Total por falla específica

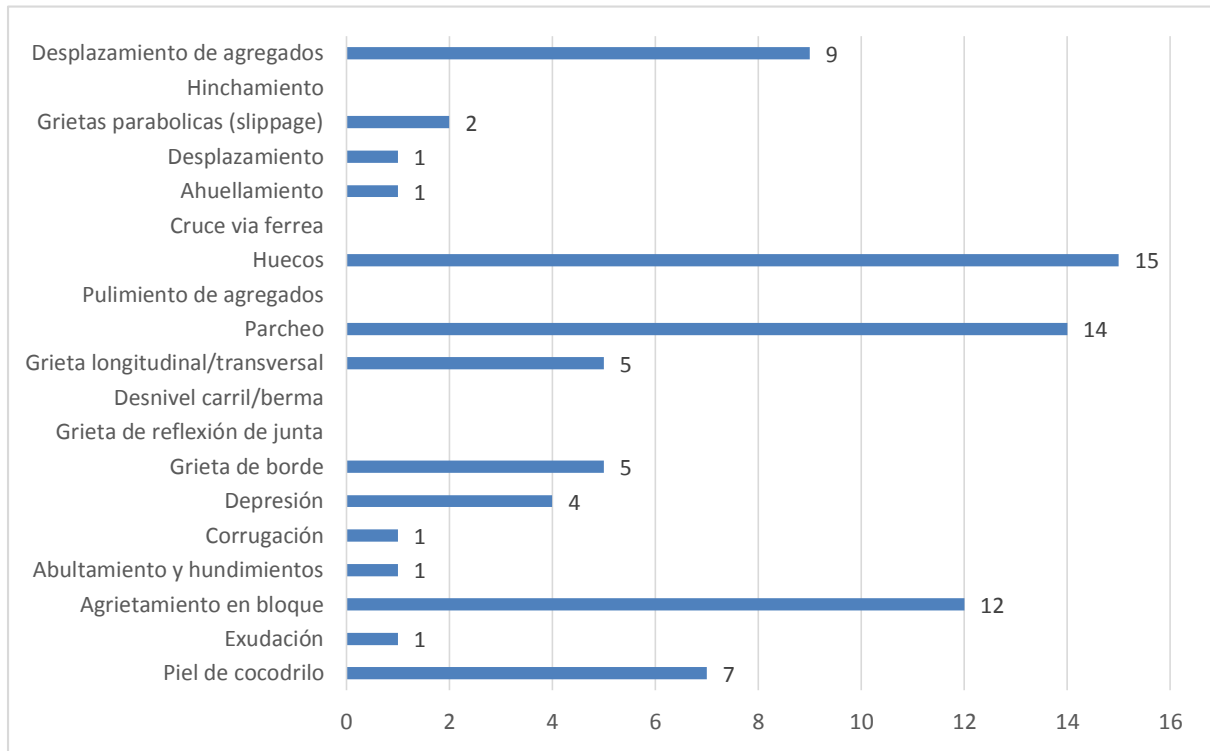
Nº	Tipo de falla	Unidad	Total
1	Piel de cocodrilo	m2	36.8
2	Exudación	m2	4.5
3	Agrietamiento en bloque	m2	160.8
4	Abultamiento y hundimientos	m	5.0
5	Corrugación	m2	12.0
6	Depresión	m2	3.0
7	Grieta de borde	m	11.5
8	Grieta de reflexión de junta	m	-
9	Desnivel carril/berma	m	-
10	Grieta longitudinal/transversal	m	42.0
11	Parcheo	m2	42.1
12	Pulimiento de agregados	m2	-
13	Huecos	und	25.2
14	Cruce vía férrea	m2	-
15	Ahuellamiento	m2	2.0
16	Desplazamiento	m2	4.5
17	Grietas parabólicas (slippage)	m2	5.0
18	Hinchamiento	m2	-
19	Desplazamiento de agregados	m2	18.9

Fuente: Elaboración propia

En este segundo cuadro podemos observar la frecuencia de cada tipo de falla en todo el tramo de estudio, considerando que se contabilizaron 78 fallas en su totalidad.

Figura 60

Frecuencia de tipo de falla en tramo



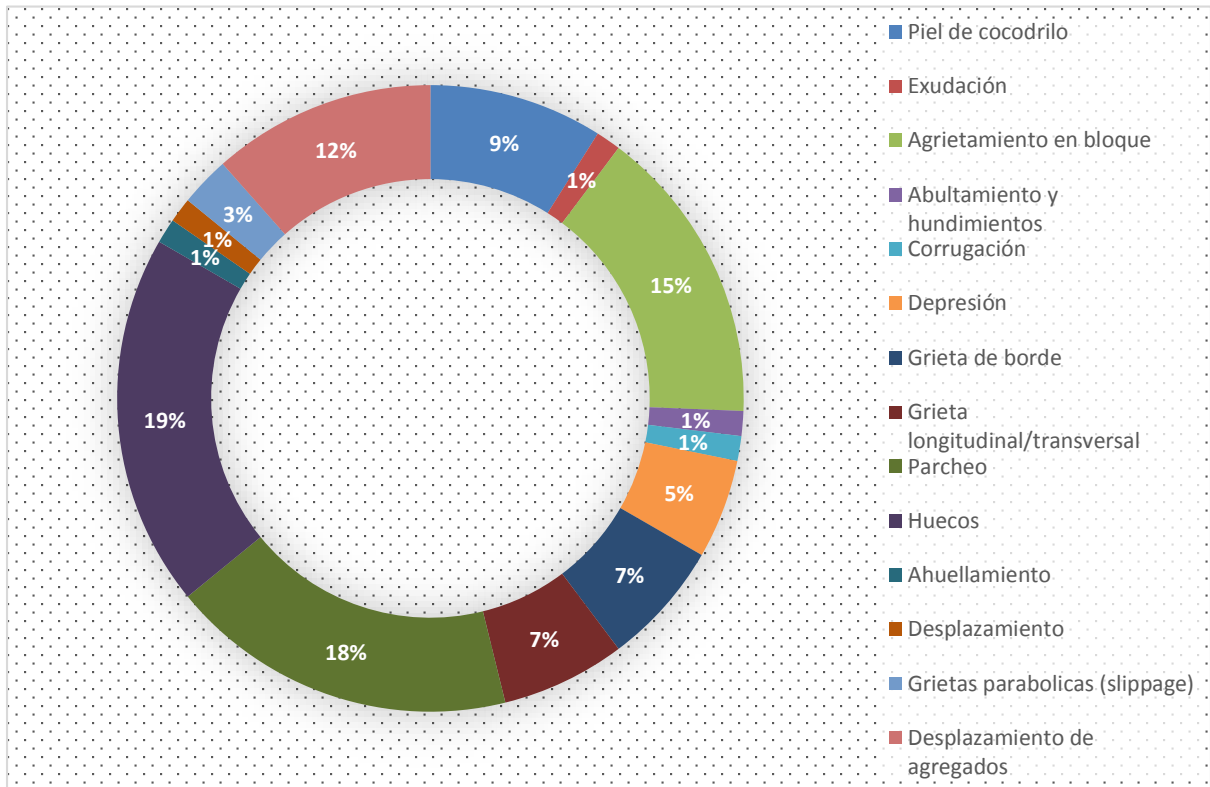
Fuente: Elaboración propia

Estas fallas fueron identificadas mediante inspección visual, que es parte fundamental en el procedimiento del método PCI.

4.1.2.2. Porcentaje de fallas recurrentes

Como se mencionó en la sección anterior, se contabilizaron en total 78 fallas y en base a estas elaboramos el siguiente gráfico que muestra el porcentaje de recurrencia de las fallas detectadas:

Figura 61
Porcentaje de fallas



Fuente: Elaboración propia

4.1.2.3. Severidad de las fallas recurrentes

Considerando las fallas existentes ya identificadas, presentamos en el siguiente cuadro la cantidad de fallas clasificadas por severidad baja (L), media (M) y alta (H).

Tabla 37
Severidad de las fallas recurrentes

N°	Tipo de falla	Severidad		
		L	M	H
1	Piel de cocodrilo	0	2	5
2	Exudación	1	0	0
3	Agrietamiento en bloque	0	2	10
4	Abultamiento y hundimientos	1	0	0
5	Corrugación	1	0	0
6	Depresión	3	1	0
7	Grieta de borde	1	0	4
10	Grieta longitudinal/transversal	2	2	1
11	Parcheo	4	8	2
13	Huecos	2	6	7
15	Ahuellamiento	0	1	0
16	Desplazamiento	0	0	1
17	Grietas parabólicas (slippage)	0	1	1
19	Desplazamiento de agregados	1	2	6
	Total	16	25	37

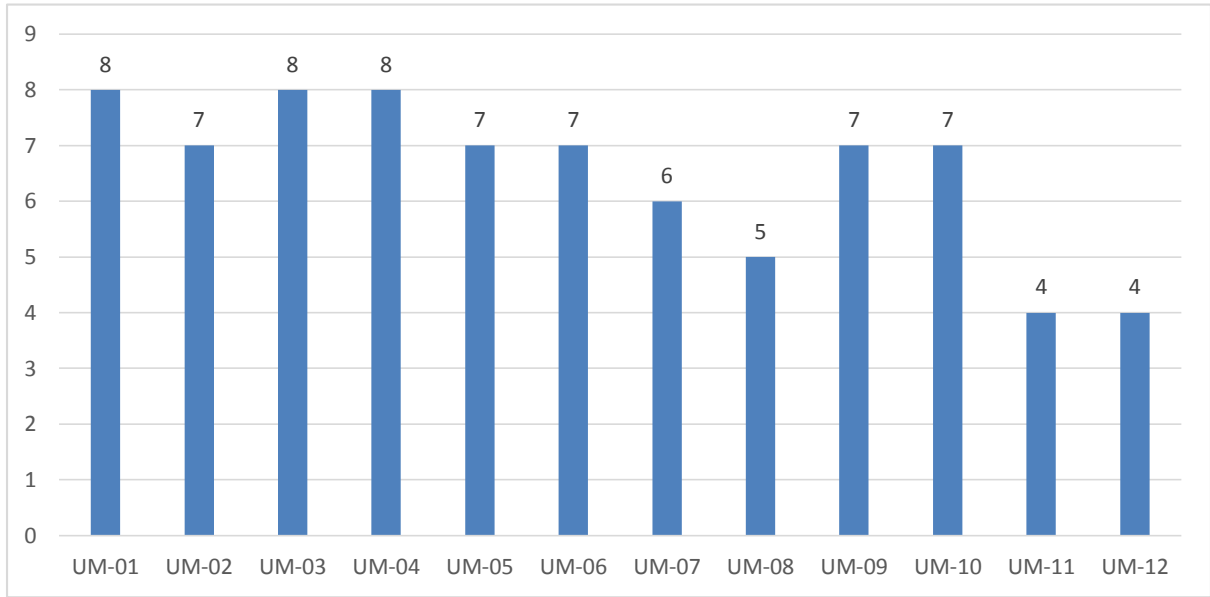
Fuente: Elaboración propia

4.1.2.4. Frecuencia de fallas en unidades de muestra

En el siguiente cuadro mostramos el número de fallas por unidades de muestra, debemos tener en consideración que tenemos un total de 78 fallas y de 12 unidades de muestra.

Figura 62

Cantidad de fallas por unidad de muestra

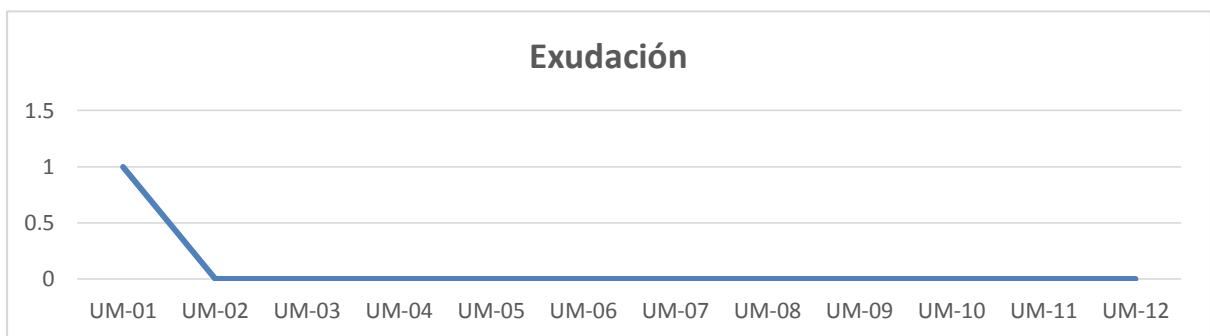
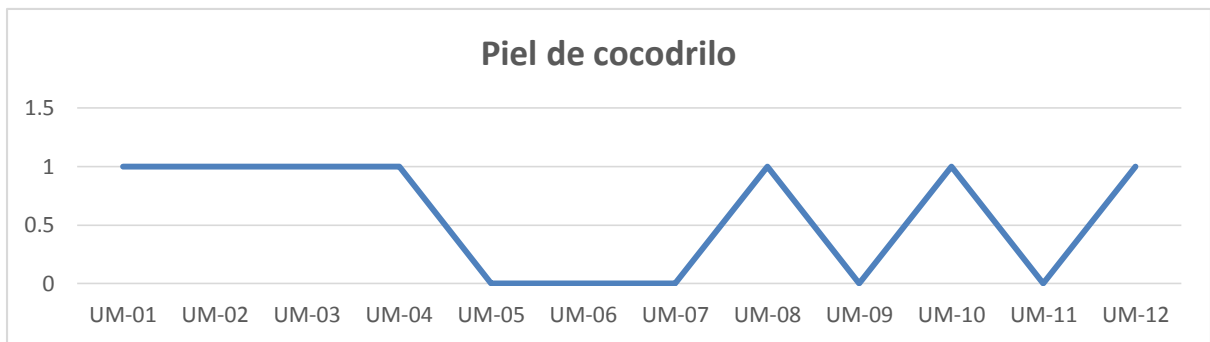


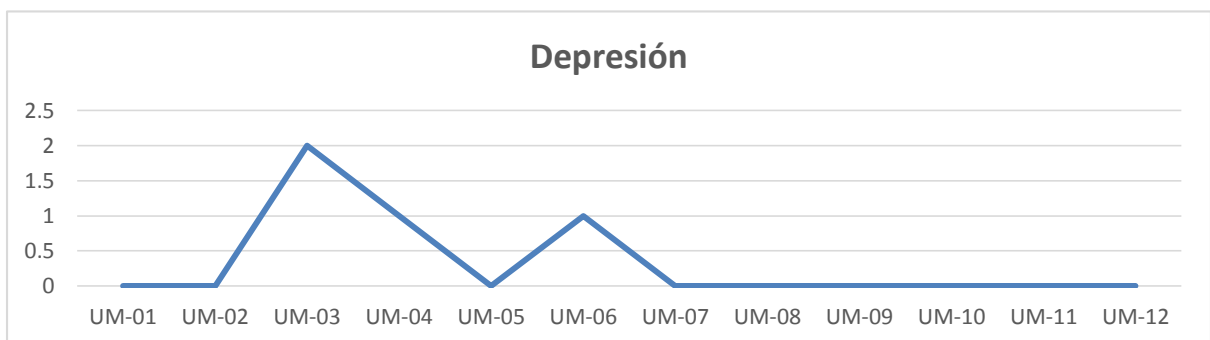
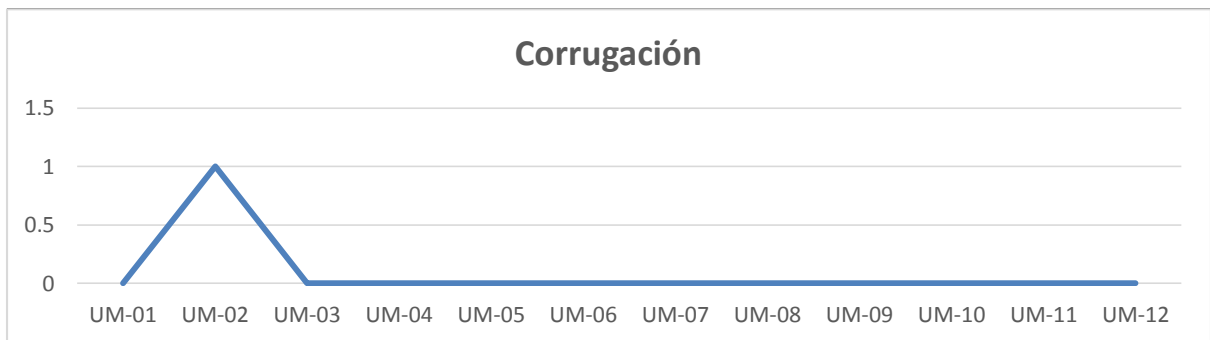
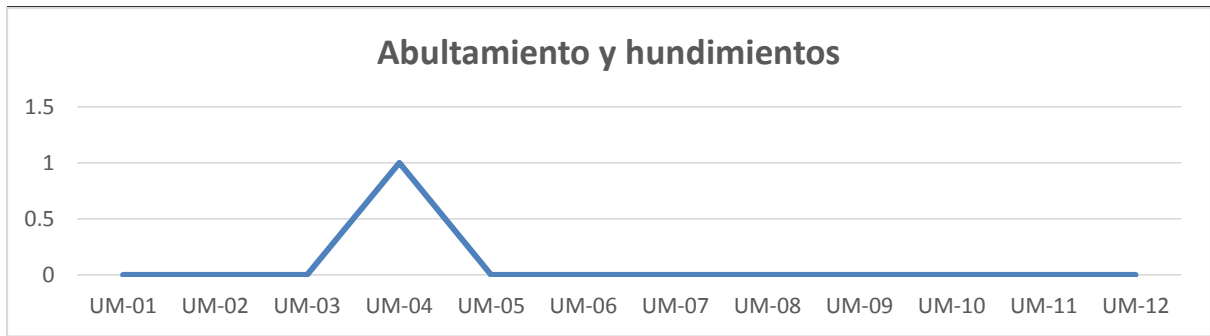
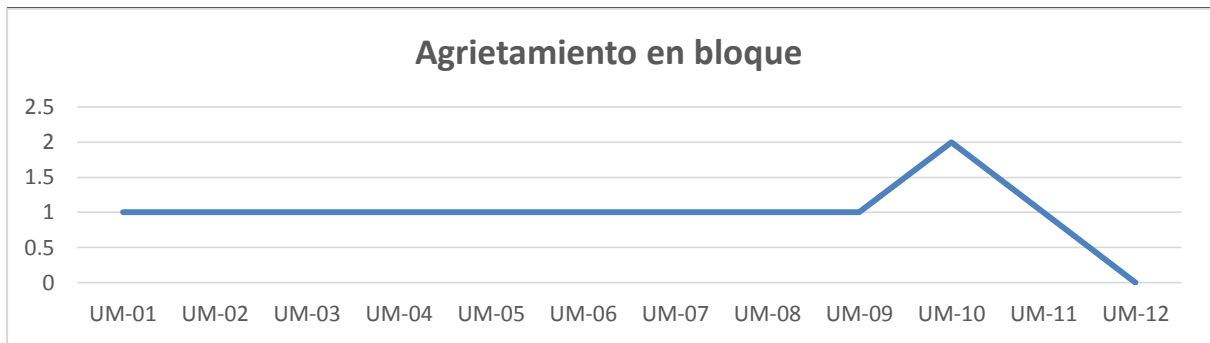
Fuente: Elaboración propia

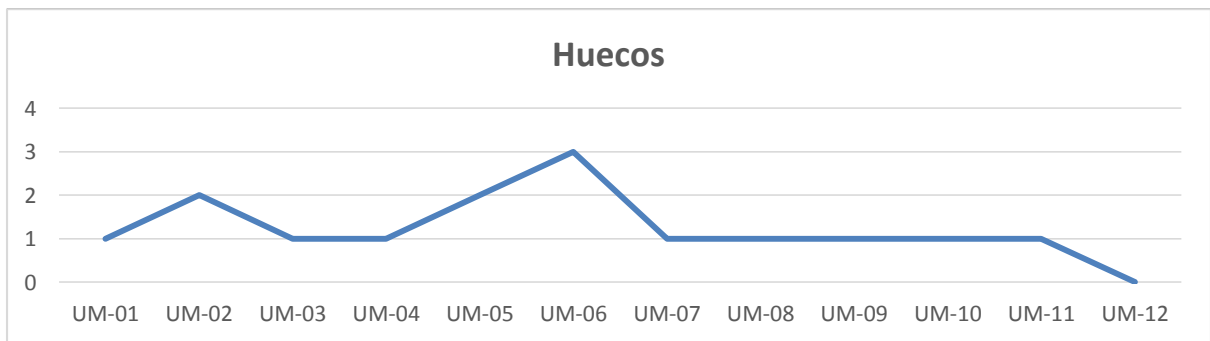
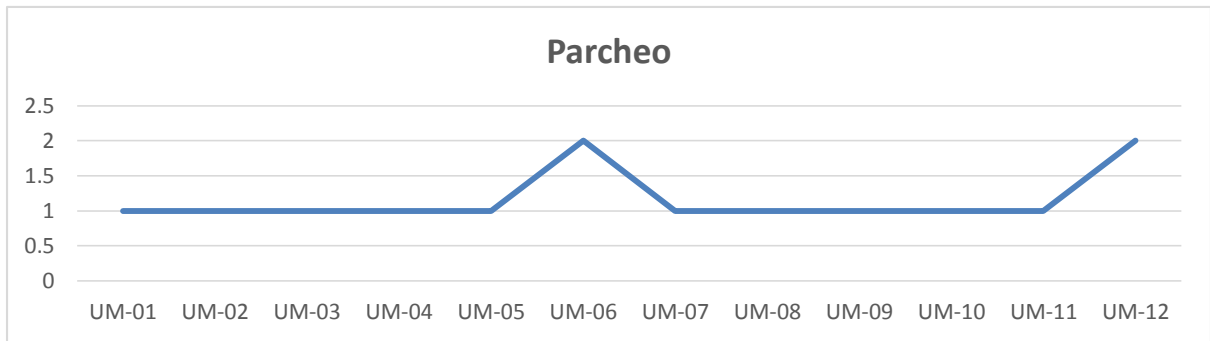
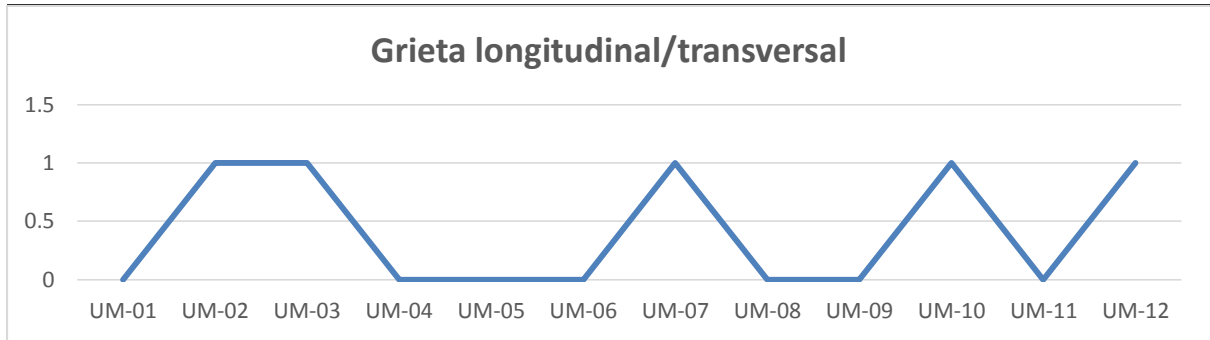
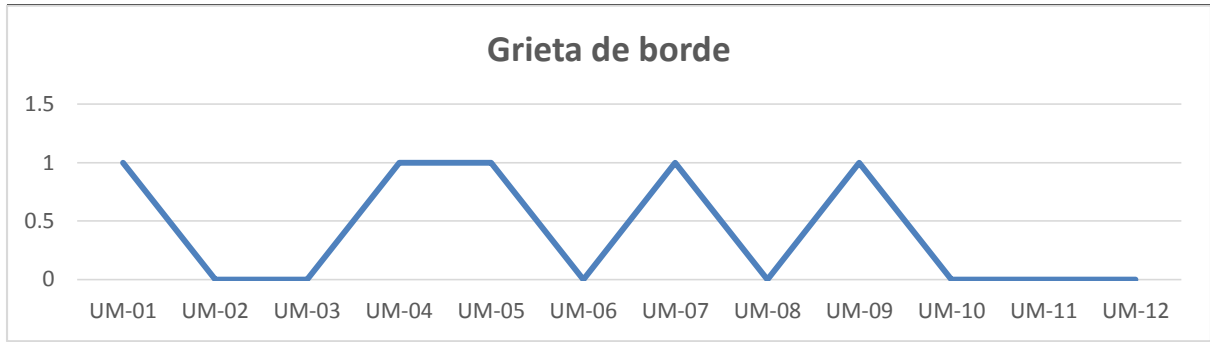
Ahora mostraremos en los siguientes gráficos la recurrencia de fallas por unidad de muestra:

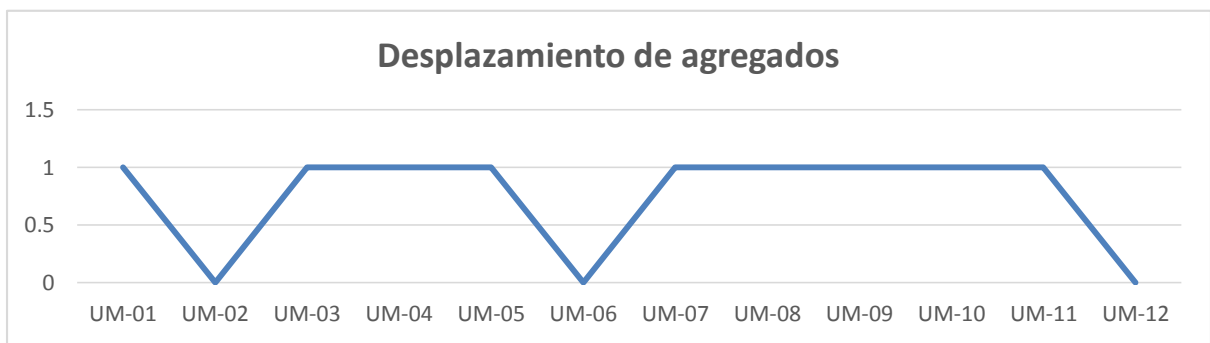
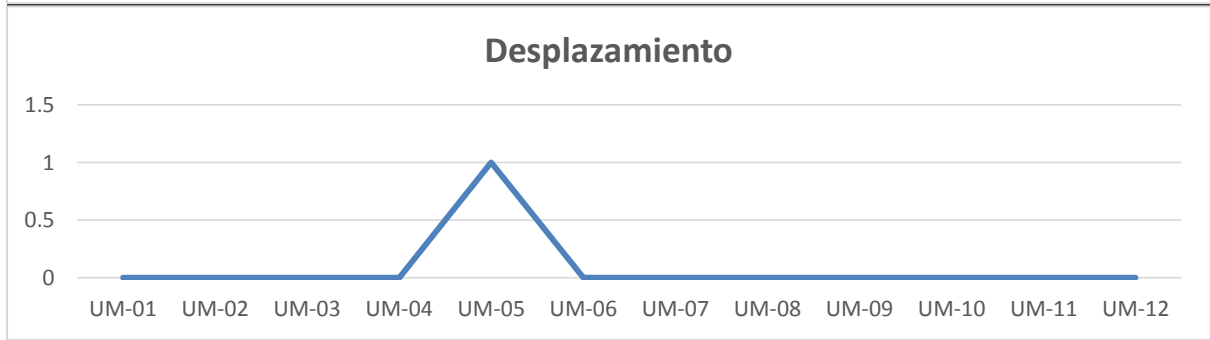
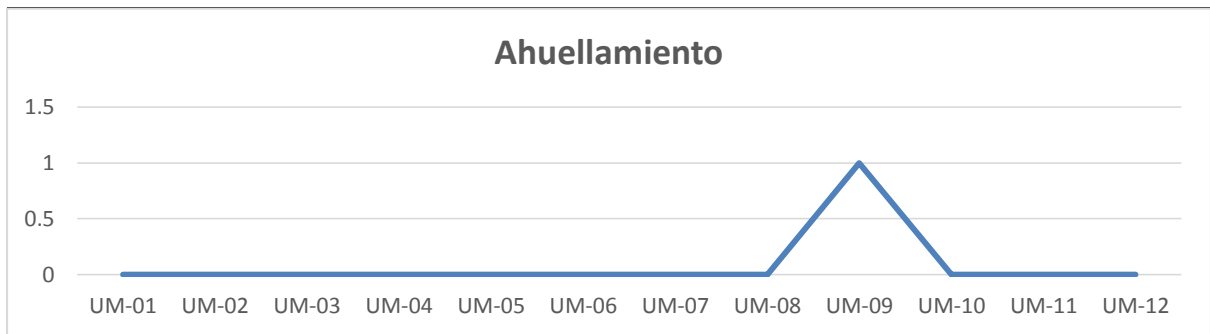
Figura 63

Recurrencia de fallas por unidad de muestra









Fuente: Elaboración propia

4.2. Evaluación del índice PCI

4.2.1. Evaluación PCI convencional

4.2.1.1. Valor del PCI por Unidad de Muestra

En el siguiente cuadro resumen presentamos los índices PCI obtenidos por cada unidad de muestra. Estos índices fueron obtenidos con el procedimiento descrito en la sección 3.4.4.1.

Análisis de datos del método de PCI.

Con el índice obtenido finalmente tenemos una condición del pavimento flexible:

Tabla 38
Condición de pavimento por unidad de muestra

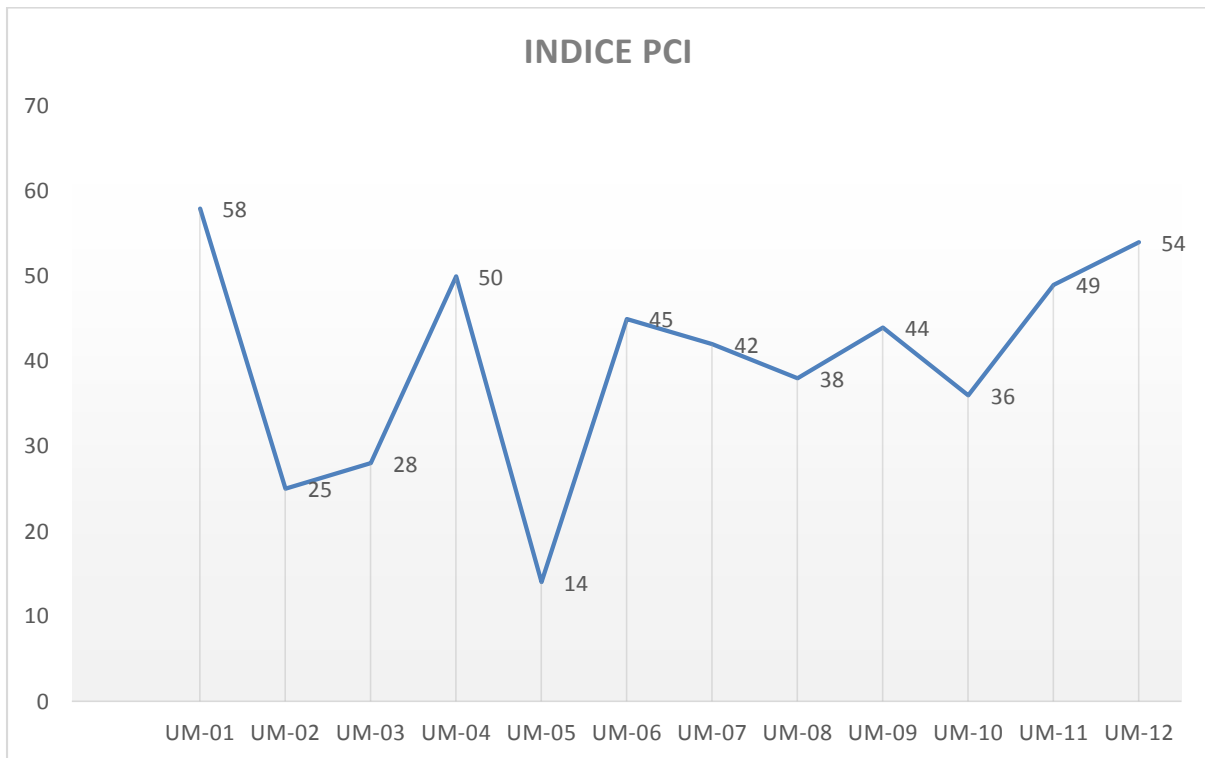
Unidad de muestra	Progresiva		Índice PCI	Condición
	Inicio	Fin		
UM-01	00+00	00+38	58	Bueno
UM-02	00+76	00+114	25	Malo
UM-03	00+152	00+190	28	Malo
UM-04	00+228	00+266	50	Regular
UM-05	00+304	00+342	14	Muy Malo
UM-06	00+380	00+418	45	Regular
UM-07	00+456	00+494	42	Regular
UM-08	00+532	00+570	38	Malo
UM-09	00+608	00+646	44	Regular
UM-10	00+684	00+722	36	Malo
UM-11	00+760	00+798	49	Regular
UM-12	00+836	00+874	54	Regular

Fuente: Elaboración propia

Para una mejor lustración sobre la tendencia que toma el valor del índice del PCI, presentamos la siguiente figura donde también se muestra los índices PCI distribuidos en las unidades de muestra.

Figura 64

Índice PCI por unidad de muestra



Fuente: Elaboración propia

4.2.1.2. Valor del PCI de la sección

Con los valores obtenidos de índice de PCI por unidad de muestra, se hace un promedio ponderado para poder obtener un índice PCI de toda la sección en estudio, aplicando la Ecuación 7.

Ecuación 7: PCI de la sección del pavimento

$$PCI_S = \frac{[(N - A) \times PCI_R] + (A \times PCI_A)}{N}$$

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.

Se obtiene el siguiente resultado:

Tabla 39

Valor PCI de la sección en estudio

Unidad de muestra	Valor de muestra	Índice PCI de sección	Condición
UM-01	58		
UM-02	25		
UM-03	28		
UM-04	50		
UM-05	14		
UM-06	45	41	Regular
UM-07	42		
UM-08	38		
UM-09	44		
UM-10	36		
UM-11	49		
UM-12	54		

Fuente: Elaboración propia

De esa manera obtenemos que la av Tacna del distrito de San Miguel se encuentra en un estado **REGULAR** con lo cual se tomaran las medidas necesarias para su mantenimiento correctivo.

4.2.2. Evaluación PCI corregido

Con los datos obtenidos en el análisis de datos del PCI corregido con los dos procedimientos adicionales de termografía y resistividad de suelos, realizamos los mismos cálculos y

procedimientos descritos en la sección 3.4.4.1. *Análisis de datos del método de PCI* y se obtienen los siguientes resultados, los cuales podemos comparar con el PCI convencional.

4.2.2.1. Valor del PCI por Unidad de Muestra

Los nuevos valores de índice PCI muestran condiciones diferentes obtenidas en la sección

4.2.1. Esto será evaluado con más detalle en una comparativa de resultados.

Tabla 40

Condición corregida de pavimento por unidad de muestra

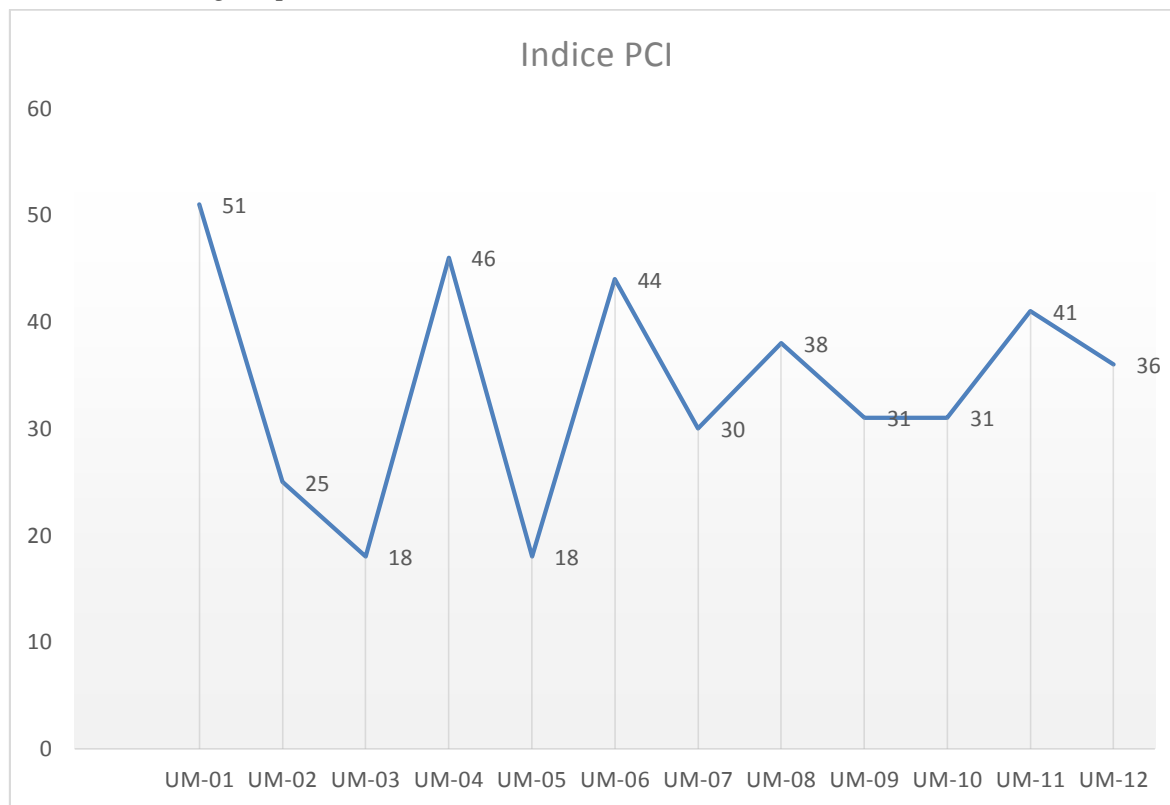
Unidad de muestra	Progresiva		Índice PCI	Condición
	Inicio	Fin		
UM-01	00+00	00+38	51	Regular
UM-02	00+76	00+114	25	Malo
UM-03	00+152	00+190	18	Muy malo
UM-04	00+228	00+266	46	Regular
UM-05	00+304	00+342	18	Muy malo
UM-06	00+380	00+418	44	Regular
UM-07	00+456	00+494	30	Malo
UM-08	00+532	00+570	38	Malo
UM-09	00+608	00+646	31	Malo
UM-10	00+684	00+722	31	Malo
UM-11	00+760	00+798	41	Regular
UM-12	00+836	00+874	36	Malo

Fuente: Elaboración propia

Para una mejor lustración sobre la tendencia que toma el valor del índice del PCI, presentamos la siguiente figura donde también se muestra los índices PCI distribuidos en las unidades de muestra.

Figura 65

Índice PCI corregido por unidad de muestra



Fuente: Elaboración propia

4.2.2.2. Valor del PCI de la sección

Con los nuevos valores de índice PCI por cada unidad de muestra se obtiene el índice ponderado de la sección en estudio:

Tabla 41

Valor PCI corregido de la sección en estudio

Unidad de muestra	Valor de muestra	Índice PCI de sección	Condición
UM-01	51		
UM-02	25		
UM-03	18		
UM-04	46		
UM-05	18	34	Malo
UM-06	44		
UM-07	30		
UM-08	38		
UM-09	31		

UM-10	31
UM-11	41
UM-12	36

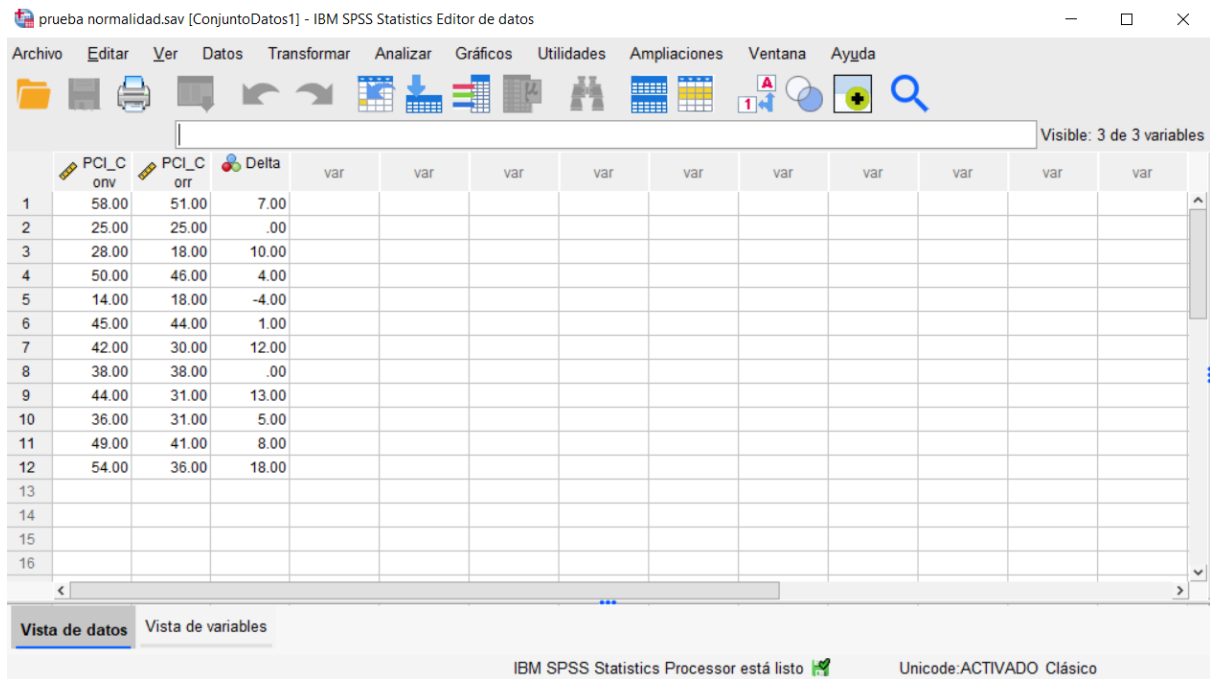
Fuente: Elaboración propia

4.3. Evaluación de confiabilidad de datos obtenidos

Para poder evaluar el nivel de confiabilidad de los datos obtenidos por medio del PCI convencional y del PCI corregido (termografía y resistividad), utilizaremos el software IBM SPSS Statistics. De este modo plantaremos las siguientes hipótesis (Cubas, 2021):

- Hipótesis Nula (H0): No existe diferencia relevante entre las medias de los datos obtenidos con el PCI convencional y el PCI corregido (termografía y resistividad) (Cubas, 2021).
- Hipótesis Alternativa (H1): Existe diferencia relevante entre las medias de los datos obtenidos con el PCI convencional y el PCI corregido (termografía y resistividad) (Cubas, 2021).
- Contemplamos un intervalo de confianza del 95% ($\alpha = 5\%=0.05$) (Hernández, Fernández, & Baptista, 2014).
- Planteamos un análisis paramétrico que indica que la variable dependiente tiene una distribución normal (Hernández, Fernández, & Baptista, 2014).
- Utilizaremos los resultados de los datos de ambos métodos para la prueba de normalidad.

Figura 66
Datos cargados en software SPSS



prueba normalidad.sav [ConjuntoDatos1] - IBM SPSS Statistics Editor de datos

Archivo Editar Ver Datos Transformar Analizar Gráficos Utilidades Ampliaciones Ventana Ayuda

Visible: 3 de 3 variables

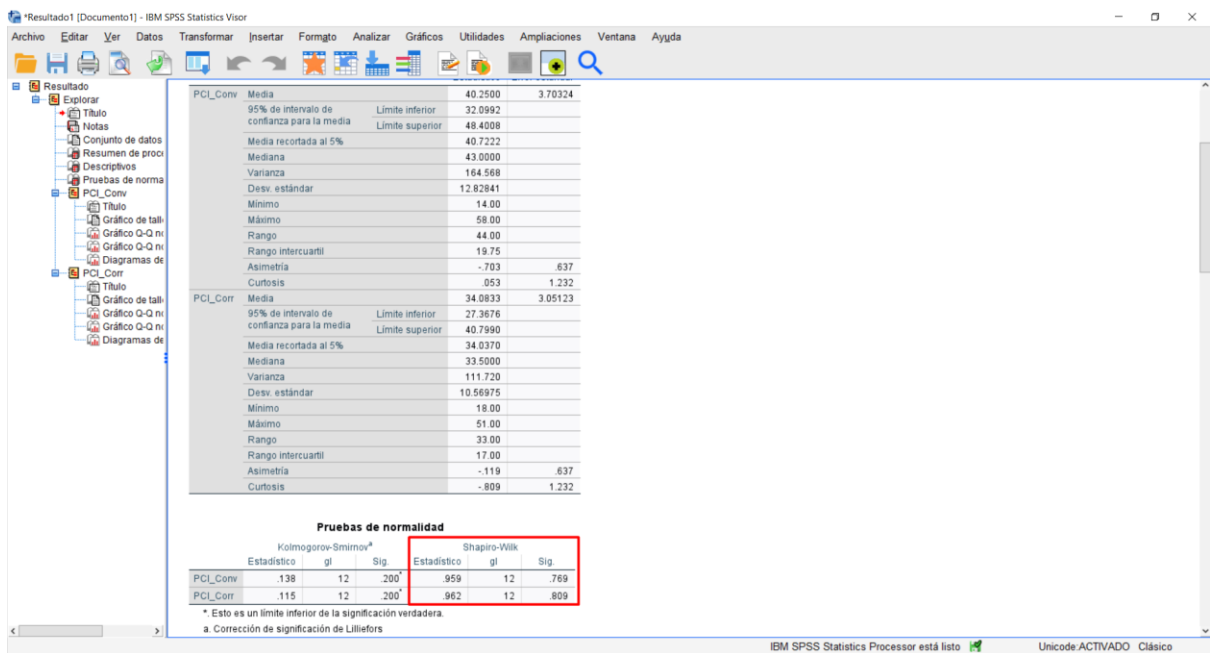
	PCL_C onv	PCL_C orr	Delta	var	var	var	var	var	var	var	var	var	var
1	58.00	51.00	7.00										
2	25.00	25.00	.00										
3	28.00	18.00	10.00										
4	50.00	46.00	4.00										
5	14.00	18.00	-4.00										
6	45.00	44.00	1.00										
7	42.00	30.00	12.00										
8	38.00	38.00	.00										
9	44.00	31.00	13.00										
10	36.00	31.00	5.00										
11	49.00	41.00	8.00										
12	54.00	36.00	18.00										
13													
14													
15													
16													

Vista de datos Vista de variables

IBM SPSS Statistics Processor está listo Unicode:ACTIVADO Clásico

Fuente: Elaboración propia obtenida de IBM SPSS Statistics

Figura 67
Prueba de normalidad en software SPSS



*Resultado1 [Documento1] - IBM SPSS Statistics Visor

Archivo Editar Ver Datos Transformar Insertar Formato Analizar Gráficos Utilidades Ampliaciones Ventana Ayuda

PCL_Conv		Media	40.2500	3.70324
95% de intervalo de confianza para la media	Limite inferior	32.0992		
	Limite superior	48.4008		
Media recortada al 5%		40.7222		
Mediana		43.0000		
Varianza		164.568		
Dev. estándar		12.82841		
Mínimo		14.00		
Máximo		58.00		
Rango		44.00		
Rango intercuartil		19.75		
Asimetría		-.703	.637	
Curiosis		.053	1.232	
PCL_Corr		Media	34.0833	3.05123
95% de intervalo de confianza para la media	Limite inferior	27.3676		
	Limite superior	40.7990		
Media recortada al 5%		34.0370		
Mediana		33.5000		
Varianza		111.720		
Dev. estándar		10.56975		
Mínimo		18.00		
Máximo		51.00		
Rango		33.00		
Rango intercuartil		17.00		
Asimetría		-.119	.637	
Curiosis		-.809	1.232	

Pruebas de normalidad

	Kolmogorov-Smirnov ^a			Shapiro-Wilk		
	Estadístico	gl	Sig.	Estadístico	gl	Sig.
PCL_Conv	.138	12	.200 ^a	.959	12	.769
PCL_Corr	.115	12	.200 ^a	.962	12	.809

^a. Esto es un límite inferior de la significación verdadera.
a. Corrección de significación de Lilliefors

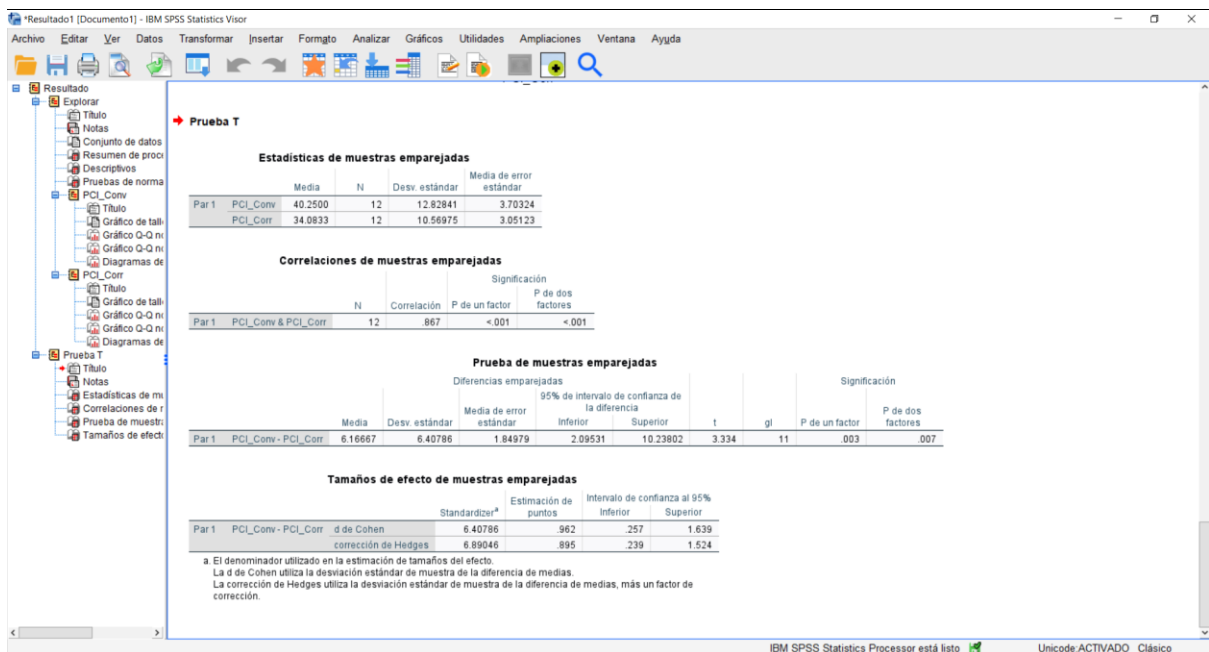
IBM SPSS Statistics Processor está listo Unicode:ACTIVADO Clásico

Fuente: Elaboración propia obtenida de IBM SPSS Statistics

Como la muestra analizada es menor a 30 datos, se utiliza el resultado de la prueba de Shapiro-Wilk. De esta prueba podemos observar que la variable dependiente (PCI convencional) tiene un $\alpha = 0.769 > \alpha = 0.05$ por lo que cumple la hipótesis H_0 que indica que las medias de ambos métodos no tienen una diferencia considerable y son confiables (Cubas, 2021).

Por último, se realiza el análisis paramétrico con la prueba t.

Figura 68
Prueba t en software SPSS



Fuente: Elaboración propia obtenida de IBM SPSS Statistics

CAPÍTULO V. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

5.1. Comparación de resultados

Realizado ambos procedimientos del PCI, el convencional y el corregido, podemos realizar las siguientes comparativas:

En la tabla a continuación mostrada observamos la variación de los índices PCI en las unidades de muestra:

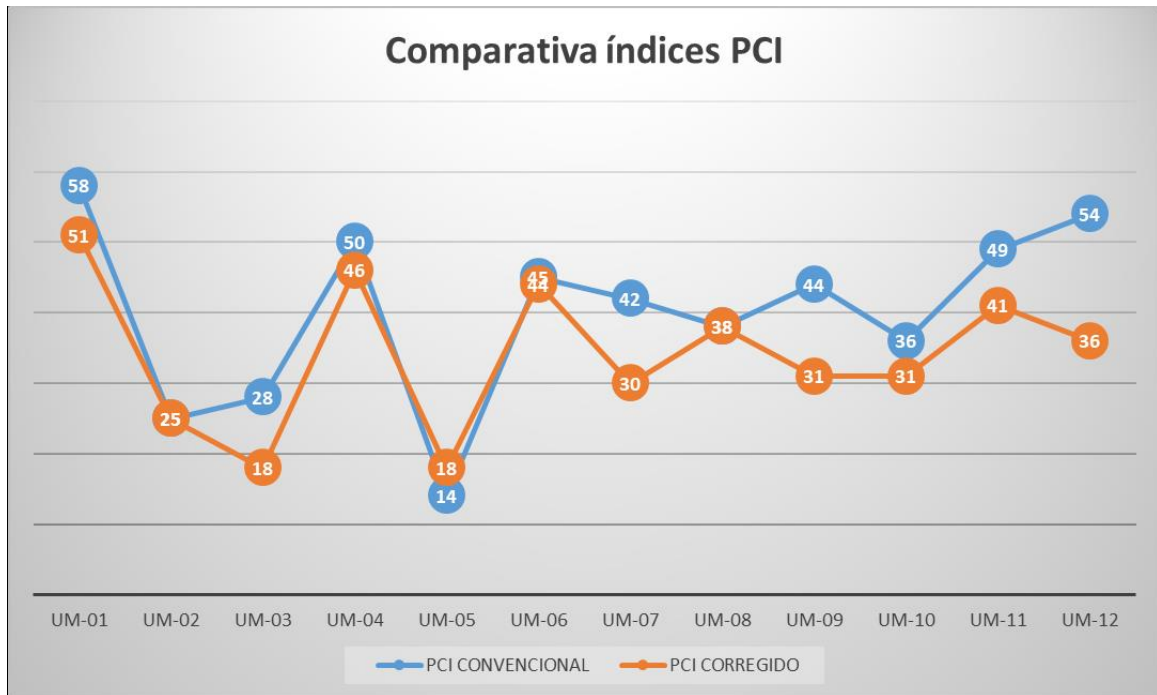
Tabla 42
Comparación índices PCI de la sección en estudio

Unidad de muestra	Progresivas		PCI convencional		PCI corregido	
	Inicio	Fin	Índice PCI	Condición	Índice PCI	Condición
UM-01	00+00	00+38	58	Bueno	51	Regular
UM-02	00+76	00+114	25	Malo	25	Malo
UM-03	00+152	00+190	28	Malo	18	Muy malo
UM-04	00+228	00+266	50	Regular	46	Regular
UM-05	00+304	00+342	14	Muy Malo	18	Muy malo
UM-06	00+380	00+418	45	Regular	44	Regular
UM-07	00+456	00+494	42	Regular	30	Malo
UM-08	00+532	00+570	38	Malo	38	Malo
UM-09	00+608	00+646	44	Regular	31	Malo
UM-10	00+684	00+722	36	Malo	31	Malo
UM-11	00+760	00+798	49	Regular	41	Regular
UM-12	00+836	00+874	54	Regular	36	Malo

Fuente: Elaboración propia

Para tener una idea gráfica de la variación de los índices tenemos la siguiente grafica donde se puede observar que la termografía y la resistividad de suelos brindaron datos adicionales que hicieron que el PCI bajara.

Figura 69
 Comparativa índices PCI



Fuente: Elaboración propia

Finalmente podemos observar la comparativa del ponderado de índices PCI de la sección en estudio donde observamos que con los datos adicionales se logra un resultado más preciso, pasando de un pavimento de condición **REGULAR** a un pavimento de condición **MALO**.

Tabla 43
Comparación índices PCI de la sección en estudio

Unidad de muestra	PCI convencional			PCI corregido		
	Índice PCI muestra	Índice PCI sección	Condición	Índice PCI muestra	Índice PCI sección	Condición
UM-01	58			51		
UM-02	25			25		
UM-03	28			18		
UM-04	50			46		
UM-05	14			18		
UM-06	45	41	Regular	44	34	Malo
UM-07	42			30		
UM-08	38			38		
UM-09	44			31		
UM-10	36			31		
UM-11	49			41		
UM-12	54			36		

Fuente: Elaboración propia

Con este último cuadro podemos dar respuesta a la pregunta principal de esta tesis y comprobar las hipótesis planteadas.

Los ensayos de termografía y resistividad eléctrica de suelos ayudan a obtener un valor más preciso del índice del PCI.

Observamos esto en las unidades de muestra como en el índice ponderado de toda la sección en estudio donde se obtienen valores más ajustados a la falla real.

El diferencial de temperatura, detectado con la termografía, en la superficie del pavimento flexible indica presencia de fallas.

Pudimos comprobar esto al detectar 11 fallas con un grado de severidad mayor y 8 fallas no detectables a simple vista (ver Tabla 22 Fallas nuevas detectadas por termografía).

La resistividad eléctrica está relacionada con el índice PCI obtenido del pavimento flexible.

Encontramos una relación entre las fallas detectadas con PCI y termografía y la resistividad de suelo medida con un telurómetro, que se ajusta a las medidas de resistividad planteadas en la teoría.

5.2. Discusión

Podemos ver que el PCI es un índice numérico que va desde cero hasta cien, en este estudio se tiene un PCI convencional de 41 y un PCI mejorado de 34, lo que significa que tiene un nivel regular y malo, y esto implica que se debe programar un mantenimiento correctivo en las zonas deterioradas y establecer una rutina de mantenimiento para prevenir las fallas encontradas y garantizar de esta manera la operatividad de la vía.

Las fisuras encontradas en su mayoría son fallas estructurales producto de la humedad del terreno y las cargas excesivas a las que se encuentra expuesta el pavimento flexible.

En cuanto a las limitaciones encontradas tenemos el alto tránsito para la toma de datos de un PCI convencional lo que nos tomó 18 horas de 2 personas, versus la toma termografía que nos tomó 3 horas con 2 personas y la resistividad del terreno que nos tomó otras 4 horas con 2 personas.

Con el método de PCI convencional se encontraron en total 70 fallas, mientras que con la termografía y resistividad se encontraron 78 fallas de las cuales 11 cambiaron de condición en la severidad, por lo que este método de ensayo nos da una mejor precisión de las condiciones en que se encuentra una falla, hasta nos da información de la posible causa que originan dicha falla.

Al evaluar la confiabilidad utilizando el software SPSS, en la prueba t se obtuvo que p-valor = 0.69 el cual es mucho mayor que $\alpha = 0.05$, por lo que se afirma que tenemos un 95% de confiabilidad lo que nos demuestra que el método empleado con termografía y resistividad es un procedimiento confiable.

En base a los resultados, se acepta la hipótesis general en donde la termografía y resistividad nos ayuda a mejorar la precisión de un método de PCI convencional, de igual manera se acepta las hipótesis secundarias en donde los métodos de termografía el diferencial de temperatura está relacionada con falla y la medida de resistividad que nos indica las condiciones en que se encuentra el pavimento está relacionado con el índice de PCI.

5.3. Conclusiones

- La aplicación de la termografía infrarroja en la detección de daños en pavimentos flexibles es positiva, este método se puede considerar como un método de inspección no destructivo, pudiendo detectar anomalías no visibles, indicando el sector afectado hasta la magnitud del daño, su ventaja además es que es capaz de analizarse grandes áreas en pequeños intervalos de tiempo, el rango de horario óptimo para una inspección se recomienda de 10.00 am a 4:00 pm.
- Se ha determinado que mediante el uso de ensayos no destructivos como la termografía y resistividad nos permite en forma más práctica y eficiente poder evaluar y determinar el grado de severidad de los diversos tipos de fallas para implementar las acciones a ejecutar en un determinado pavimento, con el fin de definir los límites de las áreas a reparar y así poder garantizar una buena vida útil.

- Se encuentra una relación significativa entre el diferencial de temperatura y la falla presente en el pavimento, así como una baja resistividad en los sectores en donde se encuentra un deterioro del pavimento.
- De los 12 tramos de pavimento flexible evaluados por el método PCI y PCI mejorado en la Av. Tacna del distrito de San Miguel, para conocer su estado superficial empleando la metodología PCI presenta una calificación de 40.25 con una clasificación de regular, mientras que utilizando ensayos no destructivos obtuvimos un PCI de 34.1 con una clasificación de malo.
- Se comparó los resultados obtenidos en el Método PCI in situ con el índice del PCI obtenidos usando ensayos de termografía y resistividad, en ambas evaluaciones los índices de PCI son similares. Se evaluó la confiabilidad de los resultados obtenidos con termografía y resistividad a los resultados convencionales, usando el software SPSS con lo que se logró obtenerse un p-valor mayor a α , lo que representa que no existe diferencia relevante entre las dos evaluaciones. Se confirma que usar termografía y resistividad es confiable para determinar el Índice de Condición del Pavimento.
- Las fallas más influyentes y representativas en la Av. Tacna del distrito de San Miguel que afectan la calidad del tránsito del pavimento flexible son los huecos con un 20%, seguido del parcheo y acometidas de servicio con un 20%, esto debido a la mala planificación y coordinación entre municipio y las empresas prestadoras de servicios. Los parcheo, huecos, agrietamiento en bloques, desprendimiento de agregados y las

grietas piel de cocodrilo son las que más afectan a este pavimento representando el 79% de fallas.

5.4. Recomendaciones

- Se recomienda realizar los PCI mejorados, apoyándose de técnicas como la termografía y resistividad de suelos con la finalidad de establecer planes de conservación y mantenimiento de vías y así proponer planes de rehabilitación y mantenimiento adecuados.
- Recomendamos profundizar investigación de ensayos no destructivos similares, con el fin de determinar un PCI mejorado y así implementar técnicas sumamente adecuadas que garanticen la vida útil del pavimento.
- Se recomienda promover el uso de métodos no destructivos en las entidades públicas y privadas, que se utilice de manera continua en el monitoreo de los pavimentos en el transcurso de su puesta de operación para poder realizar el seguimiento de su comportamiento a través del tiempo.
- Se recomienda analizar las causas de las fallas antes de realizar cualquier reparación, para aplicar el método de reparación que pueda garantizar que dicha reparación perdure en el tiempo.
- Se ha calificado el pavimento en estudio como un pavimento en mal estado, se recomienda una reconstrucción total del pavimento previo tratamiento de suelos y

reforzamiento estructural para garantizar la vida útil de dicho pavimento, debido al uso que se está dando, las condiciones medioambientales, las infiltraciones de los servicios y de los jardines aledaños estén afectando estructuralmente dicho pavimento.

- Se recomienda que una vez reconstruido el pavimento se realice un mantenimiento periódico y un monitoreo continuo con PCI mejorado que se ha planteado, lo cual servirá para una temprana identificación de las principales necesidades de los diferentes niveles de intervención.
- Se deben tomar medidas correctivas en pavimentos con jardines adyacentes que están generando presencia de humedad en el pavimento y realizar un análisis profundo de las causas que originan dichas fallas.
- Tener presente el tipo de servicio que presentara dicho pavimento, ya que los materiales y los procesos constructivos deben tener un buen control de calidad.
- Es importante contar con una buena gestión de conservación vial, el cual debe estar en continuo monitoreo de fallas y su inmediata reparación de tal forma de evitar perjudicar las condiciones de operación de la vía.

REFERENCIAS

- Araujo, S., Cárdenas, C. (2016). *Análisis de fisuras y grietas en pavimentos rígidos mediante resistividad eléctrica*. Universidad de Cuenca, Cuenca, Colombia.
- Armijos, C. R. (2009). *Evaluación superficial de algunas calles de la ciudad de Loja*. Universidad Técnica Particular de Loja. Loja, Ecuador.
- ASTM D6433. (2018). *Standard Practice for Roads and Parking. Lots Pavement Condition Index Surveys*.
- Bagavathiappan, S., Lahiri, B., Saravanan, T., Philip, J. (2013), *Infrared thermography for condition monitoring - A review*. Infrared Physics & Technology. 60(1):35-55. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.infrared.2013.03.006>
- Cengel, Y. (2003). *“Heat Transfer, a practical approach”*. McGraw-Hill, Segunda Edición, p.932.
- Conza Ccopa, D. G. (2016). *Evaluación de las fallas de la carpeta asfáltica mediante el método PCI en la Av. Circunvalación Oeste de Juliaca*. Universidad Peruana Unión.
- Cruz, W., Quispilaya, R. (2018). *Propuesta del método no convencional Wenner de Resistividad Eléctrica para caracterización de suelos en Institución Educativa Libertador San Martín – Recuay 2018*. Universidad Privada del Norte, Lima, Perú.

Cubas, J. (2021). *Uso de un dron para optimizar la evaluación superficial del pavimento flexible por el método PCI en la av. Los Conquistadores, distrito de San Isidro, Lima – 2021*. Universidad Privada del Norte, Lima, Perú.

Empresas Públicas de Medellín. (2008). *Normas Técnicas medida de resistividad eléctrica del suelo RA6-014*, Área Ingeniería Distribución, Medellín, Colombia

Linares, T. (2016). *Resistividad del suelo*. Instituto Universitario Politécnico Santiago Mariño, Maturín, Venezuela.

López, H. C., López, H. R. (2014). *Determinación y evaluación de las patologías en el concreto de pavimentos rígidos, Distrito San Juan Bautista Provincia de Huamanga - Ayacucho*. Universidad Nacional de Huancavelica, Huancavelica, Perú.

Menéndez, R. (2003). *Mantenimiento rutinario de caminos con microempresas – Manual técnico*. Oficina Internacional del Trabajo, Oficina Subregional para los Países Andinos. Lima, Perú.

Ministerio de Economía y Finanzas. (2015). *Pautas metodológicas para el desarrollo de alternativas de pavimentos en la formulación y evaluación social de proyectos de inversión pública de carreteras*, Dirección General de Inversión Pública-DGIP, Lima, Perú.

Montejo, A. (2002). *Ingeniería de pavimentos*. Colombia: Panamericana Formas e Impresos S.A.

Pacara-Copa, M., Rocha, J. H. A., Ledezma-Pérez, J. S. (2020), “*Análisis de la variabilidad horaria para la detección de daños en pavimentos flexibles usando termografía infrarroja*”, Revista ALCONPAT, 10 (3), pp. 350 – 363, DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v10i3.468>

Paucar, C. (2019). *Evaluación de pavimentos flexibles y rígidos aplicando las metodologías de inspección visual de zonas y rutas en riesgo e índice de condición del pavimento para el mantenimiento vial*, caso de la Av. Floral y Jr. Carabaya, Puno. Universidad Nacional del Altiplano, Puno, Perú.

Rocha, J., Póvoas, Y., Silva, M., Monteiro, E. (2017). *Análise da Profundidade de Fissuras em Concreto com Termografia Infravermelha*. Revista de Engenharia e Pesquisa Aplicada, 2(3): 58-65. Doi: <https://doi.org/10.25286/repa.v2i3.688>

Rodríguez, E. D. (2009). *Cálculo del índice de condición del pavimento flexible en la Av. Luis Montero, distrito de Castilla*. Universidad de Piura, 167.

Rodríguez, M. C. & Rodríguez, M. J. (2004). *Evaluación y rehabilitación de pavimentos flexibles por el método del reciclaje*. Universidad de El Salvador, San Salvador, El Salvador.

Rodríguez, P., Tacza, H. (2018). *Evaluación de fallas mediante el método PCI y planteamiento de alternativas de intervención para mejorar la condición operacional del pavimento*

flexible en el carril segregado del corredor Javier Prado. Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas, Lima, Perú.

Torres, R. (2007). *Análisis comparativo de costos entre el pavimento flexible y pavimento rígido.* Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala.

Valeriano, J. (2000). *Degradación en los pavimentos revestidos con asfalto en Lima y Callao, Alternativas de solución para su mantenimiento y rehabilitación.* Universidad Nacional de Ingeniería, Lima, Perú.

Vásquez, L. (2002). *Pavement Condition Index (PCI) para pavimentos asfálticos y de concreto en carreteras.* Recuperado de <https://sjnavarro.files.wordpress.com/2008/08/manual-pci1.pdf>

ANEXOS

- **Anexo 1:** Curva de valor deducido
- **Anexo 2:** Registro PCI convencional
- **Anexo 3:** Registro PCI corregido
- **Anexo 4:** Características de la cámara infrarroja Fluke TiS45
- **Anexo 5:** Características del telurómetro digital de Cuatro Terminales MTD 20KWe