



UNIVERSIDAD DE
COSTA RICA



LABORATORIO NACIONAL
DE MATERIALES Y MODELOS ESTRUCTURALES

Programa de Infraestructura del Transporte (PITRA)

Proyecto: LM-PI-UIIT-114-P

MONITOREO DEL DESEMPEÑO DE PAVIMENTOS A LARGO PLAZO EN COSTA RICA (DPLP-CR)

Preparado por:

Unidad de Investigación en Infraestructura y Transporte

San José, Costa Rica
Mayo, 2020

Documento generado con base en el Art. 6, inciso g) de la Ley 8114 y lo señalado en el Cap. IV, Art. 66 Reglamento al Art. 6 de la precitada ley, publicado mediante decreto DE-37016-MOPT.



Informe LM-PI-UIIT-114-P		Copia No. 1
Título y subtítulo: MONITOREO DEL DESEMPEÑO DE PAVIMENTOS A LARGO PLAZO EN COSTA RICA (DPLP-CR)		Fecha del Informe Mayo, 2020
Organización y dirección Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales (LanammeUCR) Universidad de Costa Rica, Ciudad Universitaria Rodrigo Facio San Pedro de Montes de Oca, Costa Rica Teléfono central: (506) 2511-2500 / Fax central: (506) 2511-4440		
Resumen <i>Actualmente en el país no existe un seguimiento del desempeño de los pavimentos en las carreteras a nivel de proyecto. El proyecto de Monitoreo del Desempeño de Pavimentos a Largo Plazo en Costa Rica tiene como objetivo principal generar una base de datos robusta que permita dar un seguimiento basado en aspectos técnicos de pavimentos a lo largo del tiempo y, un análisis integral del desempeño de este.</i> <i>Para el desarrollo del proyecto se seleccionaron distintos tramos de control a lo largo del país en lugares que permitan tener variedad en cuanto a las condiciones climáticas y condiciones de servicio, es decir la cantidad y el tipo de tránsito a las que se encuentran expuestas las estructuras de pavimento, diferentes elevaciones y regímenes de humedad y tipos de estructuras, tanto en pavimentos rígidos como flexibles.</i> <i>Los resultados del proyecto dependerán en gran medida del seguimiento que se le pueda dar en aras de lograr los objetivos perseguidos, pues para tener una base de datos más robusta es necesaria la continuidad que se le brinde a este. La base de datos permitirá realizar análisis de comportamiento y la creación de curvas de deterioro. Adicionalmente, los resultados del proyecto pueden ser comparados con resultados obtenidos por medio de ensayos acelerados, lo que ayudaría en gran medida a mejorar los futuros diseños que se realicen para estructuras de pavimento en vías nacionales y cantonales.</i>		
Palabras clave: Desempeño de pavimentos, pruebas de desempeño, largo plazo		Nivel de seguridad: Ninguno
Preparado por: Ing. Eliécer Arias Barrantes. Unidad de Investigación en Infraestructura y Transporte, PITRA		
Fecha: 12 / 05 / 20		
Revisado por: Ing. José Pablo Aguiar Moya, PhD. Unidad de Investigación en Infraestructura y Transporte, PITRA		Aprobado por: Ing. Ana Luisa Elizondo Coordinadora Programa de Infraestructura del Transporte
Fecha: 12 / 05 / 20		Fecha: 12 / 05 / 20



TABLA DE CONTENIDO

1 INTRODUCCIÓN.....7
1.1 CONTEXTO EN COSTA RICA7
1.2 OBJETIVO GENERAL.....8
1.2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS8
1.3 ANTECEDENTES8
1.4 JUSTIFICACIÓN9
2 MARCO TEÓRICO10
2.1 GENERALIDADES.....10
2.2 DETERIOROS SUPERFICIALES10
2.3 VARIACIÓN ESTACIONAL DE MÓDULOS10
2.4 PRUEBAS DE DESEMPEÑO.....12
2.4.1 FWD12
2.4.2 ÍNDICE DE REGULARIDAD INTERNACIONAL (IRI).....12
2.4.3 GRIP NUMBER13
2.4.4 PCI14
2.4.5 CURVAS DE DETERIORO14
2.4.6 MODELOS DE DESEMPEÑO.....15
3 METODOLOGÍA PROPUESTA18
3.1 INVESTIGACIÓN BIBLIOGRÁFICA18
3.2 RECOLECCIÓN DE INFORMACIÓN EXISTENTE.....18
3.3 SELECCIÓN DE SITIOS DE INTERÉS20
3.4 CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES22
3.5 ENSAYOS DE DESEMPEÑO25
3.5.1 PCI25
3.5.2 FWD26
3.5.3 IRI.....26
3.5.4 GRIP.....26
3.6 CLIMA26
3.7 GENERACIÓN DE BASE DE DATOS SOBRE DESEMPEÑO DE LOS TRAMOS SELECCIONADOS27
3.8 ANÁLISIS DE INFORMACIÓN PRELIMINAR27



UNIVERSIDAD DE
COSTA RICA



LABORATORIO NACIONAL
DE MATERIALES Y MODELOS ESTRUCTURALES

3.9	GENERACIÓN Y CALIBRACIÓN DE MODELOS LOCALES	27
3.10	ELABORACIÓN DE INFORMES	28
4	RESULTADOS Y PRODUCTOS ESPERADOS.....	29
5	CONFORMACIÓN DEL GRUPO DE INVESTIGACIÓN	30
6	CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES.....	31
7	RECURSOS NECESARIOS.....	35
8	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	36



ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1. ESTACIÓN CLIMÁTICA COMPACTA PROPIEDAD DEL LANAMMEUCR 11

FIGURA 2. DEFLECTOMETRÍA DE IMPACTO PARA MEDIR DEFORMACIONES EN EL PAVIMENTO 12

FIGURA 3. PERFILÓMETRO LÁSER PARA DETERMINAR EL PERFIL Y MACROTEXTURAS EN EL PAVIMENTO 13

FIGURA 4. GRIP TESTER PARA MEDIR LA RESISTENCIA AL DESLIZAMIENTO..... 14

FIGURA 5. CURVA DE DETERIORO DADA POR PCI..... 15

FIGURA 6. ESQUEMA METODOLÓGICO PARA MONITOREAR EL DESEMPEÑO DE PAVIMENTOS A LARGO PLAZO..... 19

FIGURA 7. MAPA CON UBICACIÓN DE LOS TRAMOS PROPUESTOS PARA EL PROYECTO 22

FIGURA 8. RANGO DE CALIFICACIONES PCI 25

FIGURA 9. CRONOGRAMA ESTIMADO 34



ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1. LISTA DE TRAMOS QUE FORMAN PARTE DEL PROYECTO DE LTTP..... 20

TABLA 2. ENSAYOS REQUERIDOS PARA LA EVALUACIÓN DE LA CARPETA ASFÁLTICA 23

TABLA 3. ENSAYOS REQUERIDOS PARA LA EVALUACIÓN DE LA BASE Y SUBBASE 24

TABLA 4. ENSAYOS REQUERIDOS PARA LA EVALUACIÓN DE LA SUBRASANTE 24

TABLA 5. PRODUCTOS ESPERADOS 29

TABLA 6. CONFORMACIÓN DEL GRUPO DE INVESTIGACIÓN..... 30

TABLA 7. ENSAYOS DE CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES..... 31

TABLA 8. ENSAYOS DE DESEMPEÑO (FWD, IRI, GRIP)..... 32

TABLA 9. GIRAS DE CAMPO PARA EVALUAR PCI DE LOS TRAMOS..... 33

TABLA 10. PROCESAMIENTO DE DATOS 33

TABLA 11. CREACIÓN SITIO WEB 33

TABLA 12. COSTOS ASOCIADOS A PROYECTO DEPLP-CR PRIMER AÑO 35

TABLA 13. COSTOS ASOCIADOS A PROYECTO DEPLP-CR AÑOS SIGUIENTES..... 35



1 INTRODUCCIÓN

1.1 Contexto en Costa Rica

Los programas de Desempeño de Pavimentos a Largo Plazo (LTPP, por sus siglas en inglés), desarrollados principalmente en Estados Unidos y Canadá, han estudiado el comportamiento de diferentes secciones de pavimento en el tiempo; abarcando más de 2500 secciones de prueba en pavimentos (flexibles y rígidos) (FHWA, 2017).

El programa de Desempeño de Pavimentos a Largo Plazo de Costa Rica (DPLP-CR) busca desarrollar un modelo similar al desarrollado exitosamente en los Estados Unidos y Canadá. El proyecto pretende profundizar en el análisis y conocimiento del comportamiento de los pavimentos construidos en Costa Rica, al darles un seguimiento a lo largo de los años. Para esto se busca abarcar la mayor cantidad de secciones de carretera y parámetros posibles y realizar un análisis con un alto nivel de detalle de los tramos seleccionados.

Dentro de los parámetros a analizar se incluyen: auscultación visual (ASTM D6433), tráfico vehicular de la zona, clima, espesores de las capas que componen la estructura de pavimento y la caracterización de sus materiales, así como ensayos de desempeño como: deflectometría de impacto (FWD), índice de regularidad (IRI), fricción por medio del *GRIP Number*. Sin embargo, para el caso de pavimentos nuevos que a futuro puedan ser incorporados al proyecto, dado que es a largo plazo, también se plantea la posibilidad de instalar instrumentación para el monitoreo de respuestas en sitio (temperatura del pavimento, deformaciones unitarias, presión estática).

Dichas secciones se clasifican dentro de los estudios de tipo general, al ser pavimentos construidos sobre carreteras en servicio (diseñadas por la administración, MOPT) y con parámetros no controlados, por lo que podrían complementarse con datos de estudios específicos, como las secciones generadas en el laboratorio PaveLab y ensayadas con el HVS, siendo estas, tramos con parámetros controlados. También se evaluará conforme avance el proyecto, la posibilidad de recolectar información adicional e instrumentación de proyectos nuevos cuando esto fuera posible.



1.2 Objetivo General

Generar una base de datos de desempeño y comportamiento de pavimentos de Costa Rica en condiciones reales, a largo plazo.

1.2.1 Objetivos Específicos

Fase 1

- Seleccionar tramos de carretera con diferentes condiciones de clima, flujo vehicular y ubicación geográfica en el país.
- Caracterizar los diferentes materiales que conformar el paquete estructural en cada uno de los tramos seleccionados.
- Recopilar y analizar información climática básica asociada a los tramos seleccionados que permitan describir cada sitio.
- Generar un esquema de evaluación por desempeño que permita recopilar información de forma continua y periódica durante varios años.
- Generar un repositorio digital en línea con el objetivo de almacenar la información de los tramos de pavimento.

Fase 2

- Analizar la información recopilada para calibrar curvas de desempeño a fatiga generadas en el ensayo acelerado de pavimentos (HVS).
- Analizar la información recopilada para generar curvas de deterioro que puedan ser aplicadas a la gestión de pavimentos en Costa Rica.

1.3 Antecedentes

Actualmente en el país, los diseños de estructuras de pavimentos son realizados con base en manuales internacionales de diseño como el de la Secretaría de Integración Económica Centroamericana, SIECA, Manual SIECA, 2002 o de American Association of State Highway Transportation Official, AASHTO, Manual AASHTO 1993, esto ha generado que los pavimentos en Costa Rica no se comporten según lo esperado y puedan sufrir deterioros no deseados en momentos dados del proyecto, pues no consideran las condiciones propias del país. En el informe LM-PI-AT-121-2017 (Sequeira et al, 2017), se indica sobre la necesidad de contar con modelos de desempeño actualizados pues permitirían mejorar las

Informe LM-PI-UMP-114-P	Fecha de emisión: Mayo, 2020	Página 8 de 39
-------------------------	------------------------------	----------------



estimaciones y estandarizar procesos, además, se evidencia sobre la necesidad de contar con estudios en la materia que permitan modernizar estos procesos.

A pesar de que la condición estructural de los pavimentos en Costa Rica ha ido mejorando en los últimos años, se ha evidenciado la necesidad de crear un sistema de gestión de pavimentos que contribuya a mejorar las inversiones y sostener o mejorar la calidad de las vías en el país (Sanabria, 2019), por lo tanto, el uso y generación de herramientas adecuadas permitiría contribuir en este aspecto.

A lo largo de los últimos años el LanammeUCR ha avanzado en la generación de distintos proyectos de investigación (Ávila, 2017) que facilitan el progreso del proyecto de Monitoreo del Desempeño de Pavimentos a Largo Plazo, debido a que han generado información para incorporar en la base de datos. También se han desarrollado, de forma introductoria, algunos proyectos finales de graduación en la UCR sobre curvas de deterioro (Picado, 2016) que han sido de mucha utilidad para estudiar el tema.

1.4 Justificación

Como otras obras civiles, los pavimentos tienen un periodo de diseño y de vida útil determinado, sin embargo, a diferencia de otras estructuras, los pavimentos sufren deterioros acumulativos muy difíciles de predecir con modelos 100% mecánicos. Realizar un monitoreo continuo y periódico de la condición de las estructuras de pavimento permite entender su comportamiento para las condiciones que se presentan en el país y con ello, la posibilidad de mejorar los criterios de calidad y confiabilidad del diseño durante la vida útil de la obra. Es por este motivo que resulta necesario contar con dicha información y una base de datos de pavimentos sometidos a cargas y ciclos climáticos reales, dado que, puede brindar información valiosa del desempeño de los pavimentos para generar insumos necesarios para la ingeniería de pavimentos del país.



2 MARCO TEÓRICO

2.1 Generalidades

Los pavimentos tienen diferentes propiedades y características funcionales que ayudan a determinar el desempeño que podrían desarrollar. Entre las características que se monitorean para realizar esta ponderación se encuentran el registro de deterioros superficiales (PCI) así como, pruebas no destructivas entre las que se encuentran: la deflectometría de impacto (FWD), el Índice de Regularidad Internacional (IRI), la resistencia al deslizamiento (GRIP), entre otros.

2.2 Deterioros superficiales

La observación de los deterioros superficiales es una forma de evaluar las condiciones funcionales y estructurales de los pavimentos. Existen diferencias entre los deterioros que sufren los pavimentos rígidos y los flexibles debido a la naturaleza de su estructura y por lo tanto la ponderación de estos es diferente. Este tipo de mediciones son muy valiosas para calibrar curvas y modelos de deterioro.

Para la evaluación y ponderación de estos deterioros se utiliza el Manual de Auscultación Visual de Pavimentos de Costa Rica (MOPT, 2016) y la norma ASTM D6433 *Standard Practice for Roads and Parking Lots Pavement Condition Index Surveys* (ASTM, 2018), donde se explica con detalle, los tipos de deterioro, cómo medirlo y cómo afectan la estructura, así como, su posible origen. Adicionalmente, la información de grietas superficiales que se recolecta durante estas, mediciones puede emplearse para correlacionarse con los modelos de desempeño a fatiga generados mediante ensayos de laboratorio y ensayos acelerados.

2.3 Variación estacional de módulos

La variación estacional de módulos afecta las capacidades soportantes de todas las capas del pavimento debido a los cambios de temperatura, humedad y precipitación, depende directamente de las propiedades geotécnicas del suelo (Gutiérrez & Arce, 2005). La determinación de la variación de los factores meteorológicos que alteran las propiedades mecánicas de los materiales se puede realizar por medio de estaciones meteorológicas en algunos tramos seleccionados, las cuales son capaces de medir los cambios meteorológicos y transferir estos datos de manera automática. Lo más valioso de estas mediciones locales, es contar con equipos que puedan registrar variables climáticas y la vez capturar mediciones de



humedad en los suelos, para evaluar la relación que existe entre las variables y generar modelos que puedan ser utilizados en otros tramos (ver Figura 1).

Además, el Instituto Meteorológico Nacional (IMN) cuenta con muchas estaciones de monitoreo continuo que pueden aportar información muy valiosa al respecto. Por lo que dicha información, permite caracterizar cada sección de pavimentos.



Figura 1. Estación climática compacta propiedad del LanammeUCR



2.4 Pruebas de desempeño no destructivas

2.4.1 FWD

La deflectometría de impacto (FWD) es un ensayo que se realiza en las estructuras de pavimento para medir las deflexiones que presentan sus distintas capas. Es un método no destructivo que permite evaluar la capacidad estructural de un pavimento. Este ensayo permite determinar los módulos resilientes de los materiales que componen el paquete estructural del pavimento, debido a la fácil determinación de las deflexiones y a la carga conocida que aplica el equipo (Osano & Nyangau, 2018), cuando se cuenta con información detallada de espesores de las capas. En caso de no estar disponible esta información, la técnica también permite el cálculo de indicadores de capacidad para las distintas capas que eventualmente también pueden ser asociados a la capacidad estructural (Camacho, Puello & Laurent, 2018). En la Figura 2, se muestra una fotografía del equipo que se utiliza para realizar las mediciones en pavimentos sobre la red vial nacional de Costa Rica, por parte del LanammeUCR.



Figura 2. Deflectómetro de impacto para medir deformaciones en el pavimento

Fuente: LanammeUCR, 2019

2.4.2 Índice de Regularidad Internacional (IRI)

El IRI (Índice de Regularidad Internacional) es una prueba que mide la desviación de la superficie del pavimento con respecto a una superficie plana teórica. Según Badilla (2009):



“El IRI resume matemáticamente el perfil longitudinal de la superficie de camino en una huella, representando las vibraciones inducidas por la rugosidad del camino en un auto de pasajeros típico, está definido por el valor de referencia de la pendiente promedio rectificadas (RARS80, “Reference Average Rectified Slope”, razón entre el movimiento acumulado de la suspensión y la distancia recorrida) producto de la simulación del modelo de cuarto de carro, (RQCS, “Reference Quarter Car Simulation”), para una velocidad de desplazamiento de 80 km/h”. (p.3)

Esta prueba, si bien no se asocia directamente con parámetros estructurales para un momento dado, si presenta un grado de asociación importante. Además, es una medida directa de la calidad de la superficie de ruedo y por lo tanto un indicador valioso que marca la condición inicial y cómo podrían evolucionar los daños esperados en el pavimento (parámetro funcional). En la Figura 3 se muestra un ejemplo del equipo utilizado para realizare estas mediciones.



Figura 3. Perfilómetro Láser para determinar el perfil y macrotexturas en el pavimento

Fuente: LanammeUCR, 2019

2.4.3 GRIP Number

El GRIP es un ensayo que se realiza para medir la capacidad de agarre y adhesión según la fricción superficial que tienen los pavimentos con las ruedas de los vehículos (Rajaei, Dargazany, & Chatti, 2016). Este ensayo es de importancia ya que corresponde a un factor del que depende la seguridad del



funcionamiento de la carretera. El ensayo se realiza en condiciones reales y críticas, como lo es un pavimento mojado y un neumático liso, un ejemplo del equipo utilizado se muestra en la Figura 4.



Figura 4. GRIP Tester para medir la resistencia al deslizamiento

Fuente: LanammeUCR, 2019

2.4.4 PCI

El Índice de Condición del Pavimento (por siglas en inglés, PCI) es una metodología para evaluar pavimentos flexibles y rígidos. En la misma se debe realizar un levantamiento en campo de los deterioros superficiales que presentan los pavimentos, de estos y según la clase, severidad y cantidad de los daños el pavimento adquiere una calificación que según el rango en el que se encuentre se clasifica el estado de la estructura del pavimento, todo esto siguiendo los lineamientos que ya se comentaron en la sección 2.2.

2.5 Curvas de deterioro

Las curvas de deterioro son el resultado de un análisis estadístico del comportamiento del Índice de Condición del Pavimento medido a lo largo de los años (ver Figura 5). Estas curvas son de mucha importancia ya que permiten comprobar el estado del pavimento, dar un seguimiento a su comportamiento a lo largo del tiempo y además, realizar proyecciones a futuro de cómo evolucionará el estado del pavimento (Picado, 2016). Este tipo de predicción son insumos muy valiosos pues permite crear herramientas de gestión de pavimentos que utilicen conceptos relacionados con la optimización de las inversiones (Amador & Mrawira, 2009)

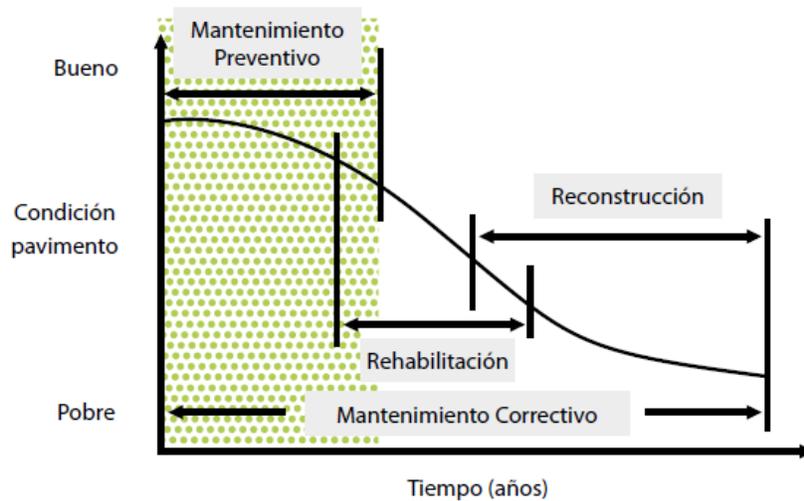


Figura 5. Curva de deterioro para PCI (IDOT, 2012)

2.6 Modelos de desempeño

Para la correcta modelación de las condiciones que presenta el pavimento en carretera, es necesario el uso de modelos de desempeño calibrados, estas calibraciones pueden realizarse a partir de: -ensayos de laboratorio y utilizando resultados de un ensayo acelerado (pocos meses o años), -datos reales de campo (muchos años) o incluso, -utilizando ambos casos.

La función de estos modelos es verificar el comportamiento y predecir con cierto grado de confiabilidad la vida a fatiga, a la deformación permanente y a otros deterioros estructurales o funcionales, para hacer, según los resultados, una mejor proyección del comportamiento del pavimento y realizar los ajustes requeridos.

Para las condiciones de Costa Rica, se sugiere la determinación de la vida a fatiga de las mezclas asfálticas de los pavimentos siguiendo dos modelos que cuentan con calibraciones preliminares utilizando resultados del ensayo acelerado de pavimentos del Pavelab-LanammeUCR, como lo son: el porcentaje de área y la longitud de las grietas (Arias, 2020). En ambos modelos el porcentaje de área agrietada y la longitud de las grietas son calculados a partir del daño acumulado y calibraciones locales resultantes del ensayo acelerado, según la metodología correspondiente. Un ejemplo de modelos de desempeño para Costa Rica se presenta en las siguientes líneas.



$$N_f = 0,00432x Cx k'_1 \left(\frac{1}{\varepsilon_t}\right)^{3,9492} \left(\frac{1}{E^*}\right)^{1,281} \quad (1)$$

$$C = 10^M \quad (2)$$

$$M = 4,84 \left[\frac{V_b}{V_a + V_b} - 0,69 \right] \quad (3)$$

Donde:

N_f : Cantidad máxima de repeticiones a fatiga para la falla (ESALS).

E^* : Módulo dinámico de la mezcla asfáltica (psi).

ε_t : Deformación por tensión en la fibra inferior de la capa asfáltica (in/in).

V_b : Contenido de asfalto efectivo (%).

V_a : Porcentaje de vacíos (%).

k'_1 : Parámetro de corrección según tipo de grieta.

h_{ac} : Espesor de la capa asfáltica (in).

Para agrietamiento de abajo-arriba:

$$k'_1 = \frac{1}{0,000398 + \frac{0,003602}{1 + e^{(11,02 - 3,49 * h_{ac})}}} \quad (4)$$

Para agrietamiento de arriba-abajo:

$$k'_1 = \frac{1}{0,01 + \frac{12}{1 + e^{(15,676 - 2,8186 * h_{ac})}}} \quad (5)$$

Para estimar el daño por fatiga se utiliza la siguiente ecuación:

$$D = \sum_{i=1}^T \frac{n_i}{N_i} \quad (6)$$

Donde:

D : Daño.

T : Número total de periodos.

n_i : Tráfico actual del periodo i .

N_i : Tráfico permitido bajo las condiciones que prevalecen del periodo i .



$$FC = \left(\frac{6000}{1 + e^{(C_1 * C'_1 + C'_2 * C''_2 * \log(D))}} \right) * \left(\frac{1}{60} \right) \quad (7)$$

Donde:

FC : agrietamiento de abajo hacia arriba por fatiga, porcentaje por área de carril.

D : daño por fatiga de abajo hacia arriba, en decimal.

C_1 : 1,0

C'_1 : $-2 * C'_2$

C'_2 : 1,0

C''_2 : $-2,40874 - 39,748 * (1 + h_{AC})^{-2,856}$

$$FC_{Top} = 10,56 \left(\frac{C_4}{1 + e^{(C_1 - C_2 \log(DI_{Top}))}} \right) \quad (8)$$

Donde:

FC_{Top} : Longitud de grietas longitudinales que inician en la superficie de la MAC.

DI_{Top} : Índice de daño acumulativo en la superficie de la MAC.

$C_{1,2,4}$: $C_1 = 7,00$; $C_2 = 3,50$; $C_4 = 1000$

$$S_{e(long)} = 200 + \frac{2300}{1 + e^{1,072 - 2,1654 \log(FC_{Top} + 0,0001)}} \quad (9)$$

Donde:

$S_{e(long)}$: agrietamiento longitudinal.



3 METODOLOGÍA PROPUESTA

La presente propuesta de investigación pretende generar una base de datos que permita dar seguimiento al desempeño de pavimentos en Costa Rica, realizando mediciones en secciones de carretera de forma periódica a una frecuencia apropiada que permita caracterizar el comportamiento de dichas secciones en el tiempo.

La existencia de estos datos corresponde con una fuente valiosa sobre cómo se comportan los pavimentos costarricenses a largo plazo. Este proyecto pretende ser un complemento al ensayo acelerado de pavimento, ya que este es un proyecto exitoso y muy valioso para analizar diferentes tipos de pavimentos en un tiempo reducido (meses) en comparación a condiciones de carga de carreteras en servicio. Sin embargo, no deja de ser un experimento controlado, con variables especificadas y donde no hay tiempo suficiente para que se desarrollen fenómenos como la oxidación natural del pavimento, variabilidad en cargas, diferentes condiciones climáticas y variabilidad en el tipo de suelos.

Por estos motivos, contar con una base de datos con resultados de pavimentos reales es muy valiosa, ya que permite unificar criterios experimentales, ver posibles patrones de falla por analizar e incluso realizar las calibraciones finales de modelos de desempeño y curvas de deterioro.

3.1 Investigación Bibliográfica

El proyecto LTPP ya ha sido implementado por años en Estados Unidos y Canadá. El proyecto ha sido desarrollado por el Departamento de Transporte de los Estados Unidos y ha sido utilizado para dar un seguimiento a las carreteras Federales de este país. De este proyecto se pueden determinar los procesos a seguir para la realización del proyecto en Costa Rica. Por otra parte, es posible hacer una comparación de los resultados obtenidos. La posibilidad de revisar a profundidad los hallazgos de estos proyectos es de suma importancia para retroalimentación futura.

También, es necesaria la revisión de los manuales de especificaciones de diseño, como el Manual CR-2010 o versiones futuras, para determinar las restricciones y condiciones existentes que presenta el diseño de pavimentos en el país, así como las propuestas asociadas a guías de diseño.

3.2 Recolección de información existente

El proyecto de Monitoreo del Desempeño de Pavimentos a Largo Plazo cuenta con distintas etapas de ejecución, todas en función de encontrar la mayor cantidad de información disponible con relación a las

Informe LM-PI-UMP-114-P	Fecha de emisión: Mayo, 2020	Página 18 de 39
-------------------------	------------------------------	-----------------



condiciones a las que los pavimentos se encuentran expuestos y como se desempeñan según las mismas. En la Figura 6 se muestra un esquema metodológico de la información requerida, como recolectarla y finalmente como analizarla.

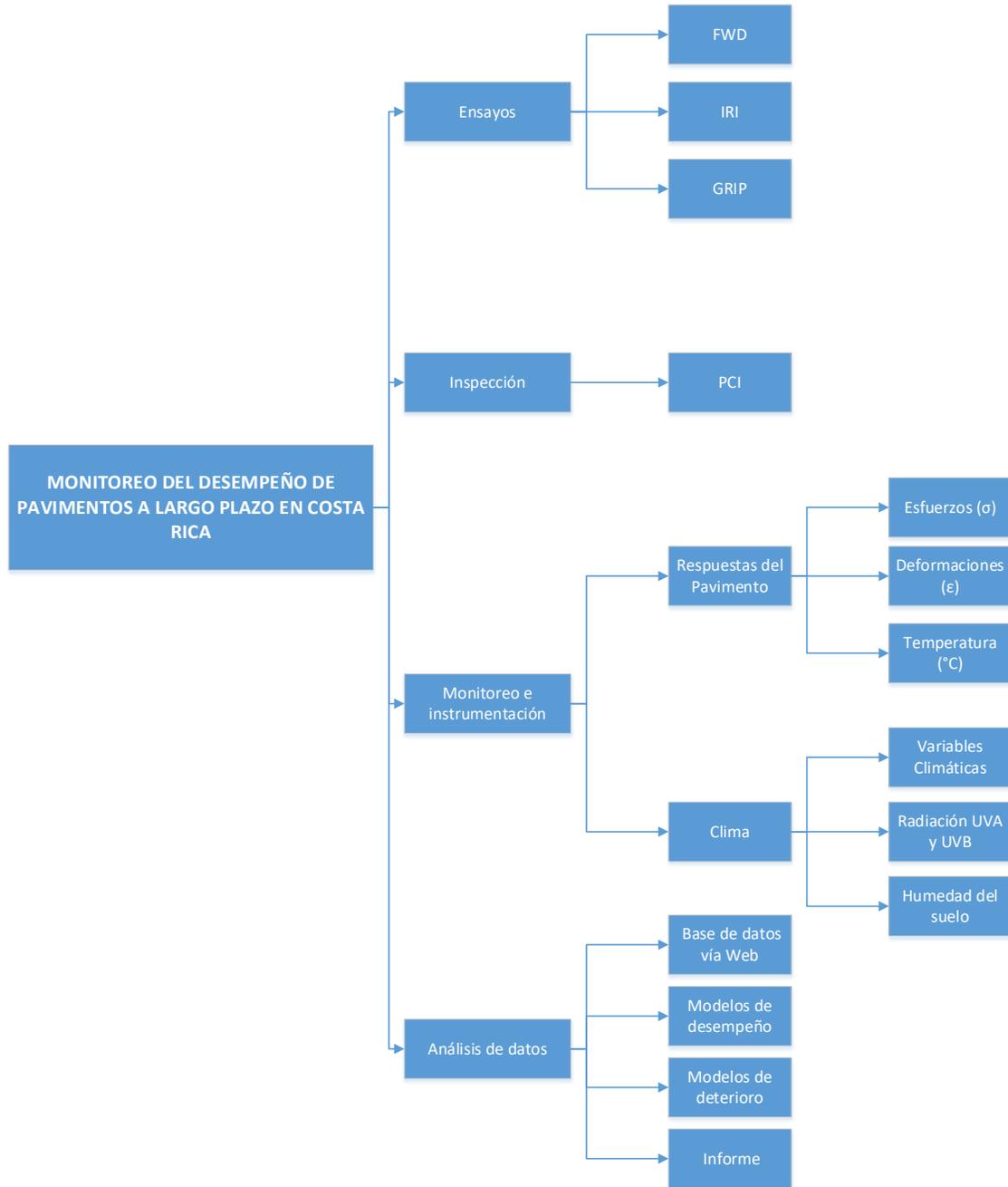


Figura 6. Esquema metodológico para monitorear el desempeño de pavimentos a largo plazo

3.3 Selección de sitios de interés

En informes previos (Ávila, 2017) se han presentado avances en secciones de control que el LanammeUCR ha monitoreado en años pasados, la propuesta es continuar con estos tramos de pavimentos y añadir secciones de prueba conforme avance el proyecto. Esto con el objetivo de ampliar el tipo de rutas y condiciones ambientales con las que se cuente.

En la Tabla 4 se muestra la propuesta de los primeros 26 tramos seleccionados. Cada tramo evaluado consta de una longitud de 100 m, en dicha tabla se muestra la descripción de cada tramo con la respectiva ruta, sección y ubicación.

Tabla 1. Lista de tramos que forman parte del proyecto de LTPP

Tramo	Ruta	Provincia	Cantón	Distrito	Sección Control
1 Sabalito - Las Mellizas	613	Puntarenas	Coto Brus	Sabalito	60311
2 Quepos - Barú	34	Puntarenas	Aguirre	Quepos	60111
3 Moravia - Coronado	102	San José	Vázquez de Coronado	Patalillo	10390
4 Cartago - Paraíso	10	Cartago	Paraíso	Paraíso	30021
5 Barú - Piñuela	34	Puntarenas	Osa	Bahía Ballena	60091
6 Jacó - Orotina	34	Alajuela	Orotina	Coyolar	21300
7 Interamericana - Caldera	23	Puntarenas	Puntarenas	Chacarita-Barranca	60610
8 Los Angeles - Santo Domingo	116	Heredia	Santo Domingo	Tures	40252
9 Guácimo - Pocora	32	Limón	Guácimo	Mercedes	70141
10 Limón - Siquirres	32	Limón	Siquirres	Pacuarito	70090
11 Playa Hermosa - Esterillos	34	Puntarenas	Garabito	Jacó	60140
12 Santa Cruz - Nambí	21	Guanacaste	Santa Cruz	Santa Cruz	50120
13 Cot - Volcán Irazú	219	Cartago	Oreamuno	Potrero Grande	30250
14 Buenos Aires - Cajón	2	Puntarenas	Buenos Aires	Volcán	60060
15 Pérez Zeledón - Río Convento	2	San José	Pérez Zeledón	Daniel Flores	10002
16 Florencia - Santa Clara	141	Alajuela	San Carlos	Florencia	20681
17 Ciudad Neilly - Paso Canoas	2	Puntarenas	Corredores	Corredores	60001
18 Liberia - Peñas Blancas	1	Guanacaste	Liberia-La Cruz	Santa Elena	50050
19 Carrillo - Lajas	160	Guanacaste	Hojancha	Puerto Carrillo	50460



Tramo	Ruta	Provincia	Cantón	Distrito	Sección Control
20 Cañas - Liberia	1	Guanacaste	Bagaces	Bagaces	51120
21 La República - Virilla	32	San José	Goicoechea	Calle Blancos	19011
22 Circunvalación Tramo Reciclado	39	San José	San José	Mata Redonda	19093
23 Tamarindo	-	Guanacaste	Santa Cruz	Tamarindo	50261
24 Cahuita - Penhurst	36	Limón	Talamanca	Cahuita	70030
25 San Clemente - Bananito Sur	36	Limón	Limón	Matama	70040
26 La Abundancia - Florencia	35	Alajuela	San Carlos	Florencia	-

Las secciones propuestas han sido seleccionadas con base en la escogencia de sitios que por su ubicación tengan diferentes condiciones climáticas, geológicas (latitud, longitud y elevación) y que, debido a la cantidad de tráfico y la composición de este, transiten diferentes cantidades de ESALS anuales. En la Figura 7 se muestra un mapa general de Costa Rica con la ubicación de los tramos.

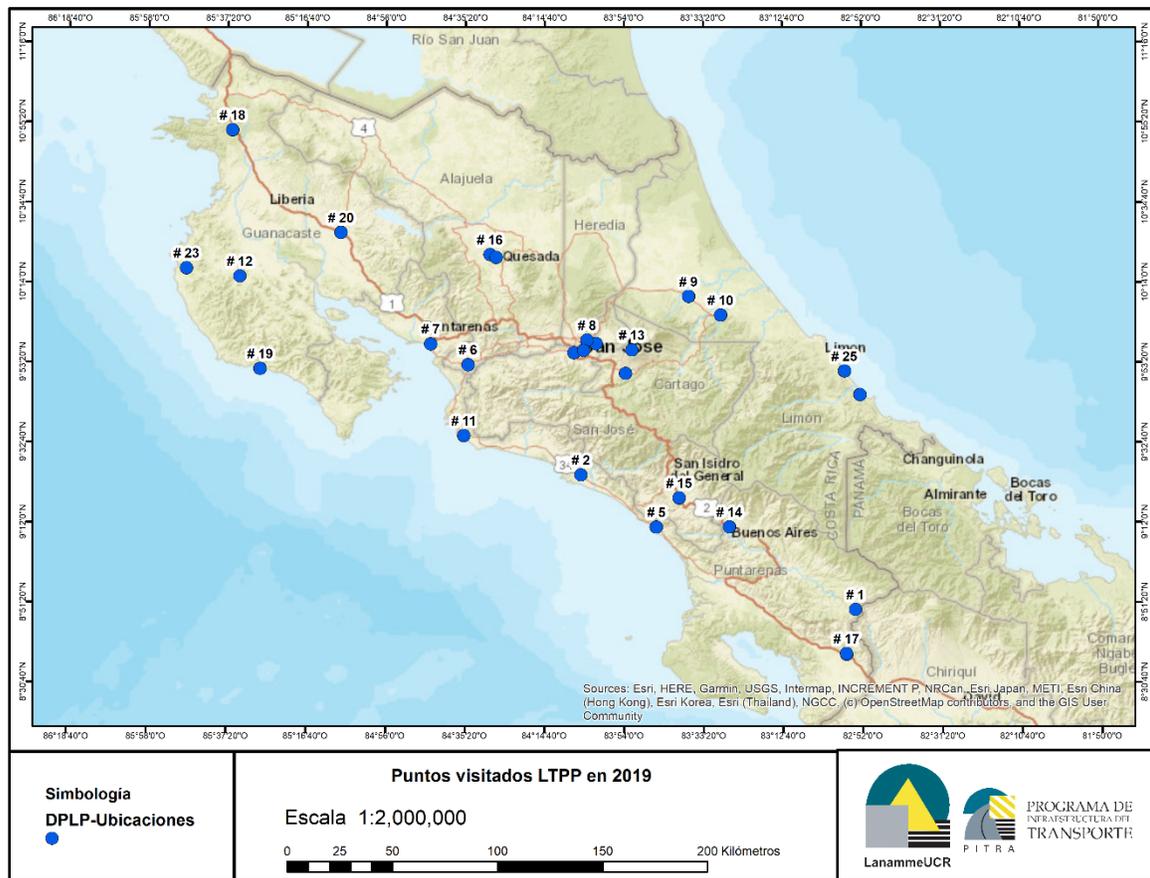


Figura 7. Mapa con ubicación de los tramos propuestos para el proyecto

3.4 Caracterización de materiales

La estructura de pavimento se divide en diferentes capas, para tener una caracterización completa de la estructura es necesario realizar la caracterización de los materiales que componen cada capa. En el caso de los pavimentos se debe hacer una caracterización de la carpeta asfáltica, base, subbase y la subrasante. En las siguientes tablas se muestran los ensayos requeridos caracterizar cada capa de la estructura de pavimento.



Tabla 2. *Ensayos requeridos para la evaluación de la carpeta asfáltica*

Nombre de ensayo	Método de ensayo
Contenido de asfalto	AASHTO T 308
Graduación de agregados	AASHTO T 30 AASHTO T 308
Contenido de agua	ASTM D 95
Densidad de la mezcla	ASTM D 2726 ASTM D 2041
Porcentaje de vacíos de aire	--
Estabilidad y flujo (pavimentos nuevos)	ASTM D 6927 AASHTO T 245
Módulo dinámico (pavimentos nuevos)	AASHTO TP 62
Creep dinámico (pavimentos nuevos)	NCHRP 465
Fatiga en vigas remoldeadas (pavimentos nuevos)	AASHTO T321
Rueda de Hamburgo	AASHTO T 324



Tabla 3. *Ensayos requeridos para la evaluación de la base y subbase*

Nombre de ensayo	Método de ensayo
Granulometría por tamizado	ASTM C 136
	ASTM C 117
	AASHTO T 27
	AASHTO T 11
Límites de Atterberg	ASTM D 4318
	AASHTO T 89
Próctor Estándar	ASTM D 1557
	AASHTO T 189, D
CBR	ASTM D 1883
	AASHTO T 193

Tabla 4. *Ensayos requeridos para la evaluación de la subrasante*

Nombre de ensayo	Método de ensayo
Granulometría por tamizado	ASTM D 422
	ASTM D 1140
	AASHTO T 88
Límites de Atterberg	ASTM D 4318
	AASHTO T 89
Próctor Estándar	ASTM D 698
	AASHTO T 99, C
CBR	ASTM D 1883
	AASHTO T 193
CBR en sitio	--



3.5 Ensayos de desempeño

La metodología aplicada en los distintos ensayos de campo se basa en normas estandarizadas internacionalmente para determinar el desempeño de diferentes aspectos mecánicos, y de serviciabilidad de los pavimentos.

3.5.1 PCI

El cálculo del PCI de los pavimentos se realizará de acuerdo con la norma ASTM D6433 (ASTM, 2018) y con el Manual de Auscultación Visual de Pavimentos de Costa Rica (MOPT, 2016), en estos se definen los tipos de deterioro presentes en los pavimentos flexibles y los pavimentos rígidos. Posteriormente es necesario definir las unidades de muestreo que varían según el tipo de pavimento que se vaya a inspeccionar. Los tramos se dividen en las secciones que según sean requeridas, o cantidad de losas en el caso de pavimentos rígidos, los cuales son inspeccionados anualmente y después se les calcula el PCI. Las calificaciones de PCI varían de 0 a 100 como se muestra en la Figura 8. El procedimiento se realiza según la norma ASTM D6433.

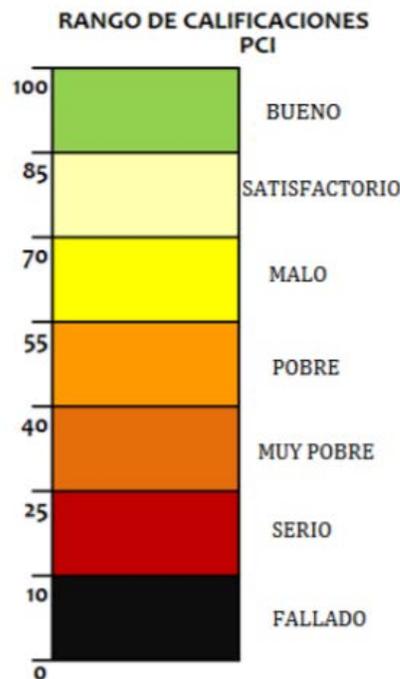


Figura 8. Rango de Calificaciones PCI (MOPT, 2016)



3.5.2 FWD

La medición de deflexiones se realiza por medio del deflectómetro de impacto y tomando de referencia la norma ASTM D4694 (ASTM, 2015). El ensayo se realizará en todos los tramos anualmente (al menos una vez al año, pero se espera que en un futuro se amplíen a dos, época invierno y verano), en cada carril y en ambos sentidos, con un espaciamiento de 10 metros a lo largo de las secciones de control (100 metros); para mantener una resolución de datos a nivel de proyecto. Es importante aclarar, que las mediciones de FWD, son muy sensibles a la ubicación y tiempo, por esto, se recomienda que se realicen al menos una vez al año y en una época similar.

3.5.3 IRI

Para determinar la regularidad del pavimento se realizará la determinación de perfil y medición de macrotextura mediante perfilómetros inercial láser. El procedimiento se realiza según las normas ASTM E950, ASTM E1845 y AASHTO R48, en todos los tramos se iniciará el ensayo 450 metros antes del tramo y finalizará 450 metros después del tramo, y se realizarán estimaciones del IRI cada 10 metros para cada carril (en ambos sentidos), esta medición se realizará anualmente.

3.5.4 GRIP

La resistencia al deslizamiento de la superficie del pavimento se medirá mediante el GRIP Tester siguiendo la norma BS 7941-2. El ensayo se realiza a lo largo de todos los tramos para cada carril de estos, se debe realizar la medición en los tramos anualmente, de igual forma con registro a cada 10 metros.

3.6 **Clima**

La información climática, a nivel general, será recopilada para cada tramo de acuerdo con la información disponible del IMN para las estaciones más cercanas a cada tramo. Esto permitirá analizar información histórica general para cada tramo.

Adicionalmente, se recolectará información propia para diferentes tramos que pueda ser relacionada de forma directa con la humedad en la estructura del pavimento. Para esto se utilizarán los equipos que se muestran en Figura 1. Estos equipos son compatibles con otros equipos de monitoreo que posee la UIIT (Unidad de Investigación en Infraestructura y Transporte), permiten comunicación de forma remota y recopilan variables de interés para la ingeniería de pavimentos.



Se espera iniciar con dos sitios (zona húmeda y zona árida), para determinar diferencias significativas entre los regímenes de precipitación y temperatura, respecto a variaciones en la humedad interna del material, se espera que la duración mínima de análisis en cada sitio sea de al menos 1 año y después puedan ser trasladados a otro sitio de interés.

También se espera recopilar información muy valiosa respecto a la radiación ultravioleta (UV) de Costa Rica, lo cual complementaría estudios en oxidación de asfaltos, como el desarrollado por Rojas (2020), en el cual se determinó la importancia de conocer los regímenes de radiación UV del país para mejorar los estudios en laboratorio y de igual forma complementar los ensayos acelerados (HVS) que desarrolla el LanammeUCR, en las pruebas que se desarrollen con la cámara climática.

3.7 Generación de base de datos sobre desempeño de los tramos seleccionados

A lo largo de los años se recolecta información de los tramos respecto de los materiales y de los ensayos de desempeño de los pavimentos, por lo que se debe hacer una recopilación y centralización de la información en una base de datos tipo SQL (por sus siglas en inglés *Structured Query Language*) con acceso y administración vía Web para datos pasados y futuros. Esto con el objetivo de dar trazabilidad a los datos, una fácil manipulación por parte de usuarios futuros y para respaldo de la información generada.

3.8 Análisis de información preliminar

La información recolectada a lo largo del proyecto permitirá dar un seguimiento al desempeño del pavimento, así como un diagnóstico de las posibles causas de daños estructurales en los pavimentos para que de esta forma sea posible determinar cuáles técnicas de mantenimiento y reparación son las más adecuadas para cada tramo analizado.

3.9 Generación y calibración de modelos locales

Por medio de ensayos acelerados de desempeño en el laboratorio es posible la creación de modelos que predigan el comportamiento de la capa asfáltica con los materiales utilizados en el país y el comportamiento de la estructura de pavimentos como un todo. Por eso, se pretende utilizar los datos obtenidos con los ensayos propuestos para calibrar modelos de desempeño a futuro. Estos modelos serán capaces de predecir el desempeño del pavimento en cuanto a la fatiga y a las deformaciones permanentes con mayor certeza. De igual forma los datos generados pueden utilizarse para generar curvas de



deterioro, basada en indicadores como IRI, FWD y PCI; modelos de desempeño más complejos como los de fatiga y daño en pavimentos, todo esto utilizando las herramientas estadísticas disponibles para estas calibraciones.

3.10 Elaboración de informes

Para el presente proyecto se realizarán informes anuales, en los que se mostrará la variación del desempeño del pavimento en los tramos seleccionados. En estos se incluirán todos los parámetros de desempeño mencionados en la sección 2.4 del presente documento. De esta manera se tendrá un registro anual del comportamiento del pavimento.

4 RESULTADOS Y PRODUCTOS ESPERADOS

La implementación del programa DPLP-CR, como parte de la investigación realizada por el LanammeUCR, permitirá una recolección sostenida a través de los años, de valiosa información complementaria a la existente, y a una resolución adecuada para análisis de datos más exhaustivos. De manera que, enfocándose en el seguimiento detallado de los deterioros que presenten las estructuras de pavimento, así como en la toma de muestras y ejecución de ensayos de laboratorio complementarios, se pueda tener un panorama amplio de las características y desempeño de los diferentes tramos.

El principal producto de este proceso de recolección de información y estudio, será una robusta base de datos que sintetice la información para cada uno de los tramos a los que se le da seguimiento.

La información recolectada a través de los años, permitirá el desarrollo y la implementación de importantes herramientas de diseño de pavimentos, incluyendo desde la adaptación de conceptos de diseño de materiales de otros países hasta el desarrollo de métodos de diseño propios de Costa Rica. En la Tabla 5 se muestra una descripción de los productos esperados.

Tabla 5. Productos esperados

x	Artículo científico en revista indexada	Libro
	Artículo científico en revista indexada	Capítulo de libro
	Artículo de divulgación	x Especificaciones técnicas
	Ponencias en congresos	Hardware
	Conferencias o seminarios	x Software
	Patentes	x Trabajos o proyectos de graduación
	Diseño de cursos	Nuevas metodologías
x	Formación de la comunidad científica	

Generación de nuevo conocimiento: Científico y/o Académico

Resultado/Producto esperado	Indicador	Beneficiario
Modelos mecánicos de predicción de deterioros y curvas de deterioro	Calibración del modelo	Entidades públicas y privadas del sector transporte que desarrollen diseños de pavimentos

Impacto a nivel nacional en la comunidad científica

Resultado/Producto esperado	Indicador	Beneficiario
Generación de artículos científicos	Artículo	Comunidad científica
Generación de contenido en la línea de modelos calibrados para diseño	Manual de diseño	Ingenieros diseñadores

Beneficios sociales y/o culturales

Resultado/Producto esperado	Indicador	Beneficiario
Garantizar un mejor desempeño de la infraestructura vial y un manejo óptimo de los recursos	Aumento en la vida útil de los pavimentos de concreto	Costarricenses

Fortalecimiento de vínculos de apoyo y reconocimiento de la Universidad de Costa Rica con el sector externo

Resultado/Producto esperado	Indicador	Beneficiario
Transferencia de tecnología y divulgación	Artículo, cursos, talleres	Público relacionado con la temática

5 CONFORMACIÓN DEL GRUPO DE INVESTIGACIÓN

En la Tabla 6 se muestra una descripción del equipo de trabajo, en una primera fase se espera que se necesite la participación de 2 asistentes, uno para procesamiento de datos y otro con énfasis en desarrollo Web para impulsar la página y base de datos

Tabla 6. *Conformación del grupo de investigación*

Investigador / Colaborador	Grado académico	Estado en régimen	Función en el proyecto	Dedicación semanal (horas)	Meses
Eliécer Arias Barrantes	Licenciatura	Interino	Investigador principal	7	Continuo
José Pablo Aguiar Moya	Doctorado	Interino	Investigador asociado	5	Continuo
Asistente 1	--	Asistente	Asistente	15	Continuo
Asistente 2	--	Asistente	Asistente	15	24 meses

6 CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES

Los ensayos necesarios para llevar a cabo el proyecto, así como las giras de inspección de campo de los tramos se muestran en las siguientes tablas. El resumen de las tablas siguientes se muestra en la Figura 9, donde se detalla el ajuste estimado de las tareas para un año calendario. Sin embargo, se espera que este proyecto tenga una duración mínima de 5 años (2020-2025), esto para garantizar que se puedan observar cambios en el desempeño de los pavimentos y con esto mejorar los análisis estadísticos de los datos.

Tabla 7. *Ensayos de caracterización de materiales*

Ensayo	Capa de estructura	Método de ensayo	Fecha estimada
Contenido de asfalto	Carpeta Asfáltica	AASHTO T 308	Año 1
Graduación de agregados	Carpeta Asfáltica	AASHTO T 30 AASHTO T 308	Año 1
Contenido de agua	Carpeta Asfáltica	ASTM D 95	Año 1
Densidad de la mezcla	Carpeta Asfáltica	ASTM D 2726 ASTM D 2041	Año 1
Porcentaje de vacíos de aire	Carpeta Asfáltica	--	Año 1
Estabilidad y flujo	Carpeta Asfáltica	ASTM D 6927 AASHTO T 245	Año 1
Granulometría por tamizado	Base y Subbase	ASTM C 136 ASTM C 117 AASHTO T 27 AASHTO T 11	Año 1
Límites de Atterberg	Base y Subbase	ASTM D 4318 AASHTO T 89	Año 1
Próctor Estándar	Base y Subbase	ASTM D 1557 AASHTO T 189, D	Año 1
CBR	Base y Subbase	ASTM D 1883	Año 1

Informe LM-PI-UMP-114-P	Fecha de emisión: Mayo, 2020	Página 31 de 39
-------------------------	------------------------------	-----------------



Ensayo	Capa de estructura	Método de ensayo	Fecha estimada
		AASHTO T 193	
Granulometría por tamizado	Subrasante	ASTM D 422 ASTM D 1140 AASHTO T 88	Año 1
Límites de Atterberg	Subrasante	ASTM D 4318 AASHTO T 89	Año 1
Próctor Estándar	Subrasante	ASTM D 698 AASHTO T 99, C	Año 1
CBR	Subrasante	ASTM D 1883 AASHTO T 193	Año 1

Tabla 8. *Ensayos de desempeño (FWD, IRI, GRIP)*

Ensayo	Encargado	Duración de la medición	Fecha estimada	Duración
FWD		6 meses	Mayo-Octubre	5 años
IRI		6 meses	Mayo-Octubre	5 años
GRIP		6 meses	Mayo-Octubre	5 años

Tabla 9. *Giras de campo para evaluar PCI de los tramos*

Gira	Puntos por inspeccionar	Duración de la medición	Fecha estimada	Duración
Cartago	Tramos 4, 13	1 día	Mayo	5 años
Pacífico Sur	Tramos 1, 2, 5, 6, 11, 14, 15, 17	2 días	Mayo	5 años
Limón	Tramos 9, 10, 24, 25	2 días	Junio	5 años
Guanacaste	Tramos 7, 12, 18, 19, 20, 23	2 días	Junio	5 años
GAM	Tramos 3, 8, 21, 22	1 día	Julio	5 años
San Carlos	Tramos 16, 26	2 día	Agosto	5 años

Tabla 10. *Procesamiento de datos*

Actividad	Duración de la medición	Fecha Estimada	Duración
Procesamiento de datos	3 meses	Julio - Octubre	5 años
Elaboración informe	1 mes	Noviembre	5 años

Tabla 11. *Creación sitio web*

Actividad	Duración	Fecha Estimada
Definir flujo de trabajo	2 meses	Mayo – Junio (primer año)
Desarrollo	10 meses	Junio (segundo año)

En la Figura 9 se muestra el cronograma estimado del proyecto para el primer año, sin embargo, se propone una duración global mínima de 5 años, por lo tanto las tareas 4-18, se replicarían para los restantes 4 años y alimentaría la base de datos del proyecto.

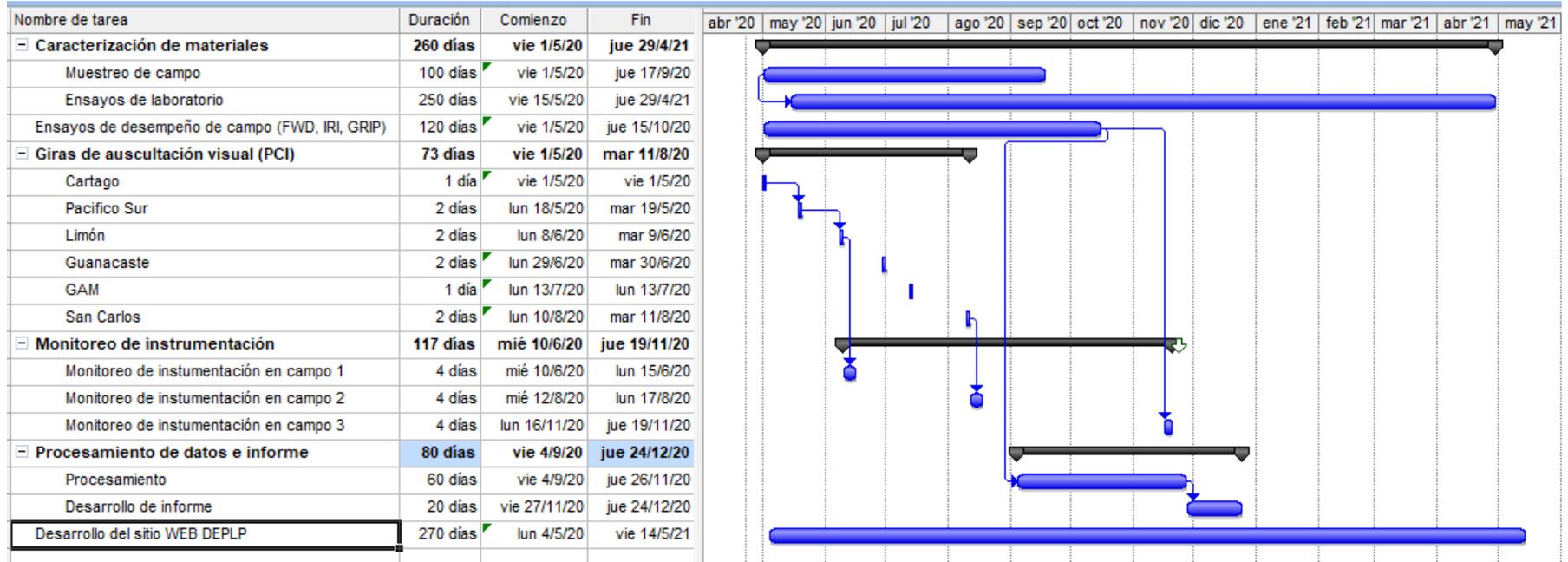


Figura 9. Cronograma estimado para el primer año.



7 RECURSOS NECESARIOS

Para el desarrollo del proyecto es necesario cumplir con cada etapa planeada, para ello es necesario el financiamiento de cada una de ellas. En la Tabla 12 se presenta un resumen del costo asociado al proyecto para el primero año de operación, que requiere caracterizar materiales en más tramos. En la Tabla 13, se muestra el presupuesto para mantener el proyecto de forma sostenida después del segundo año.

Tabla 12. Costos asociados a proyecto DEPLP-CR primer año

Concepto	Costo
Ensayos de laboratorio	₡47.866.500,00
Mano de obra	₡14.740.000,00
Giras de campo	₡1,554,600,00
Otros	₡1.000.000,00
Total	₡65.161.100,00

Tabla 13. Costos asociados a proyecto DEPLP-CR años siguientes

Concepto	Costo
Ensayos de laboratorio	₡33.160.500,00
Mano de obra	₡13.640.000,00
Giras de campo	₡1.554.600,00
Otros	₡1.000.000,00
Total	₡49.355.100,00

Para estas estimaciones se consideró un valor de 10.000 colones la hora profesional y 2.500 la hora asistente.



8 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Amador Jiménez, L., & Mrawira, D. (Diciembre de 2009). Roads Performance Modeling and Management System from Two Condition Data Points: Case Study of Costa Rica. *Journal of Transportation Engineering ASCE*, 9.
- American Association of State Highway and Transportation Officials. (2005). *AASHTO T 11 Standard Method of Test for Materials Finer Than 75- μ m (No. 200) Sieve in Mineral Aggregates by Washing*. Washington, D.C: AASHTO.
- American Association of State Highway and Transportation Officials. (2010). *AASHTO R 48 Standard Practice for Determining Rut Depth in Pavements*. Washington, D.C: AASHTO.
- American Association of State Highway and Transportation Officials. (2013). *AASHTO T 88 Standard Method of Test for Particle Size Analysis of Soils*. Washington, D.C: AASHTO.
- American Association of State Highway and Transportation Officials. (2017). *AASHTO T 193 Standard Method of Test for The California Bearing Ratio*. Washington, D.C: AASHTO.
- American Association of State Highway and Transportation Officials. (2017). *AASHTO T 89 Standard Method of Test for Determining the Liquid Limit of Soils*. Washington, D.C: AASHTO.
- American Association of State Highway and Transportation Officials. (2018). *AASHTO T 27 Standard Method of Test for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates*. Washington, D.C: AASHTO.
- American Association of State Highway and Transportation Officials. (2018). *AASHTO T 308 Determining the Asphalt Binder Content of Asphalt Mixtures by the Ignition Method*. Washington, D.C: AASHTO.
- American Association of State Highway and Transportation Officials. (2018). *ASTM D6433 - 18 Standard Practice for Roads and Parking Lots Pavement Condition Index Surveys*. West Conshohocken: ASTM.
- American Association of State Highway and Transportation Officials. (2019). *AASHTO - T30 Standard Method of Test for Mechanical Analysis of Extracted Aggregate*. Washington, D.C: AASHTO.
- American Association of State Highway and Transportation Officials. (2019). *AASHTO T 245 Standard Method of Test for Resistance to Plastic Flow of Asphalt Mixtures Using Marshall Apparatus*. Washington, D.C: AASHTO.

Informe LM-PI-UMP-114-P	Fecha de emisión: Mayo, 2020	Página 36 de 39
-------------------------	------------------------------	-----------------



- American Association of State Highway and Transportation Officials. (2019). *AASHTO T 99 Standard Method of Test for Moisture–Density Relations of Soils Using a 2.5-kg (5.5-lb) Rammer and a 305-mm (12-in.)*. Washington, D.C: AASHTO.
- Arias, E. (2020). *Guía para el Diseño Estructural Mecánico Empírico de Pavimentos en Costa Rica*. San José: LanammeUCR.
- ASTM . (2019). *ASTM D2041 Standard Test Method for Theoretical Maximum Specific Gravity and Density of Asphalt Mixtures*. West Conshohocken, PA: ASTM International.
- ASTM. (2007). *ASTM D422 Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils*. West Conshohocken, PA: ASTM International.
- ASTM. (2012). *ASTM D1557 Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Modified Effort (56,000 ft-lbf/ft³ (2,700 kN-m/m³))*. West Conshohocken, PA: ASTM International.
- ASTM. (2012). *ASTM D698 Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort (12 400 ft-lbf/ft³ (600 kN-m/m³))*. West Conshohocken, PA: ASTM International.
- ASTM. (2015). *ASTM D4694 Standard Test Method for Deflections with a Falling-Weight-Type Impulse Load Device*. West Conshohocken, PA: ASTM International.
- ASTM. (2015). *ASTM D6927-15 Standard Test Method for Marshall Stability and Flow of Asphalt Mixtures*. West Conshohocken, PA: ASTM International.
- ASTM. (2015). *ASTM E1845 Standard Practice for Calculating Pavement Macrotexture Mean Profile Depth*. West Conshohocken, PA: ASTM International.
- ASTM. (2016). *ASTM D1883 Standard Test Method for California Bearing Ratio (CBR) of Laboratory-Compacted Soils*. West Conshohocken, PA,: ASTM International.
- ASTM. (2017). *ASTM C117 Standard Test Method for Materials Finer than 75- μ m (No. 200) Sieve in Mineral Aggregates by Washing*. West Conshohocken, PA: ASTM International.
- ASTM. (2017). *ASTM D1140 Standard Test Methods for Determining the Amount of Material Finer than 75- μ m (No. 200) Sieve in Soils by Washing*. West Conshohocken, PA: ASTM International.



- ASTM. (2017). *ASTM D4318 Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils*. West Conshohocken, PA: ASTM International.
- ASTM. (2018). *ASTM D95 Standard Test Method for Water in Petroleum Products and Bituminous Materials by Distillation*. West Conshohocken, PA: ASTM International.
- ASTM. (2018). *ASTM E950 Standard Test Method for Measuring the Longitudinal Profile of Traveled Surfaces with an Accelerometer-Established Inertial Profiling Reference*. West Conshohocken, PA: ASTM International.
- ASTM. (2019). *ASTM C136 Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates*. West Conshohocken, PA: ASTM International.
- ASTM. (2019). *ASTM D2726 Standard Test Method for Bulk Specific Gravity and Density of Non-Absorptive Compacted Asphalt Mixtures*. West Conshohocken, PA: ASTM International.
- Avila Esquivel, T. (2017). *Informe de avance - LTPP LM-PI-UMP-043-R3*. San Pedro: LanammeUCR.
- Badilla, G. (2009). *Determinación de la regularidad superficial de pavimentos mediante el cálculo de índice regularidad internacional (IRI): Aspectos y consideraciones importantes*. San José: LanammeUCR.
- British Standards Institution. (2000). *BS 7941-2 Methods for measuring the skid resistance of pavement surfaces. Test method for measurement of surface skid resistance using the GripTester braked wheel fixed slip device*. BSI.
- Camacho garita, E., Puello Bolaños, R., & Laurent Matamoros, P. (2018). *Parámetros de Análisis Estructural de Pavimentos en Costa Rica*. San Pedro : LanammeUCR.
- Federal Highway Administration. (2017). *Long-Term Pavement Performance Program*. Washington: FHWA.
- Gutiérrez, T., & Arce, M. (2005). *Variación estacional de módulos*. San José: LANAMME.
- Illinois Department of Transportation (IDOT). (2012). *Bureau of Local Roads & Streets Manual*. Springfield, Illinois.
- Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales . (2019). *Catálogo de Ensayos para Evaluación de Pavimentos*. San Pedro: LanammeUCR.



- Ministerio de Obras Públicas y Transportes. (2016). *Manual de Auscultación Visual de Pavimentos de Costa Rica*. San José: MOPT.
- Osano, S., & Nyangau, T. (2018). *Interpretation of the Falling Wight Deflectometer (FWD) testing Data for the Nairobi Eastern By-Pass Road Flexible Pavement*. Nairobi: University of Nairobi.
- Picado, G. (2016). *Desarrollo de Curvas de Deterioro para Pavimento Flexible y Factor de Incertidumbre*. San José: LanammeUCR.
- Rajaei, S., Dargazany, R., & Chatti, K. (2016). *Pavement Surface Characterization for Optimization of Tradeoff Between Grip and Rolling Resistance*. Okemos: Center for Highway Pavement Preservation (CHPP).
- Rojas Rojas, G. (2020). *Implementación de protocolo de análisis en laboratorio de materiales antioxidantes para asfalto (Tesis de pregrado)*. San Pedro: Universidad de Costa Rica.
- Sanabria Sandino, J. (2019). *Informe de Evaluación de la Red Vial Nacional Pavimentada de Costa Rica Años 2018-2019*. San Pedro: LanammeUCR.
- Secretaria de Integración Económica Centroamericana. (2002). *Manual Centroamericano para el Diseño de Pavimentos*. Guatemala: SIECA.
- Sequeira Rojas, W., Guerrero Aguilera, S., Herra Gómez, L. D., & Salas Chavez, M. (2017). *Evaluación de parámetros y metodología utilizada en los diseños de pavimentos realizados bajo el marco de Licitación Pública 2014LN-000018-0CV00*. San Pedro: LanammeUCR.