



UNIVERSIDAD DE  
COSTA RICA



LABORATORIO NACIONAL  
DE MATERIALES Y MODELOS ESTRUCTURALES

## Programa de Infraestructura del Transporte (PITRA)

Informe: LM-PI-UMP-088-R1

# PRIMER ENSAYO ACELERADO DE PAVIMENTOS A ESCALA NATURAL

## DESARROLLO DE MODELOS DE DETERIORO

Preparado por:  
Unidad de Materiales y Pavimentos

San José, Costa Rica  
Diciembre, 2018

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.

Preparado por: Unidad de Materiales y Pavimentos del PITRA-  
LanammeUCR [tania.avilaesquivel@ucr.ac.cr](mailto:tania.avilaesquivel@ucr.ac.cr)





Información técnica del documento

|  |   |  |
|--|---|--|
| <b>1. Informe</b><br>LM-PI-UMP-088-R1  |   | <b>2. Copia No.</b><br>1   |
| <b>3. Título y subtítulo:</b><br>Desarrollo de modelos de deterioro  |   | <b>4. Fecha del Informe</b><br>Diciembre, 2018   |
| <b>7. Organización y dirección</b><br>Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales<br>Universidad de Costa Rica, Ciudad Universitaria Rodrigo Facio,<br>San Pedro de Montes de Oca, Costa Rica<br>Tel: (506) 2511-2500 / Fax: (506) 2511-4440  |   |  |
| <b>8. Notas complementarias</b>  |   |  |
| <b>9. Resumen</b><br><br><i>La implementación del programa PaveLab, permite la recolección de valiosa información en tiempo real de las respuestas mecánicas y físicas de los materiales que componen una estructura de pavimento.</i><br><br><i>El principal producto de este proceso de recolección de información y estudio será una robusta base de datos que permita generar modelos matemáticos para predicción del desempeño de las estructuras de pavimento.</i><br><br><i>El presente informe recopila el avance en la creación de modelos matemáticos producto del análisis de los datos obtenidos a la fecha con el simulador de vehículos pesados y los distintos tramos de prueba.</i><br><br><i>Con la información recolectada a través de los años, se colaborará con el desarrollo e implementación de importantes herramientas del diseño de pavimentos, desde adaptar conceptos de diseño de materiales de otros países, hasta el desarrollo de métodos de diseño propios de Costa Rica.</i> |   |  |
| <b>10. Palabras clave</b><br>Modelos Matemáticos,<br>Desempeño, Pavimentos Flexibles   | <b>11. Nivel de seguridad:</b><br>Ninguno | <b>12. Núm. de páginas</b><br>20   |
| <b>13. Preparado por:</b><br>Ing. Tania Ávila Esquivel, M.Sc.<br>Ingeniero investigador<br><br>_____<br>Fecha: / /   | _____<br>Fecha: / /                       | _____<br>Fecha: / /  |
| <b>14. Revisado por:</b><br>Ing. José Pablo Aguiar M., Ph. D.<br>Coordinador Unidad de Materiales y<br>Pavimentos<br><br>_____<br>Fecha: / /   | _____<br>Fecha: / /                       | <b>15. Aprobado por:</b><br>Ing. Guillermo Loría Salazar, Ph. D.<br>Coordinador General PITRA<br><br>_____<br>Fecha: / / |



## CUADRO DE CONTENIDOS

|     |   |    |
|-----|---|----|
| 1   | Introducción .....  | 4  |
| 1.1 | Descripción – Contexto del proyecto en Costa Rica.....                    | 4  |
| 1.2 | Objetivo de este informe .....  | 6  |
| 1.3 | Productos esperados .....   | 7  |
| 2   | Modelos Matemáticos .....   | 7  |
| 2.1 | Modelos de deformación permanente (Leiva et al., 2016).....               | 7  |
| 2.2 | Modelo de Fatiga (Arias et al., 2018).....                                | 9  |
| 2.3 | Modelo de predicción de rugosidad superficial (Aguilar et al., 2016)..... | 11 |
| 3   | Algunas conclusiones.....   | 18 |
| 3.1 | Modelos de deformación permanente. ....                                   | 18 |
| 3.2 | Modelo de fatiga.....   | 18 |
| 3.3 | Modelos de rugosidad superficial .....                                    | 19 |
| 4   | Referencias.....  | 20 |
|     | ANEXO A.....  | 23 |
|     | ANEXO B .....   | 27 |
|     | ANEXO C .....   | 33 |

## ÍNDICE DE FIGURAS

|                  |   |    |
|------------------|---|----|
| <b>FIGURA 1.</b> | ERRORES RELATIVOS ABSOLUTOS .....                                     | 9  |
| <b>FIGURA 2.</b> | RUGOSIDAD SUPERFICIAL EN LOS DISTINTOS TRAMOS DE PRUEBA.....          | 12 |
| <b>FIGURA 3.</b> | VARIACIÓN EN LA REGULARIDAD DEBIDO A LA SATURACIÓN DE LAS PISTAS..... | 14 |

## ÍNDICE DE TABLAS

|                 |   |    |
|-----------------|---|----|
| <b>TABLA 1.</b> | FACTORES DE CALIBRACIÓN.....  | 9  |
| <b>TABLA 2.</b> | PARÁMETROS DE CALIBRACIÓN PARA CAPAS DELGADAS DE MEZCLA ASFÁLTICA SOBRE CTB.....            | 10 |
| <b>TABLA 3.</b> | PARÁMETROS DE CALIBRACIÓN PARA CAPAS DELGADAS DE MEZCLA ASFÁLTICA SOBRE BASE GRANULAR. .... | 11 |
| <b>TABLA 4.</b> | INCREMENTO PROMEDIO DE LA REGULARIDAD SUPERFICIAL POR SECCIÓN DE PRUEBA .....               | 14 |
| <b>TABLA 5.</b> | PARÁMETROS ESTIMADOS PARA EL MODELO.....  | 18 |

|                          |                 |                |
|--------------------------|-----------------|----------------|
| Informe LM-PI-UMP-088-R1 | Diciembre, 2018 | Página 3 de 37 |
|--------------------------|-----------------|----------------|



## 1 INTRODUCCIÓN

### 1.1 Descripción – Contexto del proyecto en Costa Rica

El experimento que se describe en el presente informe responde a la necesidad de profundizar en el estudio del comportamiento y desempeño de estructuras de pavimento. Esto con la finalidad de conocer cómo se comportan sus distintos materiales componentes, de manera que los mismos puedan ser optimizados para brindar las mejores propiedades de servicio y durabilidad.

La necesidad de realizar experimentos de este tipo es imperante puesto que no hay modelos calibrados para predecir el deterioro de los pavimentos en Costa Rica; y por tanto se requiere de investigación que permita medir cómo y en cuánto se deterioran las estructuras de pavimento en función de los materiales, el clima y el tránsito al que están expuestos. Lo anterior es de aún más importancia cuando se considera que en el país se están diseñando carreteras mediante el uso de modelos de deterioro calibrados para condiciones completamente distintas, con modelos meramente empíricos y por tanto con muy baja correlación al desempeño real futuro de la estructura.

Por otra parte, en los últimos años se ha realizado un importante esfuerzo para asegurar la implementación y aplicación de ensayos de laboratorio normados y acreditados en el país. Gracias a esto, hoy en día están contemplados en la especificación nacional para la construcción de carreteras (CR-2010) distintos ensayos de laboratorio para ser realizados durante el control de calidad de las obras viales.

Los diferentes ensayos que se han venido utilizando son imprescindibles para control de las obras viales, pues son parámetros históricamente conocidos y asociados a las propiedades de los diferentes materiales que se utilizan para la construcción de carreteras. De esta forma se controlan características esenciales como densidad, cantidad de ligante utilizada, propiedades granulométricas y otros más elaborados.

Sin embargo, existen diversas limitaciones en los ensayos de laboratorio, particularmente en la relación de estos con el desempeño real de las estructuras en servicio. Por ejemplo, si bien se pueden realizar ensayos de laboratorio a los materiales que conforman una capa de base granular como medir la granulometría del material, no se conoce con detalle como esta granulometría afectará el desempeño real de dicha capa. De la misma forma, así como se le pueden medir algunas propiedades



a los materiales que conforman una capa de ruedo de mezcla asfáltica, no es común poder conocer con detalle (en el laboratorio) el comportamiento de una mezcla asfáltica con respecto a una base granular específica. Aun cuando se desarrollan ensayos que miden propiedades fundamentales del material, existen diferencias entre las condiciones de laboratorio y las que se presentan durante el servicio de la estructura.

En Costa Rica desde el año 2004 se ha venido realizando un esfuerzo importante mediante las evaluaciones a nivel de red vial, mediante el uso de ensayos de campo. En el caso costarricense se han utilizado deflectómetros de impacto (FWD) para el cálculo de la capacidad estructural y mediciones láser de los perfiles de las carreteras (RSD) para el cálculo de la regularidad superficial (IRI). Adicionalmente, se han incorporado algunas otras herramientas con el paso de los años (ej. fricción).

El uso de ensayos de campo amplía el alcance de la información disponible en cuanto a la condición estructural y funcional de los pavimentos, lo cual permite realizar la gestión y administración de los activos viales ensayados. Estos ensayos de campo reflejan la condición al momento en que se realiza la medición, razón por la cual es particularmente importante dar seguimiento en el tiempo a la forma en que cambia la condición con el paso de los vehículos y el tiempo. Adicionalmente, es de vital importancia contar con la información de demanda a que ha estado sujeta la carretera, información que no se encuentra disponible actualmente.

En Costa Rica las evaluaciones a nivel de red vial nacional las realiza por ley el LanammeUCR cada dos años, lo cual ha permitido brindar herramientas importantes a la Administración para la gestión y administración de la red vial nacional. De la misma forma se ha desarrollado una importante base de datos que permitirá realizar análisis e investigaciones relacionadas con el desempeño de las estructuras reales con el paso del tiempo.

Es importante entender las limitaciones que tienen estas evaluaciones a nivel de red para el estudio de las estructuras de pavimentos, pues para generar la información se requiere una gran cantidad de tiempo para profundizar en el estudio de su comportamiento (20+ años). También existen limitaciones en cuanto al conocimiento de las cargas aplicadas a la estructura, por lo que no se puede analizar el desempeño real de la estructura ante la aplicación repetida de cargas en tanto no se conozca su cantidad y magnitud. Adicionalmente, hay que resaltar que la evaluación de una red para fines de



gestión es muy distinta a la evaluación de una carretera a nivel de proyecto donde se busca conocer claramente el comportamiento y variabilidad de la estructura en estudio.

Una limitación adicional de las evaluaciones de redes para determinar el desempeño de un pavimento es que, por tratarse de estructuras en servicio, son muy limitados los casos donde se puede documentar las condiciones constructivas y obtener muestras del material utilizado para la construcción para realizar estudios comparativos.

En síntesis, adicionalmente a la información que aporta la evaluación de la red vial, se requiere profundizar en los siguientes aspectos:

- Conocimiento de magnitud, cantidad y características de las cargas aplicadas.
- Conocimiento detallado de los materiales existentes, sus propiedades mecánicas y espesores.
- Medición detallada del comportamiento de la estructura en el tiempo y documentación de los mecanismos de falla que se presentan.
- El tiempo de recolección de datos es de largo plazo.
- Para la implementación de nuevas tecnologías es necesaria la construcción de tramos experimentales.

También hay que considerar que la información obtenida en los diferentes laboratorios de control de calidad de las obras viales no puede ser directamente relacionada con el desempeño de los pavimentos en servicio. Esta separación entre los resultados de laboratorio y la forma en que las estructuras en servicio se desempeñan plantea retos en diferentes niveles, pues no solamente se debe conocer cuál es la relación entre los resultados de laboratorio, sino conocer los diferentes mecanismos de falla que tendrán las estructuras durante su vida de servicio, la vida útil de las estructuras, el beneficio de modificar características específicas de las mismas y la razonabilidad de los costos.

En este contexto se desarrolla la construcción del primer grupo de tramos de estudio a escala natural en Costa Rica, buscando ahondar en el estudio del comportamiento de diferentes estructuras de pavimento, documentando y generando la información necesaria para la mejora de los procesos de diseño y construcción de estructuras de pavimento.

## ***1.2 Objetivo de este informe***

Resumir los modelos matemáticos que se han generado a partir de los datos obtenidos en el primer experimento realizado con el Simulador de Vehículos Pesados (HVS, por sus siglas en inglés).



### 1.3 *Productos esperados*

La implementación del programa PaveLab, permite la recolección de valiosa información en tiempo real de las respuestas mecánicas y físicas de los materiales que componen una estructura de pavimento.

El principal producto de este proceso de recolección de información y estudio será una robusta base de datos que permita generar modelos matemáticos para predicción del desempeño de las estructuras de pavimento.

Con la información recolectada a través de los años, se colaborará con el desarrollo e implementación de importantes herramientas del diseño de pavimentos, desde adaptar conceptos de diseño de materiales de otros países, hasta el desarrollo de métodos de diseño propios de Costa Rica.

## 2 **MODELOS DE TRANSFERENCIA**

El método con el cual se predice el daño a través de la vida de una estructura de pavimento es de gran importancia para el diseño mecanicista-empírico, a la fecha se han logrado generar modelos de predicción de deformación permanente, fatiga en capa asfáltica y regularidad superficial.

A continuación, se resumen los resultados obtenidos.

### 2.1 *Modelos de deformación permanente (Leiva et al., 2016)*

Para la primera aproximación de los modelos se utilizó la información de los Deflectómetros de profundidad múltiple (MDD, por sus siglas en inglés) del primer tramo experimental AC1. La instalación de los sensores se realizó luego de construida la estructura de pavimento, se colocó un MDD en la interfaz de cada capa, en el medio de las capas de base y subbase y cerca de la superficie de rueda.

La información obtenida permite obtener la progresión de los módulos de capa al medir las deflexiones que se producen, para esto; se realizó un retrocálculo de módulos utilizando el método de espesor equivalente propuesto por Ullidtz (1987), en donde se convierte el espesor de toda la estructura en una sola capa equivalente. Dicha transformación es realizada utilizando la teoría de Odemark. El cálculo de los esfuerzos, deformaciones y deflexiones se realizó utilizando la teoría de Boussinesq.



Una correlación lineal buena entre los datos de deflexión medidos versus los estimados, junto con una desviación mínima de la línea de igualdad; fueron el criterio para realizar los retrocálculos de módulo y asegurar que la metodología utilizada fue aplicada de una manera exitosa para cada juego de datos.

Al comparar el ahuellamiento medido con los valores predichos de los modelos basados en ensayos de laboratorio, se determinó la combinación óptima de los factores de calibración de campo, de modo que el coeficiente de variación se minimizó en función de los mínimos cuadrados ordinarios (OLS, por sus siglas en inglés).

Para calibrar el modelo inicial se utilizó un solo factor de corrección ( $k_i$ ) a cada coeficiente de regresión individual ( $\beta_i$ ). Como se mencionó anteriormente, el proceso finalizó cuando el coeficiente de variación se minimizó en función de los OLS. La Tabla 1 muestra los factores de calibración resultantes para cada uno de los modelos evaluados. En el caso del modelo de la carpeta asfáltica (CA) se aplicó un solo factor. Para los modelos de las otras capas del pavimento se requirió una calibración completa para corregir los errores sistemáticos.

En la Figura 1 se muestra la gráfica de distribución acumulativa de los errores relativos absolutos para todos los puntos de datos medidos / estimados. Se puede observar que los errores relativos medianos para la CA, base y subrasante después de la calibración fueron del 27%, 9% y 7% respectivamente. Además, el 90% de los errores relativos para la CA, base y subrasante fueron inferiores al 90%, 100% y 40% respectivamente. Estos errores son significativamente más bajos que los resultados obtenidos antes de la calibración. Un análisis adicional indicó que los grandes errores se asociaron con bajo nivel de ahuellamiento, donde un pequeño cambio en el valor predicho podría generar errores de hasta el 100%. Los modelos calibrados finales se muestran en las ecuaciones 1-3.

$$\varepsilon_{pAC} = 16.254 * e^{-10.919} * T^{2.961} * N^{0.355} * \varepsilon_r \quad [1]$$

$$\varepsilon_{pGB} = 10^{-5.239} * N^{0.265} * \sigma_d^{1.025} * \sigma_3^{0.147} * \%W^{1.642} \quad [2]$$

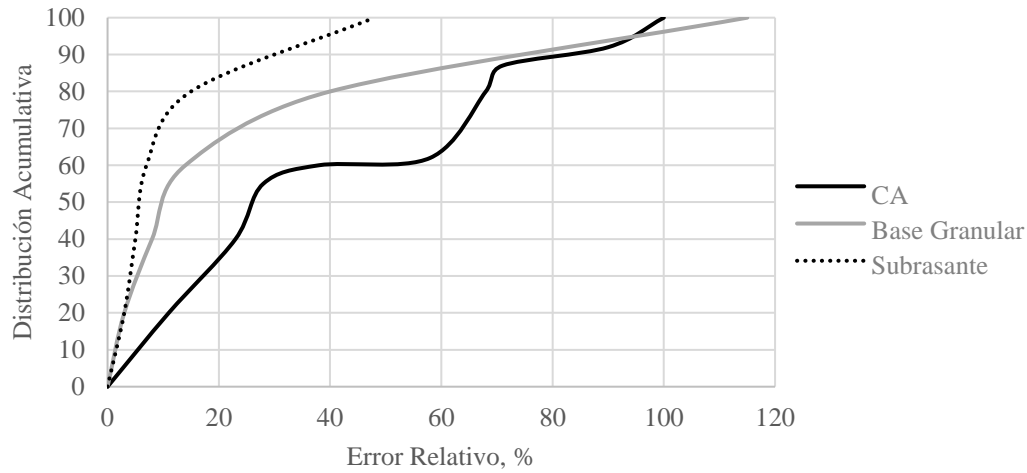
$$\varepsilon_{pSG} = 10^{-11.424} * N^{0.229} * \sigma_d^{-0.839} * \sigma_3^{-0.266} * \%W^{6.677} \quad [3]$$





**Tabla 1.** Factores de calibración.

| Capa          | k <sub>1</sub> | k <sub>2</sub> | k <sub>3</sub> | k <sub>4</sub> | k <sub>5</sub> |
|---------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| CA            | 16.256         | -              | -              | -              | -              |
| Base Granular | 1.048          | 3.841          | 0.608          | 1.911          | 0.873          |
| Subrasante    | 0.346          | 5.728          | -0.411         | -0.631         | 0.393          |



**Figura 1.** Errores relativos absolutos

Donde  $\varepsilon_{pi}$  es la deformación permanente para la capa  $i$  (capa CA en  $\text{mm} / \text{mm} \times 10^{-3}$ , otras capas en  $\text{mm}$ ),  $\varepsilon_r$  es la deformación elástica ( $\text{mm} / \text{mm} \times 10^{-3}$ ),  $N$  es el número de repeticiones de carga,  $T$  es la temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ ),  $\sigma_d$  es la tensión del desviador ( $\text{kg} / \text{cm}^2$ ) y  $\sigma_3$  es la tensión de confinamiento ( $\text{kg} / \text{cm}^2$ ), finalmente, el  $\%w$  representa el contenido de humedad (%).

## 2.2 Modelo de Fatiga (Arias et al., 2018)

Para determinar la progresión de los módulos de la CA se utilizaron los datos de deflexión obtenidos por medio del Deflectómetro de Superficie (RSD, por sus siglas en inglés) y la técnica de retrocálculo de módulos, cuyo cálculo se basó en el método de espesor equivalente; para los tramos AC1 y AC2.

Se determinó el daño por fatiga para las pruebas de laboratorio, así como para cada tramo de prueba individual en cinco ubicaciones diferentes. Se realizaron tres mediciones de deflexión en cada ubicación. Por lo tanto, fue posible determinar las respuestas mecánicas basadas en la Teoría de Capas Elásticas y verificarlas con medidores de tensión incorporados en cada pista. Además de la estimación del daño, se registró la temperatura a media profundidad de la CA con el fin de corregir el módulo de las capas susceptibles a la misma.



Se estimó el daño por fatiga de la CA para evaluar cómo el modelo de laboratorio se relaciona con los resultados de los tramos. Esta corrección se realizó utilizando factores que permitieran corregir el daño entre las condiciones de laboratorio y de campo. Las diferentes condiciones para cada pista de prueba indicaron que un solo factor de ajuste no era adecuado para predecir el daño por fatiga. En consecuencia, se desarrollaron factores de calibración independientes para cada ensayo: base granular, CTB, humedad óptima o alto grado de saturación en el subsuelo.

Se observaron diferencias entre el 100% y el 150% en daño entre el modelo de laboratorio calibrado para el ensayo de flexión en cuatro puntos (4PBB) y la sección de prueba AC2 (según los valores medidos de esfuerzo a tensión máximo en la parte inferior de la CA). Por otro lado, hay una diferencia del 6% entre los valores de daño pronosticados a partir de los datos de 4PBB y el daño real medido en la sección AC2 húmeda. Sin embargo, se debe considerar que la sección falló prematuramente en 450,000 ejes equivalentes.

En los pavimentos con capa de base estabilizada con cemento (CTB, por sus siglas en inglés), el daño previsto con la regresión de 4PBB se subestima considerablemente, la capa de CTB hace que las tensiones iniciales en la parte inferior de la capa CA sean bajas, estas estructuras de pavimento mostraron un daño significativamente menor cuando se completó el experimento.

Los modelos se calibraron para el nivel de tensión medido en la parte inferior de la CA para cada sección, con tres niveles de daño entre 60% y 90%. La ecuación 4 se obtiene al calibrar una función de fatiga clásica.

$$MN = k_1 * \left(\frac{\epsilon}{200}\right)^{-k_2} * \left(\frac{E}{3000}\right)^{-k_3} * e^{-k_4 * T} \quad [4]$$

Donde  $k_1$ ,  $k_2$ ,  $k_3$  y  $k_4$  = coeficientes de regresión corregidos con datos del HVS.

Los respectivos coeficientes de calibración se muestran en la Tabla 2 y la Tabla 3. Los coeficientes se calibraron para tres niveles de daño, ya que la carga para las cuatro pistas de prueba se detuvo cuando los niveles de daño alcanzaron el rango entre 60% y 90%. Además, los modelos se calibraron para el nivel de tensión medido en la parte inferior de la CA para cada sección. En el caso del pavimento con CTB, la tensión fue de  $15 \mu\epsilon$  y en el pavimento con base granular fue de  $353 \mu\epsilon$ .

**Tabla 2.** Parámetros de calibración para capas delgadas de mezcla asfáltica sobre CTB.

|                          |                 |                 |
|--------------------------|-----------------|-----------------|
| Informe LM-PI-UMP-088-R1 | Diciembre, 2018 | Página 10 de 37 |
|--------------------------|-----------------|-----------------|



| Sección AC1 condición seca |               |       |       | Sección AC1 condición húmeda |               |       |       |
|----------------------------|---------------|-------|-------|------------------------------|---------------|-------|-------|
| Coeficientes               | Nivel de Daño |       |       | Coeficientes                 | Nivel de Daño |       |       |
|                            | 60%           | 70%   | 90%   |                              | 60%           | 70%   | 90%   |
| k <sub>1</sub>             | 0.040         | 0.061 | 0.124 | k <sub>1</sub>               | 0.004         | 0.006 | 0.012 |
| k <sub>2</sub>             | -3.006        |       |       | k <sub>2</sub>               | -2.784        |       |       |
| k <sub>3</sub>             | -1.503        |       |       | k <sub>3</sub>               | -1.392        |       |       |
| k <sub>4</sub>             | -0.099        |       |       | k <sub>4</sub>               | -0.092        |       |       |

**Tabla 3.** Parámetros de calibración para capas delgadas de mezcla asfáltica sobre base granular.

| Sección AC2 condición seca |               |         |         | Sección AC2 condición húmeda |               |        |        |
|----------------------------|---------------|---------|---------|------------------------------|---------------|--------|--------|
| Coeficientes               | Nivel de Daño |         |         | Coeficientes                 | Nivel de Daño |        |        |
|                            | 60%           | 70%     | 90%     |                              | 60%           | 70%    | 90%    |
| k <sub>1</sub>             | 276.892       | 425.623 | 857.887 | k <sub>1</sub>               | 10.161        | 15.784 | 32.365 |
| k <sub>2</sub>             | -2.983        |         |         | k <sub>2</sub>               | -3.056        |        |        |
| k <sub>3</sub>             | -1.492        |         |         | k <sub>3</sub>               | -1.528        |        |        |
| k <sub>4</sub>             | -0.098        |         |         | k <sub>4</sub>               | -0.100        |        |        |

### 2.3 Modelo de predicción de rugosidad superficial (Aguiar et al., 2016)

El desempeño funcional de una estructura de pavimento se puede cuantificar en términos de rugosidad de la superficie de la carretera, que a su vez está relacionada con la calidad de la conducción (Arhin et al., 2015) al transitarla.

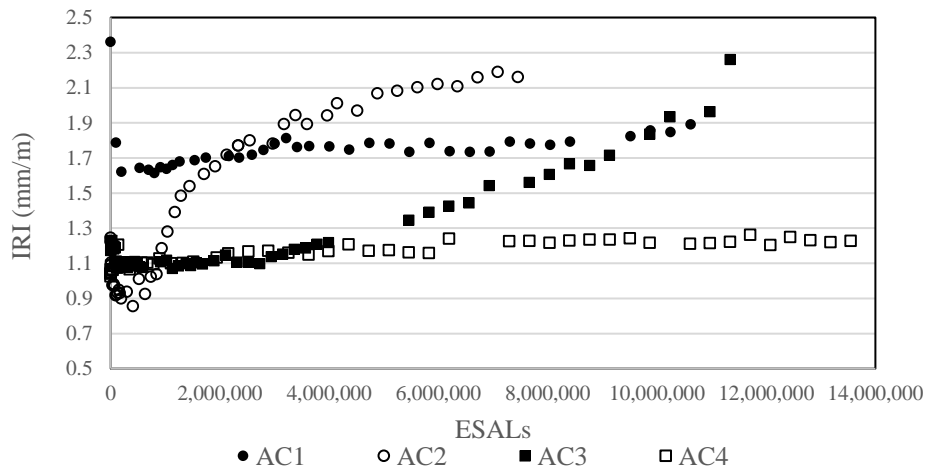
El modelado de la rugosidad, ya sea basado en parámetros subjetivos como la capacidad de servicio o diferentes indicadores, requiere cantidades significativas de datos sobre los deterioros del pavimento como la formación de roderas, parches, grietas, entre otros. En consecuencia, la rugosidad inicial después de la construcción, la evolución y el deterioro de la superficie en el tiempo deben documentarse adecuadamente.

Los ensayos acelerados permiten la recolección de datos de rugosidad de una forma rápida. Además, la rugosidad después de la construcción se puede monitorear y medir cuidadosamente, factor muy importante para determinar la evolución de la rugosidad.



Por lo tanto, el objetivo era calibrar un modelo de predicción de rugosidad superficial utilizando los datos recopilados del perfil, la deformación y la rigidez. Los datos de rugosidad promedio para las secciones de prueba evaluadas se muestran en la Figura 2. Los datos indican la rugosidad inicial después de la construcción, que para la mayoría de las secciones es del orden de 1 m / Km. La excepción corresponde a la sección AC1 que presentó una variabilidad de construcción significativa en las capas de CTB y CA y resultó en una mayor rugosidad inicial (más de 1.7 m / Km).

En general, los datos de rugosidad muestran una tendencia de crecimiento lineal con la excepción de la sección AC2 (estructura más débil: capa de CA delgada y base granular) que mostró una tasa decreciente. Para los primeros 1.5 millones de ejes equivalentes de carga aplicados (ESAL), la sección exhibió un mayor aumento de la rugosidad; sin embargo, después de estos la tasa de aumento de la rugosidad se vuelve lineal.



**Figura 2.** Rugosidad superficial en los distintos tramos de prueba

Una observación adicional de interés es que la tasa de crecimiento de la rugosidad para las secciones AC1 y AC4 es similar. Esto sirve como una verificación de que la rugosidad de la superficie depende en gran medida de la irregularidad de las capas subyacentes, que para estas secciones es similar (capa de CTB debajo de CA). Se produce un caso análogo para las secciones AC2 y AC3, que corresponden a las secciones de base granular.



Un modelo de rugosidad inicial se calibró mediante regresión lineal múltiple por mínimos cuadrados generalizados (GLS), para tener en cuenta la heterocedasticidad (aumento de la variabilidad con el tiempo). La forma estructural del modelo es la siguiente:

$$\Delta R_{it} = \beta_0 + \beta_1 T_i + \beta_2 S_{HMA,it} + \beta_3 S_{B,it} + \beta_4 S_{SB,it} + \beta_5 S_{SG,it} + \beta_6 R_{it} + \beta_7 N_{it} + e_{it} + k \quad [5]$$

Donde  $\Delta R_{it}$  corresponde al cambio en la rugosidad de la sección “i” en el tiempo “t” en m / Km en referencia a la rugosidad inicial después de la construcción, T representa el grosor inicial de cada capa en mm, S es la rigidez de cada capa de pavimento en MPa en el momento "t", R es el ahuellamiento total en mm en el tiempo "t", N es el número de ciclos de carga en los ESAL en el momento "t",  $\beta_1$  a  $\beta_7$  son los parámetros de calibración a estimar, k es el incremento en la rugosidad debida a la saturación y  $e_{it}$  son factores no observados que no son capturados por el modelo. Los parámetros estimados se muestran en la

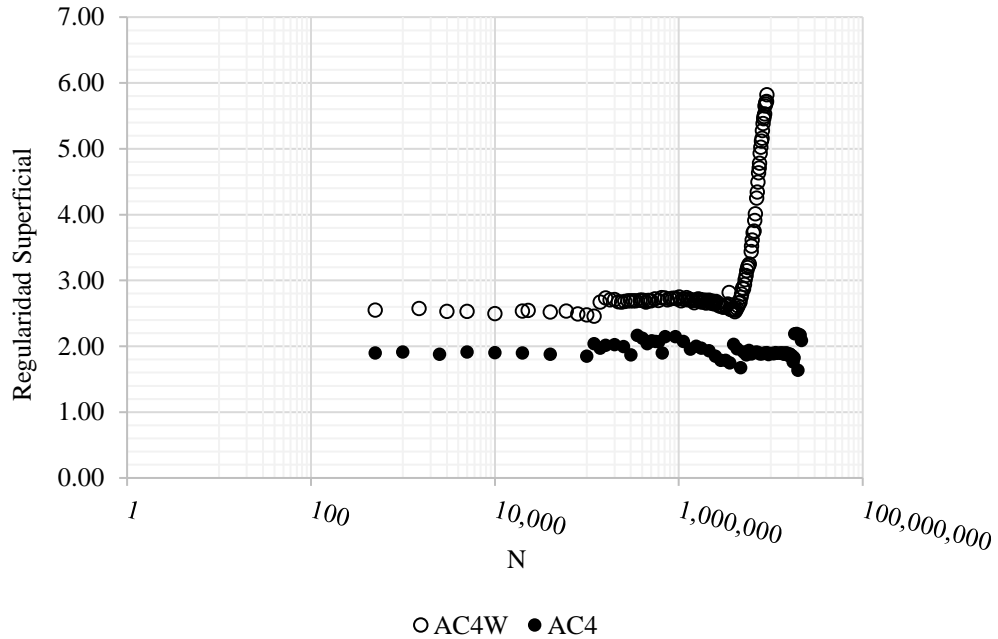


Tabla 5. El modelo busca explicar el daño incremental en las diferentes capas de la estructura del pavimento.

El parámetro k se encontró a través de los resultados obtenidos al inundar una pista por sección de prueba, la Tabla 4 muestra el aumento promedio en la rugosidad obtenida al saturar las capas granulares y la Figura 3 muestra un ejemplo de variación de la rugosidad en una sección de prueba.

Tabla 4. Incremento promedio de la regularidad superficial por sección de prueba

| Sección de prueba                        | AC1  | AC2  | AC3  | AC4  |
|--|------|------|------|------|
| Incremento en la regularidad superficial | 1.61 | 0.61 | 1.34 | 0.69 |
| Desviación estándar                      | 0.36 | 0.20 | 0.41 | 0.26 |

Figura 3. Variación en la regularidad debido a la saturación de las pistas

El modelo anterior intenta corregir la heterocedasticidad presente en el modelo de rugosidad debido a la correlación entre los regresores (variables independientes) y el término de error; sin embargo, se pueden obtener mejores predicciones de la rugosidad cuando se tiene en cuenta la heterogeneidad y el tipo de datos que se utilizan en el modelado de la rugosidad. Al estimar el modelo anterior, todos



los datos de series de tiempo (información del desempeño para una sección de pavimento dada a través del tiempo) y los datos de la sección transversal (diferentes secciones de pavimento en un momento dado) se han combinado o agrupado. En consecuencia, los datos corresponden a un conjunto de datos de panel: datos de series transversales y de tiempo (Prozzi y Madanat, 2003).

Un conjunto de datos de panel se refiere a un tipo de datos que combina una dimensión temporal con otra dimensión de sección transversal para cada unidad de estudio: las secciones de pavimento se monitorean a través del tiempo. Por lo tanto, el sesgo en el modelo se puede reducir tomando en cuenta las variables no observadas que difieren de una sección a otra, como las diferencias de materiales, la variabilidad de la construcción u otras variables específicas del sitio que no cambian con el tiempo (heterogeneidad).

El propósito del modelado basado en datos de panel es capturar la heterogeneidad no observable entre las variables y el tiempo. La aplicación de esta metodología permite el análisis de dos aspectos importantes que forman parte de una heterogeneidad no observable: i) los efectos individuales específicos, que son los que afectan de manera desigual a cada variable contenida en la muestra, que afectan directamente el comportamiento de su comportamiento, y ii) Efectos temporales, que son los que afectan por igual a todas las muestras individuales, pero varían con el tiempo (Mayorga y Muñoz, 2000).

En los modelos de datos del panel, el factor de tiempo se capturó por el número de ciclos de carga (aplicaciones ESAL) y las variables dependientes e independientes son las mismas que se usaron para generar el modelo GLS inicial (equ. 5). El modelo incluye un componente auto-recursivo (AR [1]) (en el momento "t", considera la rugosidad en el tiempo "t-1"). La forma general del modelo propuesto es la siguiente:

$$\Delta R_{it} = \alpha_i + \beta_1 T_i + \beta_2 S_{HMA,it} + \beta_3 S_{B,it} + \beta_4 S_{SB,it} + \beta_5 S_{SG,it} + \beta_6 R_{it} + \beta_7 N_{it} + \beta_8 \Delta IRI_{it-1} + u_i + e_{it} \quad [6]$$

Donde  $u_i$  representa los efectos no observables que difieren entre las muestras, pero no en el tiempo,  $e_{it}$  se refiere al error puramente aleatorio,  $\alpha_i$  y  $\beta_1$  a  $\beta_8$  son los parámetros de calibración.  $\Delta R_{it-1}$  corresponde al cambio en la rugosidad asociado al ciclo anterior (componente AR [1]).

El modelo se estimó mediante efectos fijos y técnicas de efectos aleatorios. El análisis de efectos fijos se realizó para estimar las intercepciones específicas de la sección (reconociendo que las variables



omitidas pueden llevar a cambios en los interceptos ya sea a lo largo del tiempo o entre unidades transversales) y, en el caso de los efectos aleatorios, la intersección del modelo se considera como una variable aleatoria que representa diferencias en las secciones de prueba asociadas a la heterogeneidad. Los resultados se muestran en la





UNIVERSIDAD DE  
COSTA RICA



LABORATORIO NACIONAL  
DE MATERIALES Y MODELOS ESTRUCTURALES

Tabla 5.



**Tabla 5.** Parámetros estimados para el modelo

| Variable        | GLS                    |                        |        | RE                     |                        |        | FE                     |                        |        |
|-----------------|------------------------|------------------------|--------|------------------------|------------------------|--------|------------------------|------------------------|--------|
|                 | Coefficiente           | S.E.                   | t-Stat | Coefficiente           | S.E.                   | t-Stat | Coefficiente           | S.E.                   | t-Stat |
| $T$             | 0.0025381              | 0.0013665              | 1.86   | 0.0026736              | 0.0036325              | 0.74   | -                      | -                      | -      |
| $S_{HMA}$       | -0.0001096             | 0.0000127              | -8.64  | -0.0002714             | 0.0000201              | -13.5  | -0.0003556             | 0.0000257              | -13.86 |
| $S_B$           | 0.000037               | 0.0000379              | 0.98   | -0.0014032             | 0.0001047              | -13.4  | -0.0018767             | 0.0001283              | -14.63 |
| $S_{SB}$        | 0.0011749              | 0.0002783              | 4.22   | -0.0004584             | 0.0002523              | -1.82  | 0.0004147              | 0.0003104              | 1.34   |
| $S_{SG}$        | 0.001502               | 0.0003211              | 4.68   | 0.0160145              | 0.0005682              | 28.18  | 0.0182281              | 0.000635               | 28.71  |
| $R$             | 0.0421306              | 0.004373               | 9.63   | 0.0838147              | 0.0019081              | 43.93  | 0.0868718              | 0.0019247              | 45.14  |
| $N$             | $2.06 \times 10^{-08}$ | $1.90 \times 10^{-09}$ | 10.88  | $2.79 \times 10^{-08}$ | $1.18 \times 10^{-09}$ | 23.73  | $2.91 \times 10^{-08}$ | $1.18 \times 10^{-09}$ | 24.68  |
| $\Delta R_{-1}$ | -                      | -                      | -      | 0.0026698              | 0.0004975              | 5.37   | 0.0025659              | 0.0004975              | 5.16   |
| Intercept       | -0.4222819             | 0.1346159              | -3.14  | -0.7306446             | 0.2377246              | -3.07  | -0.5723572             | 0.0295232              | -19.39 |

k Bases Granulares (Humedad Óptima= 0, Saturado= 1.06)

### 3 CONCLUSIONES PRELIMINARES

#### 3.1 Modelos de deformación permanente.

La calibración del modelo de deformación permanente de la CA se logró con el uso de un solo factor con errores razonablemente bajos. Sin embargo, los materiales granulares requirieron un conjunto completo de factores para disminuir el error; este tipo de calibración proporciona un coeficiente de variación mínimo y el error más bajo por medio de OLS.

La aplicación de estos modelos se limita a los materiales evaluados dentro de las pistas de prueba. Los resultados mostrados son el primer intento en Costa Rica de calibrar modelos basados en resultados de pruebas aceleradas a escala completa. El proceso se consideró exitoso, por lo tanto, se implementará y mejorará para futuros estudios.

#### 3.2 Modelo de fatiga

Se comprobó que la ecuación de regresión de 4PBB no coincide adecuadamente con los resultados obtenido a través del ensayo acelerado a escala real realizado en secciones de capa delgada de CA. Por esta razón, una calibración de campo bajo diferentes condiciones de humedad y diferentes estructuras de pavimentos es fundamental. Además, en el futuro deben considerarse otras condiciones para validar los resultados obtenidos en estas pruebas.



La calibración de los coeficientes del modelo de fatiga entre las secciones 4PBB y APT que se muestran en las Tablas 2 y 3 es satisfactoria para cada una de las pistas de prueba. Se requirieron diferentes parámetros de calibración para cada sección ya que el comportamiento para cada condición de prueba fue diferente, principalmente para las pistas de prueba con capa de CTB bajo niveles de humedad más altos.

Los ensayos en curso permitirán el análisis del comportamiento de capas gruesas de CA en diferentes condiciones de humedad.

Las secciones de prueba futuras ampliarán el rango en el nivel de esfuerzo utilizado.

### ***3.3 Modelos de rugosidad superficial***

Los modelos para predecir la rugosidad de la superficie se han desarrollado con base en los cambios en la rugosidad que resultan de los resultados de APT en varias pistas de prueba de pavimento. Los modelos se han definido como función de la carga de tráfico, pero también se basan en el deterioro estructural capturado por los cambios en la rigidez de la capa y las deformaciones permanentes de la estructura del pavimento. Los modelos propuestos mejoran la eficiencia en la contabilidad de la heterocedasticidad de los datos, e intentan reducir el sesgo de las variables omitidas debido a la heterogeneidad presente en los datos, como producto de las variables no observadas específicas de la sección. Esto último se puede lograr mediante el modelado basado en técnicas de datos de panel, a diferencia de los métodos OLS estándar.

En general, las estimaciones sugieren que los cambios en la rigidez de las diferentes capas de material, la deformación permanente de la estructura del pavimento y la carga de tráfico son fundamentales para predecir los cambios en la rugosidad. Se espera lo anterior, ya que se ha identificado históricamente que el deterioro del pavimento (ahuellamiento y agrietamiento) tiene un efecto importante en la rugosidad. Los modelos de datos de panel con un término recursivo automático también sugieren que existe una correlación significativa entre la rugosidad actual y las mediciones de rugosidad anteriores y, por lo tanto, deben tenerse en cuenta que el historial de rugosidad es fundamental para determinar la rugosidad futura.

Finalmente, debido a que los datos de rigidez no siempre están disponibles, los autores están investigando el uso de las deflexiones de la superficie como instrumentos para la rigidez del material.



Los datos de deflexión se pueden obtener fácilmente a partir de datos de recolectados con la viga y, por lo tanto, se pueden incluir en futuros modelos.

#### 4 REFERENCIAS

Aguiar-Moya, J. P., Camacho-Garita, E., Arias-Barrantes, E. & Loria-Salazar, L. G., Effect of Moisture on Full Scale Pavement Distress, International Society for Asphalt Pavements Conference (ISAP), Fortaleza, Brazil, 2018.

Aguiar-Moya, J.P., Corrales-Azofeifa, J.P, Loria-Salazar, L. G. & Elizondo-Arrieta, F., PaveLab and Heavy Vehicle Simulator (HVS) Implementation at the National Laboratory of Materials and Testing Models (LanammeUCR) of the University of Costa Rica. Accelerated Pavement Testing (APT) Conference. Davis, CA. 2012.

Aguiar-Moya, J.P., Torres-Linares, P., Camacho-Garita, E., Leiva-Villacorta, F. & Loria-Salazar, L.G., “Development of IRI models base on APT data”, The roles of accelerated pavement testing in pavement sustainability: Engineering, Environment and Economics, Springer International Publishing, 2016, pp. 799-813.

Arhin, S.A., Williams, L.N., Ribbiso, A., Anderson, M. Predicting Pavement Condition Index Using International Roughness Index in a Dense Urban Area. Journal of Civil Engineering Research, Vol. 5, No. 1, pp. 10 – 17. 2015.

Arias-Barrantes, E., Aguiar-Moya, J. P., Loría-Salazar, L. G. & Camacho-Garita, E., Calibration of Mechanistic-Empirical Fatigue Models Using the PaveLab Heavy Vehicle Simulator, ISAP Conference, International Society for Asphalt Pavements, 2018.

Hugo, F. & Epps Martin, A.L., “Significant Findings from Full-Scale Accelerated Pavement Testing”, NCHRP Synthesis 325, Washington, D.C., 2004.

Leiva-Villacorta, F., Aguiar-Moya, J. P., Loría-Salazar, L. G. & Navas-Carro, A., Implementación de ensayos acelerados de pavimentos en Costa Rica con el equipo HVS, Congreso Ibero – Latinoamericano del Asfalto, CILA XVII, 2013.



Leiva-Villacorta, F., Aguiar-Moya, J. P. & Loria-Salazar, L. G., Ensayos Acelerados de Pavimentos con el equipo HVS: Implementación y Primeros Resultados, 11vo Congreso Internacional Gestión y Patrimonio Vial, Chile. 2014.

Leiva-Villacorta, F., Aguiar-Moya, J. P. & Loría-Salazar, L. G., Accelerated pavement testing first results at the LanammeUCR APT facility, Transportation Research Board 94th Annual Meeting Proceedings, Washington, DC, 2015.

Leiva-Villacorta, F., Vargas-Nordcbeck, A., Aguiar-Moya, J. P. & Loria-Salazar, L. G., “Development and Calibration of permanent deformation models”, The roles of accelerated pavement testing in pavement sustainability: Engineering, Environment and Economics, Springer International Publishing, 2016, pp. 573-587.

Leiva-Villacorta, F., Vargas-Nordcbeck, A., Aguiar-Moya, J. P. & Loría-Salazar, L. G., “Influence of Tire Footprint Area and Pressure Distribution on Pavement Responses”, The Roles of Accelerated Pavement Testing in Pavement Sustainability: Engineering, Environment and Economics, Springer International Publishing, 2016, pp. 685-700.

Loría-Salazar, L. G., Leiva-Villacorta, F., Aguiar-Moya, J. P. & Camacho-Garita, E., Comparación de desempeño en pista de ensayos acelerados a escala natural de dos estructuras de pavimento semi-rígidas, Congreso Ibero – Latinoamericano del Asfalto, CILA XVIII, 2015.

Mayorga, M. & Muñoz, E. The technique of panel data: A Guide for use and interpretation. Central Bank of Costa Rica, Economic Division, DIE-NT-05-2000, San José, Costa Rica, 2000.

Prozzi, J.A. & Madanat, S.M., “Incremental nonlinear model for predicting pavement serviceability”, Journal of Transportation Engineering, Volume 129, Issue 6, 2003, pp. 635-641.

Solano, J. & Villalobos, R., Regiones y Subregiones Climáticas de Costa Rica, Instituto Meteorológico Nacional, Gestión de Desarrollo, San José, Costa Rica, 2000.

Trejos-Castillo, C., Ávila-Esquivel, T. Aguiar-Moya, J.P. & Loría-Salazar, L. G., Costa Rica’s Mechanical Empirical Design Software for Flexible Pavements, CRME, Transportation Research Board 97th Annual Meeting, 2018.

Ullidtz, P., Pavement Analysis. Development in civil engineering, Vol. 19, Elsevier, 1987.



UNIVERSIDAD DE  
COSTA RICA



LABORATORIO NACIONAL  
DE MATERIALES Y MODELOS ESTRUCTURALES

Von Quintus, H. L., Darter, M. L. & Mallela, J., Recommended practice for local calibration of the ME pavement design guide, Applied Research Associates, Inc. Transportation Sector, 2007.



ANEXO A

UNIVERSIDAD DE COSTA RICA  
VICERRECTORÍA DE INVESTIGACIÓN  
Unidad de Gestión de Proyectos  
INFORME PARCIAL

1. Información básica:

|  |  |                 |    |
|--|--|-----------------|----|
| Código:                                    | B5A43  |                 |    |
| Nombre del proyecto, actividad o programa: | Primer ensayo acelerado de pavimentos a escala natural |                 |    |
| Programa de adscripción:                   | Ley 8114 Impuesto a combustibles                       |                 |    |
| Unidad base                                | LanammeUCR   | Unidad de apoyo | NA |
| Período vigencia:                          | Del 05 de enero de 2015 al 01 de diciembre de 2019     |                 |    |
| Fecha de presentación:                     | Diciembre 2018   |                 |    |

2. Descripción general:

Resumen ejecutivo (entre 200 y 500 palabras), incluya objetivo, metas, método y resultados esperados:

La implementación del programa PaveLab, permite la recolección de valiosa información en tiempo real de las respuestas mecánicas y físicas de los materiales que componen una estructura de pavimento. El principal producto de este proceso de recolección de información y estudio será una robusta base de datos que permita generar modelos matemáticos para predicción del desempeño de las estructuras de pavimento. Con la información recolectada a través de los años, se colaborará con el desarrollo e implementación de importantes herramientas del diseño de pavimentos, desde adaptar conceptos de diseño de materiales de otros países, hasta el desarrollo de métodos de diseño propios de Costa Rica.

El objetivo de este informe es entonces el de presentar un resumen de los modelos matemáticos que se ha logrado desarrollar a la fecha, los cuales incluyen la predicción de formación permanente en todas las capas del pavimento, la predicción de la vida a la fatiga en la capa de mezcla asfáltica y un modelo para predecir el cambio en la rugosidad superficial de las estructuras de pavimento.

La aplicación de estos modelos se limita a los materiales evaluados dentro de las pistas de prueba y a los datos obtenidos a la fecha de la realización de los mismos.

Los resultados mostrados son el primer intento en Costa Rica de calibrar modelos basados en resultados de pruebas aceleradas a escala completa.

La meta es poder calibrar los modelos con todos los datos obtenidos de este primer ensayo.

3. Desarrollo y ejecución (qué se hizo y cómo):

|                          |                 |                 |
|--------------------------|-----------------|-----------------|
| Informe LM-PI-UMP-088-R1 | Diciembre, 2018 | Página 23 de 37 |
|--------------------------|-----------------|-----------------|



| Objetivos específicos y metas  | % de logro | Actividades desarrolladas   | Dificultades y formas de resolverlas |
|--|------------|---|--------------------------------------|
| <p><b>OBJETIVO ESPECÍFICO: 04</b><br/>Desarrollar modelos de transferencia para convertir la respuesta estructural del pavimento en medidas de daño o desempeño.<br/><b>METAS:</b><br/>1) Elaborar modelos matemáticos para la predicción del deterioro.<br/><b>Indicador:</b> Predicción adecuada de lo que se observa en el campo versus lo que predicen los modelos calibrados.</p> | 50%        | Análisis de la información obtenida a la fecha.<br>Realización de informes parciales. | NA                                   |

\*Agregar las celdas que sean necesarias

#### 4. Resultados globales (utilice la cantidad de palabras necesarias):

|  |
|--|
| Resultados principales:<br>Los resultados principales de esta investigación son: Desarrollar modelos de desempeño de los tramos de pavimento.  |
| Impacto del proyecto en los ámbitos que corresponda:<br>El impacto de este proyecto se espera que sea en el campo de la infraestructura vial del país para provocar que se mejore el diseño y gestión de los pavimentos. |
| Beneficios para la unidad académica y la Universidad de Costa Rica:<br>Los beneficios son: Acción social y Transferencia de tecnología.  |
| Interrogantes y nuevas investigaciones:<br>Producto de los datos obtenidos con este proyecto existe mucha apertura para desarrollar investigaciones paralelas en el ámbito de la gestión de pavimentos.                  |
| Actividades pendientes:<br>NA  |

#### 5. Producción académica (adjuntar anexos):

|  |
|--|
| Referencias de los artículos u otros productos que se proyectan:<br>NA     |
| Títulos de las ponencias y participación en eventos, lugar y fechas:<br>NA |
| Impacto en procesos de enseñanza aprendizaje:<br>NA                        |
| Otros productos:<br>NA   |





**6. Trabajos de graduación y participación estudiantil:**

| Asistentes | Labores ejecutadas |
|------------|--------------------|
| NA         | NA                 |

\*Agregar las celdas que sean necesarias

| Título de las tesis involucradas en el proyecto | Nombre de los/las estudiantes | Grado |
|---|-------------------------------|-------|
| NA  | NA                            | NA    |

\*Agregar las celdas que sean necesarias

**7. Comentarios generales:**

Ninguno

**8. Informe financiero (adjuntar informe respectivo):**

Comentarios:  
Ley 8114 de Simplificación y Eficiencia Tributaria

**9. Aspectos éticos (adjuntar la “Aplicación para revisión continua o para cerrar el estudio” del CEC):**

Comentarios:  
Ninguno

**10. Autorización para incorporar el informe final ejecutivo en los repositorios de la UCR.**

(x) SI ( ) NO Autorizo a la Vicerrectoría de Investigación para incluir en los repositorios institucionales el anterior informe.

(x) SI ( ) NO Autorizo a la Vicerrectoría de Investigación para incluir en los repositorios institucionales los productos académicos adjuntos al informe.



UNIVERSIDAD DE  
COSTA RICA



LABORATORIO NACIONAL  
DE MATERIALES Y MODELOS ESTRUCTURALES

11 de diciembre de 2018

Ing. Tania Ávila Esquivel

Fecha

Firma

Investigador(a) principal

Versión 20-11-2017.

|                          |                 |                 |
|--------------------------|-----------------|-----------------|
| Informe LM-PI-UMP-088-R1 | Diciembre, 2018 | Página 26 de 37 |
|--------------------------|-----------------|-----------------|

Tel.: +506 2511-2500 | Fax: +506 2511-4440 | [direccion.lanamme@ucr.ac.cr](mailto:direccion.lanamme@ucr.ac.cr) | [www.lanamme.ucr.ac.cr](http://www.lanamme.ucr.ac.cr)  
Dirección: LanammeUCR, Ciudad de la Investigación, Universidad de Costa Rica.  
Código Postal: 11501-2060, San Pedro de Montes de Oca, San José, Costa Rica.



UNIVERSIDAD DE  
COSTA RICA



LABORATORIO NACIONAL  
DE MATERIALES Y MODELOS ESTRUCTURALES

## ANEXO B



UNIVERSIDAD DE COSTA RICA  
VICERRECTORÍA DE INVESTIGACIÓN  
COMITÉ ÉTICO CIENTIFICO

**LanammeUCR**

Teléfonos: (506) 2511-5006 Telefax: (506) 224-9367

### Aplicación para revisión continua o para cerrar el estudio\*

Por favor complete TODAS las secciones ya sea en el caso de revisión continua o cierre del estudio

Proyecto #: B5A43

Fecha de expiración de la vigencia de la revisión inicial otorgada por el CEC: 01 de diciembre de 2019

Investigador(a) principal: Ing. Tania Ávila Esquivel

Título de la investigación: Primer ensayo acelerado de pavimentos a escala natural

#### 1. ESTADO DE LA INVESTIGACIÓN

*Marque la opción que describe mejor el estado actual de esta investigación:*

- A la fecha no se ha enrolado ningún participante.
- Continúa el reclutamiento de participantes nuevos / revisión de registros / recolección de muestras.
- Se acabó el reclutamiento, pero los participantes permanecen recibiendo intervenciones relacionadas con la investigación.



- Ya no se recluta más y los participantes completaron las intervenciones relacionadas con la investigación. El estudio permanece activo solamente para darles seguimiento a largo plazo.
- El reclutamiento se ha cerrado permanentemente, los participantes han completado todas las intervenciones relacionadas con el estudio y se ha completado el seguimiento a largo plazo. Las actividades de investigación remanentes se limitan a análisis de datos que puede requerir contacto con información sobre la que usted normalmente no tiene acceso, tal como registros médicos, académicos, especímenes de laboratorio, patología, etc.
- Estudio cerrado. El reclutamiento y el seguimiento se han completado y no se anticipa un contacto futuro con los participantes / registros / especímenes, para obtener información a la que usted normalmente no tiene acceso.

## 2. CANTIDAD DE PARTICIPANTES

*Complete con la información correspondiente:*

- A. Máximo número de participantes, a quienes se les va a solicitar consentimiento para participar y que el CEC aprobó previamente, por toda la vigencia de este estudio:  
Edgar Camacho Garita, investigadora principal, sin carga académica  
José Pablo Aguiar Moya, investigador asociado, sin carga académica  
Luis Guillermo Loría Salazar, investigador asociado, sin carga académica
- B. Número total de participantes que han consentido a la fecha:  
3
- C. Número total de participantes que luego de firmar el consentimiento, se han retirado por cuenta propia o han sido retirados por no satisfacer criterios de inclusión, a la fecha:  
1
- D. Total que ha consentido desde la última revisión continua:  
3
- E. Total que ha consentido pero se ha retirado por cuenta propia o han sido retirados por no satisfacer criterios de inclusión, desde la última revisión continua:  
Ninguna



### 3. RESUMEN DEL AVANCE DENTRO DEL ÚLTIMO PERIODO DE APROBACIÓN DEL CEC

*Conteste todas las preguntas, para las que no aplican a su estudio indique NO.*

- A.  SI  NO ¿El estudio está en la fase de reclutamiento de participantes?
- B.  SI  NO ¿El estudio ha estado reclutando participantes? *Si la respuesta es NO, pero la de A. fue SI, incluya un resumen describiendo las razones por las cuales no se ha producido.*
- C.  SI  NO ¿Alguno de los participantes se ha retirado del estudio, ha sido sacado o se ha perdido? *Si la respuesta es SI, incluya un resumen narrativo describiendo las razones para esto.*

El Ingeniero Fabricio Leiva Villacorta dejó de laborar para la institución desde Agosto de 2016 debido a que el mismo presentó su renuncia y se retiró de la institución.

- D.  SI  NO ¿Algún participante se ha quejado de la investigación? *Si la respuesta es SI, incluya un resumen narrativo de las quejas recibidas.*
- E.  SI  NO ¿Se ha publicado literatura científica relevante para esta investigación, durante este periodo, que pueda alterar las apreciaciones iniciales de riesgos o de beneficios asociados a este estudio? *Si la respuesta es SI, adjunte copias de esta publicación y un resumen narrativo.*
- F.  SI  NO ¿Ha habido hallazgos preliminares, incluyendo informes interinos, manuscritos, resúmenes, publicaciones y hallazgos clínicos, que puedan tener impacto sobre el estudio? *Si la respuesta es SI, adjunte copias de estos informes y un resumen narrativo. Anote cualquier evento o descubrimiento que pueda alterar la razón riesgo/beneficio del estudio, incluyendo informes favorables.*
- G.  SI  NO ¿Se han realizado informes de avance del estudio como los que se envían a la Vicerrectoría de Investigación, a las agencias financiadoras y otros? *En caso afirmativo, adjunte las copias y un resumen narrativo.*
- H.  SI  NO ¿Se han realizado informes de avance del estudio por parte de otros investigadores participantes, fuera de la UCR, para enviar a sus respectivas instituciones (estudios multicéntricos y otros)? *En caso afirmativo, adjunte las copias y un resumen narrativo.*



- I. SI NO ¿Se ha descubierto alguna otra información relevante a este estudio, sobre todo relacionada con los posibles riesgos y beneficios asociados al mismo? *En caso afirmativo, adjunte copias de esta información y un resumen narrativo.*
- J. SI NO ¿Se ha detectado algún problema no anticipado, relacionado con riesgos para los participantes u otras personas, en la UCR o algún otro sitio donde se desarrolle el estudio? *En caso afirmativo, enumere y describa estos problemas en un resumen narrativo.*
- K. SI NO ¿Se han reportado al CEC todos los problemas no anticipados que conllevan riesgo para los participantes u otras personas, que requieren ser informados con prontitud? *Si la respuesta es negativa, envíe al CEC la información requerida antes de que transcurran 5 días hábiles. Indique si estos eventos o problemas cambiaron la razón riesgo/beneficio o requirieron cambios en el documento de consentimiento informado.*
- L. SI NO ¿El perfil de reacciones adversas experimentado por los participantes difiere del esperado? (reacción adversa/evento adverso significa cualquier acontecimiento desfavorable e indeseado, tanto serio como no serio, esperado o inesperado, relacionado o no con el estudio). *Si la respuesta es afirmativa, adjunte un resumen narrativo describiendo las diferencias entre el perfil de reacciones adversas esperado y el encontrado.*
- M. SI NO ¿Se ha asignado a un Comité Independiente de Monitorización de Datos la revisión periódica de los riesgos para los participantes? *Si la respuesta es afirmativa indique la frecuencia con que se realiza esta tarea y un resumen narrativo de sus informes.*
- N. SI NO ¿Los participantes han experimentado algún beneficio derivado del estudio? *En caso afirmativo, adjunte un resumen narrativo describiendo estos beneficios.*

#### 4. INFORMACIÓN SOBRE EL DOCUMENTO DE CONSENTIMIENTO INFORMADO

SI NO ¿El CEC requiere el uso de un documento escrito de consentimiento informado para la ejecución de este estudio?

*En caso afirmativo, adjunte una copia del documento aprobado y sellado que ha estado en uso Y otra copia idéntica y limpia para volver a sellar una vez aprobada la revisión continua, para ser usado durante el siguiente periodo de aprobación (excepto si ya concluyó el reclutamiento).*



5. INFORMACIÓN SOBRE CONTACTOS

**Investigador principal:**

|           |                |             |                               |
|-----------|----------------|-------------|-------------------------------|
| Nombre:   | Apellido:      | Cédula #    | Unidad académica:             |
| Tania     | Ávila Esquivel | 1-1295-0236 | LanammeUCR                    |
| Teléfono: | Celular:       | Fax:        | Email:                        |
| 25112794  | 88106902       | 25114440    | tania.avilaesquivel@ucr.ac.cr |

**Profesor(a) tutor(a)** (complete si el investigador principal es estudiante):

|           |           |          |                   |
|-----------|-----------|----------|-------------------|
| Nombre:   | Apellido: | Cédula # | Unidad académica: |
| NA        | NA        | NA       | NA                |
| Teléfono: | Celular:  | Fax:     | Email:            |
| NA        | NA        | NA       | NA                |

**Persona encargada del contacto con el estudio** (complete si el contacto primario no es alguno de los anteriores):

|           |           |          |                   |
|-----------|-----------|----------|-------------------|
| Nombre:   | Apellido: | Cédula # | Unidad académica: |
|           |           |          |                   |
| Teléfono: | Celular:  | Fax:     | Email:            |
|           |           |          |                   |

6. DECLARACIÓN SOBRE CONFLICTOS DE INTERESES DEL INVESTIGADOR(A)

SI  NO ¿Se ha desarrollado algún nuevo conflicto de intereses para el investigador(a) principal o para el personal clave del estudio? *En caso afirmativo adjunte una narración detallada de las características del conflicto cuando los investigadores, personal clave o cualquier otra persona responsable del diseño, ejecución o reporte del estudio tiene un interés financiero en, o actúa en representación de, una entidad externa cuyos intereses financieros, pareciera razonable pensar, que podrían afectarse por la investigación.*

7. DECLARACIÓN DEL INVESTIGADOR PRINCIPAL

|                          |                 |                 |
|--------------------------|-----------------|-----------------|
| Informe LM-PI-UMP-088-R1 | Diciembre, 2018 | Página 31 de 37 |
|--------------------------|-----------------|-----------------|



*Lea cuidadosamente esta declaración antes de firmar.*

Adicionalmente a las respuestas anteriores, yo confirmo que el documento de consentimiento informado en uso, aprobado por el CEC, ha sido firmado, fechado y guardado en mis archivos para cada participante enrolado en este estudio y una copia del mismo fue entregada a la persona que lo firmó como participante (cuando el uso de documento de consentimiento informado fue requerido). Asimismo, confirmo que no se han realizado cambios en los procedimientos del estudio o en el documento de consentimiento sin previa aprobación por parte del CEC.

11 de diciembre de 2018

Firma del investigador(a) principal

Fecha

\*Adaptado de las fórmulas #1101 y #1129 del IRB de la Universidad de Vanderbilt.





## ANEXO C

**UNIVERSIDAD DE COSTA RICA**  
**VICERRECTORÍA DE INVESTIGACIÓN**

Unidad de Gestión de Proyectos

Unidad de Gestión de Calidad

Tel.: 2511-5845

### **Formulario para la evaluación de informes parciales, finales y solicitud de ampliación de vigencia**

#### **Instrucciones**

Los informes parciales, finales y las solicitudes de ampliación de vigencia se consideran parte de la evaluación de seguimiento; en ellos se revisan los resultados y productos alcanzados en un momento determinado, también las circunstancias y condiciones en que se produjeron. Las evaluaciones obtenidas son utilizadas como insumos para la asignación de recursos, tanto para la continuación de ejecución como para las propuestas nuevas por parte de los(as) investigadores(as) encargados(as).

Los informes y solicitudes contemplan cuatro componentes: (I) Información sustantiva de la propuesta, (II) una autoevaluación de parte del/los(as) investigadores(as), (III) una evaluación de los alcances y logros reportados y (IV) una evaluación del informe.

Los informes parciales y las solicitudes de ampliación de vigencia deben ser evaluados por las Comisiones de Investigación y/o los Consejos Científicos y aprobados por la Dirección de la Unidad Académica. En el caso de los informes finales de los proyectos de investigación, éstos deben ser evaluados adicionalmente por pares académicos, internos y/o externos a criterio de la Comisión de Investigación o del Consejo Científico. Por su parte, la Vicerrectoría de Investigación evalúa tanto

|                          |                 |                 |
|--------------------------|-----------------|-----------------|
| Informe LM-PI-UMP-088-R1 | Diciembre, 2018 | Página 33 de 37 |
|--------------------------|-----------------|-----------------|



los informes parciales como los finales, siendo la entidad que en última instancia aprueba éstos y las solicitudes de ampliación de vigencia.

Las dimensiones a evaluar son las siguientes:

*Autoevaluación:* Evaluación de las condiciones, Evaluación de los colaboradores, Evaluación del apoyo institucional recibido.

*Evaluación de alcances y logros:* Solidez de las evidencias y resultados reportados, Productividad, Impacto y Visibilidad potencial.

*Evaluación del informe:* Exhaustividad, Claridad, Rigurosidad.

A continuación encontrará cuatro apartados con los ítems correspondientes a cada una de las dimensiones a evaluar. Para cada ítem considere el informe y califíquelo luego en una escala de 1 a 100. En donde 0 indica una muy mala calificación y 100 una excelente calificación. En caso de que al evaluar considere que el componente evaluado en el ítem no debería ser aplicado a la propuesta, marque con una X en el espacio "No aplica".



## TITULO DE LA PROPUESTA:

Primer ensayo acelerado de pavimentos a escala natural

### I. Autoevaluación

Este apartado debe ser llenado por el/la/las investigador(a)(as).

| Criterio   | Calificación | No aplica |
|--|--------------|-----------|
| 1. Evaluación de la ejecución de la propuesta en general.                          | 100          |           |
| 2. Valoración del aporte de los colaboradores no académicos.                       | 100          |           |
| 3. Evaluación del nivel de integración de los colaboradores académicos.            |              | X         |
| 4. Evaluación del trabajo de los/las asistentes.                                   | 100          |           |
| 5. Valoración del apoyo administrativo de la unidad académica para esta propuesta. | 100          |           |
| 6. Valoración del apoyo de la Vicerrectoría de Investigación para esta propuesta.  |              | X         |
| 7. Valoración del aporte de otras instancias universitarias para esta propuesta.   |              | X         |
| 8. Valoración el apoyo de FUNDEVI para esta propuesta.                             |              | X         |
| 9. Grado de satisfacción con los resultados y logros alcanzados.                   | 100          |           |
| Calificación promedio (sin considerar los no aplica)                               | 100          |           |



## TITULO DE LA PROPUESTA:

Primer ensayo acelerado de pavimentos a escala natural

### II. Evaluación de alcances y logros

| Criterio  | Calificación | No aplica |
|---|--------------|-----------|
| 10. Los logros y alcances académicos del trabajo realizado.   |              |           |
| 11. Los productos académicos aportados.   |              |           |
| 12. La visibilidad potencial de los resultados y productos.   |              |           |
| 13. El impacto potencial de los resultados y productos en los procesos de enseñanza aprendizaje.          |              |           |
| 14. El impacto potencial de los resultados y productos en la unidad académica de adscripción.             |              |           |
| 15. El impacto potencial de los resultados y productos en el área disciplinar de adscripción del trabajo. |              |           |
| 16. El impacto potencial de los resultados y productos en el ámbito extraacadémico.                       |              |           |
| Calificación promedio (sin considerar los no aplica)  |              |           |

### III. Evaluación del informe

| Criterio  | Calificación | No aplica |
|---|--------------|-----------|
| 17. Grado de exhaustividad en la presentación de resultados y logros.             |              |           |
| 18. Grado de claridad en la presentación de los resultados y logros.              |              |           |
| 19. Grado de rigurosidad argumentativa en la presentación de resultados y logros. |              |           |
| 20. Evidencias aportadas para sustentar conclusiones y argumentos.                |              |           |
| Calificación promedio (sin considerar los no aplica)                              |              |           |



#### IV. Evaluación de Vicerrectoría de Investigación

| Criterio  | Calificación | No aplica |
|---|--------------|-----------|
| 21. Puntualidad en la presentación de informes.       |              |           |
| 22. Ejecución y uso de los recursos financieros.      |              |           |
| 23. Productos académicos logrados versus proyectados. |              |           |
| 24. Visibilidad de resultados y logros.               |              |           |
| 25. Impacto alcanzado versus proyectado.              |              |           |
| Calificación promedio (sin considerar los no aplica)  |              |           |
| Calificación global                                   |              |           |

Versión 12-09-2012.