

Evaluación del desempeño de los pavimentos rígidos en Costa Rica

Performance evaluation of rigid pavements in Costa Rica

María Paula Montes de Oca Hidalgo

Escuela de Ingeniería Civil
Universidad de Costa Rica
San José, Costa Rica
mpaulamh@gmail.com

Tania Ávila Esquivel

Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales
Universidad de Costa Rica
San José, Costa Rica
tania.avilaesquivel@ucr.ac.cr

Wendy Sequeira Rojas

Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales
Universidad de Costa Rica
San José, Costa Rica
wendy.sequeira@ucr.ac.cr

José Pablo Aguiar Moya

Escuela de Ingeniería Civil
Universidad de Costa Rica
San José, Costa Rica
jose.aguiar@ucr.ac.cr

Fecha de recepción: 11 de mayo de 2021 / **Fecha de aprobación:** 09 de julio de 2021

RESUMEN

Se reconoce la necesidad de conocer los deterioros típicos de los pavimentos rígidos en Costa Rica, ya que no existen técnicas de diseño ni información a nivel constructivo que tomen en cuenta las variables climatológicas ni de tránsito del país. Con el objetivo de complementar la información existente, se propone una evaluación para determinar los deterioros típicos de los pavimentos rígidos en Costa Rica.

La evaluación de los pavimentos rígidos se basó en una auscultación visual y en un levantamiento automático mediante el Geo 3D. Inicialmente, se realizó el levantamiento de los deterioros de cada uno de los siete proyectos, los cuales se utilizaron para calcular el PCI (del inglés *Pavement Condition Index*) de cada uno y determinar los deterioros típicos. Luego, se identificaron las características climatológicas y de tránsito de cada proyecto y se relacionaron con los deterioros. Finalmente, se crearon los modelos iniciales de predicción de deterioros con las relaciones obtenidas.

Se observó que los deterioros típicos de Costa Rica son el daño de sello de junta (21,22 %), desprendimiento de agregados (13,58 %), pulimiento de agregado (13,10 %) y agrietamiento lineal (7,08 %), además los deterioros se relacionan con la precipitación, temperatura y ejes equivalentes. Por lo tanto, se recomienda tomar como base los resultados de esta investigación para futuros modelos de predicción de deterioros.

Palabras clave: Deterioros típicos, PCI, auscultación visual, pavimento rígido.

ABSTRACT

The need to understand the typical deterioration of rigid pavements in Costa Rica is recognized, since there are no design techniques or information at a constructive level that considers the country's climatological and traffic variables. To complement the existing information, an evaluation is proposed to determine the typical deterioration of rigid pavements in Costa Rica.

The evaluation of rigid pavements was based on a visual auscultation and an automatic survey using Geo 3D. Initially, the deterioration of each of the seven projects was surveyed and used to calculate their PCI (Pavement Condition Index) and to determine the typical deterioration. Then, the climatological and traffic characteristics of each project were identified and related to the deteriorations. Finally, the relationships obtained were used to create the initial deterioration prediction models.

It was observed that the typical deteriorations in Costa Rica are joint seal damage (21,22 %), aggregate spalling (13,58 %), aggregate polishing (13,10 %) and linear cracking (7,08 %). In addition, the deteriorations are related to precipitation, temperature, and equivalent axis. Therefore, it is recommended that the results of this research serve as a basis for future deterioration prediction models.

Keywords: *Typical deterioration, PCI, visual auscultation, rigid pavement.*

INTRODUCCIÓN

El presente artículo se basa en el trabajo final de graduación titulado: “Evaluación del desempeño de los pavimentos rígidos en Costa Rica” (Montes de Oca, 2020). En este documento se abarcan los principales resultados de los deterioros encontrados en los siete proyectos de pavimento rígido que se evaluaron, los cuales fueron: Cañas – Liberia, San Francisco – La Colina, Zapote – San Francisco, Universal – La Salle, las losas cortas de Cartago, Guadalupe – El Alto y Limal – Tempisque. La necesidad de la investigación nace a partir del aumento de pavimentos de concreto que se han construido tanto en la Red Vial Nacional, como en las vías municipales. Es importante mencionar que, para diseñarlos, se siguen utilizando metodologías extranjeras, las cuales no consideran las condiciones climáticas ni de tránsito propias de Costa Rica. Es por esto que instituciones como el LanammeUCR se han dado a la tarea desde hace varios años de ir generando los insumos necesarios para desarrollar una metodología de diseño mecánico empírica aplicable a nuestro país.

En los últimos años se ha presentado una constante queja de la población costarricense con respecto al mal estado de los pavimentos de las vías nacionales. La presencia de deterioros y fallas tempranas se ha vuelto uno de los principales problemas a la hora de realizar un diseño de pavimentos, ya que los deterioros se toman en cuenta en los diseños a través de la aplicación de modelos de desempeño que no consideran las condiciones típicas del país y esto impide predecir con mayor precisión cuándo va a fallar el pavimento.

Existe un desconocimiento a nivel nacional de cuál es el tipo de deterioro típico en pavimentos rígidos para las condiciones climatológicas y de tránsito de Costa Rica, es por eso que no hay claridad si el modelo existente de fatiga para pavimentos rígidos es el adecuado para aplicarlo en la mayoría de los proyectos, puesto que, si no lo es, se debe desarrollar un modelo para otro tipo de deterioro y, en caso de que sí lo sea, puede requerir una calibración para que sea el adecuado. Al no contar con un modelo aplicable en Costa Rica, se presentan los deterioros y fallas tempranas que se mencionan con anterioridad, lo que genera un costo mayor a futuro por darle un mantenimiento anticipado a los pavimentos (LanammeUCR, 2017).

METODOLOGÍA

Para el presente trabajo se utilizó la metodología de la norma ASTM D6433-20 (2020) para determinar el PCI (del inglés *Pavement Condition Index*) de los proyectos evaluados. Algunos de los levantamientos se realizaron mediante la auscultación visual mientras que otros se realizaron utilizando el Geo 3D. Sin embargo, en ambos casos se utilizaron sistemas de información geográfica para registrar los deterioros existentes en cada proyecto. Asimismo, es importante mencionar que se utilizaron los valores de temperatura y precipitación proporcionados por el Instituto Meteorológico Nacional (Instituto Meteorológico Nacional, 2020) y los valores del Tránsito Promedio Diario registrados en las bases de datos del Ministerio de Obras Públicas y Transportes del año 2020 (Ministerio de Obras Públicas y Transportes, 2020) para realizar las regresiones lineales y las correlaciones entre las variables. Por último, con el levantamiento de los deterioros y con la información de tránsito, clima y estimaciones recopilada, se procedió a analizar estadísticamente la información, y generar los modelos de regresión lineal que correlacionan cada una de las variables estudiadas con los deterioros observados.

A continuación, se ejemplifica la metodología que se utilizó para realizar el levantamiento de los deterioros en cada uno de los proyectos. El levantamiento de los deterioros en Universal – La Salle (Ruta Nacional 167) se realizó mediante la metodología de la norma ASTM D6433-20 de auscultación visual. En este proyecto se utilizaron 19 unidades de muestreo por sentido, cada una con 20 losas de 3,5 m de longitud, la ubicación de las unidades de muestreo se puede observar en la Figura 1. El total de deterioros se muestra en el Cuadro 1.



Figura 1. Unidades de muestreo

Cuadro 1. Total de deterioros en La Salle – Universal

Losas evaluadas		760	
Deterioro		Cantidad de deterioros	%
22	Grieta de Esquina	3	0,4
26	Daño en sello de junta	330	43,4
28	Agrietamiento Lineal	3	0,4
29	Parches (Grandes)	3	0,4
31	Pulimiento de Agregado	167	22,0
32	Desprendimiento de Agregado	39	5,1
37	Grietas por contracción	1	0,1
38	Fractura de junta	27	3,6
39	Fractura de esquina	131	17,2
-	Sin deterioro	-	7,4

Evaluación del pavimento rígido

Para definir el número mínimo de unidades de muestreo a analizar para pavimentos rígidos se utilizó el método establecido en la norma ASTM D6433-20. Este proceso se realizó para todos los proyectos, sin embargo, es importante mencionar que los levantamientos de los deterioros de los proyectos Cañas – Liberia (Ruta Nacional 1), Zapote – San Francisco (Ruta Nacional 204) y San Francisco – La Colina (Ruta Nacional 211) fueron facilitados por la Unidad de Gestión y Evaluación de la Red Vial Nacional del LanammeUCR.

Datos obtenidos

A continuación, se muestra el total de deterioros registrados en todos los proyectos (Cuadro 2). En la Figura 2, se muestra la distribución de los deterioros en cada uno de los proyectos.

Cuadro 2. Total de deterioros registrados

Deterioro		Bajo	Medio	Alto	N/A	Total de deterioros	%
22	Grieta de Esquina	97	33	13	-	143	0,71
23	Losa Dividida	8	71	134	-	213	1,06
25	Escalonamiento entre calzada y juntas	35	-	3	-	38	0,19
26	Daño en sello de junta	3155	1013	94	-	4262	21,22
27	Escalonamiento entre calzada y espaldón	6	6	-	-	12	0,06
28	Agrietamiento lineal	744	411	266	-	1421	7,08
29	Parches (Grandes)	28	32	16	-	76	0,38
30	Parches (Pequeños)	1266	23	8	-	1297	6,46
31	Pulimiento de agregado	-	-	-	2630	2630	13,10
32	Desprendimiento de agregados	-	-	-	2728	2728	13,58
34	Punchout	3	7	10	-	20	0,10
36	Grietas en malla o Resquebrajadura	169	4	-	-	173	0,86
37	Grietas por contracción	-	-	-	1341	1341	6,68
38	Fractura de esquina	108	24	25	-	157	0,78
39	Fractura de junta	518	53	47	-	618	3,08
-	Sin deterioro	-	-	-	-	-	24,67
Total de losas auscultadas						20084	

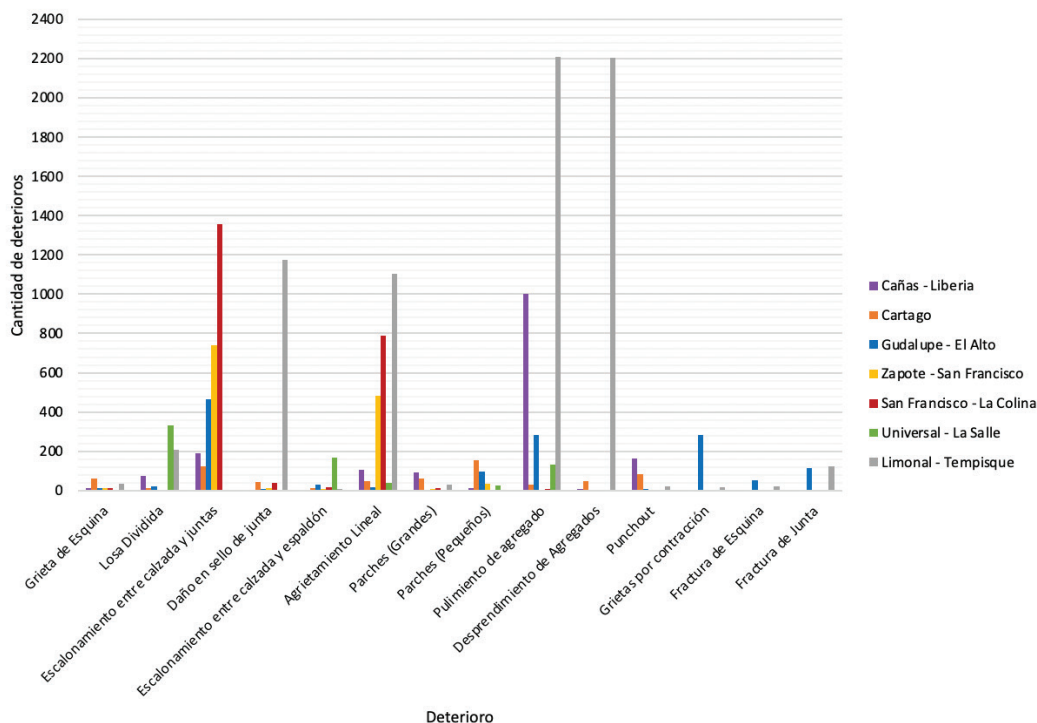


Figura 2. Gráfico de distribución de los deterioros totales por proyecto

Además, para cada proyecto se calculó el PCI de acuerdo con la metodología establecida en la norma ASTM D6433-20. A continuación, se muestran los resultados (Cuadro 3).

Cuadro 3. PCI de los proyectos

Proyecto	PCI	Condición
Cañas - Liberia (Ruta Nacional 1)	98	Bueno
Zapote - San Francisco (Ruta 204)	91	Bueno
San Francisco - La Colina (Ruta 211)	92	Bueno
Universal - La Salle (Ruta Nacional 167)	89	Bueno
Guadalupe - El Alto (Ruta Nacional 218)	81	Satisfactorio
Losas cortas de Cartago (Ruta Nacional 2)	81	Satisfactorio
Limal - Tempisque (Ruta Nacional 18)	56	Pobre

ANÁLISIS DE RESULTADOS

El proyecto más deteriorado es el de Limonal - Tempisque con un PCI de 56, esto no solo se debe a la falta de mantenimiento, también se pueden presentar estos deterioros por condiciones del suelo de la zona que no se consideraron de manera adecuada a la hora de diseñar la estructura de pavimento para esta sección de la Ruta Nacional 18. Luego, los proyectos de Cartago y Guadalupe - El Alto tienen el mismo valor de PCI, el cual es de 81, por lo tanto, el estado del pavimento es satisfactorio. Para el caso de las losas de Guadalupe - El Alto,

es importante mencionar que tienen más de 18 años, por lo tanto, se les ha dado un mantenimiento adecuado y el diseño que se optó para estas losas fue el apropiado. Por otro lado, el caso de las losas de Cartago es bastante inferior de lo esperado, ya que estas losas son de las más nuevas en esta evaluación, tienen 8 años; sin embargo, están más deterioradas que otras losas de otros proyectos más antiguos. El proyecto de Universal - La Salle tiene un PCI 89, lo que indica que el pavimento está en buen estado, lo mismo para los pavimentos de los proyectos de Zapote - San Francisco y San Francisco - La Colina que tienen un PCI de 91 y 92, respectivamente. El resultado de PCI del proyecto ubicado en Cañas - Liberia era de esperarse, ya que es el proyecto más nuevo de los siete que se evaluaron. Este pavimento tuvo un PCI de 98 lo que indica que está en muy buen estado.

Como se observa en la Figura 3, los deterioros más frecuentes son daño de sello de junta, desprendimiento de agregados, pulimiento de agregados y agrietamiento lineal. El daño de sello de junta se relaciona con la falta de mantenimiento que se le ha dado a las losas de estos proyectos. El desprendimiento de agregados puede ser ocasionado por un uso inadecuado de agregados ya que, si se utilizaron agregados redondeados, estos pierden adherencia a la mezcla. El pulimiento de agregados se puede dar por la utilización de un concreto pobre y por una resistencia baja a la abrasión por parte de los agregados. Por último, el agrietamiento lineal podría estar asociado a la pérdida de soporte por erosión y por fisuras por fatiga, las

cuales pueden ser causadas por un espesor de losa inadecuado para las condiciones de cada uno de los proyectos.

Caracterización de los proyectos

Cálculo de los ejes equivalentes

Primeramente, se realizó el cálculo de los ejes equivalentes, ESAL (del inglés *Equivalent Single Axis Load*) de cada uno de

los proyectos. Para este cálculo se obtuvieron los datos de TPD del Ministerio de Obras Públicas y Transportes (Cuadro 4).

Precipitación y temperatura

A continuación en el Cuadro 5, se muestra el diferencial de temperatura y la precipitación registrada en cada uno de los proyectos, esto para poder realizar las correlaciones correspondientes.

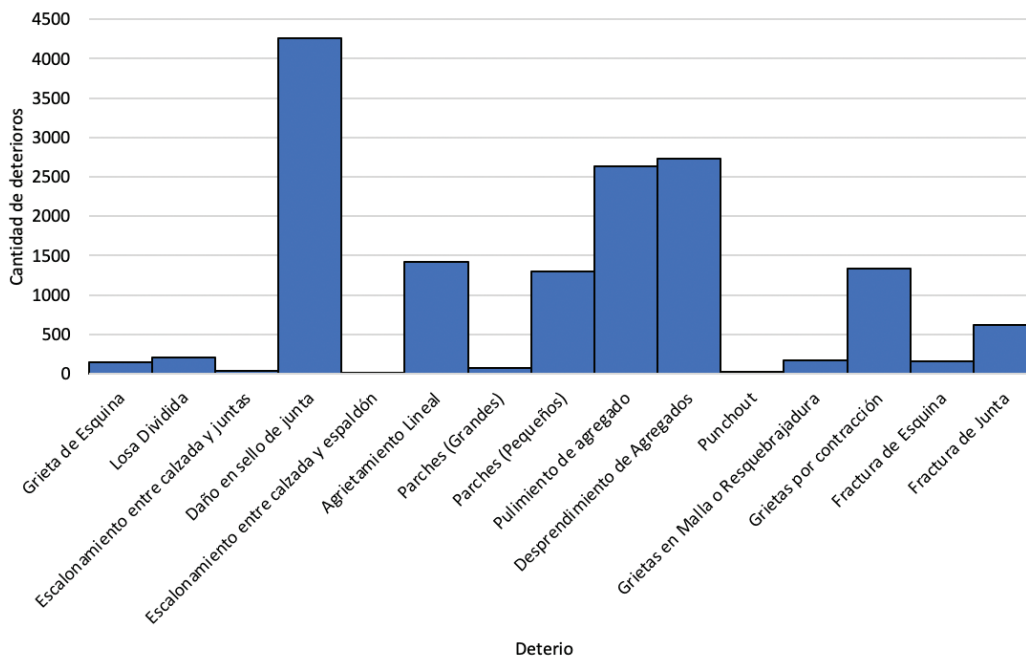


Figura 3. Gráfico de distribución de los deterioros totales

Cuadro 4. ESAL de los proyectos

Proyecto	ESAL
Cañas – Liberia	2 200 000
Zapote – San Francisco	3 206 318
San Francisco – La Colina	11 234 006
Universal – La Salle	1 651 486
Guadalupe – El Alto	15 262 402
Cartago	21 363 858
Limonal – Tempisque	6 565 780

Cuadro 5. Datos climatológicos de los proyectos

Proyecto	Estación Meteorológica	Precipitación (mm)	Temperatura máxima (°C)	Temperatura mínima (°C)	ΔT (°C)
Cañas – Liberia	74051	1541,7	33	22,1	11
Zapote – San Francisco	84203	2299	26,7	17,3	9,4
San Francisco – La Colina	84203	2299	26,7	17,3	9,4
Universal – La Salle	84193	1576,3	27,1	18,7	8,4
Guadalupe – El Alto	84139	1834,5	25,3	16,6	8,7
Cartago	73129	1367,3	22,5	13,7	8,8
Limal – Tempisque	74051	1541,7	33	22,1	11

Fuente: Instituto Meteorológico Nacional, 2020.

Correlaciones con precipitación, ESAL, ΔT y espesor de losa

Inicialmente, se calculó el coeficiente de correlación existente entre las variables precipitación, diferencial de temperatura (ΔT), ejes equivalentes, espesor de losa y los diferentes deterioros que se contabilizaron. Cabe mencionar que, para los casos de precipitación y ΔT únicamente, se consideraron coeficientes de correlación mayores de 0,6 puesto que si es menor, no existía una correlación tan clara, lo anterior se muestra en el Cuadro 6 y Cuadro 7. En el caso de los ejes equivalentes y espesor de losa, se utilizaron los deterioros que presentaron una correlación mayor a 0,7 como se muestra en el Cuadro 8 y el Cuadro 9. Los números indicados entre paréntesis en los cuadros del 6 al 9 corresponden a las designaciones indicadas en el Cuadro 2.

Cuadro 6. Correlación entre deterioros y precipitación

Deterioro	Coefficiente de correlación
Losa dividida (23)	-1,00
Daño de sello de junta (26)	0,76
Parches pequeños (30)	0,93
Escalonamiento entre calzada y juntas (25)	0,60
Grietas en malla (36)	-0,65

Cuadro 7. Correlación entre deterioros y ΔT

Deterioro	Coefficiente de correlación
Losa dividida (23)	1,00
Escalonamiento entre calzada y juntas (25)	-0,90
Fractura de esquina (38)	-0,70
Fractura de junta (39)	-0,72
Agrietamiento Lineal (28)	0,60

Cuadro 8. Correlación entre deterioros y ESAL

Deterioro	Coefficiente de correlación
Grieta de esquina (22)	0,81
Parche grande (29)	0,88
Grietas en malla (36)	0,76

Cuadro 9. Correlación entre deterioros y el espesor de losa

Deterioro	Coefficiente de correlación
Losa dividida (23)	1,00

Modelos para la determinación de deterioros

Con las correlaciones obtenidas se calcularon modelos por medio del *software* Microsoft Excel para poder determinar el porcentaje de deterioro que se puede llegar a presentar en un pavimento rígido al tener el valor de las variables precipitación, ESAL, ΔT y espesor de losa. Es importante mencionar que para cada uno de los modelos se obtuvo una probabilidad inferior a 0,15. Por lo tanto, para todas las variables hubo una significancia estadística. Con lo anterior, se obtuvieron los siguientes modelos (ecuaciones 1 a 8).

Grieta de esquina

La relación de la ecuación 1 se puede explicar porque en las losas de concreto, las deflexiones mayores se dan en las esquinas y con el aumento de la carga de tránsito, las grietas en las esquinas van a ir apareciendo.

$$\%grieta\ de\ esquina = 10^{-0,590+5,70*10^{-8}*ESAL} \quad (1)$$

$$R^2=0,51$$

Escalonamiento entre calzada y juntas

La relación encontrada en la ecuación 2 se puede explicar ya que conforme a las losas se les vayan haciendo grietas, el agua puede comenzar a infiltrarse a las subcapas del pavimento, lo que con el tiempo provoca que el soporte del pavimento se vaya perdiendo y se genera el escalonamiento.

$$\% \text{ escalonamiento entre calzada y juntas} = 10^{-2,676+0,001 \cdot \text{Precipitación}} \quad (2)$$
$$R^2=0,91$$

Daño de sello de junta

En este caso, la relación hallada en la ecuación 3 se puede explicar por una pérdida de adherencia entre el material de la junta y la losa, por la presencia constante de agua.

$$\% \text{ daño sello de junta} = -668,996 + 219,111 \cdot \log_{10}(\text{Precipitación}) \quad (3)$$
$$R^2=0,52$$

Parches grandes

La relación de la ecuación 4 se puede explicar ya que, con el paso de las cargas de tránsito, las losas se van agrietando y cuando ya existen varias grietas interconectadas surge la necesidad de colocar un parche.

$$\% \text{ parches grandes} = -9,679 + 1,58 \cdot \log_{10}(\text{ESAL}) \quad (4)$$
$$R^2=0,67$$

Parches pequeños

En este caso, la relación encontrada en la ecuación 5 se puede explicar porque con la presencia de precipitación, el agua se puede infiltrarse a capas inferiores del pavimento, lo que provoca que se pierda soporte. Al perder el soporte, aparecen grietas por el aumento de los esfuerzos al que está sometida la sección de la losa que perdió el soporte. Por lo tanto, al igual que en el caso anterior, se generan grietas interconectadas, que luego de un tiempo tienen que ser intervenidas mediante parches.

$$\% \text{ parches pequeños} = -69,333 + 0,046 \cdot \text{Precipitación} \quad (5)$$
$$R^2=0,82$$

Grietas en malla

Al igual que los casos anteriores, la relación de la ecuación 6 se puede explicar por la infiltración del agua y la pérdida de soporte, ya que provocan la aparición de grietas interconectadas que, en este caso, serían grietas en malla. Con el caso de los ejes equivalentes, con el paso de la carga de los vehículos, en la losa se generan esfuerzos y deflexiones, por lo tanto, con el paso del tiempo, estas deflexiones y esfuerzos se ven reflejados en grietas.

$$\% \text{ grietas en malla} = 10^{0,690+1,02 \cdot 10^{-7} \cdot \text{ESAL} - 0,001 \cdot \text{Precipitación}} \quad (6)$$
$$R^2=0,996$$

Fractura de esquina

$$\% \text{ fractura de esquina} = 17,861 - 1,636 \cdot \Delta T \quad (7)$$
$$R^2=0,37$$

Fractura de junta

$$\% \text{ fractura de junta} = 48,705 - 4,287 \cdot \Delta T \quad (8)$$
$$R^2=0,40$$

Tanto el modelo de fractura de esquina (ecuación 7), como para el de fractura de junta (ecuación 8), se pueden explicar mediante la contracción y expansión térmica que sufre la losa. En el caso de estas fracturas, se pueden deber a que, si en la etapa constructiva las dovelas no fueron alineadas correctamente, conforme la losa se expande y se contrae en las zonas tanto de la junta como en las esquinas, se pueden llegar a generar esfuerzos muy altos, por lo que puede provocar la fractura.

CONCLUSIONES

- Los deterioros más frecuentes en los pavimentos rígidos evaluados son daño de sello de junta, desprendimiento de agregados, pulimiento de agregado y agrietamiento lineal.
- Las losas más deterioradas son las del proyecto de Limonal – Tempisque ya que esta sección de la ruta obtuvo un PCI de 56, esto se puede deber a los problemas geotécnicos que existen en la zona.
- Las losas cortas de Cartago son de las más recientes; sin embargo, son de las más deterioradas, presentan un PCI de 81. Una de las razones por las que se podría justificar dicha condición es que se ha evidenciado que en este sitio existen problemas con la calidad de los suelos y la evacuación de aguas, lo podría haber generado gran parte de los deterioros observados.
- El PCI promedio de las losas es de 84, lo que indica que el estado de los pavimentos rígidos evaluados es satisfactorio.
- En las losas cortas de Cartago es por donde circula una mayor cantidad de vehículos pesados en comparación a los demás proyectos, esto podría dar explicación a que el deterioro más frecuente sean las grietas en malla.
- Los proyectos de San Francisco – La Colina y Zapote – San Francisco son los que presentan mayor cantidad que precipitación, se podría relacionar con el daño de sello

- junta por una pérdida de adherencia entre el material de la junta y la losa, por la presencia constante de agua.
- Existe una relación entre los deterioros losa dividida, daño de sello de junta, parches pequeños, escalonamiento entre calzada y juntas y grietas en malla con la variable de precipitación.
 - Existe una relación entre los deterioros grieta de esquina, parches grandes y grietas en malla con la variable de ejes equivalentes.
 - Existe una relación entre la variable cambio de temperatura y los deterioros fractura de junta, fractura de esquina y agrietamiento lineal.
 - El R^2 ajustado obtenido para los modelos de precipitación, ejes equivalentes y cambio de temperatura fue mayor a 0,9, lo que indica que existe un ajuste lineal casi perfecto y que se explica de manera adecuada la variación de la variable.
 - La variable espesor de losa se relaciona únicamente con el deterioro losa dividida, además se obtuvo un R^2 ajustado de 0,54, lo que indica que existe un ajuste lineal moderado.
 - Los modelos de grieta de esquina y de parches grandes, únicamente se lograron relacionar con la variable de ejes equivalentes.
 - Los modelos de escalonamiento entre calzada y juntas, daño de sello de junta y parches pequeños, únicamente se relacionan con la variable de precipitación.
 - Los modelos de fractura de esquina y fractura de junta, únicamente se relacionan con la variable de cambio de temperatura.
 - El modelo de grietas en malla se relaciona con las variables precipitación y ejes equivalentes y se obtuvo un R^2 ajustado de 0,996 lo que indica que existe un ajuste lineal perfecto.

REFERENCIAS

- ASTM (2020). *Standard Practice for Roads and Parking Lots Pavement Condition Index Surveys*. (D6433-20). ASTM International, West Conshohocken, Pennsylvania.
- Instituto Meteorológico Nacional (2020). *Estaciones Automáticas*. Recuperado de: <https://www.imn.ac.cr/estaciones-automaticas>
- LanammeUCR (2017). Evaluación del estado de las Rutas Nacionales 204 y 211, tramo Zapote – San Francisco – La Colina (Informe LM-PI-UGERVN-3-2017).
- Ministerio de Obras Públicas y Transportes (2020). *Anuario de Información de Tránsito*. Recuperado de: <https://www.mopt.go.cr/wps/wcm/connect/724c5cd7-31e8-415f-9e86-bd0571cfd9b9/AnuarioTransito2019.pdf?MOD=AJPERES>
- Montes de Oca Hidalgo, M. P. (2020). *Evaluación del desempeño de los pavimentos rígidos en Costa Rica*. (Tesis de grado). Universidad de Costa Rica, San José.