

MODELO DE COMPORTAMIENTO DEL PAVIMENTO FLEXIBLE UTILIZANDO MEDICIONES DEL ÍNDICE DE RUGOSIDAD INTERNACIONAL (IRI) PARA PREDECIR EL DETERIORO FUNCIONAL EN LA CARRETERA ABAPO - IPATI

BEHAVIORAL MODEL OF FLEXIBLE PAVEMENT USING INTERNATIONAL ROUGHNESS INDEX (IRI) MEASUREMENTS TO PREDICT FUNCTIONAL DETERIORATION ON THE ABAPO – IPATI ROAD

MSc. Calixto Daniel Aguilar Gómez ^{1 * s}
<https://orcid.org/0009-0005-8469-0479>

DOI: <https://doi.org/10.70722/tpfu8161aa14d>
Recibido: Enero 8, 2025; Aceptado: Abril 2, 2025

RESUMEN

La investigación actual adopta un enfoque cuantitativo en respuesta a los problemas derivados de los daños en el pavimento, tales como fisuras, baches, hundimientos y deformaciones, que han surgido.

El propósito principal fue desarrollar modelos predictivos del deterioro de pavimentos flexibles utilizando datos de campo del Índice de Rugosidad Internacional (IRI) recopilados entre 2018 y 2022. Esto se llevó a cabo para evaluar su relación con el deterioro funcional del pavimento en la carretera Abapo – Ipati, perteneciente a la red vial fundamental 0006, al sur que nos conecta con Argentina y Paraguay. Para la construcción del modelo de comportamiento estocástico probabilístico, se analizaron los datos de IRI para determinar la condición inicial y posterior del pavimento. Por otro lado, para el modelo de comportamiento estocástico probabilístico, los datos de IRI se transformaron en curvas representativas, utilizando la función Minitab 18. Finalmente, los resultados del IRI pronosticado se compararon con el IRI de mediciones de campo realizadas por el laboratorio Central de la ABC en el 2023. Se encontró una correlación significativa de 0.896 (89.6%) para el modelo estocástico probabilístico, por lo tanto, consideramos como correlaciones fuerte y positiva. Este resultado indica que los modelos desarrollados tienen una buena capacidad de predecir el deterioro funcional del pavimento asfáltico en la carretera Abapo – Ipati.

Palabras claves: Modelos de comportamiento, Índice de Rugosidad Internacional (IRI), modelo estocástico probabilísticos, comparación, correlación.

ABSTRACT

The current research adopts a quantitative approach in response to problems arising from pavement damage, such as cracking, potholes, subsidence and warping, that have arisen.

The main purpose was to develop predictive models of flexible pavement deterioration using International Roughness Index (IRI) field data collected between 2018 and 2022. This was carried out to evaluate its relationship

with pavement functional deterioration on the Abapo – Highway. Ipati, belonging to the fundamental road network 0006, to the south that connects us with Argentina and Paraguay. For the construction of the probabilistic stochastic behavior model, the IRI data were analyzed to determine the initial and subsequent condition of the pavement. On the other hand, for the probabilistic stochastic behavior model, the IRI data were transformed into representative curves, using the Minitab 18 function. Finally, the results of the predicted IRI were compared with the IRI of field measurements carried out by the Central laboratory of the ABC in 2023. A significant correlation of 0.896 (89.6%) was found for the probabilistic stochastic model, therefore, we consider them to be strong and positive correlations. This result indicates that the developed models have a good ability to predict the functional deterioration of the asphalt pavement on the Abapo – Ipati highway.

Keywords: Behavioral models, International Roughness Index (IRI), probabilistic stochastic model, comparison, correlation.

Citación: Calixto D. Aguilar G., **MODELO DE COMPORTAMIENTO DEL PAVIMENTO FLEXIBLE UTILIZANDO MEDICIONES DEL ÍNDICE DE RUGOSIDAD INTERNACIONAL (IRI) PARA PREDECIR EL DETERIORO FUNCIONAL EN LA CARRETERA ABAPO - IPATI.** Revista Científica EMINENTE 2025, 9-1: 31-41.

- ¹ Ingeniero Civil – Investigador de la línea de Investigación de Ingeniería Vial, Modelo de comportamiento - Unidad de Investigación, Ciencia y Tecnología (UICYT), Escuela Militar de Ingeniería (EMI UASC).
- * Corresponde al Autor (correo electrónico: cadaguilar2024@gmail.com).
- [§] Dirección de contacto Investigador: Urbanización Jardín del Sur / Calle los Jazmines - Telf.: (+591) 78550812 – Santa Cruz – Bolivia.

INTRODUCCIÓN

El pavimento flexible y aborda la problemática ocasionada por el deterioro de los pavimentos como grietas, agujeros, hundimientos y ahuellamientos, por lo que el objetivo fue desarrollar modelos de comportamiento de pavimentos flexibles utilizando valores medidos en el Índice Internacional de Rugosidad (IRI) área durante un periodo del 2018 al 2022, para determinar su correlación para predecir el desgaste funcional del pavimento flexible de la carretera Abapo – Ipati, la cual forma parte de la red vial fundamental, de la Carretera Internacional y corredor Sur Bolivia-Argentina.

Para desarrollar un modelo probabilístico de comportamiento estocástico se procesaron los datos históricos del IRI, donde se determinó la matriz de estado inicial y la matriz de estado de la superficie de la carretera, y La optimización grafica se llevará a cabo con la utilización de la función software Minitab 18.

Finalmente, se compararon los resultados del IRI con predicción y del IRI de campo del año 2023, donde se pretende encontrar que el modelo probabilístico de comportamiento estocástico tiene correlación de diseño para la elaboración de carretera.

OBJETIVO GENERAL

Desarrollar un modelo de comportamiento del pavimento flexible estocástico probabilístico, utilizando las mediciones del Índice de Rugosidad Internacional entre los años 2018 al 2022, con las mediciones de campo 2023 y determinar su correlación para predecir el deterioro funcional del pavimento flexible de la carretera Abapo – Ipati.

METODOLOGÍA

El trabajo de campo se ejecutó, en la vía Abapo - Ipati, se levantó información básica, para generar un inventario vial, y evaluar de las condiciones superficiales de la vía. Se complementó con investigación bibliográfica, de temas concernientes a la conservación vial, costos operacionales, de conservación vial.

El tramo vial de estudio tiene su identificación como SC 03 con L= 108,90 km., forma parte de la Red Vial Fundamental 0009, se encuentra ubicado en el departamento de Santa Cruz, atravesando las Provincias Cordillera; en su trayecto atraviesa los municipios de Cabezas y Gutiérrez, presenta una topografía plana, ondulada y montañosa la RVF-0006 a los y a los 20°1'19.45"S de Latitud Sur y 63°31'53.39"O de Longitud Oeste en Ipati (Fin).

Figura 1. Tramo de estudio



Fuente: Elaboración propia

Muestra

La justificación del caso de estudio es una muestra no paramétrica debido a la importancia que tiene este tramo de carretera Santa Cruz - Boyuibe para el desarrollo de las ciudades de Santa Cruz-Abapo-Ipati, por este motivo la investigación evalúa el subtramo Abapo – Ipati con una longitud de carretera de 108.90 km de la carretera concesionada de acuerdo al siguiente detalle. RVF 0009 Abapo (Prog. 147+921) al Cr. Rt. 0009 (Ipati) (Prog. 256+821) =108.90km.

Técnicas e instrumentos de recolección de datos.

En esta investigación se emplearon diversas técnicas y herramientas de recolección de datos.

Técnicas empleadas:

- Mediciones de campo de IRI
- Revisión base de datos de mediciones de IRI
- Análisis de informes presentados.
- Observación de mediciones en campo.
- Modelos matemáticos.

Instrumentos:

- Perfilómetro Laser inerciales RSP (Road Surface Profiler)

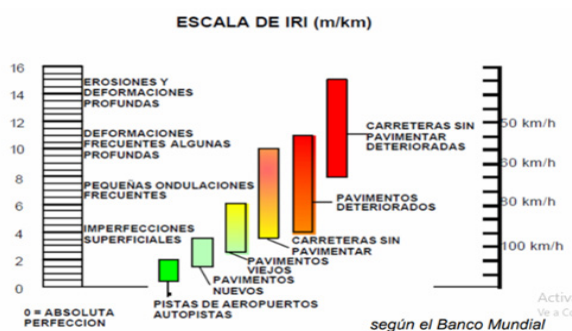
- Base de datos o sistemas de información.
- Registro del contenido del documento.
- Registro de observación de campo.
- Uso de Minetab 18 para modelar ecuaciones gráficas.

Para garantizar la fiabilidad de los instrumentos de medición, se utilizaron equipos con certificados de calibración. Antes de llevar a cabo las mediciones en la vía concesionada, se realizó una calibración In-Situ siguiendo las especificaciones técnicas del equipo. Este procedimiento contó con la presencia del supervisor de la Administradora Boliviana de Carreteras y un representante de la empresa de conservación vial.

Ensayos para realizar la evaluación funcional

Índice de Regularidad Internacional (IRI) ASTM E 867-06, ASTM E 1170.

Figura 2. Escala IRI (m/km)



Fuente: Elaboración propia

El objetivo del trabajo de auscultación es realizar el levantamiento del perfil longitudinal para la determinación del Índice de Regularidad Internacional (IRI) del pavimento existente en el Tramo Abapo - Ipati.

Para establecer criterios de calidad y comportamiento de los pavimentos que indicarán las condiciones actuales y futuras del estado superficial de un camino, surgió la necesidad de establecer un índice que permitiera evaluar las deformaciones verticales de un camino, que afectan la dinámica de los vehículos que transitan sobre él. Se trató de unificar los criterios de evaluación con los equipos de medición de rugosidad a nivel mundial, tales como los perfilómetros o los equipos del tipo respuesta, que permite calificar la

condición superficial de un camino no sólo en forma subjetiva. El Índice Internacional de Regularidad, fue propuesto por el Banco Mundial en 1986, como un estándar estadístico de la Regularidad y sirve como parámetro de referencia en la medición de la calidad de rodadura de un camino.

El IRI tiene sus orígenes en un programa norteamericano llamado National Cooperative Highway Research Program (NCHRP, por sus siglas en inglés) y está basado en un modelo llamado “Golden Car”, descrito en el reporte 228 del NCHRP. El cálculo matemático del IRI.

Parámetro del índice de regularidad internacional (IRI).

Según el programa de conservación vial del estado plurinacional de Bolivia para los proyectos de conservación vial como ser el tramo Abapo - Ipati, se establece como requisito que el valor del parámetro de Rugosidad no supere los límites especificados:

IRI (m/km)	3.5
------------	-----

Se puede establecer RANGOS PARA EL IRI, cuyos límites estarán determinados por los correspondientes valores del Índice de Serviciabilidad Presente (PSI), los cuales ya fueron definidos por la AASHO en 1962.

Tabla 1. Valores de IRI – PSI

Valores de PSI	Rangos de IRI (m/km)	Calificación
	Flexible	
5	0 – 1.2	Muy buena
4.2		
4		
3	1.2 – 2.9	Buena
2.5	2.9 – 5.3	Regular
2		
1.5	5.3 – 8.3	Mala
1		
0	> 8.3	Muy mala

Fuente: Laboratorio Central ABC

Los rangos propuestos se muestran en la Tabla Nro. 9, los cuales son derivados a partir de los niveles de serviciabilidad PSI del método AASHTO, permitiendo clasificar al pavimento por su condición funcional considerando valores de rugosidad (IRI). A partir de estos rangos de IRI se identifica la calidad de rodadura que presenta el pavimento, lográndose así CALIFICAR LA CONDICIÓN FUNCIONAL del pavimento del tramo evaluado.

DESARROLLO

El método de investigación utilizado fue el método experimental con datos cuantitativo, Porque se investiga el tema desde los datos del IRI en el periodo 2018, 2019, 2020, 2021 y 2022 para la comparación con la gestión 2023.

Modelo estocástico probabilístico se requiere datos históricos de 1 a 5 años.

Datos procesados y ordenados del (IRI) Prog. 147+921 – Prog. 256+821 Gestión 2018 al 2023.

A continuación, se presentan la siguiente figura Nro. 3 con los resultados obtenidos del IRI desde la gestión 2018 al 2023 cada 100m y 1000m para lograr mejor su representación, a lo largo de la carretera Prog. 147+921 ubicado en Abapo y terminan en la Prog. 256+821 en Ipati, para cada unidad de muestra analizada del tramo Abapo - Ipati. Este proceso de datos se realizó unidad por unidad U-1 a la U-1114.

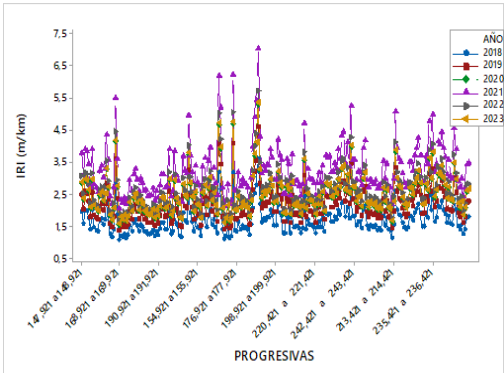
Para la realización de la investigación se ejecutaron las siguientes acciones las cuales están desglosadas de acuerdo con los objetivos específicos, como se muestra en la tabla siguiente:

Tabla 2. Yacimientos escogidos

ID Unidad	Progresivas de Proyecto		Valor de IRI medido m/km					
	De	A	2018	2019	2020	2021	2022	2023
U – 1	147+921	148+021	1,77	2,28	2,62	3,49	2,82	2,66
U – 2	148+021	148+121	1,29	1,82	2,09	2,68	2,25	2,35
U – 3	148+121	148+221	1,89	2,13	2,45	3,26	2,64	3,04
U – 4	148+221	148+321	4,37	4,55	5,23	6,96	5,64	4,77

Fuente: Elaboración propia

Figura 3. Escala IRI

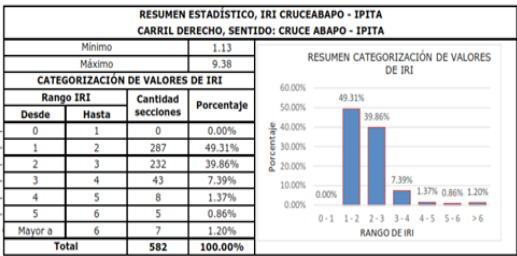


Fuente: Elaboración propia

Evaluación del método (IRI) Prog. 147+921 al 205+521

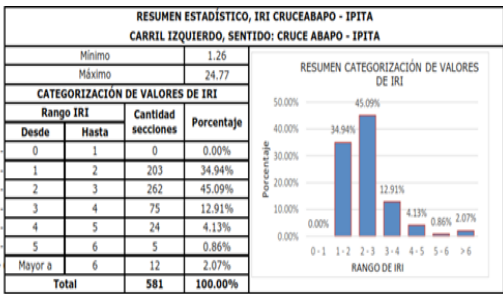
A continuación, se presentan la siguiente tabla Nro. 3 y Nro. 4 con los resultados obtenidos del IRI a lo largo de la carretera 147+921 (Abapo) a 205+521 (Ipita), para cada unidad de muestra analizada del tramo.

Tabla 3. 147+921 al 205+521 (Carril Derecho)



Fuente: Elaboración propia

Tabla 4. 147+921 al 205+521 (Carril Izquierdo)



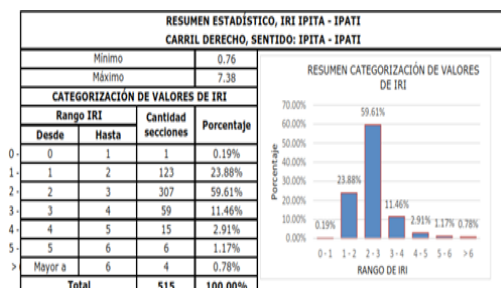
Fuente: Elaboración propia

Evaluación del método (IRI) Prog. 205+521 al 256+821

A continuación, se presentan la siguiente tabla Nro. 5

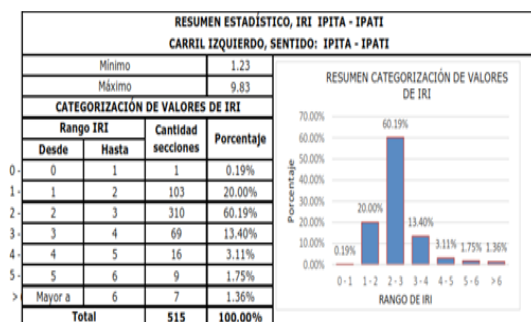
y Nro. 6 con los resultados obtenidos del IRI a lo largo de la carretera 205+521 (Ipita) a 256+821 (Ipiti), para cada unidad de muestra analizada del tramo.

Tabla 5. 205+521 al 256+821 (Carril Derecho)



Fuente: Elaboración propia

Tabla 6. 205+521 al 256+821 (Carril Izquierdo)



Fuente: Elaboración propia

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Resultados del modelo estocástico probabilístico

El modelo de deterioro estocástico probabilístico utilizando necesita únicamente los datos de dos años consecutivos para calcular las matrices de predicción. En este estudio, se emplearon los datos de los años 2018 y 2019. Se observa que el proceso de transición de un estado i a un estado j (P_{ij}) depende exclusivamente del estado actual y no de los estados previos, una característica conocida como propiedad de Markov (Lam, 2008).

Mediante la aplicación del modelo estocástico probabilístico-aplicada para los años 2018, 2019, 2020, 2021, 2022 Se pudo obtener las matrices de transición para cada periodo de tiempo.

Niveles de deterioros del pavimento según IRI

Para construir el modelo estocástico probabilístico, se toman en cuenta los niveles de deterioro del

pavimento según la clasificación del Índice de Rugosidad Internacional (IRI) detallados en la tabla 16, Los rangos se establecieron considerando los valores máximos y mínimos observados en las mediciones de campo, de acuerdo con (Hoang, 2017).

Tabla 7. Niveles de deterioros del pavimento según IRI

PSI	IRI	Nivel de Deterioro	Estado
4 - 5	$IRI \leq 1.8$	Muy Buena	E1
3 - 4	$1.8 < IRI \leq 2$	Buena	E2
2 - 3	$2.8 < IRI \leq 4$	Regular	E3
1 - 2	$4.3 < IRI \leq 6$	Mala	E4
0 - 1	$IRI > 6.8$	Muy mala	E5

Fuente: Hoang, 2017

Determinación de los niveles de deterioros del pavimento 147+921 al 256+821 cada 1000m.

Tabla 8. Niveles de deterioros del pavimento según IRI U-1 AL U-218

ID Unidad	Progresivas de proyecto	Valor de IRI medido m/km		E1	E2	E3	E4	E5
		2018	2019					
				<1.8	1.8<IRI<2.8	2.8<IRI<4.3	4.3<IRI<6.8	>6.8
U-1	147,921 a 148,921	1,92	2,47					
U-2	148,921 a 149,921	1,57	2,01		1			
U-3	149,921 a 150,921	1,99	2,55					
U-4	150,921 a 151,921	1,95	2,50					
U-5	151,921 a 152,921	1,76	2,25		1			
U-6	152,921 a 153,921	1,39	1,78					
U-7	153,921 a 154,921	1,98	2,54					
U-8	154,921 a 155,921	1,43	1,84	1				
U-9	155,921 a 156,921	1,36	1,75					
U-10	156,921 a 157,921	1,31	1,68					
U-11	157,921 a 158,921	1,65	2,12		1			
U-12	158,921 a 159,921	1,72	2,20		1			
U-13	159,921 a 160,921	1,54	1,98		1			
U-14	160,921 a 161,921	1,68	2,16		1			
U-15	161,921 a 162,921	2,21	2,84			1		
U-16	162,921 a 163,921	1,82	2,33					
U-17	163,921 a 164,921	1,23	1,57					
U-18	164,921 a 165,921	1,13	1,44					
U-19	165,921 a 166,921	1,38	1,77					
U-20	166,921 a 167,921	2,80	3,59			1		
U-21	167,921 a 168,921	1,84	2,36		1			
U-22	168,921 a 169,921	1,05	1,34					
U-23	169,921 a 170,921	1,18	1,51					

U-24	170,921 a 171,921	1,13	1,45					
U-25	171,921 a 172,921	1,22	1,57					
U-26	172,921 a 173,921	1,11	1,43					
U-27	173,921 a 174,921	1,20	1,54					
U-28	174,921 a 175,921	1,49	1,92					
U-29	175,921 a 176,921	1,32	1,69					
U-216	253,421 a 254,421	1,39	1,78					
U-217	254,421 a 255,421	1,74	2,24		1			
U-218	255,421 a 256,821	1,77	2,27		1			
U – Muestreo que SI cambian nivel deterioro:				37	67	15	1	0
U – Muestreo que NO cambian nivel deterioro:				56	39	2	1	0
Total de U – Muestreo:				218				

Fuente: Elaboración propia

Resumen de distribución de unidades de muestreo y estado de condición deterioro años 2018 al 2019

Se analizaron y procesaron los datos de la tabla 17 para identificar los segmentos que experimentaron cambios de condición o se mantuvieron en el mismo estado al pasar de un año a otro. La tabla 18 muestra el estado de condición para el año 2018 en comparación con el año 2019, y se genera la matriz de condición correspondiente.

Tabla 9. Resumen de cambio del nivel deterioro 2018 y 2019

Existe cambio nivel deterioro	E1	E2	E3	E4	E5
	<1,8	1,8<IRI<2,8	2,8<IRI<4,3	4,3<IRI<6,8	>6,8
SI	37	67	15	1	0
NO	56	39	2	1	0
Total	93	106	17	2	0
% SI	0,40	0,63	0,88	0,50	0
% NO	0,60	0,37	0,12	0,50	0

Fuente: Elaboración propia

Matriz de probabilidades de transición

$$\begin{bmatrix} 0.40 & 0.60 & 0.00 & 0.00 & 0.00 \\ 0.00 & 0.63 & 0.37 & 0.00 & 0.00 \\ 0.00 & 0.00 & 0.88 & 0.12 & 0.00 \\ 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.50 & 0.5 \\ 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 \end{bmatrix}$$

Estado de la condición de deterioro al año 2019

Estado	Unidad de muestreo	2019
E1	37	0,31
E2	67	0,56
E3	15	0,12
E4	1	0,01
E5	0	0,00
Total	120	1

Calculo Matriz de probabilidades de transición 2020.

$$\begin{bmatrix} 0.40 & 0.60 & 0.00 & 0.00 & 0.00 \\ 0.00 & 0.63 & 0.37 & 0.00 & 0.00 \\ 0.00 & 0.00 & 0.88 & 0.12 & 0.00 \\ 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.50 & 0.5 \\ 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0.31 \\ 0.56 \\ 0.12 \\ 0.01 \\ 0.00 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.12 & 0.34 & 0.00 & 0.00 & 0.00 \\ 0.00 & 0.35 & 0.05 & 0.00 & 0.00 \\ 0.00 & 0.00 & 0.11 & 0.00 & 0.00 \\ 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.01 & 0.00 \\ 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 \end{bmatrix}$$

Matriz de Transición 2019

Calculo Matriz de probabilidades de transición 2021.

$$\begin{bmatrix} 0.40 & 0.60 & 0.00 & 0.00 & 0.00 \\ 0.00 & 0.63 & 0.37 & 0.00 & 0.00 \\ 0.00 & 0.00 & 0.88 & 0.12 & 0.00 \\ 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.50 & 0.5 \\ 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0.12 \\ 0.71 \\ 0.16 \\ 0.01 \\ 0.00 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.05 & 0.41 & 0.00 & 0.00 & 0.00 \\ 0.00 & 0.43 & 0.06 & 0.00 & 0.00 \\ 0.00 & 0.00 & 0.14 & 0.00 & 0.00 \\ 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.01 & 0.00 \\ 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 \end{bmatrix}$$

Matriz de Transición 2020

Calculo Matriz de probabilidades de transición 2022.

$$\begin{bmatrix} 0.40 & 0.60 & 0.00 & 0.00 & 0.00 \\ 0.00 & 0.63 & 0.37 & 0.00 & 0.00 \\ 0.00 & 0.00 & 0.88 & 0.12 & 0.00 \\ 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.50 & 0.5 \\ 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0.05 \\ 0.74 \\ 0.20 \\ 0.01 \\ 0.00 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.02 & 0.50 & 0.00 & 0.00 & 0.00 \\ 0.00 & 0.53 & 0.07 & 0.00 & 0.00 \\ 0.00 & 0.00 & 0.18 & 0.00 & 0.00 \\ 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.01 & 0.00 \\ 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 \end{bmatrix}$$

Matriz de Transición 2021

Cálculo Matriz de probabilidades de transición 2023.

$$\begin{bmatrix} 0.40 & 0.60 & 0.00 & 0.00 & 0.00 \\ 0.00 & 0.63 & 0.37 & 0.00 & 0.00 \\ 0.00 & 0.00 & 0.88 & 0.12 & 0.00 \\ 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.50 & 0.5 \\ 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0.05 \\ 0.74 \\ 0.20 \\ 0.01 \\ 0.00 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.02 & 0.50 & 0.00 & 0.00 & 0.00 \\ 0.00 & 0.53 & 0.07 & 0.00 & 0.00 \\ 0.00 & 0.00 & 0.18 & 0.00 & 0.00 \\ 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.01 & 0.00 \\ 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 \end{bmatrix}$$

Matriz de Transición 2021

De acuerdo con las matrices definidas en la tabla para el estado de condición de IRI, se toma el promedio y se obtiene el siguiente vector.

$$a_0 = (0.51, 3.49, 1.04, 0.05, 0.0)$$

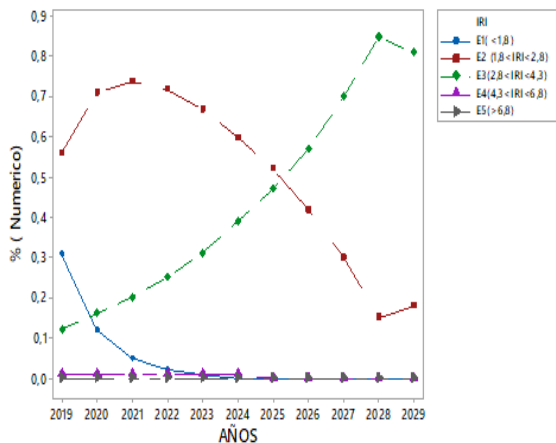
El modelo de deterioro estocástico probabilístico implica la multiplicación repetida de la matriz de estado de condición a_0 por la matriz de probabilidad durante un periodo de 10 años.

Tabla 10. Vectores de condición de estado 2019 al 2029

T	E1	E2	E3	E4	E5
Años	<1,8	1,8<IRI<2,8	2,8<IRI<4,3	4,3<IRI<6,8	>6,8
2019	0,31	0,56	0,12	0,01	0,00
2020	0,12	0,71	0,16	0,01	0,00
2021	0,05	0,74	0,20	0,01	0,00
2022	0,02	0,72	0,25	0,01	0,00
2023	0,01	0,67	0,31	0,01	0,00
2024	0,00	0,60	0,39	0,01	0,00
2025	0,00	0,52	0,47	0,00	0,00
2026	0,00	0,42	0,57	0,00	0,00
2027	0,00	0,30	0,70	0,00	0,00
2028	0,00	0,15	0,85	0,00	0,00
2029	0,00	0,18	0,81	0,00	0,00

Fuente: Elaboración propia

Figura 4. Vectores de condición de estado vs años



Fuente: Elaboración propia

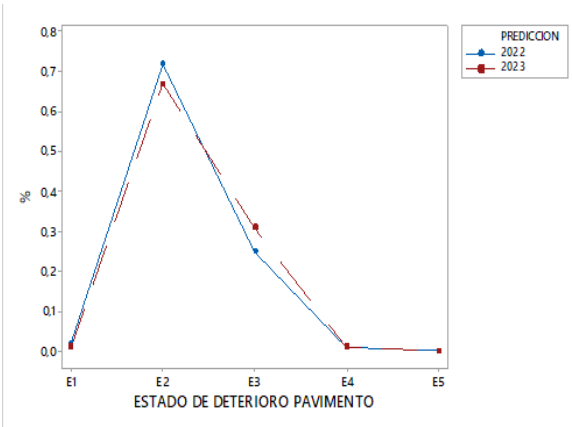
Resumen Matriz de probabilidades 2022 y 2023.

Tabla 11. Resumen Matriz de probabilidades 2022 y 2023

Estado	% Probabilidades (2022)	% Probabilidades (2023)
E1	0,02	0,01
E2	0,72	0,67
E3	0,25	0,32
E4	0,01	0,01
E5	0,00	0,00

Fuente: Elaboración propia

Figura 5. Cuando comparativo de matriz 2022 y 2023



Fuente: Elaboración propia.

Determinación del valor IRI (Predecido) Vs IRI (Medido)

Después de crear el modelo estocástico probabilístico, se llevó a cabo la validación de los valores pronosticados del IRI para el año 2023. Esto se realizó comparando dichos valores con las mediciones de campo realizadas por la empresa de conservación vial CONSOLSER, mediante contratación del laboratorio central de la Administradora Boliviana de Carreteras en ese mismo año. La correlación resultante se presenta en la tabla 12 que se muestra a continuación:

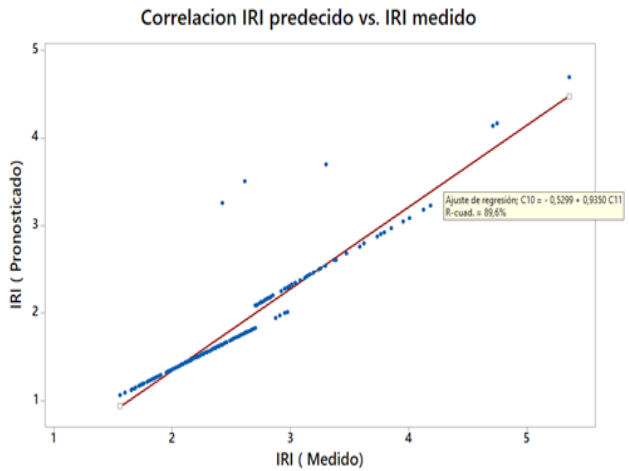
Tabla 12. Valor de IRI medido m/km predecido y medido 2023

ID Unidad	Progresivas de Proyecto	Valor de IRI medido m/km		Obs.
		2023 (Predecido)	2023 (Medido)	
U-1	147+921 a 148+921	1,94	2,87	Regular
U-2	148+921 a 149+921	1,58	2,34	Buena
U-3	149+921 a 150+921	2,01	2,97	Regular
U-4	150+921 a 151+921	1,97	2,91	Regular
U-5	151+921 a 152+921	1,77	2,62	Buena
U-6	152+921 a 153+921	1,40	2,07	Buena
U-7	153+921 a 154+921	2,00	2,95	Regular
U-8	154+921 a 155+921	1,45	2,14	Buena
U-9	155+921 a 156+921	1,37	2,03	Buena
U-10	156+921 a 157+921	1,32	1,95	Buena
U-11	157+921 a 158+921	1,66	2,46	Buena
U-12	158+921 a 159+921	1,73	2,56	Buena
U-13	159+921 a 160+921	1,56	2,3	Buena
U-14	160+921 a 161+921	1,70	2,51	Buena
U-15	161+921 a 162+921	3,69	3,3	Regular
U-16	162+921 a 163+921	3,03	2,71	Regular
U-17	163+921 a 164+921	1,24	1,83	Buena
U-18	164+921 a 165+921	1,14	1,68	Muy Buena
U-19	165+921 a 166+921	1,39	2,06	Buena

4-20	166+921 a 167+921	4,68	4,18	Regular
U-21	167+921 a 168+921	3,07	2,74	Regular
U-22	168+921 a 169+921	1,06	1,56	Muy Buena
U-23	169+921 a 170+921	1,19	1,76	Muy Buena
U-24	170+921 a 171+921	1,14	1,69	Muy Buena
U-25	171+921 a 172+921	1,23	1,82	Buena
U-26	172+921 a 173+921	1,12	1,66	Muy Buena
U-27	173+921 a 174+921	1,21	1,79	Muy Buena
U-28	174+921 a 175+921	1,51	2,23	Buena
U-29	175+921 a 176+921	1,33	1,97	Buena
U-30	176+921 a 177+921	1,60	2,37	Buena
U-31	177+921 a 178+921	1,70	2,51	Buena
U-32	178+921 a 179+921	1,52	2,24	Buena
U-33	179+921 a 180+921	1,34	1,98	Buena
U-34	180+921 a 181+921	1,54	2,28	Buena
U-35	181+921 a 182+921	1,46	2,16	Buena
U-36	182+921 a 183+921	1,33	1,96	Buena
U-37	183+921 a 184+921	1,35	1,99	Buena
U-38	184+921 a 185+921	1,25	1,84	Buena
U-39	185+921 a 186+921	1,25	1,85	Buena
U-40	186+921 a 187+921	1,26	1,86	Buena
U-41	187+921 a 188+921	1,37	2,03	Buena
U-42	188+921 a 189+921	1,18	1,74	Muy Buena
U-43	189+921 a 190+921	1,34	1,98	Buena
U-44	190+921 a 191+921	1,22	1,8	Muy Buena
U-212	249+421 a 250+421	1,50	2,21	Buena
U-213	250+421 a 251+421	1,40	2,07	Buena
U-214	251+421 a 252+421	1,54	2,27	Buena
U-215	252+421 a 253+421	1,25	1,84	Buena
U-216	253+421 a 254+421	1,40	2,07	Buena
U-217	254+421 a 255+421	1,76	2,6	Buena
U-218	255+421 a 256+421	1,79	2,64	Buena
	Promedio	2,05	2,47	Buena

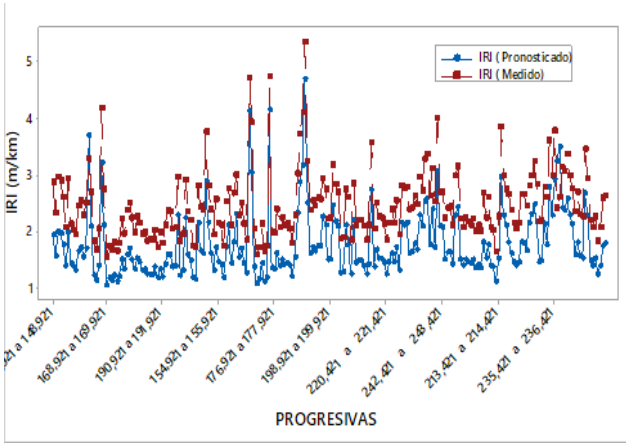
Fuente: Elaboración propia

Figura 6. Correlación IRI (pronosticado) Vs IRI (medido)



Fuente: Elaboración propia

Figura 7. Gráfico de Serie IRI (pronosticado) Y IRI (medido)



Fuente: Elaboración propia

Resultados de los daños a la capa de rodadura flexible Prog. 147+921 al 256+421.

El modelo de deterioro (estocástico probabilístico) exhiben un coeficiente de correlación (R2) notablemente alto. Se puede comprobar que este modelo desarrollado posee cualidades predictivas excepcionales al compararlos con las mediciones de campo realizadas por la empresa CONSOLSER, mediante Laboratorio de la ABC el año 2023. Debido a este hallazgo, se procedió a calcular el deterioro funcional del pavimento utilizando los valores predichos del IRI hasta el año 2029. Estos cálculos se presentan en la tabla y gráfico siguientes.

Tabla 13. Valor de IRI medido m/km pronosticado hasta el año 2029

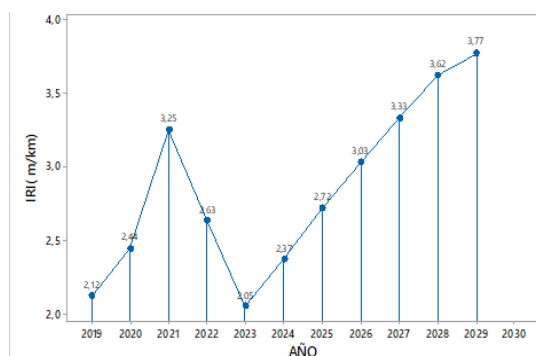
T Años	IRI (Predecido) m/km	Condición
2019	2,12	Buena
2020	2,44	Buena
2021	3,25	Buena
2022	2,63	Buena
2023	2,05	Buena
2024	2,37	Buena
2025	2,72	Buena
2026	3,06	Regular
2027	3,33	Regular
2028	3,62	Regular
2029	3,37	Regular

Fuente: Elaboración propia

En el caso del modelo estocástico probabilístico, la predicción del IRI se logra mediante la multiplicación

del estado de condición inicial a0 por la matriz de probabilidad. Esta matriz se construyó utilizando datos de campo recopilados entre 2018 y 2029, y se contrastó con las mediciones de campo de 2023. Esto nos proporciona la capacidad de prever el comportamiento funcional del pavimento hasta el año 2029, como se muestra en la tabla 13 y figura 8.

Figura 8. IRI(Pronosticado) hasta el año 2029.



Fuente: Elaboración propia

Análisis de los resultados Prog. 147+921 al 256+421.

La relación identificada mediante el desarrollo del modelo de deterioro estocástico probabilístico, como se muestra en la figura 8, exhibe una correlación positiva sólida y confirma la precisión de los valores pronosticados de deterioro para los próximos 10 años. Se observa que la curva de deterioro funcional del pavimento, basada en los valores pronosticados del IRI indicados en la figura 6, revela un aumento acelerado del deterioro durante los primeros años 2024 hasta alcanzar el año 2029, con valores que gradualmente convergen en un valor de 3.77 m/km. Por lo tanto, se sugiere que la capacidad predictiva de la cadena de Markov homogénea disminuye con el tiempo a medida que se aproxima al valor máximo.

La información de la tabla 13 muestra que para el año 2029, el valor de IRI de 3.77 m/km no cumple con el límite máximo de IRI establecido por la Administradora Boliviana de Carreteras, el cual especifica que el valor de IRI de la carretera Puno Juliaca no debe exceder el parámetro de 3.50 m/km. Según la curva de deterioro funcional del pavimento flexible, se concluye que hasta el año 2025, el pavimento mantiene su condición de “Bueno”. Sin embargo, a partir del año 2026 hasta el 2029, la

condición del pavimento se califica como “Regular” de acuerdo con el estado de condición indicado en la tabla 7 (Hoang, 2017).

CONCLUSIONES

La creación del modelo de comportamiento estocástico-probabilístico, basados en las mediciones del Índice de Rugosidad Internacional (IRI) realizadas entre 2018 y 2022 en la carretera Abapo – Ipati, demuestra una correlación positiva significativa. Esto facilita la predicción del deterioro funcional del pavimento flexible, como se evidencia en la tabla 13.

Las estadísticas presentadas comprueban el modelo de comportamiento de pavimento Estocástico Probabilístico, ha sido creado con base en las mediciones de IRI de 2018 a 2022, exhibe una correlación fuertemente moderada de $R = 0.896$ entre los valores observados y los valores pronosticados del IRI para el año 2023, como se ilustra en la figura 6.

El modelo de comportamiento estocástico probabilístico demuestra excelente capacidad predictiva al ser contrastados con los datos recolectados en el tramo carretero Abapo - Ipati. Este modelo proporcionará una visión del deterioro funcional del Índice de Rugosidad Internacional (IRI) en la carretera durante un período de tiempo, como se muestra en la figura 8.

Al emplear la metodología IRI, posterior análisis modelo de comportamiento funcional estocástico probabilístico, en el tramo de estudio en la progresivas 147+921 al Km 256+821, el estado del pavimento oscila entre Regular y Muy Bueno.

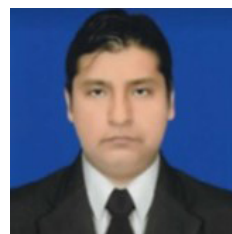
Para finalizar este estudio proporciona una base sólida para la implementación de medidas de mantenimiento preventivo que contribuyan a mejorar la durabilidad y la calidad de la carretera Abapo-Ipati, asegurando un óptimo servicio para los usuarios de la carretera y minimizando u optimizar los costos de mantenimiento rutinario a largo plazo.

CONFLICTO DE INTERÉS

El autor declara que no tiene conflictos de interés con la presente investigación.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] AASHTO (1,993) American Associations of State Highway and Transportation Officials, Guide for Design of Pavement Structures.
- [2] Argueta M., Castro H. (2009), Metodología para la calibración de los modelos de deterioro de pavimentos generados por el programa HDM4.
- [3] Benedict, S, Somerville, M, Vassiliki, L, Ortiz-Garcia, J, Rupiny, K, and Godfrey, H, (2011). Stochastic model for strategic assessment of road maintenance. pp.53-60.
- [4] Butt, A., Shahin M., Carpenter, S., & Carnahan, J (1994), Aplicación de Markov Process to Pavement Management Systems at Network Level. Third International Conference on Managing Pavements, (págs. 159-172).
- [5] Bennett C.R., De-Solminihac H., Chamorro A. Data collection technologies for road management, Transport Note No. 30: 1-8, The World Bank, Washington, DC, 2006.
- [6] G. Thenoux, F. Halles Metodología simplificada de priorización de conservación de pavimentos a nivel de red.
- [7] Guerra-García, G., (2006). "Déficit de recursos para el Mantenimiento de la Infraestructura Vial y alternativas de solución". Ministerio de Economía y Finanzas. Hernández S., Fernández C., Baptista L., Metodología de la Investigación 6ta edición.
- [8] H.P. Hong & S.S. Wang 2007. Stochastic Modeling of Pavement Performance.
- [9] Jay N. Meegoda., Shengyan Gao 2014. Roughness Progression Model for Asphalt Pavements Using Long-Term Pavement Performance Data.
- [10] Kiyoshi Kobayashi Myungsik Do, Daeseok Han 2010. Estimation of Markovian transition probabilities for pavement deterioration forecasting.
- [11] Leiva V. Metodología para el desarrollo modelos de deterioro para caminos vecinales de lastre y suelo, Lanamme, 2004.
- [12] Picado M., Desarrollo de curvas de deterioro para pavimento flexible y factor de incertidumbre. Revista Infraestructura Vial/ LanammeUCR/ISSN: 1409-4045- ISSN / Volumen 18/Numero 31/Julio, 2016/p.p 30-38.
- [13] Prozzi, J., 2001 Modeling Pavement Performance by Combining Field and Experimental Data.
- [14] Rodríguez M., Theboux Z., Gonzales V., 2013 Evaluación probabilística del agrietamiento de pavimentos en carreteras de Chile.
- [15] Solminhac T., Hidalgo S., Salgado T., Valdés F. Calibración de modelos de comportamiento HDM de pavimentos asfálticos a las condiciones de Chile, Chile, estudio de seguimiento de pavimentos asfálticos, Ministerio de Obras Públicas, 2003.
- [16] Solminihac H. Gestión de infraestructura vial, Santiago de Chile, Ediciones Pontificia Universidad Católica de Chile, 2001, 508 p.
- [17] Sotil, A., (2013). Propuesta de sistema de gestión de pavimentos para municipalidades y gobiernos locales.
- [18] Turrado R. (2016), Análisis de los modelos de deterioro de firmes en la gestión de la conservación de redes de carreteras.

**Calixto Daniel Aguilar Gómez.**

Ingeniero Civil RNI 21329
 M.Sc. en Ingeniería de Conservación de Carreteras.
 M.Sc. en Ingeniería Vial con Mención en Carreteras, Puentes y Túneles.
 Especialistas en Educación superior.
 Diplomado en Planificación y Desarrollo de Competencias Profesionales en Educación Superior.
 Diplomado en Ingeniería Vial con Mención Carreteras, Puentes y Túneles.
 Diplomado en Conservación de Carreteras.
 Diplomado en Ingeniería de Carreteras.