ATMIRE

Title	Influencia del coeficiente de drenaje estimado a partir de la precipitación histórica en el diseño estructural de pavimentos flexibles según el método AASHTO 1993: carretera San Miguel–El Descanso, Cusco
Item Type	http://purl.org/coar/resource_type/c_bdcc
Authors	Chocce Huarancca, Felix;Perez Carhuapoma, Hector Eduardo;Rojas Sumari, Jorge Rodrigo
Publisher	Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas (UPC)
Rights	http://purl.org/coar/access_right/c_abf2
Download date	2026-11-28 06:03:57
Item License	https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/
Link to Item	https://hdl.handle.net/10757/692151

UNIVERSIDAD PERUANA DE CIENCIAS APLICADAS

ESCUELA DE POSTGRADO

PROGRAMA DE MAESTRÍA EN INGENIERÍA VIAL

Influencia del coeficiente de drenaje estimado a partir de la precipitación histórica en el diseño estructural de pavimentos flexibles según el método AASHTO 1993: carretera San Miguel–El Descanso, Cusco.

TRABAJO DE INVESTIGACIÓN

Presentado como parte de los requisitos para optar el grado académico de Maestro en Ingeniería Vial

AUTOR(ES)

Chocce Huarancca, Felix	0009-0000-3149-067X
Perez Carhuapoma, Hector Eduardo	0009-0007-2438-1943
Rojas Sumari, Jorge Rodrigo	0009-0007-6254-5101

ASESOR(ES)

Lazo Lazaro, Guillermo	0000-0002-7968-7858

Lima, 05 de octubre de 2026

Dedicatoria

A nuestras familias, por su apoyo constante, comprensión y confianza durante el desarrollo de esta investigación. Su acompañamiento, motivación y esfuerzo fueron esenciales para culminar esta etapa de formación académica y profesional.

A las personas que, con su ejemplo, orientación y palabras de aliento, nos impulsaron a continuar aprendiendo, perseverar ante las dificultades y asumir con responsabilidad este proceso de crecimiento personal y profesional.

Agradecimientos

Expresamos nuestro agradecimiento al Mg. Ing. Manuel Elías Silvera Lima, director de la Maestría en Ingeniería Vial, por su orientación académica, exigencia metodológica y aportes brindados durante el proceso formativo. Sus observaciones contribuyeron a fortalecer la organización, claridad y presentación técnica de esta investigación.

De manera especial, agradecemos al Mg. Ing. Guillermo Lazo, asesor de la investigación, por el acompañamiento académico, la revisión técnica y las recomendaciones realizadas durante el desarrollo del estudio. Su orientación fue fundamental para mejorar la coherencia metodológica, el análisis de los escenarios de diseño y la interpretación de los resultados obtenidos mediante el método AASHTO 1993.

Asimismo, agradecemos a la Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas, a través de la Escuela de Postgrado y del Programa de Maestría en Ingeniería Vial, por la formación recibida y por promover investigaciones aplicadas a problemas reales de la infraestructura vial.

Extendemos nuestro reconocimiento a las instituciones, profesionales y fuentes técnicas que facilitaron información para el análisis climático, el estudio de tránsito, el reconocimiento de campo, la evaluación geotécnica, los ensayos de laboratorio y la identificación de las condiciones de drenaje en la carretera San Miguel–El Descanso, Cusco. Finalmente, agradecemos a nuestras familias por su apoyo, comprensión y motivación durante esta etapa académica.

Resumen

En el diseño estructural de pavimentos flexibles, el coeficiente de drenaje (m) del método AASHTO 1993 suele adoptarse a partir de valores referenciales de tabla, lo que puede generar incertidumbre en zonas altoandinas con variabilidad de precipitación. La carretera San Miguel–El Descanso presenta condiciones climáticas que requieren evaluar la influencia del drenaje en las capas granulares del pavimento.

La investigación evaluó la influencia del coeficiente de drenaje, estimado mediante indicadores de precipitación histórica, en el diseño estructural de pavimentos flexibles según AASHTO 1993. Se analizaron registros del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI) y del producto grillado PISCOp 3.0, considerando el tiempo de exposición a saturación (tS), el Índice de Saturación Climática (ISC) y las condiciones de drenaje verificadas en campo.

El coeficiente de drenaje estimado con información SENAMHI fue 1.13 y con PISCOp 3.0 fue 1.15. En el diseño calculado sin redondeo, estos valores produjeron reducciones aproximadas de 11.50 % y 13.04 %, respectivamente, en los espesores de base y subbase granular frente a la línea base con m = 1.00. La diferencia entre ambos escenarios fue 1.74 %, evidenciando consistencia entre las fuentes climáticas evaluadas.

Se concluye que la precipitación histórica permite construir indicadores indirectos de exposición potencial a humedad y sustentar la estimación del coeficiente de drenaje. Este parámetro no modifica directamente el Número Estructural requerido, pero influye en el aporte estructural de las capas granulares y en los espesores obtenidos. Su aplicación debe respaldarse mediante la verificación funcional del drenaje en campo.

Palabras clave: pavimento flexible; AASHTO 1993; coeficiente de drenaje; precipitación histórica; SENAMHI; PISCOp 3.0; Índice de Saturación Climática; diseño estructural.

Objetivo de Desarrollo Sostenible (ODS) relacionado:

Objetivo de Desarrollo Sostenible (ODS)	Marque
ODS 1: Fin de la pobreza||SDG 1: No poverty	
ODS 2: Hambre cero||SDG 2: Zero hunger	
ODS 3: Salud y bienestar||SDG 3: Good health and well-being	
ODS 4: Educación de calidad||SDG 4: Quality education	
ODS 5: Igualdad de género||SDG 5: Gender equality	
ODS 6: Agua limpia y saneamiento||SDG 6: Clean water and sanitation	
ODS 7: Energía asequible y no contaminante||SDG 7: Affordable and clean energy	
ODS 8: Trabajo decente y crecimiento económico||SDG 8: Decent work and economic growth	
ODS 9: Industria, innovación e infraestructura||SDG 9: Industry, innovation and infrastructure	X
ODS 10: Reducción de las desigualdades||SDG 10: Reduced inequalities	
ODS 11: Ciudades y comunidades sostenibles||SDG 11: Sustainable cities and communities	
ODS 12: Producción y consumo responsables||SDG 12: Responsible consumption and production	
ODS 13: Acción por el clima||SDG 13: Climate action	X
ODS 14: Vida submarina||SDG 14: Life below water	
ODS 15: Vida de ecosistemas terrestres||SDG 15: Life on land	
ODS 16: Paz, justicia e instituciones sólidas||SDG 16: Peace, justice and strong institutions	
ODS 17: Alianzas para lograr los objetivos||SDG 17: Partnerships for the goals	

Abstract

In flexible pavement structural design, the AASHTO 1993 drainage coefficient (m) is commonly selected from tabulated reference values, which may introduce uncertainty in high-Andean areas with variable precipitation. The San Miguel–El Descanso road presents climatic conditions that require an assessment of the influence of drainage on the pavement's granular layers.

This study evaluated the influence of the drainage coefficient, estimated using historical precipitation indicators, on flexible pavement structural design according to AASHTO 1993. Records from Peru's National Service of Meteorology and Hydrology (SENAMHI) and the PISCOp 3.0 gridded product were analyzed, considering the time of exposure to saturation (tS), the Climatic Saturation Index (CSI), and drainage conditions verified in the field.

The drainage coefficient estimated using SENAMHI data was 1.13, while the value obtained from PISCOp 3.0 was 1.15. In the unrounded design calculations, these values produced approximate reductions of 11.50% and 13.04%, respectively, in granular base and subbase thicknesses compared with the baseline scenario using m = 1.00. The difference between both scenarios was 1.74%, indicating consistency between the climate data sources evaluated.

It is concluded that historical precipitation data can be used to develop indirect indicators of potential moisture exposure and support drainage coefficient estimation. This parameter does not directly modify the required Structural Number but influences the structural contribution of the granular layers and the resulting thicknesses. Its application should be supported by field verification of functional drainage conditions.

Keywords: flexible pavement; AASHTO 1993; drainage coefficient; historical precipitation; SENAMHI; PISCOp 3.0; Climatic Saturation Index; structural design.

N° 27633_Chocce Huarancca, Félix_ Influencia del coeficiente de drenaje estimado a partir de la

INFORME DE ORIGINALIDAD

9%	9%	4%	3%
INDICE DE SIMILITUD	FUENTES DE INTERNET	PUBLICACIONES	TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1	hdl.handle.net Fuente de Internet	2%
2	repositorio.unesum.edu.ec Fuente de Internet	<1%
3	Submitted to Universidad Politécnica del Perú Trabajo del estudiante	<1%
4	upc.aws.openrepository.com Fuente de Internet	<1%
5	Submitted to UNIVERSIDAD DE SANTANDER UDES Trabajo del estudiante	<1%
6	Submitted to Docentes Trabajo del estudiante	<1%
7	tesis.pucp.edu.pe Fuente de Internet	<1%
8	www.investigaciones.uabjb.edu.bo Fuente de Internet	<1%
9	repositorio.unap.edu.pe Fuente de Internet	<1%
10	www4.congreso.gob.pe Fuente de Internet	<1%
11	csustentable.minvu.gob.cl Fuente de Internet	<1%
12	dspace.ucuenca.edu.ec Fuente de Internet	<1%
13	Submitted to Universidad San Ignacio de Loyola Trabajo del estudiante	<1%
14	idoc.pub Fuente de Internet	<1%
15	dspace.ups.edu.ec Fuente de Internet	<1%

Tabla de contenido

1. CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN 1

1.1 Realidad problemática 3

1.1.1 Árbol del problema 5

1.1.2 Árbol de objetivos 6

1.1.3 Indicadores de medición de problema 7

1.2 Formulación del problema 8

1.2.1 Problema general 8

1.2.2 Problemas específicos 8

1.3 Estado del arte 9

1.4 Justificación 11

1.5 Hipótesis general 12

1.5.1 Hipótesis específicas 12

1.6 Objetivos de la investigación 13

1.6.1 Objetivo general 13

1.6.2 Objetivos específicos 13

2. CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO 14

2.1 Introducción al marco teórico 14

2.2 Pavimentos flexibles y comportamiento estructural 16

2.3 Subrasante y módulo resiliente 17

2.4 Drenaje en pavimentos flexibles 17

2.5 Tiempo de exposición a saturación 18

2.6 Precipitación histórica e información climática 19

2.7 Método AASHTO 1993 para pavimentos flexibles 20

2.8 Número Estructural y aporte de capas 21

2.9 Coeficiente de drenaje en el método AASHTO 1993 22

2.9.1 Calidad de drenaje según AASHTO 1993 22

2.9.2 Tiempo próximo a saturación según AASHTO 1993 23

2.9.3 Coeficientes de drenaje para capas granulares 23

2.10 Índice de Saturación Climática *(ISC)* 23

2.11 Marco conceptual 24

3.1 Enfoque y tipo de investigación 25

3.2 Tipo y nivel de investigación 25
3.3 Diseño de investigación 26
3.4 Variables e indicadores 27
3.4.1 Variable independiente 27
3.4.2 Variable dependiente 27
3.5 Población y muestra 28
3.5.1 Población 28
3.5.2 Muestra 30
3.6 Técnicas e instrumentos 32
3.7 Procedimiento metodológico 34
3.8 Procesamiento climático y validación de datos 37
3.9 Desarrollo del *tS* e *ISC* 40
3.10 Estimación del coeficiente de drenaje 43
3.11 Diseño estructural AASHTO 1993 por escenarios 46
3.12 Análisis estadístico, sensibilidad y correlaciones 47
4.1 Introducción 49
4.2 Caracterización del área de estudio 50
4.3 Sectores representativos de análisis 53
4.4 Fuentes de información climática consideradas 54
4.5 Estaciones meteorológicas SENAMHI consideradas 54
4.5.1 Procesamiento de precipitación SENAMHI 56
4.5.2 Tiempo de exposición a saturación obtenido con SENAMHI 58
4.5.3 Análisis descriptivo del tS SENAMHI 61
4.5.4 Coeficientes de drenaje asociados al tS SENAMHI 63
4.6 Procesamiento de información PISCOp 3.0 65
4.7 Comparativo SENAMHI vs PISCOp 3.0 71
4.7.1 Indicadores de validación del comparativo 75
4.7.2 Escenarios de coeficiente de drenaje evaluados 76
4.7.3 Verificación de campo de las condiciones de drenaje 77
4.7.4 Validación integral de la metodología propuesta 80
4.8 Determinación del tránsito de diseño 82
4.8.1 Resultados principales del aforo vehicular 83
4.8.2 Cálculo del tránsito promedio diario semanal e IMDA 84

4.8.3 Proyección del tránsito y clasificación según DG-2018 86
4.8.4 Determinación del tránsito pesado de diseño 88
4.8.5 Cálculo de ejes equivalentes de diseño 89
4.8.6 Clasificación del tránsito pesado para pavimento 91
4.8.7 Síntesis técnica del tránsito de diseño 92
4.9 Resultados geotécnicos y módulo resiliente de la subrasante 93
4.10 Diseño estructural mediante el método AASHTO 1993 96
4.10.1 Parámetros generales de diseño 97
4.10.2 CBR de diseño y módulo resiliente de la subrasante 99
4.10.3 Número estructural requerido 100
4.10.4 Aporte estructural de la carpeta asfáltica 100
4.10.5 Escenarios de coeficiente de drenaje 102
4.10.6 Criterio de distribución del SN granular 103
4.10.7 Diseño estructural calculado sin redondeo 103
4.10.8 Figuras esquemáticas del paquete estructural calculado sin redondeo 106
4.10.9 Comparación de espesores calculados 110
4.10.10 Diseño con redondeo constructivo 112
4.10.11 Análisis complementario de sensibilidad con carpeta asfáltica de 12, 14 y 16 cm 113
4.10.12 Interpretación final del diseño estructural 115
4.10.13 Condiciones de aplicabilidad del coeficiente de drenaje adoptado 115
4.11 Discusión de resultados 116
4.12 Verificación de los objetivos específicos 118
4.13 Verificación del objetivo general 120
5. CAPÍTULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES 121
5.1 Conclusiones 121
5.2 Recomendaciones 122
Referencias 124
Anexo(s) 127

Lista de Tablas

Tabla 1 Indicadores considerados en el análisis de la investigación 7
Tabla 2 Clasificación de la calidad del drenaje según AASHTO 1993 22
Tabla 3 Porcentaje del tiempo de exposición a la saturación (tS) según AASHTO 1993 . 23
Tabla 4 Coeficientes de drenaje recomendados por AASHTO 1993 23
Tabla 5 Indicadores utilizados en la investigación 27
Tabla 6 Técnicas e instrumentos de investigación 34
Tabla 7 Umbrales referenciales de precipitación diaria establecidos por el SENAMHI 41
Tabla 8 Clasificación propuesta del Índice de Saturación Climática (ISC) 43
Tabla 9 Escenarios del coeficiente de drenaje considerados en el análisis 46
Tabla 10 Características generales del área de estudio 51
Tabla 11 Sectores considerados en el análisis estructural 53
Tabla 12 Características de las estaciones meteorológicas del SENAMHI consideradas en la investigación 55
Tabla 13 Síntesis del procesamiento de los registros de precipitación de las estaciones del SENAMHI 57
Tabla 14 Tiempo de exposición a la saturación (tS) calculado para cada estación del SENAMHI 59
Tabla 15 Estadísticos descriptivos del tS obtenido a partir de la precipitación observada en las estaciones del SENAMHI 62
Tabla 16 Coeficientes de drenaje estimados a partir del tS obtenido en las estaciones del SENAMHI 64
Tabla 17 Resultados del tS y del coeficiente de drenaje obtenidos mediante PISCOp 3.0 67
Tabla 18 Resumen técnico de los bloques procesados mediante PISCOp 3.0 70
Tabla 19 Comparación del tS y del coeficiente de drenaje entre el SENAMHI y PISCOp 3.0 72
Tabla 20 Indicadores de validación de la comparación entre el SENAMHI y PISCOp 3.0 75
Tabla 21 Escenarios del coeficiente de drenaje obtenidos mediante las fuentes climáticas evaluadas 77
Tabla 22 Matriz de verificación de campo para determinar la aplicabilidad del coeficiente de drenaje 79
Tabla 23 Matriz de validación integral de la metodología propuesta 81

Tabla 24 Composición vehicular semanal del tránsito registrado 83
Tabla 25 Cálculo del tránsito promedio diario semanal (TPDS) y del índice medio diario anual (IMDA) del tramo evaluado 85
Tabla 26 Resumen de la proyección del tránsito vehicular 86
Tabla 27 Clasificación de la carretera según la demanda vehicular 88
Tabla 28 Parámetros principales para el cálculo de las cargas equivalentes de eje simple (ESAL) 89
Tabla 29 Aporte al ESAL total según el tipo de vehículo pesado 90
Tabla 30 Clasificación del tránsito pesado para el diseño del pavimento 91
Tabla 31 Módulo resiliente adoptado a partir del índice de soporte de California (CBR) de diseño 94
Tabla 32 Parámetros generales empleados en el diseño mediante AASHTO 1993 97
Tabla 33 Coeficientes estructurales y sustento técnico de las capas del pavimento 98
Tabla 34 CBR de diseño y módulo resiliente por sector 99
Tabla 35 Número estructural requerido (SN requerido) por sector 100
Tabla 36 Distribución del número estructural (SN) entre la carpeta asfáltica y las capas granulares 101
Tabla 37 Escenarios del coeficiente de drenaje empleados en el diseño estructural 102
Tabla 38 Diseño estructural calculado sin redondeo 104
Tabla 39 Variación de los espesores calculados respecto de la línea base 110
Tabla 40 Espesores adoptados mediante redondeo constructivo 112
Tabla 41 Aporte estructural de la carpeta asfáltica en el análisis de sensibilidad 113
Tabla 42 Verificación del cumplimiento de los objetivos específicos 119
Tabla 43 Matriz de trazabilidad técnica de la investigación 127
Tabla 44 Síntesis del estudio de tránsito 128
Tabla 45 Síntesis geotécnica de la subrasante 129
Tabla 46 CBR de diseño y módulo resiliente adoptado 130
Tabla 47 Procesamiento de los registros de precipitación de las estaciones del SENAMHI 131
Tabla 48 Procesamiento de la información climática de PISCOp 3.0 132
Tabla 49 Comparación climática entre el SENAMHI y PISCOp 3.0 133
Tabla 50 Síntesis del diseño estructural mediante AASHTO 1993 134
Tabla 51 Verificación técnica de la base y la subbase granulares 135

Lista de Figuras

Figura 1 Árbol del problema 5
Figura 2 Árbol de objetivos 6
Figura 3 Enfoques del diseño estructural de pavimentos flexibles 15
Figura 4 Estructura típica de un pavimento flexible 16
Figura 5 Ubicación del tramo San Miguel–El Descanso 29
Figura 6 Plano de ubicación de los sectores de muestreo 31
Figura 7 Evidencias de la recopilación de información en campo y laboratorio 33
Figura 8 Diagrama de flujo del procedimiento metodológico de la investigación 36
Figura 9 Mapa de ubicación de las estaciones meteorológicas del SENAMHI cercanas al tramo de estudio 38
Figura 10 Distribución de las estaciones meteorológicas y de la información de PISCOp 3.0 en el área de influencia 39
Figura 11 Estacionalidad climática de la exposición a la saturación en la carretera San Miguel–El Descanso 41
Figura 12 Condiciones de drenaje superficial observadas en el tramo de estudio 45
Figura 13 Sección típica existente del tramo San Miguel–El Descanso 52
Figura 14 Tiempo de exposición a la saturación (tS) según las estaciones del SENAMHI 60
Figura 15 Coeficientes de drenaje según la calidad del drenaje en las estaciones del SENAMHI 64
Figura 16 Tiempo de exposición a la saturación (tS) obtenido mediante PISCOp 3.0 68
Figura 17 Coeficiente de drenaje obtenido mediante PISCOp 3.0 por punto de análisis 69
Figura 18 Comparación del tiempo de exposición a la saturación (tS) entre el SENAMHI y PISCOp 3.0 73
Figura 19 Comparación de los coeficientes de drenaje (m) obtenidos a partir de datos del SENAMHI y de PISCOp 3.0 74
Figura 20 Esquema de validación integral de la metodología propuesta 82
Figura 21 Composición vehicular semanal del tránsito registrado 84
Figura 22 Proyección del tránsito vehicular durante el periodo de diseño 87
Figura 23 Aporte al ESAL total según el tipo de vehículo pesado 91
Figura 24 Clasificación del tránsito pesado de diseño según el ESALs 92
Figura 25 Módulo resiliente de la subrasante por sector de análisis 95

Figura 26 Distribución del número estructural requerido (SN requerido) entre la carpeta asfáltica y las capas granulares 101
Figura 27 Coeficientes de drenaje considerados en los escenarios de diseño mediante AASHTO 1993 102
Figura 28 Variación del espesor calculado de la base granular según el escenario de drenaje 105
Figura 29 Variación del espesor calculado de la subbase granular según el escenario de drenaje 106
Figura 30 Comparación esquemática del paquete estructural calculado sin redondeo para el sector 1, tramo km 26+000–27+500 107
Figura 31 Comparación esquemática del paquete estructural calculado sin redondeo para el sector 2, tramo km 31+500–33+000 108
Figura 32 Comparación esquemática del paquete estructural calculado sin redondeo para el sector 3, tramo km 39+000–41+000 109
Figura 33 Reducción porcentual promedio de los espesores por efecto del coeficiente de drenaje 111
Figura 34 Análisis de sensibilidad de la base granular para espesores de carpeta asfáltica de 12, 14 y 16 cm 114
Figura 35 Análisis de sensibilidad de la subbase granular para espesores de carpeta asfáltica de 12, 14 y 16 cm 114
Figura 36 Panel fotográfico de las actividades de campo y de la verificación técnica 137

1. CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN

El agua y la humedad son factores críticos en el comportamiento de los pavimentos flexibles, debido a que pueden disminuir la rigidez y la capacidad de soporte de la subrasante y de las capas granulares. Cuando el drenaje no funciona adecuadamente, la permanencia del agua dentro de la estructura favorece el desarrollo de deformaciones y acelera el deterioro del pavimento. Por ello, el drenaje debe considerarse una condición técnica vinculada con el desempeño estructural y la vida útil de la infraestructura vial (Chu et al., 2023; Rokitowski et al., 2021).

En el método AASHTO 1993, el coeficiente de drenaje (m) permite ajustar el aporte estructural de la base y subbase granular según la calidad del drenaje y el tiempo de exposición a condiciones cercanas a la saturación. Sin embargo, en la práctica, este valor suele adoptarse mediante tablas referenciales, sin relacionarlo necesariamente con información climática propia del tramo evaluado. Esta situación puede generar incertidumbre en el diseño, principalmente en carreteras expuestas a variabilidad de precipitación y humedad (Pérez-González et al., 2024).

La importancia del coeficiente de drenaje (m) radica en que no modifica directamente el Número Estructural requerido (*SN requerido*), pero sí influye en el aporte estructural calculado de las capas granulares. En consecuencia, una selección poco representativa puede conducir a espesores de base y subbase que no reflejen adecuadamente las condiciones reales del tramo, generando posibles sobredimensionamientos, subdimensionamientos o decisiones técnicas con mayor nivel de incertidumbre.

Investigaciones recientes han destacado la necesidad de incorporar información climática representativa en el diseño y la evaluación de pavimentos, debido a que la precipitación, la infiltración y la variación de humedad pueden modificar la respuesta de las capas estructurales. Esta consideración adquiere especial importancia en regiones con marcada variabilidad climática, donde el empleo exclusivo de información histórica general puede no representar adecuadamente las condiciones previstas durante la vida útil del pavimento (Haslett et al., 2021; Maadani et al., 2021; Mendoza-Sanchez et al., 2024).

En el Perú, el método AASHTO 1993 continúa siendo una de las metodologías empleadas para el diseño estructural de pavimentos flexibles. Sin embargo, la selección del coeficiente de drenaje suele realizarse mediante valores referenciales, sin relacionarlo de

manera explícita con registros históricos de precipitación ni con indicadores que representen la exposición de la estructura a condiciones de humedad. Esta limitación puede reducir la representatividad del diseño, especialmente en regiones altoandinas como Cusco, donde la precipitación presenta una marcada variación estacional (Mendoza-Sanchez et al., 2024; Pérez-González et al., 2024).

En este contexto, la presente investigación se desarrolla en la carretera San Miguel–El Descanso, ubicada en el departamento de Cusco, con el objetivo de evaluar la influencia del coeficiente de drenaje (*m*) estimado a partir de indicadores climáticos derivados de la precipitación histórica en el diseño estructural de pavimentos flexibles según el método AASHTO 1993. Para ello, se considera información climática histórica proveniente de registros del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI) y de la información grillada PISCOp 3.0, relacionándola con el tiempo de exposición a saturación (*tS*), el Índice de Saturación Climática (*ISC*) y las condiciones de drenaje verificadas en campo.

La investigación compara tres escenarios de diseño estructural: una línea base referencial con coeficiente de drenaje (*m*) igual a 1.00, un escenario estimado con información SENAMHI y un escenario estimado con información PISCOp 3.0. Con esta comparación se analiza cómo varía el aporte estructural calculado de la base y subbase granular, así como los espesores obtenidos mediante el método AASHTO 1993. De esta manera, la tesis busca reducir la dependencia de valores únicamente referenciales y aportar una forma más objetiva y técnicamente sustentada para estimar este coeficiente en carreteras altoandinas.

Además, esta investigación busca que la selección del coeficiente de drenaje sea una decisión técnica mejor sustentada y no solo una elección basada en valores generales de tabla. En carreteras altoandinas como San Miguel–El Descanso, donde la lluvia, la humedad y el funcionamiento del drenaje pueden cambiar el comportamiento de las capas granulares, resulta necesario integrar la información climática con la verificación de campo para obtener un diseño más coherente con las condiciones reales del tramo. Este enfoque permite que el parámetro adoptado responda mejor al comportamiento esperado del pavimento durante su vida útil y fortalece el criterio técnico del proyectista frente a escenarios con variabilidad climática.

1.1 Realidad problemática

La presencia de agua en un pavimento flexible puede acelerar la pérdida de su capacidad estructural. Cuando el drenaje es deficiente o las capas permanecen húmedas durante periodos prolongados, los materiales granulares disminuyen su resistencia y rigidez, lo que afecta el desempeño y la vida útil de la estructura. Por ello, el análisis de la humedad y del drenaje constituye un aspecto relevante del diseño estructural (Chu et al., 2023; Mousavi et al., 2021; Ullah et al., 2022).

A nivel mundial, la influencia de la humedad sobre los pavimentos flexibles ha adquirido mayor atención debido a la variabilidad climática. La precipitación, la infiltración y la permanencia del agua pueden modificar el comportamiento de los materiales y acelerar su deterioro. Por esta razón, distintas investigaciones recomiendan integrar la información climática con el análisis estructural del pavimento (Haslett et al., 2021; Maadani et al., 2021; Mendoza-Sanchez et al., 2024; Mousavi et al., 2021).

La guía de la American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO, 1993) utiliza el coeficiente de drenaje (m) para ajustar el aporte estructural de la base y la subbase granular. Este valor se define según la calidad del drenaje y el tiempo de exposición a la saturación; sin embargo, suele seleccionarse mediante tablas y criterios cualitativos que no siempre representan las condiciones climáticas del proyecto, lo que puede generar incertidumbre en el diseño (Pérez-González et al., 2024).

En Latinoamérica, la topografía accidentada y la variabilidad estacional de las lluvias limitan la representatividad de valores generales del coeficiente de drenaje (Mendoza-Sanchez et al., 2024; Pérez-González et al., 2024).

En el Perú, el método AASHTO 1993 continúa utilizándose como referencia para el diseño estructural de pavimentos flexibles. El procedimiento considera el efecto de la humedad mediante el coeficiente de drenaje; sin embargo, su selección suele realizarse a partir de los valores establecidos en las tablas del método. Cuando esta elección no se contrasta con registros históricos de precipitación ni con indicadores que representen el tiempo de exposición de las capas granulares a la humedad, el valor adoptado puede no reflejar las condiciones particulares del tramo analizado (AASHTO, 1993; Ministerio de Transportes y Comunicaciones [MTC], 2014).

Esta limitación cobra mayor importancia en las regiones peruanas donde las lluvias varían según la temporada, la altitud y el relieve. Para analizar estas condiciones se dispone de registros del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI) y de datos grillados del producto Peruvian Interpolated Data of the SENAMHI's Climatological and Hydrological Observations (PISCOp), útiles para caracterizar el clima de las zonas donde se diseñan pavimentos flexibles (Aybar et al., 2020; Gutierrez & Lavado-Casimiro, 2026; SENAMHI, 2024).

En el departamento de Cusco, las condiciones altoandinas originan periodos de lluvia concentrados en determinados meses del año. La combinación de altitud, relieve y estacionalidad puede influir en el funcionamiento de los sistemas de drenaje y en el comportamiento de las capas granulares. En la carretera San Miguel–El Descanso, estas características hacen necesario evaluar con mayor detalle la influencia del coeficiente de drenaje en el diseño estructural del pavimento flexible. Sin embargo, en la documentación técnica revisada para el tramo no se identificó un procedimiento cuantitativo que utilice la precipitación histórica como insumo para construir indicadores indirectos de exposición potencial a humedad y respaldar la estimación del coeficiente de drenaje conforme al método AASHTO 1993.

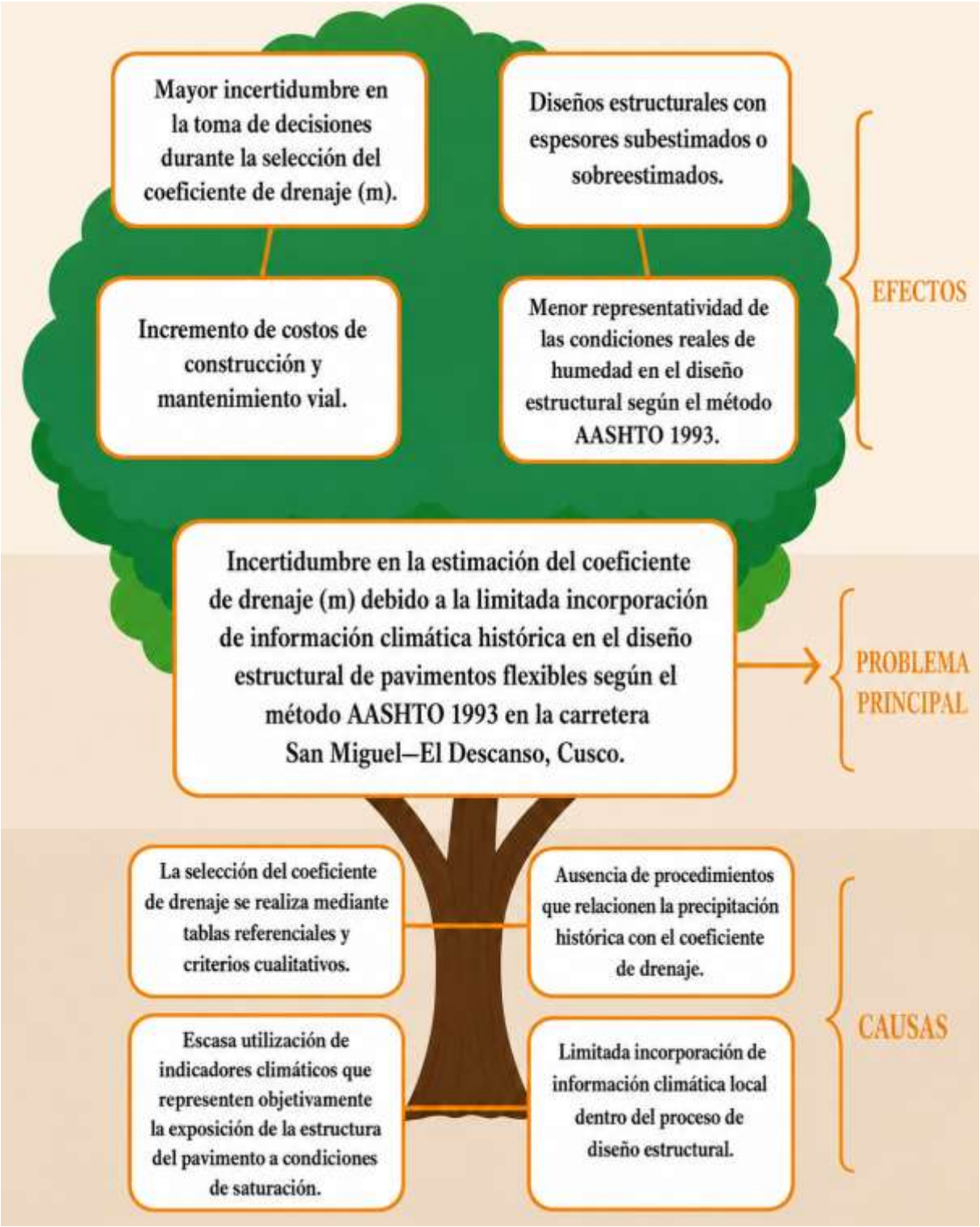
Si el valor de *m* no representa las condiciones climáticas del tramo, los espesores calculados podrían no responder a la exposición potencial a condiciones de humedad. Por ello, su selección debe considerar la precipitación histórica del área evaluada (AASHTO, 1993; Pérez-González et al., 2024; Saride et al., 2022).

Frente a esta situación, la investigación emplea los registros de precipitación del SENAMHI y PISCOp 3.0 para construir indicadores climáticos indirectos de exposición potencial a condiciones de humedad elevada. La precipitación no mide directamente el grado de saturación de la base o subbase. En este marco, el tiempo de exposición a saturación (tS) se interpreta como una aproximación climática operativa, mientras que el Índice de Saturación Climática (ISC), propuesto en esta investigación, se utiliza de manera complementaria para caracterizar y comparar la exposición climática. La estimación del coeficiente de drenaje (m) se sustenta en el tS operativo y en la calidad funcional del drenaje verificada en campo, de acuerdo con los rangos de AASHTO 1993. Los resultados se comparan con una línea base para analizar la influencia de m en el aporte estructural de las capas granulares y en los espesores requeridos.

1.1.1 Árbol del problema

Figura 1

Árbol del problema

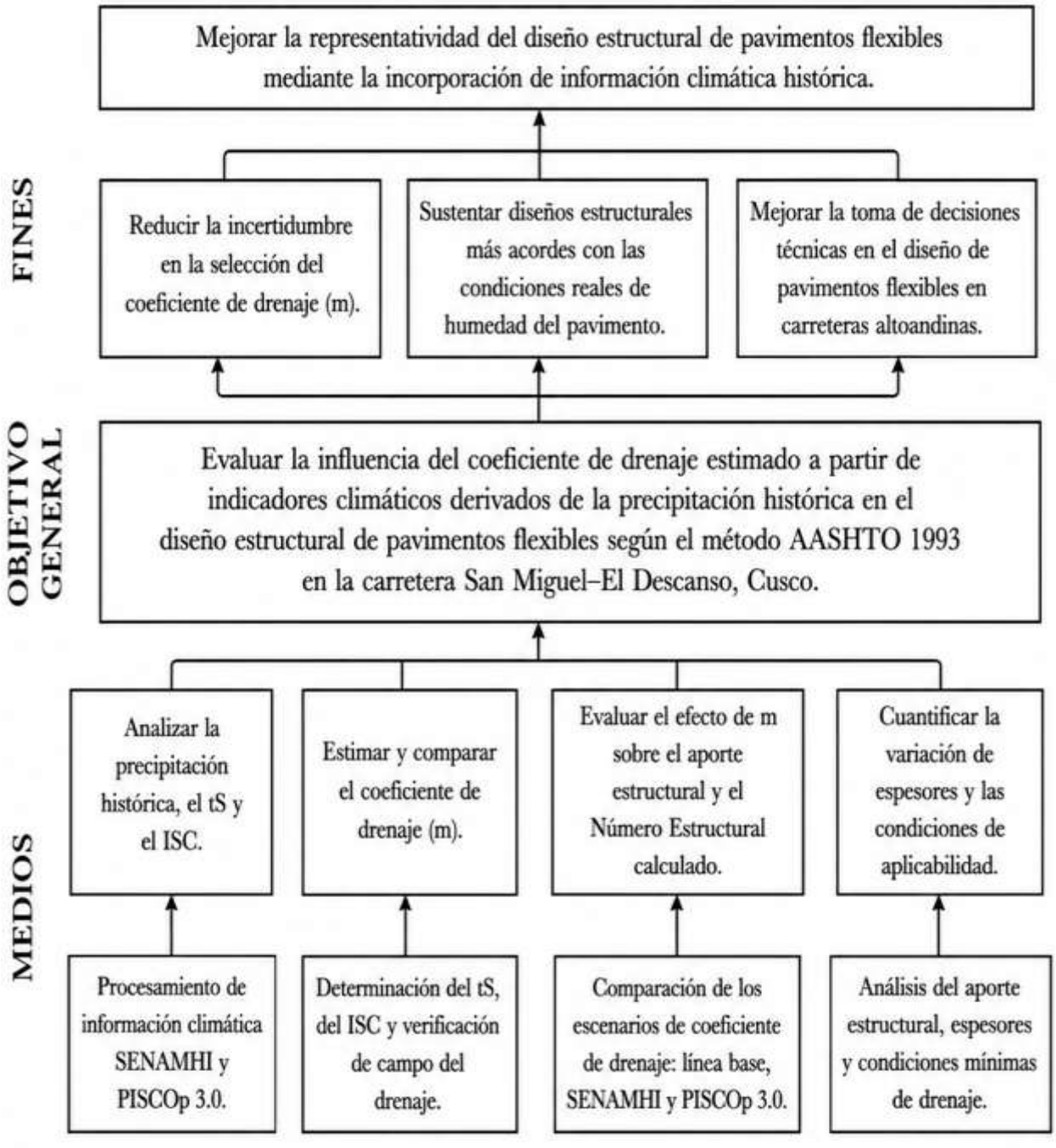


Nota. Se muestran las causas, el problema principal y los efectos de la investigación.

1.1.2 Árbol de objetivos

Figura 2

Árbol de objetivos



Nota. Se muestran los medios, el objetivo general y los fines de la investigación. m = coeficiente de drenaje; tS = tiempo de exposición a saturación; ISC = Índice de Saturación Climática.

1.1.3 Indicadores de medición de problema

Tabla 1

Indicadores considerados en el análisis de la investigación

Indicador	Unidad de medida	Descripción
Precipitación histórica acumulada (PP)	mm	Corresponde a la precipitación registrada por el SENAMHI y estimada mediante PISCOp 3.0. Permite conocer el comportamiento de las lluvias en el área de estudio y su posible relación con la humedad del pavimento (Chu et al., 2023; Haslett et al., 2021).
Tiempo de exposición a saturación (tS)	%	Indica el porcentaje de tiempo durante el cual el pavimento podría permanecer próximo a la saturación. Su cálculo permite representar la exposición de las capas granulares a condiciones de humedad (AASHTO, 1993; Pérez-González et al., 2024).
Índice de Saturación Climática (ISC)	Adimensional	Es un indicador climático complementario propuesto en la presente investigación que integra la precipitación histórica relativa y el tS operativo. Permite caracterizar y comparar la exposición potencial a condiciones de humedad entre fuentes y sectores. No constituye un parámetro original de AASHTO 1993 ni interviene directamente en la interpolación del coeficiente de drenaje (m).
Coeficiente de drenaje (m)	Adimensional	Es el parámetro de AASHTO 1993 que ajusta el aporte estructural de la base y la subbase de acuerdo con la calidad del drenaje y la exposición a la humedad (AASHTO, 1993; Pérez-González et al., 2024).
Número Estructural requerido (SN requerido)	Adimensional	Representa la demanda estructural mínima del pavimento, determinada mediante el tránsito, la confiabilidad, la serviciabilidad y la capacidad de soporte de la subrasante (AASHTO, 1993; Huang, 2004).

Número Estructural calculado (SN calculado)	Adimensional	Es el valor obtenido a partir de los espesores y coeficientes de las capas. Al compararlo con el *SN* requerido, se verifica si la estructura propuesta cumple con la demanda del diseño (AASHTO, 1993; Huang, 2004).
Variación porcentual de espesores (ΔEspesor)	%	Muestra el cambio de los espesores entre la línea base y los escenarios calculados con información del SENAMHI y PISCOp 3.0. Permite reconocer la sensibilidad del diseño ante la variación de *m* (AASHTO, 1993; Pérez-González et al., 2024).

Nota. Se presentan los indicadores climáticos y estructurales empleados en el análisis mediante el método AASHTO 1993.

1.2 Formulación del problema

1.2.1 Problema general

¿Cómo influye el coeficiente de drenaje (m), estimado a partir de indicadores climáticos derivados de la precipitación histórica, en el diseño estructural de pavimentos flexibles según el método AASHTO 1993 en la carretera San Miguel–El Descanso, Cusco?

1.2.2 Problemas específicos

PE1. ¿En qué medida la precipitación histórica, representada mediante el tiempo de exposición a saturación (tS) y el Índice de Saturación Climática (ISC), permite estimar el coeficiente de drenaje (m) del método AASHTO 1993?

PE2. ¿Qué diferencias se presentan entre el coeficiente de drenaje referencial y los coeficientes estimados mediante información del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI) y PISCOp 3.0?

PE3. ¿Cómo influye la variación del coeficiente de drenaje (m) en el aporte estructural calculado de las capas granulares y en los espesores requeridos para satisfacer el Número Estructural requerido (SN requerido)?

PE4. ¿Qué variación presentan los espesores de base y subbase granular frente a los escenarios de coeficiente de drenaje evaluados, y bajo qué condiciones de drenaje resultan técnicamente aplicables?

1.3 Estado del arte

La presencia de agua en un pavimento flexible puede reducir la capacidad de soporte de las capas granulares y de la subrasante. Su efecto no depende únicamente de la cantidad de lluvia, sino también de la infiltración, la eficiencia del drenaje y el tiempo durante el cual los materiales permanecen húmedos. Mousavi et al. (2021), al revisar investigaciones anteriores, señalan que alrededor del 80 % de los daños del pavimento puede estar relacionado, directa o indirectamente, con el exceso de agua en sus capas. Por ello, la humedad debe analizarse como una condición que varía durante el año.

Chu et al. (2023) observaron que la respuesta estructural del pavimento depende de las propiedades de los materiales y de la capacidad del sistema para evacuar el agua. Asimismo, Ullah et al. (2022) comprobaron que el módulo resiliente disminuye cuando la humedad supera el contenido óptimo. En un pavimento de Polonia, Rokitowski et al. (2021) encontraron que las deflexiones del sector más afectado por la humedad fueron entre 24 % y 123 % superiores a las registradas en el sector con mejores condiciones. Estos resultados muestran que el comportamiento puede cambiar según el nivel y el tiempo de exposición al agua.

Mousavi et al. (2021) desarrollaron un modelo que relaciona la precipitación, la infiltración, las propiedades hidráulicas y las cargas del tránsito. Los autores advirtieron que los promedios mensuales pueden ocultar los efectos de lluvias intensas de corta duración. En la misma línea, Yu-Shan y Shakiba (2021) identificaron que la saturación y el aumento de la presión de poros pueden incrementar las deformaciones del pavimento. Estos hallazgos respaldan el uso de registros diarios para identificar los periodos con mayor potencial de saturación.

La American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO, 1993) representa el efecto del drenaje mediante el coeficiente *m*, aplicado al aporte estructural de la base y la subbase granular. Su selección considera la calidad del drenaje y el porcentaje de tiempo durante el cual las capas permanecen próximas a la saturación, denominado en esta investigación tiempo de exposición a la saturación (*tS*). La guía establece cuatro intervalos de *tS*: menos de 1 %, entre 1 % y 5 %, entre 5 % y 25 % y más de 25 %. Por tanto, *m* depende tanto de la calidad del drenaje como del tiempo de exposición a la humedad.

El aspecto crítico se encuentra en la forma de determinar el *tS*, debido a que AASHTO 1993 establece los intervalos de tiempo próximo a la saturación, pero no desarrolla un procedimiento específico para obtenerlos directamente de registros diarios de precipitación. Esta limitación puede llevar a seleccionar *m* mediante apreciaciones generales que no representan la estacionalidad del tramo. Por ello, transformar la información climática en un indicador cuantificable constituye un paso necesario para vincular la precipitación con la exposición potencial a la saturación y con el aporte estructural de las capas granulares (AASHTO, 1993; Mousavi et al., 2021; Pérez-González et al., 2024).

Pérez-González et al. (2024) señalaron que la selección de *m* mediante valores tabulados puede generar incertidumbre cuando no se consideran el material y el clima local. En los casos estudiados, los coeficientes variaron entre 0,85 y 1,13 y los espesores presentaron una variación promedio del 12 %. A partir de los valores reportados se calculan reducciones aproximadas de 16,7 % en Coro y 20,3 % en Maracay. En una condición desfavorable de El Callao, el espesor aumentó cerca de 4,1 %. Esto confirma que una selección más precisa de *m* puede evitar diseños excesivos o insuficientes.

El coeficiente *m* no modifica directamente el Número Estructural requerido (*SN* requerido), sino el aporte estructural de la base y la subbase y, en consecuencia, los espesores necesarios. Saride et al. (2022) demostraron que la capacidad de drenaje también puede cambiar durante el servicio: las cargas redujeron la permeabilidad alrededor de 20 % y la disminución estimada a largo plazo se ubicó entre 65 % y 70 %. Estos resultados refuerzan la necesidad de seleccionar *m* considerando las condiciones reales del proyecto y no solamente un valor general de tabla.

En el Perú, Aybar et al. (2020) desarrollaron Peruvian Interpolated Data of the SENAMHI's Climatological and Hydrological Observations (PISCOp) para representar la distribución temporal y espacial de las lluvias. Gutierrez y Lavado-Casimiro (2026) actualizaron esta información mediante PISCOp 3.0, mientras que el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI, 2024) proporciona registros observados en estaciones. Ambas fuentes permiten comparar información puntual y grillada para caracterizar la precipitación en zonas altoandinas.

La revisión confirma que la humedad afecta el comportamiento del pavimento y que AASHTO 1993 utiliza el *tS* para seleccionar *m*. Sin embargo, todavía es limitada la

aplicación de procedimientos que calculen el *tS* mediante registros diarios del propio tramo. Frente a ello, la investigación relaciona la precipitación histórica, el *tS* y el Índice de Saturación Climática (ISC) para estimar *m* y evaluar su influencia en el aporte estructural y los espesores de la carretera San Miguel–El Descanso (AASHTO, 1993; Aybar et al., 2020; Gutierrez & Lavado-Casimiro, 2026; Pérez-González et al., 2024).

1.4 Justificación

La investigación se justifica por la necesidad de representar con mayor precisión el efecto de la humedad en el diseño estructural de pavimentos flexibles. Cuando el agua permanece en la base, la subbase o la subrasante, los materiales pueden perder resistencia y rigidez, especialmente si el drenaje no permite evacuarla oportunamente. En este contexto, la American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO, 1993) incorpora el coeficiente de drenaje (*m*) para ajustar el aporte estructural de las capas granulares según la calidad del drenaje y el tiempo durante el cual permanecen próximas a la saturación. Por ello, la selección de este coeficiente debe guardar relación con las condiciones de humedad del proyecto (Chu et al., 2023; Mousavi et al., 2021; Pérez-González et al., 2024).

Desde el punto de vista teórico, el estudio permite profundizar en la relación entre la precipitación histórica, el tiempo de exposición a la saturación (*tS*) y el coeficiente *m*. Aunque AASHTO 1993 reconoce el porcentaje de tiempo próximo a la saturación como un criterio para seleccionar este parámetro, en la práctica suele recurrirse a categorías generales que no siempre reflejan la estacionalidad climática del tramo. La investigación busca reducir esta limitación mediante el análisis de información climática diaria, manteniendo los fundamentos del método y adaptando su aplicación a las condiciones de una carretera altoandina (AASHTO, 1993; Mendoza-Sanchez et al., 2024; Pérez-González et al., 2024).

Desde el punto de vista metodológico, se propone una secuencia trazable que relaciona la precipitación histórica con el *tS*, el Índice de Saturación Climática (ISC) y la estimación de *m*. El ISC es un indicador planteado en la investigación para integrar las variables climáticas analizadas y apoyar la selección del coeficiente de drenaje. El procedimiento compara una línea base referencial con dos escenarios elaborados a partir de registros observados y datos grillados. De esta manera, la selección de *m* se sustenta en información cuantificable del área de estudio y no solamente en una valoración cualitativa del drenaje (AASHTO, 1993; Mousavi et al., 2021; Pérez-González et al., 2024).

Desde el punto de vista práctico, el procedimiento se aplica a la carretera San Miguel–El Descanso, ubicada en una zona altoandina de Cusco con precipitaciones estacionales. Para representar estas condiciones se utilizan registros del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI) y datos grillados de Peruvian Interpolated Data of the SENAMHI's Climatological and Hydrological Observations, versión 3.0 (PISCOp 3.0). La comparación entre ambas fuentes permite evaluar si las diferencias en la representación de la precipitación influyen en el *tS*, en el coeficiente *m* y en los espesores calculados para las capas granulares (Aybar et al., 2020; Gutierrez & Lavado-Casimiro, 2026; SENAMHI, 2024).

La utilidad de la investigación se encuentra en que *m* no modifica directamente el Número Estructural requerido (*SN* requerido), pero sí el aporte estructural calculado de la base y la subbase y, por consiguiente, los espesores necesarios para cumplir con la demanda del diseño. Los resultados pueden ser útiles para proyectistas, consultores, entidades responsables de infraestructura vial e investigadores que trabajen en carreteras altoandinas. Asimismo, el procedimiento puede emplearse como referencia en otros tramos con condiciones climáticas semejantes, siempre que sea adaptado y validado con información local (AASHTO, 1993; Pérez-González et al., 2024).

Esta es la versión recomendada porque explica con claridad la necesidad del estudio, su aporte teórico, la propuesta metodológica, su aplicación práctica y los posibles beneficiarios, sin repetir innecesariamente la realidad problemática ni adelantar todos los resultados.

1.5 Hipótesis general

El coeficiente de drenaje (m), estimado a partir de indicadores climáticos derivados de la precipitación histórica, influye de manera cuantificable en el diseño estructural de pavimentos flexibles según el método AASHTO 1993 en la carretera San Miguel–El Descanso, Cusco.

1.5.1 Hipótesis específicas

HE1. La precipitación histórica, representada mediante el tiempo de exposición a saturación (tS) y el Índice de Saturación Climática (ISC), permite estimar coeficientes de drenaje diferenciados respecto al valor referencial del método AASHTO 1993.

HE2. Los coeficientes de drenaje estimados con información del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI) y PISCOp 3.0 presentan diferencias cuantificables respecto al escenario de línea base.

HE3. La variación del coeficiente de drenaje (m) modifica cuantificablemente el aporte estructural de la base y subbase granular, generando variaciones en los espesores requeridos para satisfacer el Número Estructural requerido (SN requerido).

HE4. Los espesores calculados de base y subbase granular varían frente a los escenarios de coeficiente de drenaje (m) evaluados, y su aplicabilidad técnica depende de mantener condiciones funcionales de drenaje durante la vida útil del pavimento.

1.6 Objetivos de la investigación

1.6.1 Objetivo general

Evaluar la influencia del coeficiente de drenaje (m), estimado a partir de indicadores climáticos derivados de la precipitación histórica, en el diseño estructural de pavimentos flexibles según el método AASHTO 1993 en la carretera San Miguel–El Descanso, Cusco.

1.6.2 Objetivos específicos

OE1. Analizar la precipitación histórica del área de estudio mediante información del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI) y PISCOp 3.0, determinando el tiempo de exposición a saturación (tS) y el Índice de Saturación Climática (ISC) como indicadores de exposición del pavimento a condiciones de humedad.

OE2. Estimar y comparar el coeficiente de drenaje (m) del método AASHTO 1993 en los escenarios de línea base, SENAMHI y PISCOp 3.0, considerando los indicadores climáticos obtenidos y la verificación de campo.

OE3. Evaluar el efecto del coeficiente de drenaje (m) sobre el aporte estructural calculado de la base y subbase granular y su incidencia en los espesores requeridos para satisfacer el Número Estructural requerido (SN requerido).

OE4. Cuantificar la variación de los espesores de base y subbase granular en los escenarios evaluados y establecer las condiciones mínimas de drenaje requeridas para sustentar la aplicabilidad técnica de los coeficientes de drenaje adoptados.

2. CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO

2.1 Introducción al marco teórico

El diseño estructural de pavimentos flexibles requiere considerar la interacción entre las cargas de tránsito, las propiedades mecánicas de los materiales y las condiciones ambientales que actúan durante la vida útil de la infraestructura vial. Entre estos factores, la humedad constituye una variable relevante, debido a que puede modificar la capacidad de soporte de las capas granulares y acelerar los procesos de deterioro cuando las condiciones de drenaje no son adecuadas (Chu et al., 2023; Huang, 2004).

Diversas investigaciones han demostrado que la precipitación y la permanencia del agua dentro de la estructura del pavimento influyen en el comportamiento de los materiales granulares y de la subrasante. En este contexto, el drenaje cumple una función fundamental, debido a que permite controlar la humedad, evacuar el agua infiltrada y conservar las condiciones estructurales previstas durante el diseño (Cedergren, 1987; Chu et al., 2023).

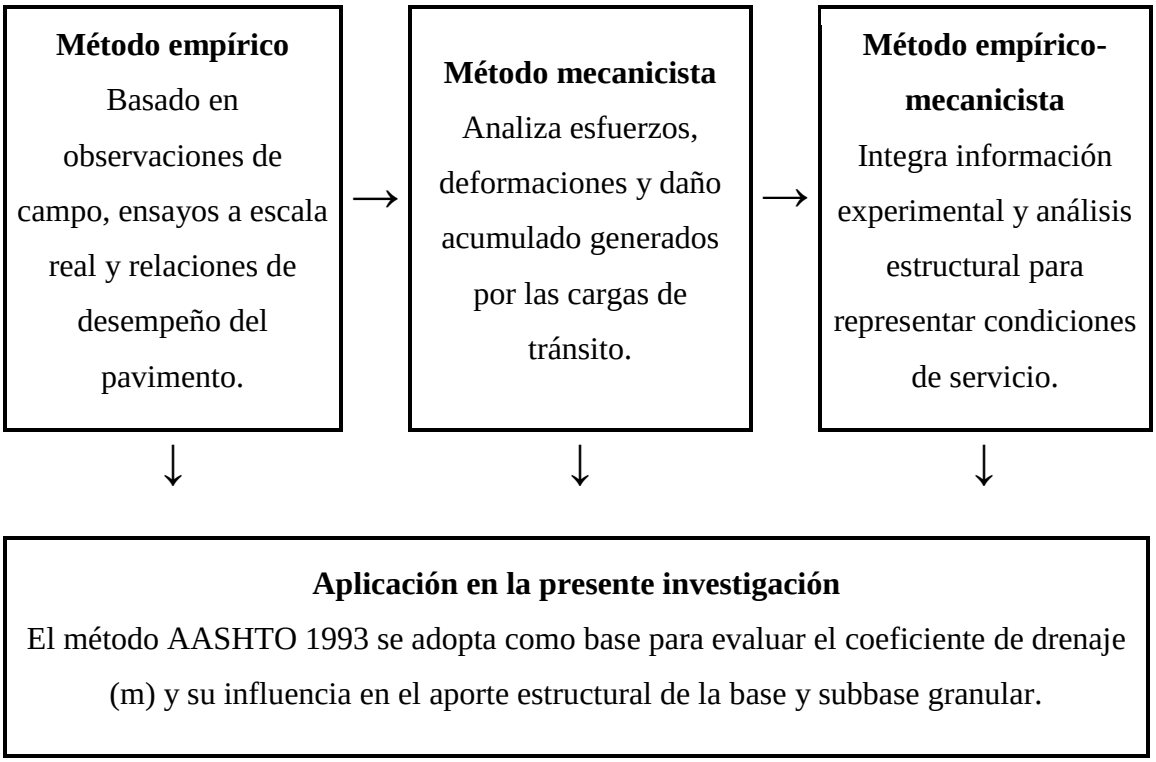
En ese sentido, la elección del método AASHTO 1993 en la presente investigación responde a su amplia aplicación práctica y a la posibilidad de analizar, dentro de su estructura metodológica, la influencia del drenaje sobre el aporte estructural de la base y subbase granular. Este enfoque permite vincular variables como tránsito, serviciabilidad, confiabilidad, capacidad de soporte de la subrasante, estructura del pavimento y condiciones de drenaje, lo que resulta coherente con el objetivo de evaluar el coeficiente de drenaje (m) a partir de información climática histórica. En el contexto peruano, el diseño de pavimentos flexibles se apoya en criterios normativos y en metodologías ampliamente utilizadas como AASHTO 1993, debido a que permiten desarrollar diseños estructurales verificables y comparables bajo diferentes escenarios de análisis (AASHTO, 1993; Huang, 2004).

Este marco teórico permite comprender cómo la precipitación, el tiempo de exposición a saturación (tS) y el Índice de Saturación Climática (ISC) se relacionan con el coeficiente de drenaje (m), el Número Estructural calculado (SN calculado) y los espesores de diseño**.**

La Figura 3 sintetiza estos enfoques de diseño estructural y muestra su relación con la metodología adoptada en la presente investigación.

Figura 3

Enfoques del diseño estructural de pavimentos flexibles



Nota. Se muestran los enfoques empírico, mecanicista y empírico-mecanicista considerados en el diseño estructural de pavimentos flexibles.

Dentro del método AASHTO 1993, la influencia de la humedad se incorpora mediante el coeficiente de drenaje (m), parámetro que ajusta el aporte estructural de las capas granulares en función de la calidad del drenaje y del tiempo de exposición a condiciones cercanas a la saturación (AASHTO, 1993). Sin embargo, la selección de este coeficiente suele realizarse mediante criterios referenciales, lo que puede generar incertidumbre cuando no se consideran registros climáticos propios del área de estudio.

En ese sentido, el presente marco teórico desarrolla los fundamentos relacionados con pavimentos flexibles, drenaje vial, precipitación histórica, método AASHTO 1993, coeficiente de drenaje (m) e indicadores climáticos. Estos conceptos permiten sustentar la metodología propuesta para estimar dicho coeficiente a partir de información climática histórica y evaluar su influencia en el diseño estructural del pavimento flexible de la carretera San Miguel–El Descanso, Cusco.

2.2 Pavimentos flexibles y comportamiento estructural

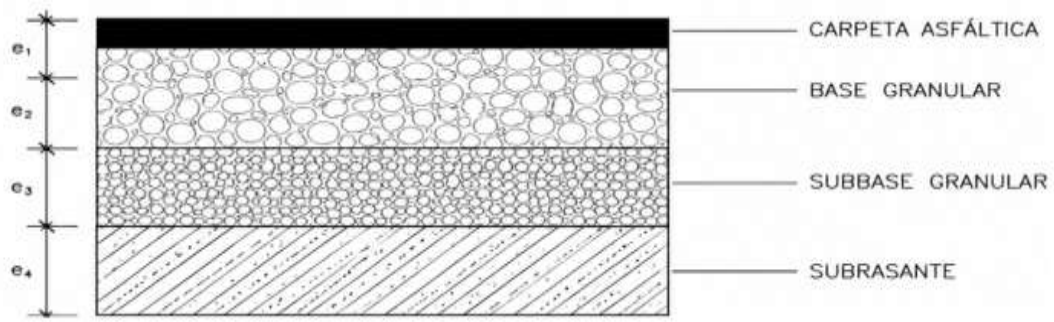
Los pavimentos flexibles son estructuras multicapa conformadas por una carpeta asfáltica y capas granulares apoyadas sobre la subrasante. Su función principal es distribuir progresivamente las cargas vehiculares hacia el terreno de fundación, evitando que los esfuerzos transmitidos superen la capacidad de soporte del suelo (Yoder & Witczak, 1975; Huang, 2004).

La estructura típica de un pavimento flexible está integrada por carpeta asfáltica, base granular, subbase granular y subrasante. La carpeta asfáltica proporciona la superficie de rodadura y contribuye a la distribución inicial de las cargas. La base granular cumple una función estructural importante, debido a que transmite y distribuye los esfuerzos generados por el tránsito hacia las capas inferiores. La subbase granular brinda soporte adicional y puede favorecer el drenaje interno de la estructura. Finalmente, la subrasante constituye el soporte natural o mejorado sobre el cual se apoya el paquete estructural del pavimento (AASHTO, 1993; Huang, 2004).

El comportamiento estructural del pavimento depende del tránsito, la calidad de los materiales, la capacidad de soporte de la subrasante y las condiciones ambientales. Entre estas últimas, la humedad es especialmente relevante porque puede disminuir la rigidez de las capas granulares y afectar su contribución estructural. Por ello, el análisis del drenaje y de la exposición a humedad resulta necesario en el diseño del pavimento flexible, especialmente en la base y subbase granular, donde el coeficiente de drenaje interviene directamente dentro del método AASHTO 1993 (Cedergren, 1987; Chu et al., 2023; Mousavi et al., 2021).

Figura 4

Estructura típica de un pavimento flexible



Nota. Adaptado de Huang (2004).

2.3 Subrasante y módulo resiliente

La subrasante constituye la capa de fundación del pavimento y su capacidad de soporte influye directamente en el Número Estructural requerido (SN requerido) y en los espesores de diseño. En el método AASHTO 1993, esta condición se representa mediante el módulo resiliente de la subrasante (Mr), el cual expresa la respuesta elástica del suelo frente a cargas repetidas de tránsito (AASHTO, 1993; Huang, 2004).

Cuando no se dispone de ensayos directos de módulo resiliente, este puede estimarse mediante correlaciones empíricas a partir del California Bearing Ratio (CBR). En la presente investigación, la estimación del módulo resiliente se desarrolla mediante la siguiente expresión:

$$M_r = 2555 \times CBR^{0.64} \quad (1)$$

Donde:

$M_r =$ módulo resiliente de la subrasante (psi)
$CBR =$ California Bearing Ratio (%)

Esta correlación permite aproximar la capacidad estructural de la subrasante a partir de los ensayos de la Relación de Soporte de California (California Bearing Ratio [CBR]) cuando no se dispone de ensayos dinámicos específicos del módulo resiliente. Sin embargo, debe considerarse que el contenido de humedad puede modificar la respuesta resiliente del suelo, especialmente cuando existen deficiencias de drenaje o exposición prolongada a condiciones próximas a la saturación (Rokitowski et al., 2021; Ullah et al., 2022).

2.4 Drenaje en pavimentos flexibles

El drenaje en pavimentos flexibles tiene como finalidad controlar la presencia y permanencia del agua dentro de la estructura vial. El agua puede ingresar mediante fisuras, infiltración desde la superficie, escorrentía lateral o ascenso capilar desde la subrasante. Cuando permanece durante periodos prolongados dentro de las capas granulares, puede ocasionar pérdida de rigidez, disminución de resistencia e incremento de las deformaciones estructurales (Cedergren, 1987; Moulton, 1980; Mousavi et al., 2021).

El drenaje puede clasificarse en superficial y subsuperficial. El drenaje superficial capta y evacúa el agua de lluvia antes de que ingrese a la estructura del pavimento, mientras que el drenaje subsuperficial permite remover el agua acumulada en las capas internas o

proveniente del subsuelo. La interacción adecuada entre ambos sistemas contribuye a reducir el tiempo de exposición a saturación (tS) y a preservar el desempeño estructural del pavimento.

La humedad influye principalmente en las capas de base y subbase granular, debido a que estos materiales pueden perder resistencia y rigidez cuando permanecen expuestos a condiciones cercanas a la saturación. Por esta razón, la evaluación del drenaje constituye un elemento central en la presente investigación, ya que permite relacionar la precipitación histórica, el tiempo de exposición a saturación (tS) y la estimación del coeficiente de drenaje (m).

2.5 Tiempo de exposición a saturación

En la presente investigación, el tiempo de exposición a saturación (tS) representa una aproximación climática operativa del porcentaje del periodo analizado con exposición potencial a condiciones de humedad elevada o próximas a la saturación. Se obtiene a partir de la frecuencia de días que cumplen el umbral de precipitación adoptado y no constituye una medición directa de la saturación interna de la base, subbase o subrasante. Su interpretación se realiza conjuntamente con la calidad funcional del drenaje verificada en campo, en concordancia con los criterios de AASHTO 1993.

En la presente investigación, el tS se determina a partir de los registros históricos de precipitación del área de estudio mediante la siguiente expresión:

$$tS = \frac{D_s}{D_t} \times 100 \qquad (2)$$

Donde:

$tS =$ tiempo de exposición a saturación (%)
$D_s =$ número de días con potencial de saturación
$D_t =$ número total de días analizados

Valores elevados de tS indican una mayor exposición potencial de la estructura del pavimento a condiciones de humedad, mientras que valores bajos reflejan una menor permanencia relativa de agua en las capas granulares. Este indicador constituye la base para la estimación del Índice de Saturación Climática (ISC).

2.6 Precipitación histórica e información climática

La precipitación histórica constituye una variable climática fundamental para caracterizar la exposición potencial del pavimento a condiciones de humedad. Sin embargo, los registros de precipitación no miden directamente el contenido de humedad ni el grado de saturación de la base, subbase o subrasante. En esta investigación, dichos registros se emplean como insumo para construir indicadores climáticos indirectos que permiten identificar patrones, variabilidad temporal y periodos con aporte hídrico relevante.

En la presente investigación se emplearon registros meteorológicos del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI, 2024) y datos del producto grillado PISCOp 3.0. Los registros de las estaciones del SENAMHI proporcionaron información observada de la precipitación en el área de influencia del tramo. Por su parte, PISCOp utiliza procedimientos de integración e interpolación para generar información grillada de precipitación con cobertura espacial continua en el territorio peruano (Aybar et al., 2020). La versión PISCOp 3.0 amplía la serie diaria al periodo 1981–2025 e incorpora mejoras en el control de calidad, la selección de estaciones, la imputación de datos faltantes y la integración de información satelital y geoespacial (SENAMHI, 2026). Ambas fuentes se analizaron de manera independiente para comparar la estimación del tiempo de exposición a saturación (tS) y del coeficiente de drenaje (m).

Para caracterizar estadísticamente la precipitación histórica se utilizan indicadores como la precipitación media anual, la desviación estándar y el coeficiente de variación.

La precipitación media anual se expresa como:

$$P_{ma} = \frac{\sum_{i=1}^{n} P_i}{n} \tag{3}$$

Donde:

$P_{ma} =$ precipitación media anual (mm)
$P_i =$ precipitación anual registrada (mm)
$n =$ número de años analizados

La desviación estándar se expresa como:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum(P_i - \bar{P})^2}{n-1}} \tag{4}$$

Donde:

$\sigma =$ desviación estándar

$P_i =$ precipitación observada

$\bar{P} =$ precipitación promedio

El coeficiente de variación se determina mediante:

$$CV = \frac{\sigma}{\bar{P}} \times 100 \quad (5)$$

Donde:

$CV =$ coeficiente de variación (%)

$\sigma =$ desviación estándar

$\bar{P} =$ precipitación promedio

Estos parámetros permiten evaluar la variabilidad de la precipitación y sirven como base para interpretar el comportamiento climático del área de estudio.

2.7 Método AASHTO 1993 para pavimentos flexibles

El método AASHTO 1993 es un procedimiento empírico ampliamente utilizado para el diseño estructural de pavimentos flexibles. Su formulación se basa en los resultados del AASHO Road Test y relaciona el tránsito proyectado, la confiabilidad, la serviciabilidad, el módulo resiliente de la subrasante y la capacidad estructural del pavimento mediante el concepto de Número Estructural requerido (SN requerido) (AASHTO, 1993; Huang, 2004).

La Ecuación general de diseño para pavimentos flexibles se expresa como:

$$\log_{10}\left(W_{18}\right) = Z_R S_0 + 9.36\log_{10}\left(SN+1\right) - 0.20 + \frac{\log_{10}\left(\frac{\Delta PSI}{4.2-1.5}\right)}{0.40 + \frac{1094}{\left(SN+1\right)^{5.19}}} + 2.32\log_{10}\left(M_R\right) - 8.07 \quad (6)$$

Donde:

$W_{18} =$ número acumulado de ejes equivalentes de 80 kN

$Z_R =$ desviación normal estándar asociada al nivel de confiabilidad

$S_0 =$ desviación estándar combinada

$SN =$ Número Estructural requerido

$\Delta PSI =$ pérdida admisible de serviciabilidad

$M_R =$ módulo resiliente de la subrasante (psi)

Esta ecuación permite determinar el Número Estructural requerido (SN requerido) para soportar las cargas de tránsito previstas durante el periodo de diseño. Es importante precisar que el coeficiente de drenaje (m) no modifica directamente el SN requerido calculado con esta ecuación; su influencia se presenta en el aporte estructural calculado de las capas granulares y, por tanto, en los espesores necesarios para cumplir dicho requerimiento.

2.8 Número Estructural y aporte de capas

El Número Estructural (SN) representa la capacidad estructural que debe proporcionar el pavimento flexible para soportar las cargas de tránsito durante el periodo de diseño. En el método AASHTO 1993, el SN calculado por las capas del pavimento se obtiene considerando el espesor de cada capa, su coeficiente estructural y, en el caso de la base y subbase granular, el coeficiente de drenaje correspondiente (AASHTO, 1993; Huang, 2004).

La expresión general del Número Estructural aportado es:

$$SN = a_1 D_1 + a_2 m_2 D_2 + a_3 m_3 D_3 \quad (7)$$

Donde:

$SN =$ Número Estructural calculado o aportado

$a_1 =$ coeficiente estructural de la carpeta asfáltica

$a_2 =$ coeficiente estructural de la base granular

$a_3 =$ coeficiente estructural de la subbase granular

$D_1 =$ espesor de la carpeta asfáltica

$D_2 =$ espesor de la base granular

$D_3 =$ espesor de la subbase granular

$m_2 =$ coeficiente de drenaje de la base granular

$m_3 =$ coeficiente de drenaje de la subbase granular

Esta ecuación es fundamental para la investigación, debido a que el coeficiente de drenaje (m) modifica el aporte estructural de la base y la subbase granular mediante los términos $a_2 m_2 D_2$ y $a_3 m_3 D_3$. Por ello, una variación en el valor de m puede generar cambios en el Número Estructural calculado (SN calculado) y en los espesores necesarios para cumplir el Número Estructural requerido (SN requerido).

2.9 Coeficiente de drenaje en el método AASHTO 1993

El coeficiente de drenaje (*m*) es un parámetro incorporado por el método AASHTO 1993 para representar el efecto de la humedad sobre el aporte estructural de las capas granulares. Su valor depende principalmente de la calidad del drenaje y del porcentaje de tiempo durante el cual la estructura permanece expuesta a condiciones próximas a la saturación (AASHTO, 1993).

Valores mayores a 1.00 representan condiciones favorables de drenaje, mientras que valores menores a 1.00 reflejan condiciones desfavorables, asociadas a mayor permanencia de humedad dentro de la estructura del pavimento. Debido a que este parámetro se aplica a la base y subbase granular, su variación puede modificar el aporte estructural calculado de dichas capas y los espesores requeridos para satisfacer el SN requerido.

2.9.1 Calidad de drenaje según AASHTO 1993

Tabla 2

Clasificación de la calidad del drenaje según AASHTO 1993

Calidad de drenaje	Tiempo requerido para evacuar el agua
Excelente	2 horas
Bueno	1 día
Regular	1 semana
Malo	1 mes
Muy malo	El agua permanece atrapada

Nota. Adaptado de AASHTO (1993).

La clasificación anterior refleja la capacidad del sistema para evacuar el agua infiltrada y recuperar condiciones adecuadas de humedad después de un evento de precipitación. Cuanto menor sea el tiempo requerido para evacuar el agua, mayor será la calidad del drenaje y mejor será el aporte estructural efectivo de las capas granulares.

2.9.2 Tiempo próximo a saturación según AASHTO 1993

Tabla 3

Porcentaje del tiempo de exposición a la saturación (tS) según AASHTO 1993

Tiempo próximo a saturación	Porcentaje (%)
Muy bajo	< 1
Bajo	1–5
Moderado	5–25
Alto	> 25

Nota. Adaptado de AASHTO (1993).

Este criterio constituye uno de los fundamentos de la investigación, debido a que el tiempo de exposición a saturación se estima a partir del análisis de registros históricos de precipitación y posteriormente se relaciona con la selección del coeficiente de drenaje.

2.9.3 Coeficientes de drenaje para capas granulares

Tabla 4

Coeficientes de drenaje recomendados por AASHTO 1993

Calidad de drenaje	< 1 %	1–5 %	5–25 %	> 25 %
Excelente	1.4	1.35	1.3	1.2
Bueno	1.25	1.2	1.15	1
Regular	1.15	1.1	1	0.8
Malo	1	0.9	0.8	0.6
Muy malo	0.8	0.7	0.6	0.4

Nota. Adaptado de AASHTO (1993).

La combinación entre calidad de drenaje y tiempo de exposición a saturación (tS) permite seleccionar el coeficiente de drenaje (m) aplicable a las capas granulares. Sin embargo, el procedimiento tradicional depende en gran medida de criterios referenciales, por lo que puede generar incertidumbre cuando no se incorporan datos climáticos representativos del área de estudio.

2.10 Índice de Saturación Climática *(ISC)*

El Índice de Saturación Climática (ISC) es un indicador climático complementario propuesto en la presente investigación para integrar la precipitación histórica relativa y el tiempo de

exposición a saturación (tS) operativo, con la finalidad de caracterizar y comparar la exposición potencial del pavimento a condiciones de humedad. El ISC no es un parámetro original del método AASHTO 1993, no representa una medición directa de la saturación interna del pavimento y no sustituye los rangos de tS y calidad de drenaje utilizados para seleccionar el coeficiente de drenaje (m).

Conceptualmente, el ISC integra la precipitación acumulada relativa y el tS operativo para caracterizar y comparar la exposición climática potencial entre los sectores evaluados. Su función es complementaria: no mide la saturación real, no sustituye los criterios de AASHTO 1993 ni calcula directamente el coeficiente de drenaje (m).

En esta investigación, el ISC se utiliza como indicador complementario para comparar la exposición climática potencial entre las fuentes y los sectores evaluados. No interviene directamente en la interpolación del coeficiente de drenaje (m), cuya estimación se sustenta en el tS operativo y en la calidad funcional del drenaje dentro de los rangos de AASHTO 1993.

2.11 Marco conceptual

La presente investigación se fundamenta en la relación entre precipitación histórica, tiempo de exposición a saturación (tS), Índice de Saturación Climática (ISC), coeficiente de drenaje (m) y diseño estructural mediante el método AASHTO 1993. Estos elementos permiten evaluar cómo las condiciones climáticas pueden influir en el aporte estructural de las capas granulares y en los espesores adoptados para el diseño del pavimento flexible.

La precipitación histórica permite caracterizar el comportamiento climático del área de estudio. A partir de ella se determina el tiempo de exposición a saturación (tS), el cual representa la permanencia potencial de humedad en la estructura del pavimento. Luego, mediante el Índice de Saturación Climática (ISC), se integra la información climática y se genera un criterio de apoyo para estimar el coeficiente de drenaje (m).

Finalmente, el coeficiente de drenaje (m) se incorpora en el cálculo del Número Estructural calculado (SN calculado) aportado por la base y subbase granular dentro del método AASHTO 1993. Esta relación permite evaluar la influencia de dicho coeficiente sobre el diseño estructural del pavimento flexible en la carretera San Miguel–El Descanso, ubicada en la región Cusco.

3. CAPÍTULO III: METODOLOGÍA

3.1 Enfoque y tipo de investigación

La presente investigación se desarrolla bajo un enfoque cuantitativo, debido a que emplea datos numéricos provenientes de registros históricos de precipitación del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI), información climática Peruvian Interpolation data of the SENAMHI's Climatological and Hydrological Observations – precipitation versión 3.0 (PISCOp 3.0), parámetros de tránsito, características geotécnicas de la subrasante y variables del diseño estructural de pavimentos flexibles. Estos datos permiten analizar la influencia del coeficiente de drenaje (m) en el diseño desarrollado mediante el método de la American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO 1993).

El estudio aplica procedimientos matemáticos y estadísticos para determinar el tiempo de exposición a saturación (tS), calcular el Índice de Saturación Climática (ISC) y estimar el coeficiente de drenaje en los escenarios climáticos SENAMHI y PISCOp 3.0. A partir de ello, se evalúa su efecto sobre el Número Estructural calculado (SN calculado), el aporte de las capas granulares y los espesores del pavimento flexible en la carretera San Miguel–El Descanso, Cusco.

3.2 Tipo y nivel de investigación

La investigación es de tipo aplicada, debido a que utiliza conocimientos técnicos y científicos relacionados con la precipitación histórica, el drenaje y el diseño estructural de pavimentos flexibles para analizar un problema específico: la estimación del coeficiente de drenaje (m) en el método AASHTO 1993 a partir de información climática representativa.

Su finalidad no se limita a describir el comportamiento climático del área de estudio, sino que propone un procedimiento de análisis que permite incorporar registros históricos de precipitación y condiciones de drenaje dentro del diseño estructural del pavimento flexible. De esta manera, la investigación aporta un criterio metodológico aplicable a carreteras ubicadas en zonas altoandinas con condiciones climáticas similares.

El nivel de investigación es explicativo con componente correlacional. Es explicativo porque analiza de qué manera el coeficiente de drenaje (m) estimado mediante precipitación histórica influye en el diseño estructural del pavimento flexible. Asimismo, presenta un componente correlacional porque evalúa la relación entre el ISC y el coeficiente de drenaje

(m), así como la relación entre dicho coeficiente, el Número Estructural calculado (SN calculado) y los espesores de diseño.

3.3 Diseño de investigación

El diseño de investigación es no experimental, debido a que las variables de estudio son observadas, procesadas y analizadas sin manipulación directa del investigador sobre las condiciones climáticas, el tránsito, la subrasante o las características físicas del tramo vial.

Asimismo, la investigación presenta un diseño retrospectivo, analítico y comparativo por escenarios. Es retrospectivo porque utiliza registros históricos de precipitación y datos existentes del tramo de estudio. Es analítico porque procesa información climática, geotécnica y estructural para estimar el coeficiente de drenaje (m) y evaluar su influencia en el diseño del pavimento. Es comparativo por escenarios porque analiza el comportamiento del diseño estructural considerando una línea base, un escenario basado en registros SENAMHI y un escenario basado en información PISCOp 3.0.

El esquema metodológico general de la investigación se representa mediante la siguiente relación:

$$PP \rightarrow tS \rightarrow ISC \rightarrow m \rightarrow SN_{calculado} \rightarrow Espesores$$

Donde:

$PP =$ precipitación histórica
$tS =$ tiempo de exposición a saturación
$ISC =$ Índice de Saturación Climática
$m =$ coeficiente de drenaje
$SN_{calculado} =$ Número Estructural aportado por las capas del pavimento
$Espesores =$ espesores de carpeta asfáltica, base granular y subbase granular

Esta secuencia permite relacionar la información climática con el coeficiente de drenaje (m) y, posteriormente, evaluar su efecto sobre el aporte estructural de las capas granulares dentro del método AASHTO 1993.

3.4 Variables e indicadores

3.4.1 Variable independiente

La variable independiente corresponde al coeficiente de drenaje (m) estimado a partir de indicadores climáticos derivados de la precipitación histórica. Para su determinación se consideran los registros climáticos disponibles, el tiempo de exposición a saturación (tS), el Índice de Saturación Climática (ISC) y las condiciones de drenaje observadas en el tramo de estudio.

3.4.2 Variable dependiente

La variable dependiente corresponde al diseño estructural del pavimento flexible según el método AASHTO 1993. Esta variable se analiza mediante el Número Estructural propuesto o calculado (SN calculado), el aporte estructural de las capas granulares y los espesores calculados y adoptados para la carpeta asfáltica, base granular y subbase granular, considerando como referencia el SN requerido del proyecto.

Tabla 5

Indicadores utilizados en la investigación

Indicador	Unidad	Descripción
Precipitación histórica acumulada (PP)	mm	Precipitación histórica acumulada obtenida a partir de registros SENAMHI e información PISCOp 3.0.
Tiempo de exposición a saturación (tS)	%	Porcentaje de tiempo de exposición a saturación, determinado a partir de los días con potencial de humedad elevada.
Índice de Saturación Climática (ISC)	Adimensional	Índice de Saturación Climática utilizado para representar el potencial de exposición de la estructura del pavimento a condiciones de humedad.
Coeficiente de drenaje (m)	Adimensional	Coeficiente de drenaje utilizado en el método AASHTO 1993 para ajustar el aporte estructural de las capas granulares.

Número Estructural requerido ($SN_{requerido}$)	Adimensional	Número Estructural obtenido mediante la Ecuación general del método AASHTO 1993.
Número Estructural calculado ($SN_{calculado}$)	Adimensional	Número Estructural aportado por las capas del pavimento considerando espesores, coeficientes estructurales y coeficientes de drenaje.
Variación porcentual de espesores (ΔE)	%	Variación porcentual de los espesores obtenidos al comparar los escenarios de coeficiente de drenaje evaluados.

Nota. Los indicadores fueron definidos en función de las variables de análisis y de los procedimientos empleados en la investigación.

3.5 Población y muestra

3.5.1 Población

La población de la investigación está constituida por el corredor vial San Miguel–El Descanso, ubicado en el departamento de Cusco, ámbito donde se evalúa la influencia del coeficiente de drenaje (m) en el diseño AASHTO 1993 de pavimentos flexibles. Metodológicamente, la población corresponde al conjunto de unidades que comparten características comunes y sobre las cuales se desarrolla el estudio (Hernández-Sampieri & Mendoza Torres, 2023). En este caso, comprende el tramo vial, los registros históricos de precipitación y los parámetros técnicos asociados al tránsito, geotecnia, drenaje y diseño estructural.

La delimitación del área de estudio se apoyó en planos de ubicación, mapas altitudinales y planos de sectorización, los cuales permitieron identificar el corredor vial y definir los sectores representativos para el análisis climático, geotécnico, de drenaje y diseño estructural.

Figura 5

Ubicación del tramo San Miguel–El Descanso



Nota. La figura muestra la ubicación del tramo San Miguel – El Descanso, considerado como población de estudio para el análisis del coeficiente de drenaje.

3.5.2 Muestra

La muestra fue definida a partir de tres sectores representativos del corredor vial San Miguel–El Descanso. La selección se realizó mediante criterio técnico, considerando el reconocimiento de campo, la presencia de deterioros en el pavimento, las condiciones de drenaje superficial y la disponibilidad de información geotécnica necesaria para el desarrollo del diseño estructural.

Los sectores evaluados fueron los siguientes:

- **Sector 1:** km 26+000 – km 27+500.
- **Sector 2:** km 31+500 – km 33+000.
- **Sector 3:** km 39+000 – km 41+000.

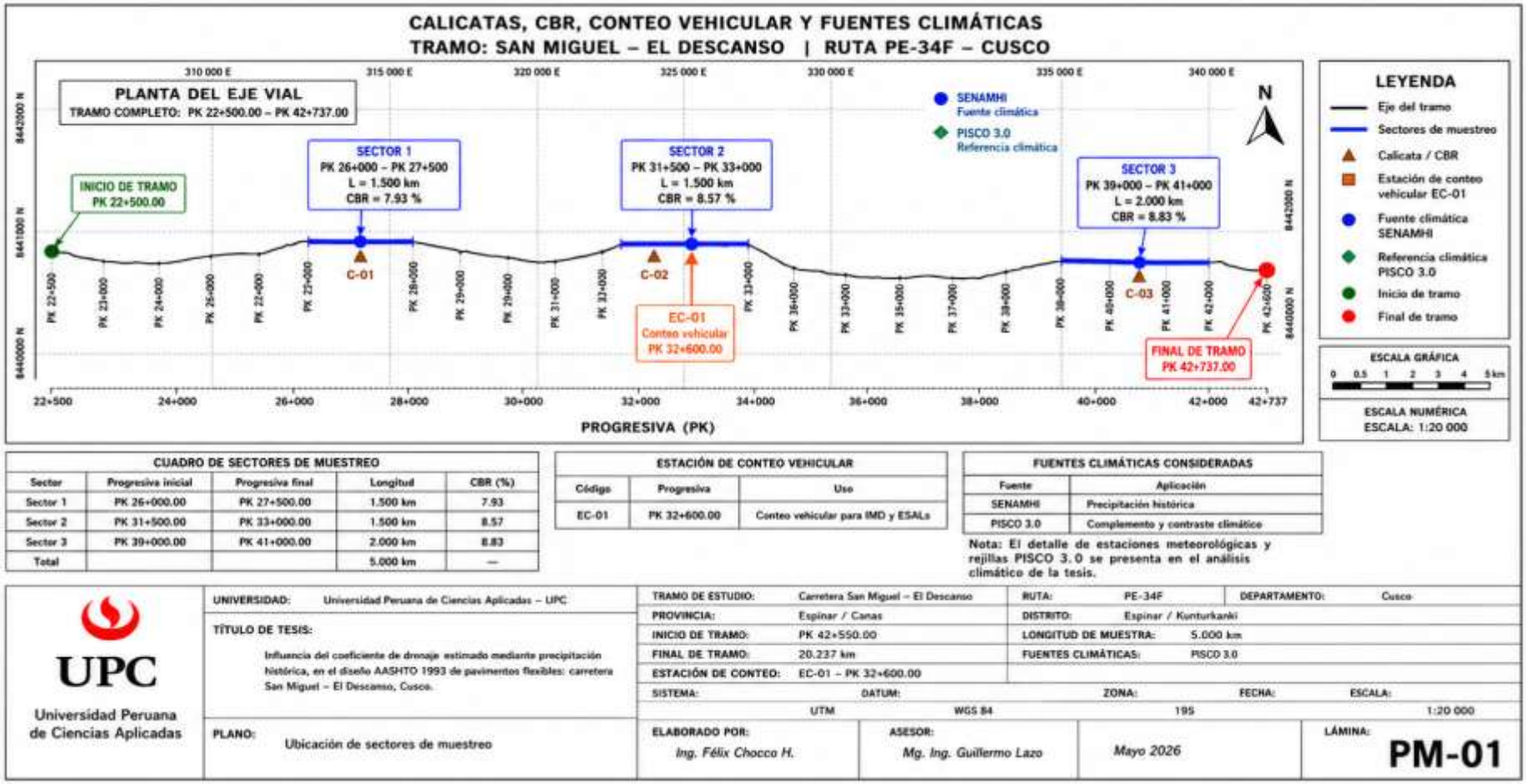
En conjunto, los sectores seleccionados comprenden una longitud acumulada de 5.000 km. Esta delimitación permitió trabajar con zonas representativas del tramo, considerando su exposición climática, comportamiento del drenaje, características de tránsito, condición de subrasante y deterioros observados durante el recorrido de campo. De esta manera, la muestra permitió evaluar la influencia del coeficiente de drenaje (m) en el diseño estructural del pavimento flexible mediante el método AASHTO 1993.

La muestra fue seleccionada mediante un muestreo no probabilístico intencional por criterio técnico. En este tipo de muestreo, las unidades de análisis no se eligen al azar, sino en función de los objetivos del estudio, las características del problema y la información que pueden aportar a la investigación (Hernández-Sampieri & Mendoza Torres, 2023). En este caso, se priorizaron sectores con evidencias de deterioro superficial, condiciones de drenaje observables, disponibilidad de información geotécnica y representatividad dentro del corredor vial.

Asimismo, la selección intencional permite trabajar con unidades que aportan información relevante para responder al problema de investigación, siempre que exista coherencia entre la muestra, los objetivos y las variables analizadas (Arias Gonzáles & Covinos Gallardo, 2021; Creswell & Creswell, 2023). Bajo este criterio, los sectores seleccionados permitieron relacionar la precipitación histórica, las condiciones de drenaje, la subrasante y los parámetros estructurales empleados en el diseño AASHTO 1993 de pavimentos flexibles.

Figura 6

Plano de ubicación de los sectores de muestreo



Nota. Se muestran los sectores de muestreo, calicatas, estación de conteo vehicular y fuentes climáticas empleadas en el análisis.

3.6 Técnicas e instrumentos

La recolección de información se desarrolló mediante revisión documental, procesamiento estadístico y observación directa en campo. Estas técnicas permitieron organizar datos climáticos, vehiculares, geotécnicos y de campo, coherentes con las variables e indicadores de la investigación (Hernández-Sampieri & Mendoza Torres, 2023), para estimar el coeficiente de drenaje (m) y evaluar su influencia en el diseño estructural del pavimento flexible mediante el método AASHTO 1993.

La revisión documental permitió recopilar registros históricos de precipitación del SENAMHI, información climática grillada PISCOp 3.0, estudios de tránsito, resultados geotécnicos, ensayos de laboratorio, normas técnicas y documentos especializados en pavimentos flexibles. Con esta información se caracterizó la precipitación del tramo San Miguel–El Descanso, se determinó el tiempo de exposición a saturación (tS), se calculó el Índice de Saturación Climática (ISC) y se definieron los parámetros de diseño conforme al método AASHTO 1993 y la normativa vial aplicable (American Association of State Highway and Transportation Officials [AASHTO], 1993; Ministerio de Transportes y Comunicaciones [MTC], 2018).

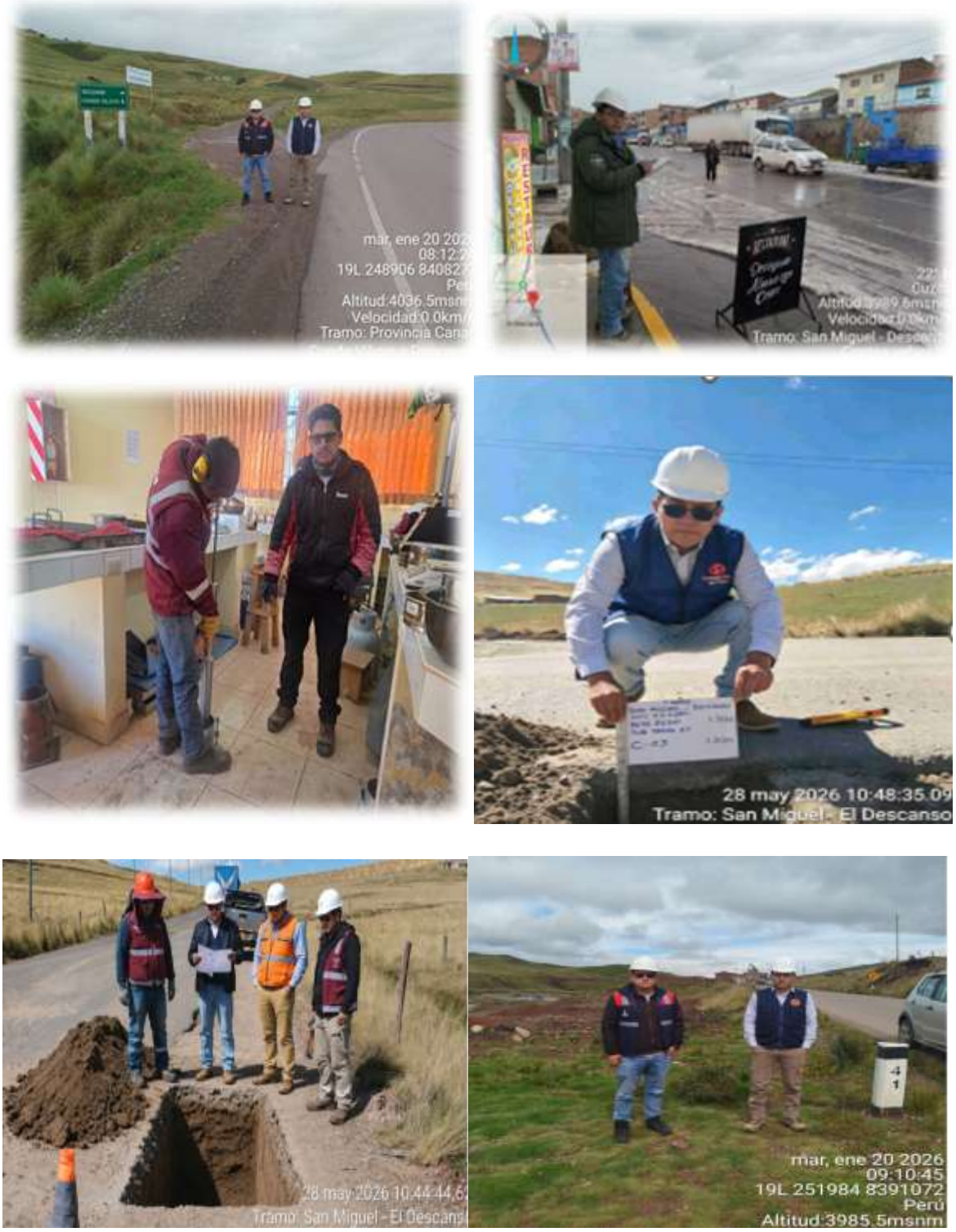
La observación directa en campo complementó la información documental mediante el reconocimiento de sectores representativos, registro fotográfico, conteo vehicular, inspección de cunetas, alcantarillas, puntos de evacuación superficial, calicatas y trabajos de laboratorio. Estas actividades sustentaron la sectorización del tramo, la evaluación del drenaje superficial y los parámetros usados en el diseño estructural.

Finalmente, el procesamiento estadístico permitió comparar la información del SENAMHI con PISCOp 3.0, validar la consistencia de los registros climáticos, estimar indicadores de humedad y comparar escenarios de diseño. En conjunto, estas técnicas fortalecieron la estimación del coeficiente de drenaje (m) y su aplicación en el diseño estructural del pavimento flexible bajo las condiciones reales del tramo evaluado.

Las evidencias de campo y laboratorio se presentan a continuación como parte del registro fotográfico metodológico.

Figura 7

Evidencias de la recopilación de información en campo y laboratorio



Nota. Conteo vehicular, reconocimiento del tramo, calicatas y ensayos de laboratorio empleados en el diseño estructural del pavimento flexible.

Con la información recopilada, se ordenaron las técnicas, los instrumentos y los datos obtenidos en cada etapa del estudio. Esto permitió vincular el trabajo de campo, los registros climáticos, el tránsito y los resultados geotécnicos con el diseño estructural del pavimento.

Tabla 6

Técnicas e instrumentos de investigación

Técnica	Instrumento	Información obtenida
Revisión documental	Registros SENAMHI	Precipitación histórica observada.
Revisión documental	Base de datos PISCOp 3.0	Información climática grillada del área de estudio.
Revisión documental	Estudio de tráfico	*IMDA*, tránsito de diseño y *ESALs*.
Revisión documental	Estudios geotécnicos	*CBR*, módulo resiliente y características de subrasante.
Observación directa	Ficha de inspección de drenaje	Estado de cunetas, alcantarillas y condiciones de evacuación de agua.
Registro de campo	Fotografías y fichas de reconocimiento	Evidencia del tramo, subtramos, drenajes y condiciones superficiales.
Procesamiento estadístico	Hojas de cálculo	*tS*, *ISC*, coeficiente de drenaje, *SN* y espesores.

Nota. Los instrumentos fueron definidos según las fuentes de información y los procedimientos de análisis empleados en la investigación.

3.7 Procedimiento metodológico

El procedimiento metodológico se desarrolló mediante una secuencia ordenada orientada a estimar el coeficiente de drenaje (m) a partir de información histórica de precipitación y

evaluar su influencia en el diseño estructural de pavimentos flexibles mediante el método AASHTO 1993.

Primero, se recopiló información climática proveniente de registros SENAMHI y de la base PISCOp 3.0, con la finalidad de caracterizar el comportamiento de la precipitación en el área de influencia del tramo San Miguel–El Descanso. Luego, se realizó el control y validación de la información climática mediante indicadores estadísticos, con el propósito de verificar la consistencia de los datos utilizados.

Posteriormente, se determinó el tiempo de exposición a saturación (tS) a partir de los registros diarios de precipitación. Con esta información se calculó el Índice de Saturación Climática (ISC), indicador propuesto para representar el potencial de exposición de la estructura del pavimento a condiciones de humedad.

De manera complementaria, se evaluaron las condiciones de drenaje existentes mediante inspección visual de campo, considerando la presencia, continuidad y estado de cunetas, alcantarillas y elementos de evacuación de agua. Esta información permitió complementar la interpretación climática para la estimación del coeficiente de drenaje (m).

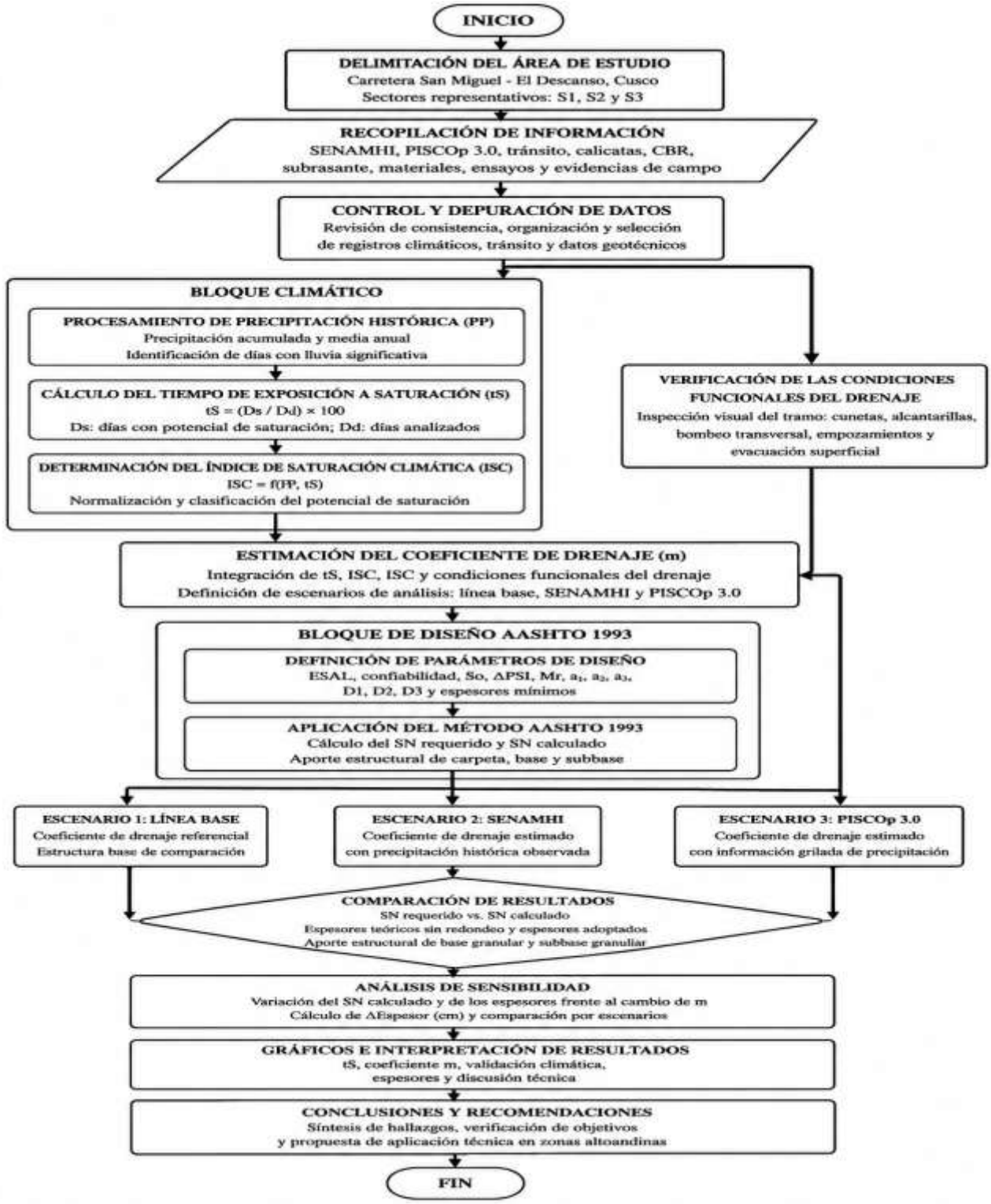
Esta etapa fue importante porque permitió contrastar los datos climáticos con las condiciones reales del tramo evaluado. De esta manera, la estimación del coeficiente de drenaje (m) no se basó únicamente en registros numéricos, sino también en la lectura técnica del comportamiento del drenaje superficial observado en campo.

Finalmente, se desarrolló el diseño estructural del pavimento flexible mediante el método AASHTO 1993, considerando tres escenarios de análisis: línea base, escenario SENAMHI y escenario PISCOp 3.0. Los resultados obtenidos fueron comparados mediante análisis estadístico, análisis de sensibilidad y correlaciones entre Índice de Saturación Climática (ISC), coeficiente de drenaje (m), Número Estructural calculado (SN calculado) y espesores de diseño.

La secuencia metodológica se resume en el siguiente diagrama de flujo, donde se muestran las etapas desarrolladas desde la recopilación de información climática, geotécnica, vehicular y de campo, hasta la estimación del coeficiente de drenaje (m) y la comparación de los escenarios de diseño mediante AASHTO 1993.

Figura 8

Diagrama de flujo del procedimiento metodológico de la investigación



Nota. La figura resume el procedimiento metodológico aplicado para estimar el coeficiente de drenaje y evaluar el diseño estructural según AASHTO 1993.

3.8 Procesamiento climático y validación de datos

El procesamiento climático se desarrolló a partir de dos fuentes principales de información: los registros históricos de precipitación de estaciones meteorológicas del SENAMHI y la información climática grillada PISCOp 3.0. (Gutierrez & Lavado-Casimiro, 2026). La finalidad de este procesamiento fue caracterizar el comportamiento de la precipitación en el área de influencia del tramo San Miguel–El Descanso, identificar periodos de mayor exposición a humedad y evaluar la representatividad de las fuentes climáticas utilizadas.

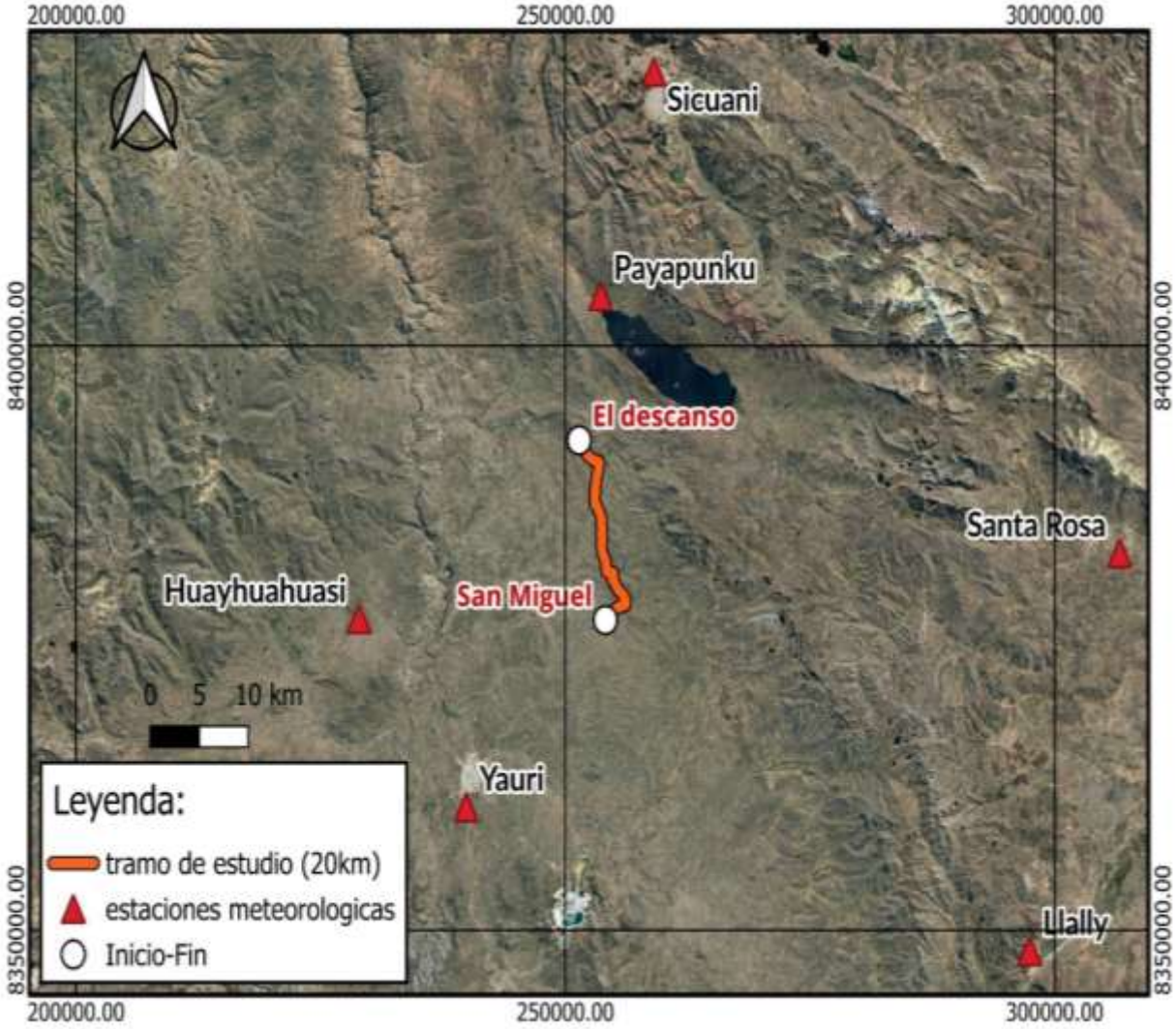
La validación metodológica no se limitó a la comparación numérica entre SENAMHI y PISCOp 3.0. En esta investigación, la validación se desarrolló en cuatro niveles complementarios: validación climática, mediante el contraste entre registros observados y datos grillados; validación de campo, mediante la verificación de las condiciones reales de drenaje superficial; validación estructural, mediante la comprobación de que el Número Estructural calculado (SN calculado) cumple o supera el Número Estructural requerido (SN requerido); y validación de aplicabilidad, mediante la definición de condiciones mínimas que deben conservarse para que el coeficiente de drenaje (m) adoptado sea técnicamente sostenible.

Este enfoque permite responder a la necesidad de verificar que los resultados no sean únicamente producto del cambio de un parámetro en la fórmula, sino de un procedimiento trazable que relaciona precipitación histórica, exposición a saturación, condición de drenaje y respuesta estructural del paquete de pavimento. Con ello, el valor del coeficiente de drenaje (m) no se adopta de manera aislada, sino a partir de evidencias climáticas y condiciones verificadas en el tramo. Esta relación permite dar mayor respaldo técnico al diseño, especialmente porque el comportamiento del pavimento flexible depende de la forma en que las capas granulares responden frente a la humedad.

En primer lugar, se recopilaron y organizaron los registros de precipitación de estaciones meteorológicas cercanas al tramo de estudio. Para la selección de estaciones se consideraron criterios de proximidad espacial, altitud, ubicación dentro de una región climática similar y disponibilidad de registros. Esta información permitió establecer una base observada para el análisis de la precipitación histórica y para la posterior determinación del tiempo de exposición a saturación (tS).

Figura 9

Mapa de ubicación de las estaciones meteorológicas del SENAMHI cercanas al tramo de estudio

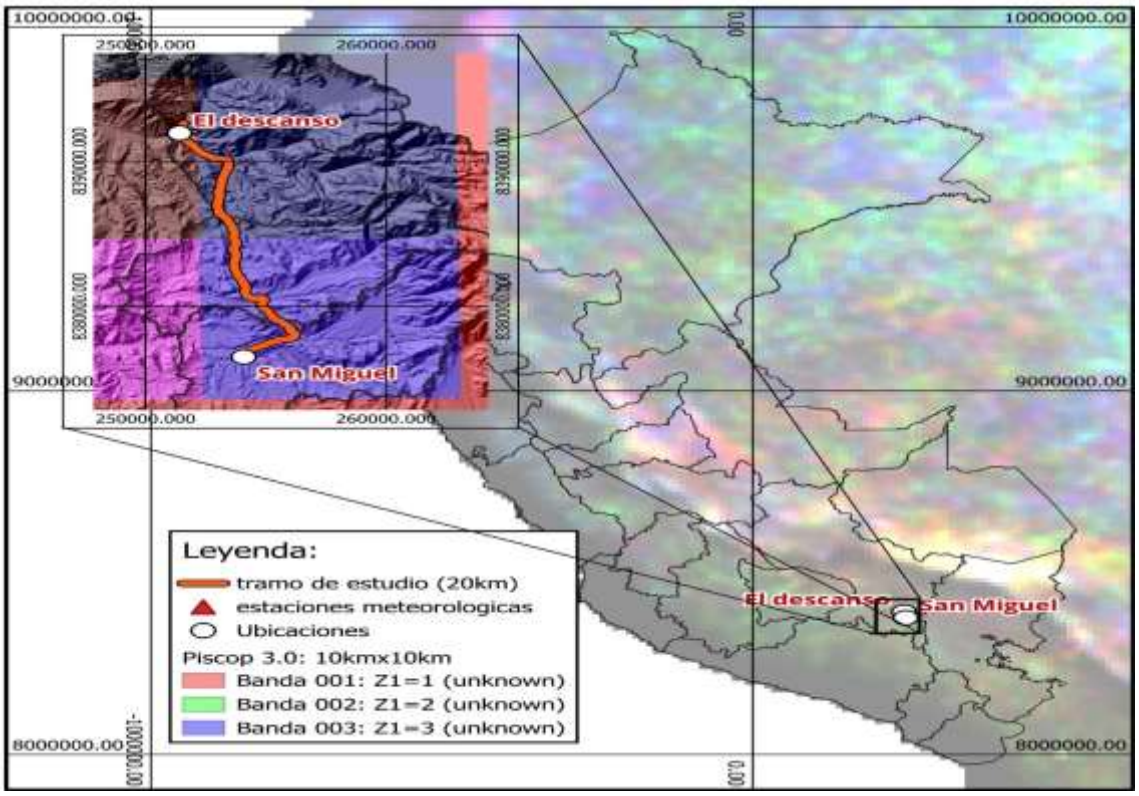


Nota. Vista panorámica del área de influencia del tramo San Miguel–El Descanso. Tomado de Google Maps (s. f.-a), https://maps.app.goo.gl/qEwwZ26DnnvSWxpy8

Después de caracterizar la información observada, se incorporó la base climática PISCOp 3.0 como fuente principal de información grillada de precipitación. Esta fuente permitió ampliar el análisis espacial de la precipitación y comparar su comportamiento con los registros observados del SENAMHI, especialmente en sectores donde la cobertura directa de estaciones meteorológicas es limitada.

Figura 10

Distribución de las estaciones meteorológicas y de la información de PISCOp 3.0 en el área de influencia



Nota. La figura muestra la relación espacial de la precipitación acumulada diaria estimada por el producto PISCOp 3.0 (serie histórica desde 1981-2025).

Posteriormente, se evaluó la consistencia entre la información observada y los datos PISCOp 3.0 mediante indicadores estadísticos de ajuste. Para ello, se emplearon el coeficiente de determinación (R^2), el coeficiente de eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE), el error cuadrático medio (RMSE), el error absoluto medio (MAE) y el sesgo porcentual (PBIAS). Estos indicadores permitieron analizar el grado de correspondencia entre ambas fuentes de información climática.

El coeficiente de determinación se expresa como:

$$R^2 = r^2 \qquad (8)$$

Donde:

$R^2 =$ coeficiente de determinación

$r =$ coeficiente de correlación de Pearson

El sesgo porcentual se expresa como:

$$PBIAS = 100 \times \frac{\sum(PISCOp - Observado)}{\sum(Observado)} \quad (9)$$

Donde:

$PISCOp =$ precipitación estimada por la base PISCOp 3.0

$Observado =$ precipitación registrada por estación meteorológica SENAMHI

3.9 Desarrollo del *tS* e *ISC*

El tiempo de exposición a saturación (tS) representa el porcentaje del periodo analizado durante el cual la estructura del pavimento puede estar expuesta a condiciones potenciales de humedad elevada. Este indicador se calculó a partir de los registros diarios de precipitación, considerando los días que superan el umbral de lluvia definido para identificar condiciones con potencial de acumulación de humedad.

El cálculo del tiempo de exposición a saturación se realizó mediante la siguiente expresión:

$$tS = \frac{D_s}{D_t} \times 100 \quad (10)$$

Donde:

$tS =$ tiempo de exposición a saturación, en %

$D_s =$ número de días con potencial de saturación

$D_t =$ número total de días analizados

Para determinar el número de días con precipitación climáticamente relevante (*Ds*), se contabilizaron aquellos con precipitación diaria acumulada mayor o igual a 10 mm. Este umbral constituye un criterio operativo adoptado en la investigación, tomando como referencia los rangos de precipitación diaria presentados por SENAMHI (2014), incluida la categoría moderadamente lluviosa del caso Tumbes–CORPAC (9 mm < RR ≤ 20 mm). Su aplicación no implica que una precipitación de 10 mm produzca necesariamente la saturación física de las capas del pavimento; permite identificar, de manera reproducible, eventos de precipitación con potencial de incrementar la exposición a condiciones de humedad elevada.

Tabla 7

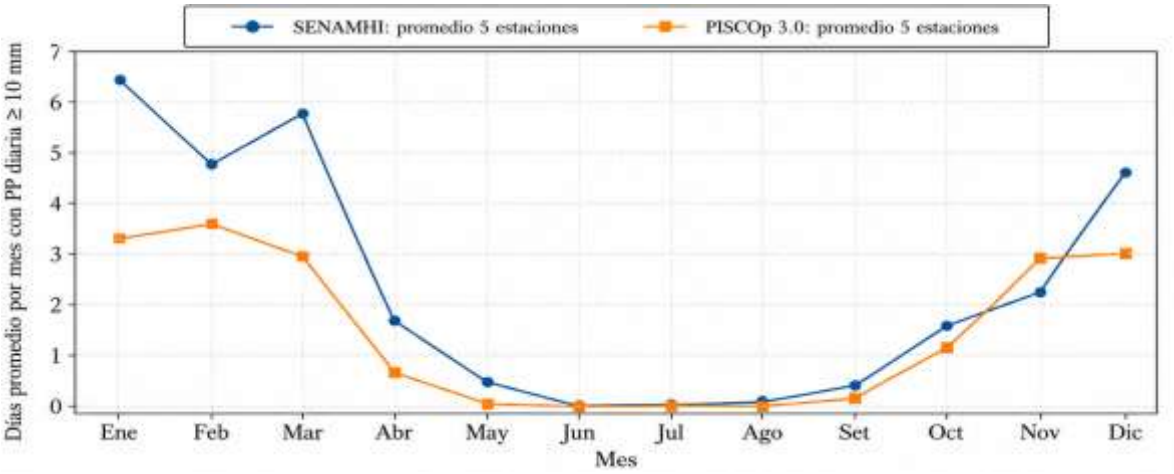
Umbrales referenciales de precipitación diaria establecidos por el SENAMHI

Fuente	Criterio considerado	Rango de referencia
SENAMHI, caso práctico Tumbes–CORPAC	Lluvia diaria acumulada moderadamente lluviosa	9 mm < RR ≤ 20 mm
Criterio operativo de la investigación	Número de días con precipitación climáticamente relevante (*Ds*)	RR/día ≥ 10 mm

Nota. Adaptado de SENAMHI (2014). El valor de 10 mm se adopta como criterio operativo de la investigación para identificar días con aporte hídrico relevante.

Figura 11

Estacionalidad climática de la exposición a la saturación en la carretera San Miguel–El Descanso



Nota. Se contabilizan días críticos con precipitación diaria ≥ 10 mm. SENAMHI usa registros observados por estación; PISCOp 3.0 usa información grillada diaria comparable.

El análisis climático consideró la precipitación diaria acumulada, expresada en milímetros por día (mm/día), y la precipitación acumulada durante el periodo evaluado. El tiempo de exposición a saturación (tS) representa el porcentaje de días en los que el pavimento podría estar expuesto a condiciones de humedad elevada; por tanto, no corresponde a una intensidad instantánea de lluvia expresada en milímetros por hora (mm/h). Esta diferenciación es importante porque el coeficiente de drenaje (*m*) del método AASHTO 1993 depende del tiempo próximo a saturación y de la calidad funcional del drenaje.

El tS operativo se calculó a partir de la precipitación diaria acumulada (Pd), considerando como días con aporte hídrico climáticamente relevante (Ds) aquellos con Pd ≥ 10 mm. Luego, se aplicó la relación tS = (Ds / Dt) × 100, donde Dt representa el número total de días analizados. El resultado constituye una aproximación indirecta de exposición climática potencial a humedad y no una medición de la saturación real de las capas. El tS operativo y la calidad funcional del drenaje verificada en campo sustentaron la interpolación del coeficiente de drenaje (*m*) dentro de los rangos establecidos por AASHTO 1993.

En este contexto, se planteó el Índice de Saturación Climática (ISC) como un indicador adimensional complementario que relaciona la precipitación acumulada relativa con el tS operativo y facilita la comparación de la exposición climática potencial entre sectores y fuentes de información.

El Índice de Saturación Climática (ISC) se calculó mediante la siguiente expresión:

$$ISC = \left(\frac{PP_i}{PP_{max}}\right)\left(\frac{tS_i}{100}\right) \quad (11)$$

Donde:

$\mathrm{ISC} =$ Índice de Saturación Climática

$\mathrm{PP_i} =$ precipitación acumulada correspondiente al sector o fuente evaluada, en mm

$\mathrm{PP_{max}} =$ precipitación máxima registrada dentro del conjunto de datos analizados, en mm

$\mathrm{tS_i} =$ tiempo de exposición a saturación correspondiente al sector o fuente evaluada, en %

El deterioro del pavimento no depende únicamente de la cantidad de precipitación, sino también de la frecuencia con la que la estructura puede estar expuesta a condiciones de humedad elevada. Por ello, el Índice de Saturación Climática (ISC) integra dos componentes adimensionales: el cociente PPi / PPmax, que representa el aporte hídrico relativo, y el término tSi / 100, que expresa la exposición relativa a condiciones con potencial de saturación. Esta integración facilita la comparación climática entre sectores y fuentes de información.

Primer término $\frac{PP_i}{PP_{max}}$, representa la intensidad relativa del aporte hídrico; su rango es

$0 < \frac{PP_i}{PP_{max}} < 1.$

Segundo término $\frac{tS_i}{100}$, representa la permanencia de la humedad, También varía entre 0 y 1.

Por lo tanto,$0 < ISC < 1$. Este comportamiento facilita su utilización como factor multiplicativo en modelos de calibración.

Tabla 8

Clasificación propuesta del Índice de Saturación Climática (ISC)

Rango ISC	Nivel de exposición climática
0.00–0.25	Baja
0.25–0.50	Moderada
0.50–0.75	Alta
0.75–1.00	Muy alta

Nota. El ISC se encuentra en función de la información histórica de precipitación.

3.10 Estimación del coeficiente de drenaje

La estimación del coeficiente de drenaje (m) relacionó los criterios establecidos por AASHTO 1993 con la información climática del tramo y la verificación de las condiciones funcionales del drenaje en campo. Este procedimiento redujo la dependencia de una selección basada únicamente en valores referenciales y permitió sustentar técnicamente los escenarios evaluados.

En una primera etapa, el tiempo de exposición a saturación (tS) se relacionó con los rangos establecidos por AASHTO 1993 para identificar el intervalo del coeficiente de drenaje (m) aplicable a las capas granulares. Posteriormente, se verificaron en campo las condiciones funcionales del drenaje en los sectores seleccionados, considerando el estado de las cunetas, alcantarillas, obras de drenaje transversal, continuidad de la evacuación superficial y posibles zonas de acumulación de agua.

En síntesis, la estimación del coeficiente de drenaje (m) se sustentó en el tS operativo, entendido como indicador climático indirecto, y en la calidad funcional del drenaje verificada en campo. El Índice de Saturación Climática (ISC) se empleó de manera complementaria para caracterizar y contrastar las fuentes climáticas; por tanto, no sustituyó

los rangos establecidos por AASHTO 1993 ni intervino directamente en la interpolación de m.

La inspección se complementó con registros fotográficos de cunetas, alcantarillas, puntos de descarga y condiciones de evacuación superficial. Esta información permitió describir cualitativamente el funcionamiento del drenaje y verificar si las condiciones observadas eran compatibles con los escenarios considerados en el análisis. La inspección de campo no se utilizó para calcular directamente el valor de m ni para reemplazar una evaluación hidráulica detallada.

El procedimiento metodológico comprendió cinco etapas sucesivas:

- Determinación del tiempo de exposición a saturación (tS) a partir de la información histórica de precipitación.
- Cálculo del Índice de Saturación Climática (ISC) para cada fuente de información climática evaluada.
- Verificación de las condiciones funcionales del drenaje mediante inspección de campo, considerando el estado de las cunetas, alcantarillas, bombeo transversal, puntos de descarga y posibles zonas de empozamiento.
- Identificación del intervalo del coeficiente de drenaje (m) de acuerdo con los rangos establecidos por AASHTO 1993, considerando el tS operativo y las condiciones funcionales del drenaje observadas en campo.
- Selección del coeficiente de drenaje para cada escenario a partir del tS operativo y de la calidad funcional del drenaje, dentro de los rangos establecidos por AASHTO 1993. El ISC se empleó complementariamente para comparar la exposición climática entre las fuentes evaluadas.

El coeficiente de drenaje adoptado en cada escenario debe interpretarse como un valor condicionado al funcionamiento del sistema de drenaje. En ese sentido, los valores m = 1.13 para el escenario SENAMHI y m = 1.15 para el escenario PISCOp 3.0 son aplicables mientras las condiciones del tramo se mantengan compatibles con la calidad de drenaje considerada en el diseño.

Si durante la operación de la vía se presentan cunetas colmatadas, alcantarillas obstruidas, empozamientos persistentes o pérdida del bombeo transversal, los coeficientes adoptados

dejarían de representar la condición considerada en el diseño estructural. En ese caso, deberá reevaluarse el valor de m utilizado en el dimensionamiento del pavimento.

Figura 12

Condiciones de drenaje superficial observadas en el tramo de estudio



Nota. La figura presenta las condiciones de drenaje superficial observadas en el tramo San Miguel–El Descanso, empleadas para complementar la evaluación de los coeficientes de drenaje.

Una vez identificado el rango correspondiente, el coeficiente de drenaje (m) se seleccionó considerando el tS operativo y la calidad funcional del drenaje verificada en campo, dentro de los rangos establecidos por AASHTO 1993. El ISC se utilizó de manera complementaria

para caracterizar y comparar las fuentes climáticas evaluadas. Para el análisis comparativo, se definieron tres escenarios: línea base, SENAMHI y PISCOp 3.0.

Tabla 9

Escenarios del coeficiente de drenaje considerados en el análisis

Escenario	Fuente o criterio de análisis	Criterio metodológico
Línea base	Condición referencial sin ajuste climático específico	Se adopta como escenario patrón para comparar la influencia del coeficiente de drenaje.
SENAMHI	Registros históricos observados y condiciones de drenaje del tramo	El valor de m se sustenta en el tS operativo y en el drenaje verificado en campo; el ISC se emplea como indicador complementario.
PISCOp 3.0	Información grillada de precipitación y condiciones de drenaje del tramo	El valor de m se sustenta en el tS operativo y en el drenaje verificado en campo; el ISC se emplea como indicador complementario.

Nota. Los escenarios comparan la influencia del coeficiente de drenaje en el diseño estructural del pavimento mediante AASHTO 1993.

3.11 Diseño estructural AASHTO 1993 por escenarios

El diseño estructural del pavimento flexible se desarrolló aplicando el método AASHTO 1993, mediante el cual se determinó el Número Estructural requerido (SN requerido) en función de las condiciones de tránsito, confiabilidad, serviciabilidad, capacidad de soporte de la subrasante y variabilidad del diseño.

Una vez obtenido el SN requerido, se verificó el Número Estructural calculado (SN calculado), entendido como el aporte estructural proporcionado por las capas que conforman el pavimento. Para ello, se consideraron los espesores adoptados, los coeficientes estructurales de cada capa y los coeficientes de drenaje aplicables a la base y subbase granular.

Para el cálculo del SN calculado, los espesores se trabajaron inicialmente en las unidades compatibles con la formulación AASHTO 1993 y, posteriormente, se expresaron en centímetros para facilitar la presentación de resultados, la comparación entre escenarios y el redondeo constructivo de los espesores propuestos.

Es importante precisar que el coeficiente de drenaje (m) no modifica directamente el SN requerido obtenido mediante el método AASHTO 1993. Su influencia se refleja en el SN calculado, debido a que interviene en el aporte estructural de las capas granulares, principalmente en la base y la subbase. Por esta razón, la variación del coeficiente de drenaje (m) puede modificar los espesores adoptados para que la estructura del pavimento cumpla con el SN requerido.

Para el análisis comparativo del diseño estructural, se definieron tres escenarios de coeficiente de drenaje, los cuales fueron empleados como parámetros de entrada en la aplicación del método AASHTO 1993:

- Línea base con coeficiente de drenaje (m) = 1.00, considerada como condición referencial sin ajuste climático específico.
- Escenario SENAMHI con coeficiente de drenaje (m) = 1.13, definido a partir de registros históricos observados y de las condiciones de drenaje del tramo.
- Escenario PISCOp 3.0 con coeficiente de drenaje (m) = 1.15, definido a partir de información climática PISCOp 3.0 y de las condiciones de drenaje del tramo.

3.12 Análisis estadístico, sensibilidad y correlaciones

El análisis estadístico se aplicó para organizar, interpretar y contrastar la información climática y estructural utilizada en la investigación. Esta etapa permitió comprender el comportamiento de la precipitación histórica, verificar la representatividad de las fuentes climáticas empleadas y evaluar la influencia del coeficiente de drenaje (m) en el diseño estructural del pavimento flexible.

En primer lugar, se calcularon estadísticos descriptivos de la precipitación, tales como precipitación acumulada, precipitación media, desviación estándar y coeficiente de variación. Estos indicadores permitieron reconocer la variabilidad temporal de las lluvias en el área de influencia del tramo San Miguel–El Descanso, así como identificar los periodos con mayor exposición potencial a condiciones de humedad.

Posteriormente, se realizó el análisis de sensibilidad del diseño estructural considerando los tres escenarios definidos para la investigación: línea base, SENAMHI y PISCOp 3.0. Este análisis permitió comparar la respuesta del pavimento frente a diferentes valores del coeficiente de drenaje (m), evaluando su efecto sobre el Número Estructural calculado (SN

calculado), el aporte estructural de las capas granulares y los espesores de carpeta asfáltica, base granular y subbase granular.

La variación porcentual de los espesores se determinó mediante la siguiente expresión:

$$\Delta E = \frac{E_i - E_{base}}{E_{base}} \times 100 \quad (12)$$

Donde:

$\Delta E =$ variación porcentual del espesor, en %

$E_i =$ espesor obtenido en el escenario evaluado

$E_{base} =$ espesor obtenido en la línea base

Esta formulación permite expresar como valor positivo la reducción de espesor respecto a la línea base, lo cual facilita la interpretación de los resultados comparativos entre escenarios.

Además, se analizaron las relaciones entre los principales indicadores de la investigación, con el propósito de identificar el grado de asociación entre las condiciones climáticas y la respuesta estructural del pavimento. Para ello, se consideraron las siguientes relaciones:

- *ISC* vs coeficiente de drenaje.
- Coeficiente de drenaje vs Número Estructural calculado.
- Coeficiente de drenaje vs espesores de diseño.
- Coeficiente de drenaje vs aporte estructural de base y subbase granular.

Estas relaciones permitieron evaluar si las variaciones del coeficiente de drenaje (m) generan cambios en el aporte estructural de las capas granulares y en los espesores de diseño. Así, el análisis estadístico, el análisis de sensibilidad y las correlaciones proporcionaron una base técnica para sustentar la incorporación de información climática histórica en el diseño estructural de pavimentos flexibles mediante el método AASHTO 1993.

El Índice de Saturación Climática (ISC) no forma parte de los parámetros establecidos por AASHTO (1993). Es un indicador climático complementario propuesto por los tesistas para caracterizar y comparar la exposición potencial a humedad; no mide la saturación real del pavimento ni calcula directamente el coeficiente de drenaje (m).

4. CAPÍTULO IV: RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Introducción

El presente capítulo desarrolla los resultados obtenidos a partir de la aplicación de la metodología planteada para evaluar la influencia del coeficiente de drenaje (m), estimado mediante información histórica de precipitación, en el diseño estructural de pavimentos flexibles mediante el método AASHTO 1993. El análisis se realizó en la carretera San Miguel–El Descanso, ubicada en la provincia de Canas, departamento de Cusco, considerando sectores representativos del corredor vial y empleando información climática procedente de estaciones meteorológicas del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI) e información climática grillada PISCOp 3.0.

La importancia de este análisis se relaciona con el efecto que puede generar la humedad sobre las capas granulares del pavimento flexible. En zonas altoandinas, donde las precipitaciones presentan una marcada estacionalidad, la permanencia de agua en la estructura puede modificar el comportamiento de la base y subbase, afectando su aporte estructural y el desempeño del pavimento durante su vida útil. Por ello, la incorporación de información climática dentro del proceso de diseño permite representar con mayor precisión las condiciones reales de servicio del tramo evaluado.

Los resultados se presentan de manera ordenada, siguiendo la secuencia metodológica definida en el Capítulo III. En primer lugar, se caracteriza el área de estudio, los sectores analizados y las estaciones meteorológicas empleadas. Luego, se desarrolla el procesamiento climático, la validación de la información PISCOp 3.0, la determinación del tiempo de exposición a saturación (tS), el cálculo del Índice de Saturación Climática (ISC) y la estimación del coeficiente de drenaje (m). Posteriormente, se presentan los resultados del tránsito de diseño, la caracterización geotécnica y el diseño estructural mediante AASHTO 1993.

El análisis estructural se desarrolla considerando tres escenarios de coeficiente de drenaje: línea base con coeficiente de drenaje (m) = 1.00, escenario SENAMHI con coeficiente de drenaje (m) = 1.13 y escenario PISCOp 3.0 con coeficiente de drenaje (m) = 1.15. Estos escenarios permiten comparar la influencia del coeficiente de drenaje sobre el Número Estructural calculado (SN calculado), el aporte estructural de las capas granulares y los espesores finales del pavimento flexible.

Finalmente, se desarrolla la discusión técnica de los resultados, considerando la relación entre precipitación histórica, exposición potencial a saturación, coeficiente de drenaje y diseño estructural. Esta discusión permite identificar el aporte de la investigación y sustentar la utilidad de incorporar información climática local dentro del diseño de pavimentos flexibles en carreteras altoandinas.

4.2 Caracterización del área de estudio

La investigación se desarrolló en la carretera San Miguel–El Descanso, correspondiente a la ruta PE-34F, ubicada en el departamento de Cusco, entre las provincias de Espinar y Canas. El tramo se emplaza en un entorno altoandino, con una altitud promedio aproximada de 4014.7 m s. n. m., donde las condiciones climáticas, topográficas y de drenaje tienen incidencia directa sobre el comportamiento estructural del pavimento flexible.

Para la delimitación general del proyecto se consideró el tramo comprendido entre las progresivas km 22+500 y km 42+737, con una longitud aproximada de 20.24 km. Sin embargo, el análisis específico de la investigación se concentró en sectores representativos ubicados dentro del corredor San Miguel–El Descanso, seleccionados por su disponibilidad de información técnica, condiciones de drenaje, representatividad geotécnica y pertinencia para la evaluación estructural mediante AASHTO 1993.

Esta caracterización permite establecer el contexto físico y funcional del tramo antes de desarrollar el análisis climático, geotécnico y estructural. En ese sentido, la ubicación altoandina, la longitud del corredor, las condiciones de drenaje y la configuración geométrica de la vía constituyen elementos relevantes para interpretar posteriormente la influencia del coeficiente de drenaje (m) en el diseño del pavimento flexible.

La caracterización general del tramo permite ubicar el área de estudio dentro de su contexto vial, territorial y funcional. En este caso, se consideran aspectos como la ruta, ubicación política, progresivas, longitud, altitud, sistema de coordenadas, características geométricas básicas y tipo de tránsito predominante. Estos datos son necesarios para comprender las condiciones iniciales del corredor San Miguel–El Descanso antes de desarrollar el análisis climático, geotécnico y estructural del pavimento flexible. La información se presenta de manera resumida en la Tabla 10.

Tabla 10

Características generales del área de estudio

Descripción	Dato
Tramo vial	Carretera San Miguel–El Descanso
Ruta	PE-34F
Departamento	Cusco
Provincia	Espinar / Canas
Distrito	Espinar / Kunturkanki
Localidad	San Miguel / El Descanso
Progresiva inicial del tramo general	PK 22+500.00
Progresiva final del tramo general	PK 42+737.00
Longitud total del tramo general	20.24 km
Altitud promedio aproximada	4014.7 *m* s. n. m.
Sistema de coordenadas	UTM
Datum	WGS 84
Zona	19S
Tráfico predominante	Vehículos ligeros, vehículos pesados y buses
Ancho de calzada	6.60 m
Berma	1.50 *m* a ambos lados
Número de carriles	1 carril por sentido
Espesor referencial inicial de carpeta asfáltica	0.10 m

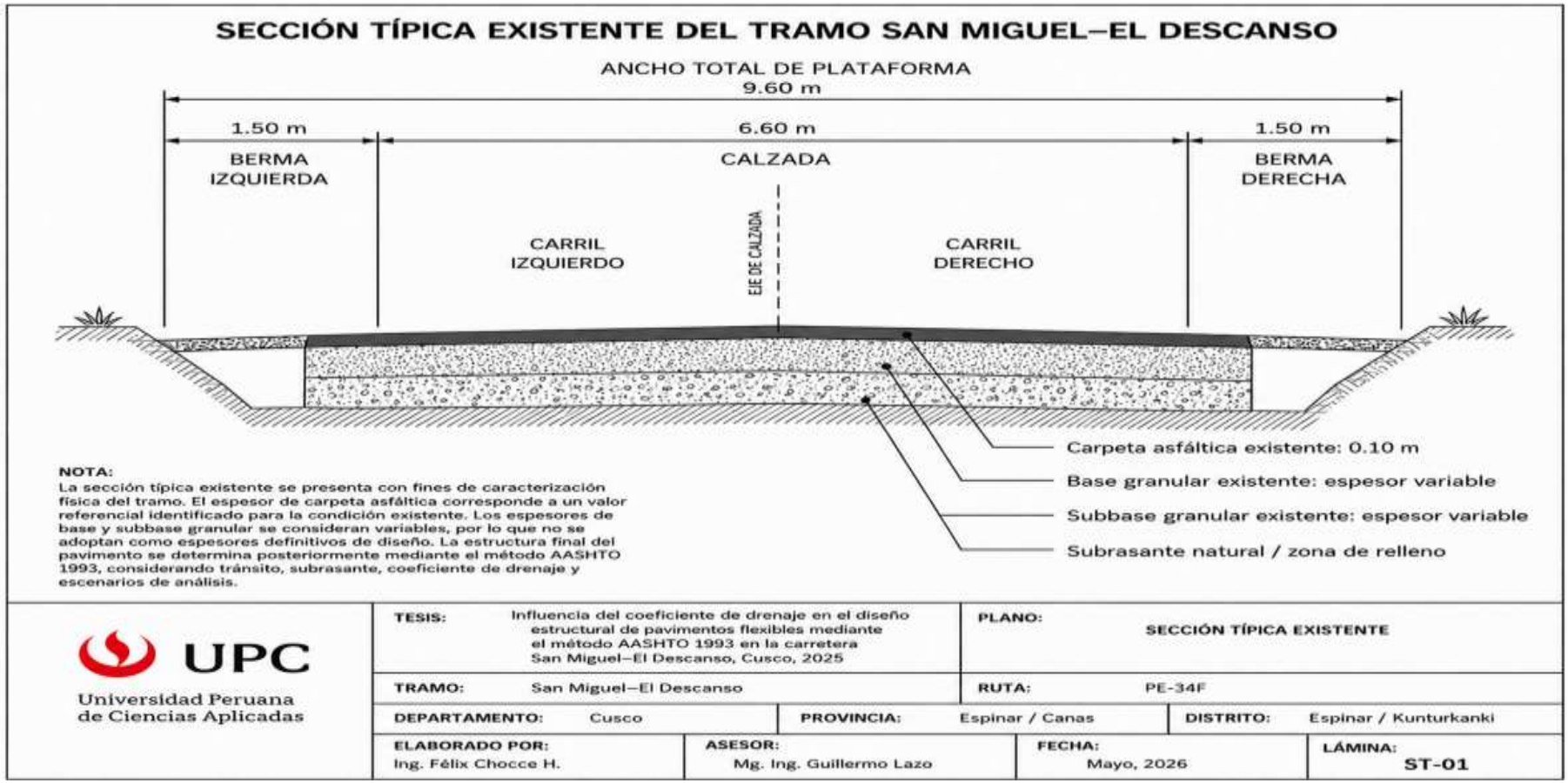
Nota. Los datos corresponden a la caracterización general del tramo San Miguel–El Descanso y fueron obtenidos del plano de ubicación del tramo de estudio.

Para complementar la caracterización física del tramo, se presenta la sección típica existente de la vía. Esta permite identificar la configuración general de la calzada, bermas laterales y estructura superficial referencial antes del desarrollo del diseño estructural por escenarios mediante el método AASHTO 1993.

La sección típica existente muestra la configuración transversal del tramo San Miguel–El Descanso, incluyendo calzada, bermas y capas referenciales del pavimento, información necesaria para el análisis de drenaje, tránsito y diseño estructural AASHTO 1993.

Figura 13

Sección típica existente del tramo San Miguel–El Descanso



Nota. La figura presenta la sección típica existente del tramo San Miguel–El Descanso, considerando calzada, bermas y espesor referencial de carpeta asfáltica.

La caracterización del área de estudio permite contextualizar las condiciones físicas y funcionales del tramo evaluado. Su ubicación en un entorno altoandino, junto con las condiciones de tránsito, drenaje y geometría básica de la vía, justifica la necesidad de analizar la influencia de la precipitación histórica en el diseño estructural del pavimento flexible mediante el método AASHTO 1993. En ese sentido, el espesor de carpeta asfáltica mostrado en la sección típica se considera referencial, mientras que los espesores definitivos se desarrollan posteriormente en los escenarios de diseño estructural.

4.3 Sectores representativos de análisis

Con la finalidad de evaluar la influencia del coeficiente de drenaje (m) sobre el diseño estructural, se seleccionaron tres sectores representativos dentro del corredor San Miguel–El Descanso. Estos sectores fueron definidos considerando criterios de disponibilidad de información geotécnica, condiciones de drenaje, representatividad climática y aplicación del diseño estructural mediante el método AASHTO 1993.

La sectorización permite analizar el comportamiento del pavimento en unidades específicas del tramo, evitando presentar el diseño como un único valor general para todo el corredor. De esta manera, se mejora la interpretación técnica de los resultados y se facilita la comparación entre las condiciones de subrasante, drenaje y espesor estructural en cada sector.

Tabla 11

Sectores considerados en el análisis estructural

Sector	Inicio	Final	Longitud
Sector 1	26+000	27+500	1.5 km
Sector 2	31+500	33+000	1.5 km
Sector 3	39+000	41+000	2.0 km
Total			**5.0 km**

Nota. Los sectores fueron definidos como unidades representativas para el análisis climático, geotécnico, de drenaje y diseño estructural.

Los tres sectores seleccionados constituyen la muestra técnica de la investigación. Aunque el tramo general presenta una longitud aproximada de 20.24 km, el análisis estructural se concentró en estos sectores debido a que permiten representar condiciones relevantes del corredor y aplicar de manera ordenada la metodología propuesta. Esta delimitación también

facilita la comparación de resultados entre sectores y escenarios de coeficiente de drenaje (m).

4.4 Fuentes de información climática consideradas

Para la caracterización climática del tramo San Miguel–El Descanso se utilizaron dos fuentes de información de precipitación: los registros observados de estaciones meteorológicas del SENAMHI y la información grillada PISCOp 3.0. La primera fuente permitió analizar el comportamiento pluviométrico a partir de estaciones cercanas al área de estudio, mientras que la segunda permitió complementar el análisis mediante una base espacial de precipitación.

Esta organización permitió diferenciar el procesamiento de datos observados, el procesamiento de información grillada y el posterior comparativo entre ambas fuentes. De esta manera, la estimación del tiempo de exposición a saturación (tS), el Índice de Saturación Climática (ISC) y el coeficiente de drenaje (m) se sustentó en una evaluación climática más representativa del entorno altoandino del tramo evaluado.

4.5 Estaciones meteorológicas SENAMHI consideradas

La caracterización climática con información observada se realizó a partir de estaciones meteorológicas del SENAMHI ubicadas en el entorno de influencia del tramo San Miguel–El Descanso. La selección de estas estaciones consideró criterios de proximidad espacial, altitud, disponibilidad de registros y representatividad de las condiciones climáticas propias del entorno altoandino.

Para este análisis se consideraron las estaciones Huayhuahuasi, Payapunku, Sicuani, Santa Rosa y Llally, las cuales conforman una red de referencia alrededor del corredor vial evaluado. El uso de más de una estación permitió reducir la incertidumbre asociada a la variabilidad espacial de la precipitación, debido a que en zonas altoandinas las lluvias pueden presentar diferencias importantes por efecto de la altitud, el relieve y la ubicación geográfica.

Tabla 12

Características de las estaciones meteorológicas del SENAMHI consideradas en la investigación

Estación	Código	Tipo de estación	Altitud (m s. n. m.)	Periodo analizado	Criterio de selección
Huayhuahuasi	114124	Meteorológica automática	3950	2021–2026	Proximidad al área de influencia y representatividad altoandina
Payapunku	114126	Meteorológica automática	4020	2021–2026	Proximidad al tramo y disponibilidad de registros recientes
Sicuani	759	Meteorológica convencional	3550	1993–2023	Serie histórica amplia y referencia regional de precipitación
Santa Rosa	823	Meteorológica convencional	4050	1989–2013	Representatividad altitudinal y climática del entorno altoandino
Llally	00761r	Meteorológica convencional	3970	2017–2026	Complemento espacial para contrastar la variabilidad de precipitación

Nota. Estaciones SENAMHI seleccionadas por cercanía, altitud y disponibilidad de registros para el análisis climático del tramo San Miguel–El Descanso.

La distribución de estas estaciones permite representar el comportamiento pluviométrico del área de influencia del tramo. En conjunto, la información climática procesada constituye el insumo principal para evaluar la exposición a humedad y su influencia sobre el coeficiente de drenaje (m) utilizado en el método AASHTO 1993.

4.5.1 Procesamiento de precipitación SENAMHI

La información de precipitación observada del SENAMHI fue procesada con la finalidad de caracterizar el comportamiento climático del área de influencia del tramo San Miguel–El Descanso. Para ello, los registros de las estaciones seleccionadas fueron organizados por estación, año, mes y día, lo que permitió construir una base diaria homogénea para el análisis climático de la investigación.

Durante el procesamiento se revisó la disponibilidad de datos por estación, la continuidad de los registros y la consistencia de la información empleada. En los casos en que la información se encontraba en registros horarios, los valores fueron acumulados para obtener la precipitación diaria correspondiente, mediante la siguiente expresión:

$$P_d = \sum_{h=1}^{24} P_h \quad (13)$$

Donde:

P_d= precipitación diaria acumulada, en mm.
P_h= precipitación registrada en la hora h, en mm.
h= hora de registro.

Este procedimiento permitió trabajar con una misma unidad temporal e identificar los días con mayor aporte hídrico en el tramo de estudio. Para la investigación, se consideró como día crítico aquel en el que la precipitación acumulada diaria en 24 horas (RR/día) fue igual o mayor a 10 mm. Este valor se adoptó como criterio operativo para reconocer eventos de lluvia con potencial de generar condiciones de humedad relevantes en la estructura del pavimento. La decisión se respalda en el tratamiento de la precipitación acumulada diaria utilizado por SENAMHI, donde RR/día corresponde a la precipitación acumulada en 24 horas y permite clasificar los eventos de lluvia según su magnitud (SENAMHI, 2014).

$P_d \geq 10$ mm

Donde:

P_d= precipitación diaria acumulada, en mm.

Asimismo, la identificación de los días críticos se representó mediante una variable indicadora, con la finalidad de diferenciar los días con y sin potencial de saturación:

$$I_d = \begin{cases} 1, & \text{si } P_d \geq 10 \text{ mm} \\ 0, & \text{si } P_d < 10 \text{ mm} \end{cases}$$

Donde:

I_d= indicador diario de potencial de saturación.

$I_d = 1$ representa un día con potencial de saturación.

$I_d = 0$ representa un día sin potencial de saturación.

Para el cálculo del tiempo de exposición a saturación (tS), se empleó un denominador anual de 365 días, con el propósito de mantener una comparación uniforme entre las estaciones evaluadas y asegurar la trazabilidad del procesamiento climático. Este criterio permitió organizar los resultados de manera ordenada y relacionar el análisis de precipitación diaria con los cálculos posteriores desarrollados en la investigación.

El análisis de la precipitación observada permitió reconocer la variabilidad climática entre estaciones, aspecto relevante en zonas altoandinas debido a las diferencias de altitud, relieve y distribución espacial de las lluvias. Por ello, el procesamiento de la información SENAMHI constituye una etapa fundamental para estimar posteriormente el tiempo de exposición a saturación (tS) y el coeficiente de drenaje (m) asociado al diseño estructural del pavimento flexible.

El procesamiento desarrollado con la información SENAMHI se resume en la siguiente tabla, donde se presenta la actividad realizada, el criterio de procesamiento aplicado y el resultado obtenido para cada etapa del análisis climático.

Tabla 13

Síntesis del procesamiento de los registros de precipitación de las estaciones del SENAMHI

Etapa	Actividad realizada	Criterio aplicado	Resultado obtenido
1	Recopilación de registros SENAMHI	Selección de estaciones cercanas y representativas del área de influencia	Base inicial de precipitación observada
2	Organización de la información	Ordenamiento por estación, año, mes y día	Serie diaria estructurada para cada estación

3	Depuración de registros	Revisión de consistencia, datos faltantes y valores atípicos evidentes	Base climática homogénea para el análisis
4	Acumulación diaria de precipitación	Trabajo con precipitación diaria acumulada expresada en mm/día	Identificación de días con lluvia significativa
5	Determinación de días críticos	Aplicación del umbral para identificar días con exposición potencial a humedad	Número de días `Ds` por estación
6	Cálculo del tiempo de exposición a saturación	Relación entre días críticos y total de días analizados	Valor de *tS* para el análisis climático
7	Cálculo de indicadores climáticos	Integración de precipitación acumulada y *tS*	Obtención del Índice de Saturación Climática *(ISC)*
8	Relación con AASHTO 1993	Vinculación del *tS* con los rangos de tiempo próximo a saturación	Insumo para estimar el coeficiente de drenaje `m`

Nota. La tabla resume el procesamiento de la precipitación SENAMHI utilizado para estimar el *tS*, el ISC y el coeficiente de drenaje aplicado en el diseño AASHTO 1993.

El procesamiento de los registros SENAMHI permitió organizar una base climática observada y homogénea para las estaciones consideradas. Esta información constituye el insumo principal para identificar los días con potencial de saturación y calcular los indicadores climáticos utilizados posteriormente en la estimación del coeficiente de drenaje (m).

4.5.2 Tiempo de exposición a saturación obtenido con SENAMHI

A partir de los registros diarios procesados del SENAMHI, se identificaron los días con potencial de saturación para cada estación meteorológica considerada en el análisis. Este indicador permitió estimar el porcentaje de tiempo en el que la estructura del pavimento podría encontrarse expuesta a condiciones de humedad cercanas a la saturación, aspecto relevante para el comportamiento de la base y la subbase granular dentro del método AASHTO 1993.

Para cada estación, el tiempo de exposición a saturación (tS) se determinó a partir del promedio mensual de días críticos de precipitación, utilizando un denominador anual de 365 días. La expresión empleada fue la siguiente:

$$tS = \left(\frac{\sum_{m=1}^{12} \bar{D}_{s,m}}{365} \right) \times 100 \qquad (14)$$

Donde:

tS= tiempo de exposición a saturación, en %.

$\bar{D}_{s,m}$= promedio mensual de días con potencial de saturación en el mes m.

365 = número de días del año adoptado para el análisis.

Esta formulación permitió obtener un indicador climático comparable entre estaciones, aun cuando los periodos de registro no fueran exactamente iguales. De esta manera, el tiempo de exposición a saturación (tS) refleja la frecuencia relativa con la que el pavimento puede estar sometido a condiciones de humedad significativa, a partir de la precipitación observada.

Durante el procesamiento climático, se revisó la consistencia de los valores obtenidos para las estaciones evaluadas, verificando que los resultados guarden coherencia con los registros diarios de precipitación y con el criterio operativo adoptado para identificar los días con potencial de saturación. Esta revisión permitió utilizar valores consistentes de tiempo de exposición a saturación (tS) como base para la estimación posterior del coeficiente de drenaje (m).

Tabla 14

Tiempo de exposición a la saturación (tS) calculado para cada estación del SENAMHI

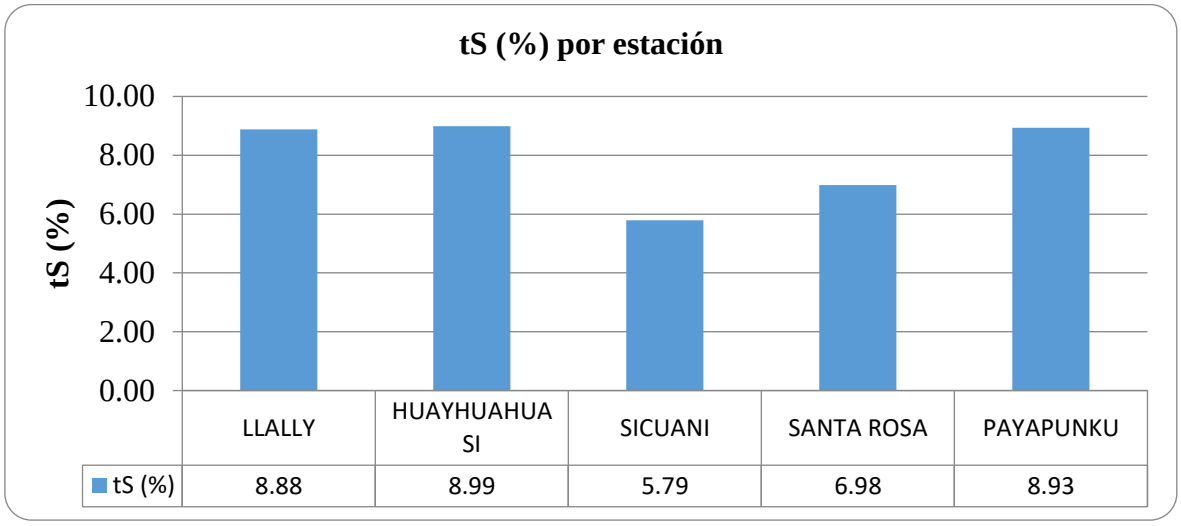
Estación	Periodo analizado	*tS* calculado (%)
Llally	2017–2026	8.88
Huayhuahuasi	2021–2026	8.99
Sicuani	1993–2023	5.79
Santa Rosa	1989–2013	6.98
Payapunku	2021–2026	8.93
Promedio	—	**7.91**

Nota. Se aprecia que las estaciones con el periodo analizado presentan un *tS* más bajo.

A partir del procesamiento de los registros diarios de precipitación del SENAMHI, se determinó el tiempo de exposición a saturación (tS) para cada estación considerada. Este indicador permite conocer qué porcentaje del periodo analizado presentó condiciones potenciales de humedad elevada, de acuerdo con el umbral de precipitación adoptado en la investigación. Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 15 y sirven como base para estimar posteriormente el coeficiente de drenaje (m) en el diseño AASHTO 1993.

Figura 14

Tiempo de exposición a la saturación (tS) según las estaciones del SENAMHI



Nota. Los mayores valores de tiempo de exposición a saturación (tS) indican estaciones con mayor frecuencia relativa de días con potencial de humedad en la estructura del pavimento.

Los resultados muestran que el tiempo de exposición a saturación (tS) obtenido con información SENAMHI varía entre 5.79 % y 8.99 %, con un promedio de 7.91 %. Las estaciones Huayhuahuasi, Payapunku y Llally presentan los mayores valores de exposición, mientras que Sicuani registra el menor valor. Esta variación confirma que la precipitación no se distribuye de manera uniforme en el entorno altoandino, por lo que el uso de varias estaciones permite representar mejor la condición climática del tramo evaluado.

En términos técnicos, estos resultados evidencian una exposición moderada a humedad dentro del área de estudio. Por ello, el valor promedio de tiempo de exposición a saturación (tS) = 7.91 % constituye un insumo relevante para la estimación posterior del coeficiente de drenaje (m) del escenario SENAMHI, el cual será incorporado en el diseño estructural del pavimento flexible mediante el método AASHTO 1993.

4.5.3 Análisis descriptivo del tS SENAMHI

Con la finalidad de complementar la interpretación de los resultados, se realizó un análisis descriptivo del tiempo de exposición a saturación (tS) obtenido con información SENAMHI. Este análisis permite resumir la variabilidad entre estaciones mediante indicadores estadísticos básicos, sin aplicar pruebas inferenciales, debido a que el objetivo de esta etapa es caracterizar la exposición climática observada.

Para ello, se calcularon el promedio, el valor mínimo, el valor máximo, el rango, la desviación estándar y el coeficiente de variación del tiempo de exposición a saturación (tS). El promedio se utilizó como valor representativo del escenario SENAMHI, mientras que la desviación estándar y el coeficiente de variación permitieron evaluar la dispersión de los resultados entre estaciones.

El promedio del tiempo de exposición a saturación (tS) se calculó mediante la siguiente expresión:

$$\bar{tS} = \frac{1}{k}\sum_{i=1}^{k} t\,S_i \qquad (15)$$

Donde:

$\bar{tS}$= promedio del tiempo de exposición a saturación, en %.
tS_i= tiempo de exposición a saturación de la estación i, en %.
k= número de estaciones meteorológicas consideradas.

El rango se determinó como la diferencia entre el valor máximo y el valor mínimo:

$$R = tS_{max} - tS_{min} \qquad (16)$$

Donde:

R= rango del tiempo de exposición a saturación, en puntos porcentuales.
tS_{max}= valor máximo de tS, en %.
tS_{min}= valor mínimo de tS, en %.

La desviación estándar se calculó mediante:

$$s_{(tS)} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{k}(tS_i - \bar{tS})^2}{k-1}} \qquad (17)$$

Donde:

$s_{(tS)}$= desviación estándar del tiempo de exposición a saturación.

tS_i= valor de tSde cada estación.

$\bar{tS}$= promedio del tS.

k= número de estaciones analizadas.

Finalmente, el coeficiente de variación se obtuvo mediante:

$$CV_{tS} = \left(\frac{s_{(tS)}}{\bar{tS}}\right) \times 100 \quad (18)$$

Donde:

CV_{tS} = coeficiente de variación del tiempo de exposición a saturación, en %.

s_{tS} = desviación estándar del tS.

$\bar{tS}$ = promedio del tS.

Tabla 15

Estadísticos descriptivos del tS obtenido a partir de la precipitación observada en las estaciones del SENAMHI

Indicador	Valor
Promedio	7.91%
Valor mínimo	5.79%
Valor máximo	8.99%
Rango	3.20 puntos porcentuales
Desviación estándar	1.46
Coeficiente de variación	18.43%

Nota. Los estadísticos descriptivos fueron calculados a partir de los valores de tS obtenidos para las estaciones SENAMHI consideradas en la investigación.

El análisis descriptivo evidencia una variabilidad moderada del tiempo de exposición a saturación (tS) entre estaciones. El rango de 3.20 puntos porcentuales muestra diferencias en la exposición a humedad, asociadas principalmente a la ubicación, altitud y comportamiento local de la precipitación. Sin embargo, el coeficiente de variación de 18.43 % indica que los valores mantienen una dispersión controlada, por lo que el promedio de tS = 7.91 % resulta adecuado como valor representativo del escenario SENAMHI.

Desde el punto de vista técnico, este resultado permite sustentar que la exposición climática del tramo no debe evaluarse a partir de una sola estación, sino mediante una lectura integrada de la red meteorológica considerada. Por ello, el valor promedio del tiempo de exposición a saturación (tS) se adopta como insumo para la estimación posterior del coeficiente de drenaje (m) asociado al escenario SENAMHI.

4.5.4 Coeficientes de drenaje asociados al tS SENAMHI

A partir del tiempo de exposición a saturación (tS) obtenido con información SENAMHI, se interpolaron los coeficientes de drenaje asociados a las distintas calidades de drenaje consideradas por el método AASHTO 1993. Este procedimiento permitió relacionar la exposición climática observada con el comportamiento estructural esperado de las capas granulares del pavimento flexible.

La interpolación se realizó considerando que el coeficiente de drenaje (m) varía en función del porcentaje de tiempo en que la estructura del pavimento puede encontrarse expuesta a condiciones cercanas a la saturación. Para ello, se empleó una interpolación lineal entre los límites del intervalo correspondiente, según la siguiente expresión:

$$m = m_1 + \left(\frac{tS - tS_1}{tS_2 - tS_1}\right)(m_2 - m_1) \qquad (19)$$

Donde:

m= coeficiente de drenaje interpolado.
tS= tiempo de exposición a saturación calculado, en %.
tS_1= límite inferior del intervalo de exposición a saturación, en %.
tS_2= límite superior del intervalo de exposición a saturación, en %.
m_1= coeficiente de drenaje asociado al límite inferior del intervalo.
m_2= coeficiente de drenaje asociado al límite superior del intervalo.

Para el caso del escenario SENAMHI, el valor promedio obtenido fue **tS = 7.91 %**, el cual se ubica dentro del intervalo de exposición utilizado para la interpolación. A partir de este valor se calcularon los coeficientes de drenaje para las condiciones de drenaje excelente, bueno, regular, pobre y muy pobre. Los resultados se presentan en la Tabla 16.

Tabla 16

Coeficientes de drenaje estimados a partir del tS obtenido en las estaciones del SENAMHI

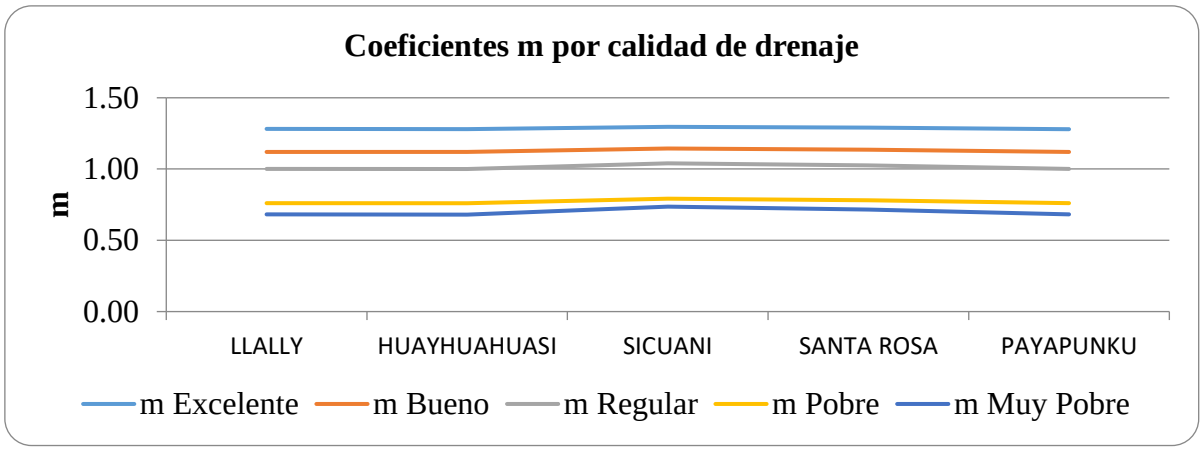
Estación	*tS* automático (%)	Coeficiente de drenaje (*m*)				
		Excelente	Bueno	Regular	Pobre	Muy pobre
Llally	8.88	1.28	1.12	1	0.76	0.68
Huayhuahuasi	8.99	1.28	1.12	1	0.76	0.68
Sicuani	5.79	1.3	1.14	1.04	0.79	0.74
Santa Rosa	6.98	1.29	1.14	1.03	0.78	0.72
Payapunku	8.93	1.28	1.12	1	0.76	0.68
Promedio *tS*	**7.91**	—	—	—	—	—

Nota. Los coeficientes *m* corresponden a valores interpolados a partir del *tS* SENAMHI y la calidad de drenaje considerada para las capas granulares.

Para complementar la interpretación de los valores obtenidos, la Figura 15 presenta la variación de los coeficientes de drenaje interpolados para cada estación SENAMHI, considerando las diferentes calidades de drenaje establecidas por AASHTO 1993. Esta representación permite visualizar cómo cambia el coeficiente de drenaje (m) según el tiempo de exposición a saturación (tS) y la condición de drenaje asumida para las capas granulares.

Figura 15

Coeficientes de drenaje según la calidad del drenaje en las estaciones del SENAMHI



Nota. La figura muestra la variación de los coeficientes de drenaje interpolados para cada estación SENAMHI, considerando diferentes condiciones de calidad de drenaje.

Los resultados muestran que, para mejores condiciones de drenaje, los valores del coeficiente de drenaje (m) son mayores. En cambio, cuando la calidad del drenaje disminuye, los valores de m se reducen. Este comportamiento es coherente con el enfoque del método AASHTO 1993, debido a que el coeficiente de drenaje ajusta el aporte estructural de las capas granulares en función de su exposición a humedad.

Para el escenario SENAMHI se adoptó la condición de drenaje **buena**, debido a que representa una condición técnica compatible con el comportamiento observado del tramo y con el análisis climático obtenido a partir de las estaciones consideradas. Bajo esta condición, la interpolación del coeficiente de drenaje se expresó mediante la siguiente relación:

$$m_{Bueno} = 1.1875 - 0.0075(tS)$$

Reemplazando el valor promedio obtenido con SENAMHI:

$$m_{Bueno} = 1.1875 - 0.0075(7.9123)$$
$$m_{Bueno} = 1.1282 = 1.13$$

Por tanto, el coeficiente de drenaje adoptado para el escenario SENAMHI fue:

$$m_{SENAMHI} = 1.13$$

Este valor constituye el parámetro de drenaje que será incorporado posteriormente en el diseño estructural del pavimento flexible mediante el método AASHTO 1993. Su importancia radica en que no modifica directamente la demanda estructural requerida del pavimento, sino el aporte estructural efectivo de las capas granulares, especialmente de la base y la subbase.

En conjunto, los resultados obtenidos con información SENAMHI permiten caracterizar la exposición climática observada del tramo San Miguel–El Descanso y sustentar la adopción de un coeficiente de drenaje representativo para el diseño estructural. El valor promedio de tS = 7.91 % y el coeficiente de drenaje (m) = 1.13 proporcionan una base técnica más objetiva que la selección puramente referencial del parámetro de drenaje.

4.6 Procesamiento de información PISCOp 3.0

La información PISCOp 3.0 fue procesada como fuente climática grillada de precipitación diaria para el área de influencia del tramo San Miguel–El Descanso. Este producto fue

desarrollado mediante la integración e interpolación de registros pluviométricos observados, con el propósito de generar una serie continua y de alta resolución para el territorio peruano (Aybar et al., 2020**).** Esta base permitió disponer de una serie continua de precipitación para el periodo 1981–2025, organizada por día calendario y punto de análisis. A diferencia de la información observada en estaciones meteorológicas, PISCOp 3.0 proporciona valores estimados en grilla; por ello, su procesamiento se realizó de manera independiente, sin combinarlo con otras fuentes climáticas.

Durante el procesamiento climático, los registros diarios fueron organizados en dos niveles de análisis: estaciones de control y tramos del corredor vial. Esta separación permitió evaluar el comportamiento climático de cada punto sin distorsionar los promedios. Para el escenario PISCOp 3.0, el análisis principal se desarrolló con las estaciones de control Llally, Huayhuahuasi, Sicuani, Santa Rosa y Payapunku, debido a que estas permiten comparar la información grillada con las estaciones del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI) utilizadas en la investigación. Los resultados del Tramo I y Tramo II se consideraron como control complementario del corredor vial, sin reemplazar el promedio obtenido con las estaciones de control.

Para el procesamiento diario, se consideró como día con potencial de saturación aquel en el que la precipitación diaria acumulada fue igual o superior a 10 mm, conforme al criterio operativo adoptado en la investigación. Este criterio permitió identificar los días con mayor posibilidad de exposición de la estructura del pavimento a condiciones de humedad. La condición aplicada fue la siguiente:

$$P_d \geq 10 \text{ mm}$$

Donde:

P_d= precipitación diaria PISCOp 3.0, en mm.

partir del criterio de precipitación diaria adoptado, se identificó el número de días con potencial de saturación (Ns) mediante el conteo de los registros diarios que presentaron una precipitación acumulada mayor o igual a 10 mm. Este procedimiento permitió reconocer los días en los que la estructura del pavimento pudo estar expuesta a una mayor presencia de humedad. Luego, con estos valores, se calculó el tiempo de exposición a saturación (tS) mediante la siguiente expresión:

$$tS = \left(\frac{N_s}{N_t}\right) \times 100 \quad (20)$$

Donde:

tS= tiempo de exposición a saturación, en %.

N_s= número de días con precipitación diaria igual o superior a 10 mm.

N_t= número total de días analizados.

El periodo evaluado comprendió 16 436 días para cada punto de análisis, lo que permitió calcular uniformemente el tiempo de exposición a saturación (tS) en todas las estaciones de control y los tramos evaluados.

El procedimiento se aplicó a todos los puntos incluidos en la Tabla 17. Para mostrar su trazabilidad, se presenta el caso de Llally, donde 1 065 de los 16 436 días analizados cumplieron la condición Pd ≥ 10 mm; por tanto, tS = (1 065 / 16 436) × 100 = 6.48 %. Para la calidad funcional del drenaje evaluada, se obtuvo mediante interpolación un coeficiente m = 1.14.

Tabla 17

Resultados del tS y del coeficiente de drenaje obtenidos mediante PISCOp 3.0

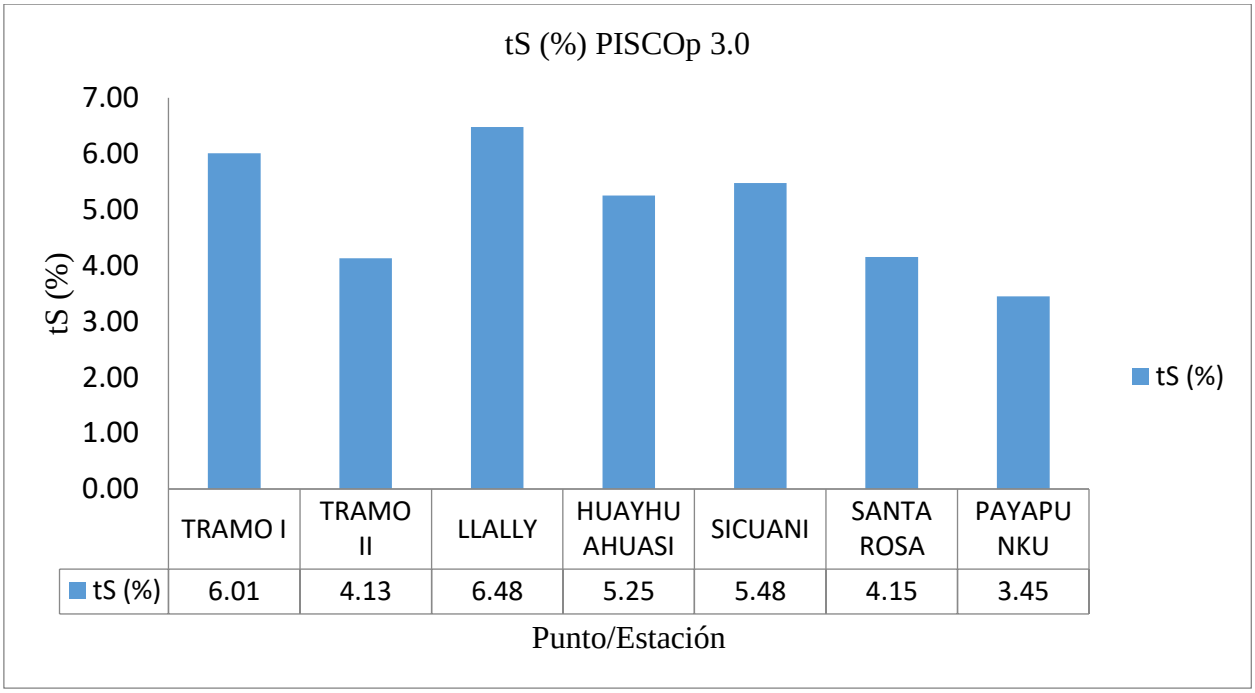
Punto de análisis	Tipo de punto	Días analizados (Nt)	Días con potencial de saturación (Ns)	Tiempo de exposición a saturación (tS) PISCOp (%)	Coeficiente de drenaje interpolado (m)
Tramo I	Tramo vial	16 436	987	6.01	1.14
Tramo II	Tramo vial	16 436	679	4.13	1.16
Llally	Estación de control	16 436	1 065	6.48	1.14
Huayhuahuasi	Estación de control	16 436	863	5.25	1.15
Sicuani	Estación de control	16 436	900	5.48	1.15
Santa Rosa	Estación de control	16 436	682	4.15	1.16
Payapunku	Estación de control	16 436	567	3.45	1.16

Nota. Nt = número total de días analizados; Ns = número de días con precipitación diaria igual o superior a 10 mm.

La Figura 16 compara el tiempo de exposición a saturación (tS) obtenido mediante el producto grillado de precipitación PISCOp 3.0 (Peruvian Interpolated Data of SENAMHI's Climatological and Hydrological Observations) en los tramos y estaciones de control evaluados.

Figura 16

Tiempo de exposición a la saturación (tS) obtenido mediante PISCOp 3.0



Nota. La figura presenta el tiempo de exposición a saturación estimado con PISCOp 3.0 para los puntos de análisis del tramo evaluado.

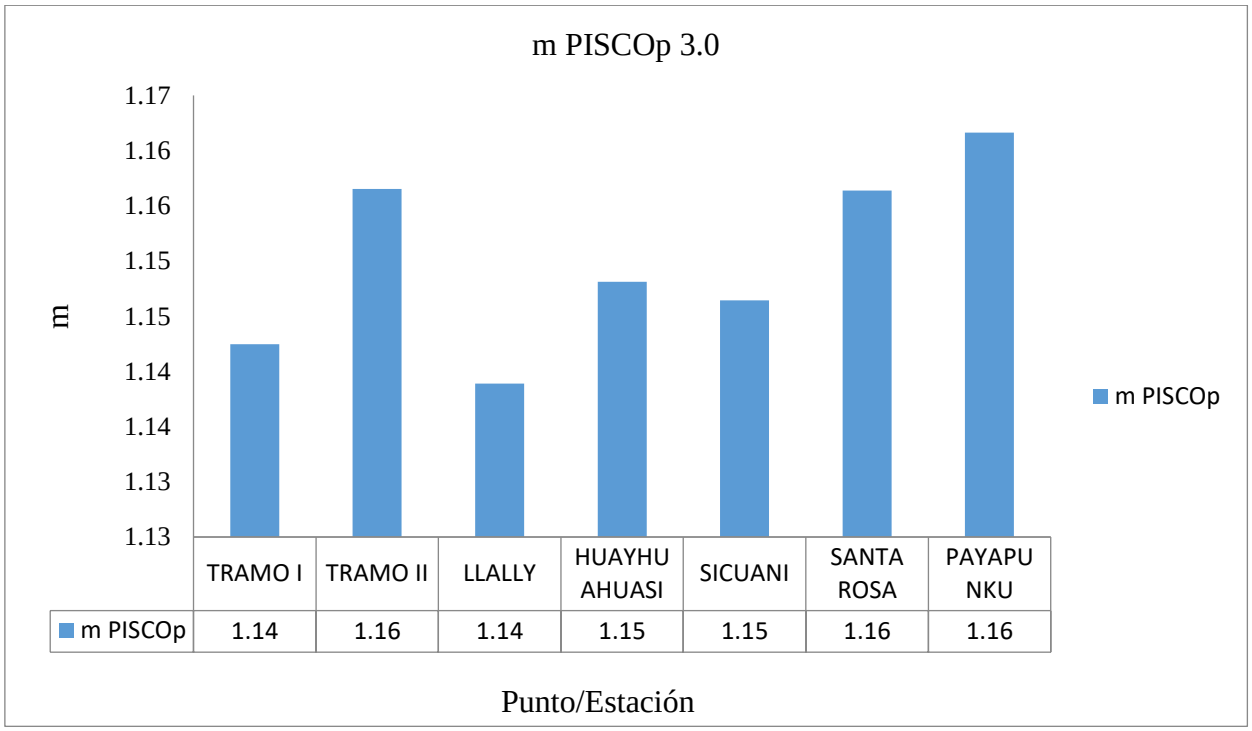
Los resultados muestran que el tiempo de exposición a saturación (tS) obtenido con PISCOp 3.0 varía entre 3.45 % y 6.48 %. El mayor valor corresponde a Llally, con 6.48 %, mientras que el menor valor corresponde a Payapunku, con 3.45 %. En los tramos del corredor vial, el Tramo I presentó un tS de 6.01 %, mientras que el Tramo II registró 4.13 %. Esta diferencia evidencia que la exposición a humedad no es uniforme dentro del área de análisis, aun cuando se utilice una misma fuente climática grillada.

Para estimar el coeficiente de drenaje (m) correspondiente a cada valor de tS, se utilizó una interpolación lineal tomando como referencia los valores establecidos para una calidad de drenaje buena. Los parámetros considerados fueron:

$tS_{inf} = 5\%, tS_{sup} = 25\%, m_{inf} = 1.15$y $m_{sup} = 1.00.$

Figura 17

Coeficiente de drenaje obtenido mediante PISCOp 3.0 por punto de análisis



Nota. La figura muestra la variación del coeficiente de drenaje m obtenido a partir del *Ts* calculado con información PISCOp 3.0.

Los coeficientes obtenidos muestran una relación inversa entre el tiempo de exposición a saturación (tS) y el coeficiente de drenaje (m). Es decir, cuando el tiempo de exposición a saturación aumenta, el coeficiente de drenaje disminuye; en cambio, cuando el tS es menor, el valor de m se aproxima al límite superior correspondiente a la calidad de drenaje adoptada. Este comportamiento es coherente con el método AASHTO 1993, debido a que el coeficiente de drenaje representa el efecto de la humedad sobre el aporte estructural de las capas granulares.

Para mantener la coherencia del análisis, los resultados se organizaron en dos bloques: estaciones de control y tramos del corredor vial. El bloque de estaciones de control se utilizó como base principal para adoptar el valor representativo del escenario PISCOp 3.0, mientras que el bloque de tramos se empleó como control complementario del comportamiento climático del corredor.

Tabla 18

Resumen técnico de los bloques procesados mediante PISCOp 3.0

Bloque de análisis	**Elementos incluidos**	***tS* promedio (%)**	**m promedio**	**Uso técnico**
PISCOp por tramos	Tramo I y Tramo II	5.07	1.15	Control interno del corredor vial
PISCOp por estaciones de control	Llally, Huayhuahuasi, Sicuani, Santa Rosa y Payapunku	4.96	1.15	Valor adoptado para el escenario PISCOp 3.0

Nota. El valor PISCOp 3.0 adoptado corresponde al promedio de las cinco estaciones de control; Tramo I y Tramo II se emplean solo como verificación complementaria del corredor vial**.**

A partir del bloque de cinco estaciones de control, el tiempo de exposición a saturación (tS) promedio obtenido fue:

$tS_{PISCOp} = 4.96\%$

Debido a que el tS obtenido se encuentra en el intervalo de 1 % a 5 %, para una calidad funcional del drenaje “Bueno” se interpoló entre m = 1.25, correspondiente a tS = 1 %, y m = 1.15, correspondiente a tS = 5 %:

m = 1.25 − [(4.96 − 1) / (5 − 1)] × (1.25 − 1.15)

m = 1.151 = 1.15

Por tanto, el coeficiente de drenaje adoptado para el escenario PISCOp 3.0 fue:

m PISCOp = 1.15

El valor interpolado corresponde a una calidad funcional del drenaje buena y a un tiempo de exposición a saturación próximo al límite superior del intervalo de 1 % a 5 %. Para el diseño estructural se adoptó el valor redondeado m = 1.15, debido a que la diferencia decimal no produce una variación significativa en los resultados.

En conjunto, los resultados obtenidos con PISCOp 3.0 permiten caracterizar la exposición climática del área de estudio mediante una fuente grillada de precipitación diaria. El

procesamiento evidencia valores bajos a moderados de tiempo de exposición a saturación (tS), con un promedio adoptado de 4.96 % para las estaciones de control y un coeficiente de drenaje (m) = 1.15, los cuales serán utilizados posteriormente en el análisis estructural del pavimento flexible mediante el método AASHTO 1993.

4.7 Comparativo SENAMHI vs PISCOp 3.0

La comparación entre SENAMHI y PISCOp 3.0 se realizó con la finalidad de evaluar la consistencia entre una fuente climática observada y una fuente climática grillada. Para mantener la coherencia técnica del análisis, el comparativo se desarrolló con las cinco estaciones comunes entre ambas fuentes: Llally, Huayhuahuasi, Sicuani, Santa Rosa y Payapunku. Estas estaciones permiten contrastar directamente los valores de tiempo de exposición a saturación (tS) y coeficiente de drenaje (m) obtenidos con SENAMHI y PISCOp 3.0.

Los valores correspondientes a Tramo I y Tramo II no se incorporaron en el comparativo SENAMHI–PISCOp 3.0, debido a que corresponden a puntos de análisis del corredor vial procesados solo con información PISCOp 3.0. Por ello, fueron utilizados como control complementario del comportamiento climático del tramo, pero no como base para comparar ambas fuentes ni para adoptar el coeficiente de drenaje (m) del escenario PISCOp 3.0.

En esta etapa, SENAMHI se mantiene como la fuente observada principal, debido a que proviene de registros meteorológicos medidos en estación. PISCOp 3.0 se considera una fuente grillada complementaria, útil para contrastar el comportamiento climático del área de estudio y evaluar la sensibilidad del coeficiente de drenaje (m) frente al tipo de información utilizada.

Para cuantificar la diferencia entre ambas fuentes, se calcularon la diferencia del tiempo de exposición a saturación (tS), la diferencia del coeficiente de drenaje (m) y la variación relativa del coeficiente de drenaje. Las expresiones empleadas fueron las siguientes:

$$\Delta tS = tS_{PISCOp} - tS_{SENAMHI}$$

$$\Delta m = m_{PISCOp} - m_{SENAMHI}$$

$$VR_m = \left(\frac{\Delta m}{m_{SENAMHI}}\right) \times 100 \quad (21)$$

Donde:

ΔtS= diferencia del tiempo de exposición a saturación, en puntos porcentuales.

Δm= diferencia entre coeficientes de drenaje.

VR_m= variación relativa del coeficiente de drenaje, en %.

tS_{PISCOp}= tiempo de exposición a saturación obtenido con PISCOp 3.0.

$tS_{SENAMHI}$= tiempo de exposición a saturación obtenido con SENAMHI.

m_{PISCOp}= coeficiente de drenaje obtenido con PISCOp 3.0.

$m_{SENAMHI}$= coeficiente de drenaje obtenido con SENAMHI.

Tabla 19

Comparación del tS y del coeficiente de drenaje entre el SENAMHI y PISCOp 3.0

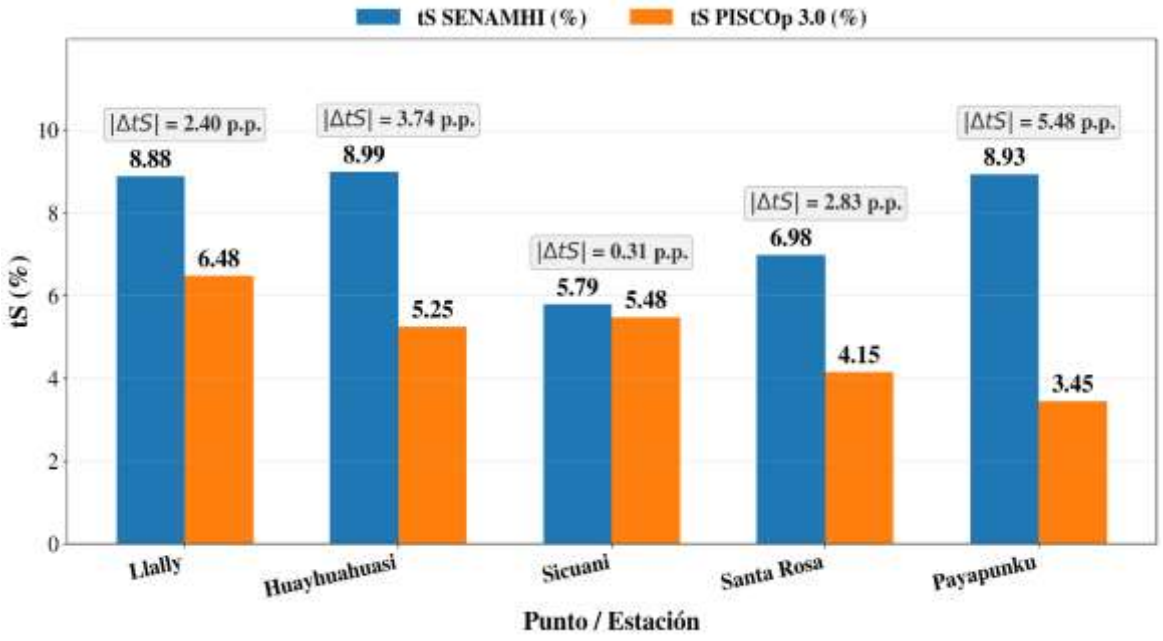
Estación	tS SENAMHI (%)	m SENAMHI	tS PISCOp 3.0 (%)	m PISCOp 3.0	ΔtS (p.p.)	Δm	VRm (%)
Llally	8.88	1.12	6.48	1.139	-2.4	0.02	1.6
Huayhuahuasi	8.99	1.12	5.25	1.148	-3.74	0.03	2.5
Sicuani	5.79	1.14	5.48	1.146	-0.31	0.00	0.2
Santa Rosa	6.98	1.14	4.15	1.156	-2.83	0.02	1.87
Payapunku	8.93	1.12	3.45	1.162	-5.48	0.04	3.67
Promedio	7.91	1.13	4.96	1.15	-2.95	0.02	1.97

Nota. Comparación entre los valores de tS y coeficiente de drenaje obtenidos con registros SENAMHI e información PISCOp 3.0.

Para complementar el análisis comparativo entre las fuentes climáticas, la Figura 18 presenta los valores de tiempo de exposición a saturación (tS) obtenidos con SENAMHI y PISCOp 3.0 en las estaciones comunes consideradas. Esta comparación permite observar las diferencias entre la información observada y la información grillada, así como identificar si ambas fuentes mantienen una tendencia coherente en la representación de la exposición potencial a humedad del tramo evaluado.

Figura 18

Comparación del tiempo de exposición a la saturación (tS) entre el SENAMHI y PISCOp 3.0

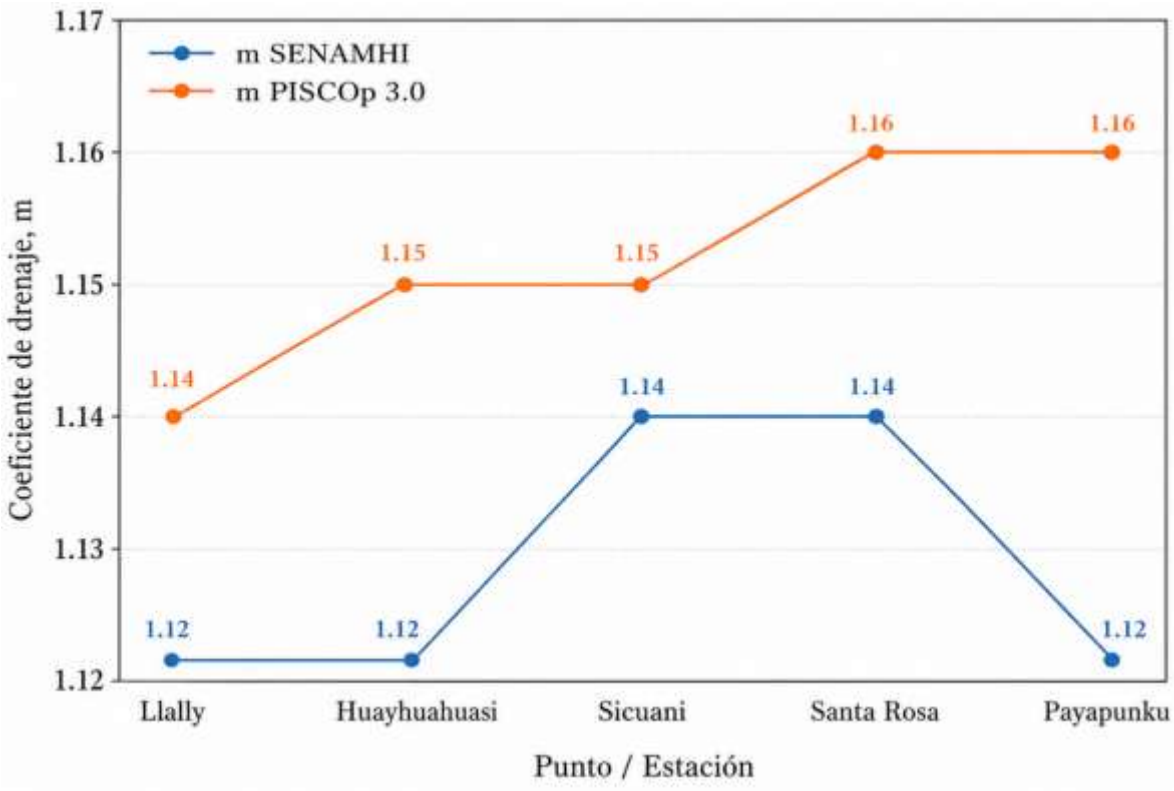


Nota. La diferencia absoluta se calculó mediante y se expresa en puntos porcentuales (p.p.). En las cinco estaciones evaluadas, PISCOp 3.0 presentó valores de tS inferiores a los obtenidos con SENAMHI.

Los resultados muestran que PISCOp 3.0 presenta menores valores de tiempo de exposición a saturación (tS) que SENAMHI en todas las estaciones evaluadas. La diferencia promedio fue de -2.95 puntos porcentuales, lo que evidencia que la fuente grillada estima una menor exposición a condiciones cercanas a la saturación. La menor diferencia se presentó en Sicuani, con -0.31 puntos porcentuales, mientras que la mayor diferencia correspondió a Payapunku, con -5.48 puntos porcentuales.

Figura 19

Comparación de los coeficientes de drenaje (m) obtenidos a partir de datos del SENAMHI y de PISCOp 3.0



Nota. La figura compara los coeficientes de drenaje interpolados para las estaciones comunes evaluadas con SENAMHI y PISCOp 3.0.

La diferencia observada en el tiempo de exposición a saturación (tS) se refleja directamente en el coeficiente de drenaje (m). Al presentar menores tiempos de exposición a saturación, PISCOp 3.0 generó valores de m ligeramente mayores que los obtenidos con SENAMHI. En promedio, SENAMHI obtuvo un coeficiente de drenaje (m) = 1.128, redondeado a 1.13, mientras que PISCOp 3.0 obtuvo un coeficiente de drenaje (m) = 1.150, redondeado a 1.15.

Desde el punto de vista del diseño AASHTO 1993, esta diferencia no debe interpretarse como un reemplazo de la información observada, sino como una evidencia de sensibilidad climática. SENAMHI representa la fuente principal por corresponder a registros de estación, mientras que PISCOp 3.0 aporta una lectura complementaria basada en información grillada. En ese sentido, el comparativo permite sustentar que el valor adoptado de coeficiente de drenaje (m) = 1.15 para PISCOp 3.0 es coherente con el comportamiento de las cinco estaciones de control y no depende de los valores complementarios de Tramo I y Tramo II.

4.7.1 Indicadores de validación del comparativo

Para complementar la interpretación, se calcularon indicadores de validación sobre el coeficiente de drenaje (m). Estos indicadores permiten medir la magnitud de las diferencias entre SENAMHI y PISCOp 3.0, considerando únicamente las cinco estaciones comunes utilizadas en el comparativo. Esta delimitación evita mezclar estaciones meteorológicas con puntos de análisis del corredor vial y mantiene la coherencia del contraste entre ambas fuentes climáticas.

El error medio absoluto se calculó mediante:

$$MAE_m = \frac{\sum_{i=1}^{n} |\Delta m_i|}{n} \quad (22)$$

La raíz del error cuadrático medio se calculó mediante:

$$RMSE_m = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} (\Delta m_i)^2}{n}} \quad (23)$$

Donde:

MAE_m= error medio absoluto del coeficiente m.

$RMSE_m$= raíz del error cuadrático medio del coeficiente m.

Δm_i= diferencia del coeficiente de drenaje en la estación i.

n= número de estaciones comparadas.

Tabla 20

Indicadores de validación de la comparación entre el SENAMHI y PISCOp 3.0

Indicador	Valor	Unidad	Lectura técnica
Estaciones comparadas	5	n	Comparación realizada sobre estaciones comunes
Diferencia promedio de *tS*	-2.95	p.p.	PISCOp 3.0 estima menor exposición a saturación
Diferencia promedio de m	0.02	adim.	PISCOp 3.0 genera un *m* promedio mayor
Variación promedio de m	1.97	%	Diferencia relativa moderada respecto a SENAMHI

MAE_m	0.02	adim.	Error medio absoluto entre fuentes climáticas
RMSE_m	0.03	adim.	Penaliza las diferencias más altas entre fuentes
Máxima diferencia de m	0.04	adim.	Mayor separación identificada entre ambas fuentes
Estación crítica	Payapunku	—	Punto con mayor diferencia de m

Nota. Los indicadores fueron calculados a partir de las diferencias del coeficiente de drenaje entre SENAMHI y PISCOp 3.0 para las cinco estaciones comunes del análisis.

Los indicadores muestran que la diferencia promedio del coeficiente de drenaje (m) fue de 0.022, con una variación relativa promedio de 1.97 %. Este resultado indica que la diferencia entre ambas fuentes es moderada. Sin embargo, la estación Payapunku presenta la mayor separación, con una diferencia de m = 0.041, por lo que debe considerarse como punto crítico dentro de la discusión técnica.

En conjunto, el comparativo confirma que PISCOp 3.0 estima menores tiempos de exposición a saturación y, como consecuencia, genera coeficientes de drenaje ligeramente mayores. Por ello, el escenario SENAMHI se mantiene como fuente observada principal para el diseño, mientras que PISCOp 3.0 se utiliza como contraste complementario para evaluar la sensibilidad del parámetro de drenaje frente a una fuente climática grillada.

4.7.2 Escenarios de coeficiente de drenaje evaluados

A partir del procesamiento climático desarrollado con las fuentes SENAMHI y PISCOp 3.0, se definieron los coeficientes de drenaje que serán empleados como parámetros de entrada en el diseño estructural del pavimento flexible mediante el método AASHTO 1993. Para efectos comparativos, se consideró una línea base con coeficiente de drenaje (m) = 1.00, correspondiente a una condición referencial sin ajuste climático específico. Posteriormente, se incorporaron los valores obtenidos a partir de información climática observada y grillada, con el propósito de evaluar la sensibilidad del diseño frente a la variación del coeficiente de drenaje.

Tabla 21

Escenarios del coeficiente de drenaje obtenidos mediante las fuentes climáticas evaluadas

Escenario	Criterio de análisis	Coeficiente *m* adoptado
Línea base	Condición referencial sin ajuste climático específico	1
SENAMHI	Registros históricos observados y condición de drenaje del tramo	1.13
PISCOp 3.0	Información climática grillada PISCOp 3.0 y condición de drenaje del tramo	1.15

Nota. Los valores se emplean como parámetros de entrada para comparar los escenarios de diseño estructural mediante AASHTO 1993.

Es importante precisar que el coeficiente de drenaje (m) no modifica directamente el Número Estructural requerido (SN requerido), obtenido mediante la ecuación general del método AASHTO 1993. Su efecto se refleja en el Número Estructural calculado (SN calculado), debido a que interviene en el aporte estructural de la base y la subbase granular.

Por ello, al incrementarse el valor del coeficiente de drenaje (m), aumenta el aporte estructural efectivo de las capas granulares. Esto puede reducir los espesores requeridos para cumplir con el Número Estructural requerido (SN requerido). En ese sentido, los escenarios definidos permiten evaluar de manera cuantitativa la influencia del coeficiente de drenaje en la configuración final del paquete estructural.

4.7.3 Verificación de campo de las condiciones de drenaje

Como complemento del análisis climático realizado con información del SENAMHI y PISCOp 3.0, se efectuó una verificación de campo en los sectores representativos de la carretera San Miguel–El Descanso. Esta actividad tuvo como finalidad conocer el estado funcional del drenaje superficial y comprobar si las condiciones observadas eran compatibles con los escenarios de coeficiente de drenaje (m)considerados en el diseño mediante el método AASHTO 1993.

La verificación no buscó desarrollar un diseño hidráulico detallado de cunetas o alcantarillas. Su propósito fue identificar, de manera directa, cómo se evacúa el agua de lluvia en cada sector y reconocer posibles condiciones que puedan favorecer su permanencia sobre la calzada, las bermas o las zonas próximas a la plataforma vial.

Durante la inspección se evaluaron la presencia y continuidad de las cunetas laterales, la existencia de elementos de drenaje transversal, el estado de los puntos de descarga, el bombeo de la calzada y la posible formación de empozamientos. También se observó la presencia de sedimentos, material fino u otras obstrucciones que podrían reducir la capacidad de evacuación del agua durante los periodos de mayor precipitación.

La información obtenida en campo se utilizó como un complemento de los resultados climáticos asociados al tiempo de exposición a saturación (tS)y al Índice de Saturación Climática (ISC). Por tanto, la inspección no se empleó para calcular directamente el coeficiente de drenaje ni para determinar el tiempo real de evacuación del agua dentro de la base y subbase granular. Su función fue comprobar si las condiciones físicas del tramo permitían considerar razonablemente los escenarios de diseño analizados.

En este procedimiento se diferenciaron dos aspectos. El primero correspondió a la estimación del coeficiente de drenaje a partir de la precipitación histórica, el tiempo de exposición a saturación y los rangos establecidos por AASHTO 1993. El segundo estuvo relacionado con la verificación de las condiciones mínimas que debe mantener el sistema de drenaje para que los valores adoptados continúen siendo técnicamente aplicables durante la vida útil del pavimento.

Esta diferenciación es importante, ya que el coeficiente de drenaje no debe entenderse como un valor independiente del estado real de la vía. Su aplicación depende de que las cunetas, alcantarillas, pendientes transversales y puntos de descarga se mantengan operativos. Si estos elementos pierden funcionalidad por falta de limpieza, acumulación de sedimentos, deterioro o presencia de empozamientos persistentes, será necesario revisar el coeficiente empleado en el diseño.

Tabla 22

Matriz de verificación de campo para determinar la aplicabilidad del coeficiente de drenaje

Sector	Progresiva	Condición observada de drenaje superficial	Elementos de evacuación identificados	Bombeo transversal referencial	Riesgo de permanencia de humedad	Criterio técnico para AASHTO 1993	Interpretación para el coeficiente m
Sector 1	km 26+000 – km 27+500	Evacuación superficial funcional hacia los bordes de la plataforma. La presencia de drenaje lateral permite reducir la permanencia del agua sobre la calzada y bermas.	Cunetas laterales presentes y puntos de descarga superficial identificados.	2.50%	Bajo a moderado, asociado principalmente a eventos de lluvia intensa o mantenimiento insuficiente.	Condición compatible con una calidad de drenaje entre regular y buena, siempre que se conserve la funcionalidad de las cunetas.	Sustenta la aplicabilidad del coeficiente de drenaje adoptado para los escenarios SENAMHI y PISCOp 3.0, bajo condición de mantenimiento periódico.
Sector 2	km 31+500 – km 33+000	Drenaje lateral existente, con posibilidad de reducción de eficiencia por colmatación puntual o acumulación localizada de material fino.	Cunetas laterales, drenaje transversal y zonas de descarga que requieren conservación.	2.25%	Moderado, debido a posibles puntos de acumulación temporal durante la temporada de lluvias.	Condición regular a favorable, técnicamente aceptable si se asegura limpieza, continuidad hidráulica y evacuación superficial.	El valor *m* es aplicable de manera condicionada; si se pierde la continuidad del drenaje, debe revisarse el coeficiente adoptado.
Sector 3	km 39+000 – km 41+000	La evacuación superficial es parcial y presenta mayor sensibilidad a la continuidad del drenaje lateral y transversal.	Cunetas laterales con continuidad variable y drenaje transversal existente.	2.00%	Moderado, con posibilidad de acumulación localizada en zonas bajas o puntos de descarga limitada.	Condición regular; requiere mantenimiento y verificación durante periodos de lluvia para sostener la calidad de drenaje asumida.	El coeficiente *m* puede emplearse como escenario de diseño, pero su validez depende de mantener operativas las obras de drenaje superficial.

Nota. La verificación de campo corresponde a una evaluación funcional del drenaje superficial para sustentar la aplicabilidad del coeficiente *m* en AASHTO 1993; no reemplaza un diseño hidráulico definitivo de cunetas o alcantarillas.

Los resultados de la verificación muestran que los sectores evaluados presentan condiciones de drenaje entre regular y buena. Esta condición sustenta la aplicación de los coeficientes de drenaje adoptados en los escenarios de diseño, siempre que se mantenga la funcionalidad de cunetas, alcantarillas y puntos de descarga durante la vida útil del pavimento.

El bombeo transversal referencial varía entre 2.00 % y 2.50 %, rango que permite conducir el escurrimiento superficial hacia los bordes, bermas, cunetas o elementos de descarga. Sin embargo, este bombeo no garantiza por sí solo el desempeño del drenaje, ya que también influyen la continuidad de cunetas, el estado de alcantarillas, la presencia de sedimentos y la conservación durante la temporada de lluvias.

En ese sentido, los valores del coeficiente de drenaje (m) = 1.13 para SENAMHI y coeficiente de drenaje (m) = 1.15 para PISCOp 3.0 deben interpretarse en función de la realidad del tramo. Su aplicabilidad depende de que el drenaje superficial conserve una condición funcional y reduzca la permanencia del agua en la estructura del pavimento. Si se presentan cunetas colmatadas, alcantarillas obstruidas o empozamientos persistentes, el coeficiente de drenaje (m) debe revisarse, porque la condición real dejaría de ser compatible con el escenario asumido en el diseño AASHTO 1993.

4.7.4 Validación integral de la metodología propuesta

Con la finalidad de responder a la necesidad de validación metodológica, se integraron los principales componentes de la investigación en una matriz de verificación técnica. Esta matriz permite demostrar que el coeficiente de drenaje (m) no fue adoptado únicamente como un valor de tabla, sino a partir de una secuencia técnica que relaciona la precipitación histórica, el tiempo de exposición a saturación (tS), el Índice de Saturación Climática (ISC), la condición de drenaje observada en campo, la verificación estructural y la aplicabilidad durante la vida útil del pavimento.

La validación integral se planteó considerando que la investigación no busca diseñar hidráulicamente las obras de drenaje, sino evaluar la influencia del coeficiente de drenaje (m) en el diseño estructural mediante el método AASHTO 1993. Por ello, el análisis se concentra en verificar si los valores adoptados para los escenarios evaluados presentan coherencia técnica desde la información climática hasta la respuesta estructural del paquete de pavimento.

Tabla 23

Matriz de validación integral de la metodología propuesta

Nivel de validación	¿Qué se valida?	Evidencia utilizada	Criterio técnico de validación	Resultado / aporte a la tesis
Validación climática	La estimación del coeficiente de drenaje a partir de información histórica de precipitación.	Registros SENAMHI e información PISCOp 3.0; resultados de precipitación, *tS*, ISC y coeficiente de drenaje m.	El valor de *m* debe sustentarse en información climática representativa y no únicamente en tablas referenciales.	Demuestra que el coeficiente de drenaje tiene una base climática objetiva y trazable.
Validación de campo	La compatibilidad del coeficiente *m* con la condición real del tramo evaluado.	Verificación de cunetas, drenaje transversal, puntos de descarga, empozamientos y continuidad de evacuación superficial.	La condición observada del drenaje debe ser coherente con la calidad de drenaje asumida en el método AASHTO 1993.	Sustenta que el valor de *m* no se adopta solo por tabla, sino que se vincula con la condición física del tramo.
Validación funcional del bombeo	La capacidad de la calzada para evacuar el agua superficial hacia los bordes.	Bombeos transversales referenciales de 2.50 %, 2.25 % y 2.00 % en los sectores representativos.	El bombeo debe favorecer el escurrimiento superficial hacia bermas, cunetas o puntos de descarga.	Refuerza la aplicabilidad del coeficiente de drenaje, siempre que se mantenga la funcionalidad de cunetas y alcantarillas.
Validación estructural AASHTO 1993	El cumplimiento estructural del paquete de pavimento en los escenarios evaluados.	Número Estructural requerido y Número Estructural calculado por escenario de diseño.	El SN calculado debe ser mayor o igual al SN requerido.	Confirma que el diseño cumple estructuralmente y que *m* influye principalmente en el aporte de base y subbase granular.

Nota. La matriz resume los niveles de validación utilizados para sustentar la estimación, aplicación y permanencia del coeficiente de drenaje en el diseño AASHTO 1993.

A continuación, se presenta el esquema metodológico que resume de manera ordenada el proceso seguido para sustentar el coeficiente de drenaje adoptado en el diseño AASHTO 1993.

Figura 20

Esquema de validación integral de la metodología propuesta



Nota. El esquema resume la secuencia de validación integral que relaciona precipitación histórica, condición de drenaje observada y respuesta estructural AASHTO 1993.

La matriz de validación integral evidencia que la investigación no se limita a modificar el coeficiente de drenaje (m) dentro del procedimiento AASHTO 1993. Por el contrario, sustenta su aplicación mediante una secuencia técnica que vincula información climática histórica, verificación de campo, funcionalidad del drenaje y cumplimiento estructural del paquete de pavimento.

De esta manera, el coeficiente de drenaje (m) se presenta como un parámetro estimado con base en información climática y contrastado con las condiciones reales de drenaje del tramo. Sin embargo, su aplicabilidad durante la vida útil del pavimento depende de mantener operativas las cunetas, alcantarillas, bombeo transversal y zonas de descarga.

4.8 Determinación del tránsito de diseño

El tránsito de diseño constituye uno de los parámetros principales para el dimensionamiento estructural del pavimento flexible, debido a que permite estimar la demanda vehicular que

actuará sobre la estructura durante el periodo de servicio. En la presente investigación, este parámetro se determinó a partir del aforo vehicular realizado en la estación ubicada en la progresiva km 32+600, correspondiente al tramo San Miguel–El Descanso.

Para el análisis se consideraron los resultados del tránsito semanal, la clasificación vehicular, el tránsito promedio diario semanal, el Índice Medio Diario Anual (IMDA), la proyección de la demanda y el cálculo de ejes equivalentes de 8.2 toneladas. Esta secuencia permite relacionar el estudio de tráfico con el diseño estructural del pavimento mediante el método AASHTO 1993.

Asimismo, el tránsito obtenido permite clasificar la vía según la demanda vehicular establecida en el Manual de Carreteras: Diseño Geométrico DG-2018 del Ministerio de Transportes y Comunicaciones (MTC, 2018). Esta clasificación complementa el análisis estructural, porque permite interpretar la condición funcional del tramo evaluado no solo con el tránsito actual, sino también con la demanda proyectada durante el periodo de diseño.

4.8.1 Resultados principales del aforo vehicular

Durante la semana de evaluación se registró un tránsito total de 13 524 vehículos. De este volumen, 9 298 vehículos correspondieron a unidades ligeras y 4 226 vehículos a unidades pesadas. En términos porcentuales, los vehículos ligeros representaron el 68.75 % del tránsito semanal, mientras que los vehículos pesados alcanzaron el 31.25 %.

Tabla 24

Composición vehicular semanal del tránsito registrado

Tipo de vehículo	Tráfico semanal	Participación
Vehículos ligeros	9 298	68.75%
Vehículos pesados	4 226	31.25%
Total	13 524	100.00%

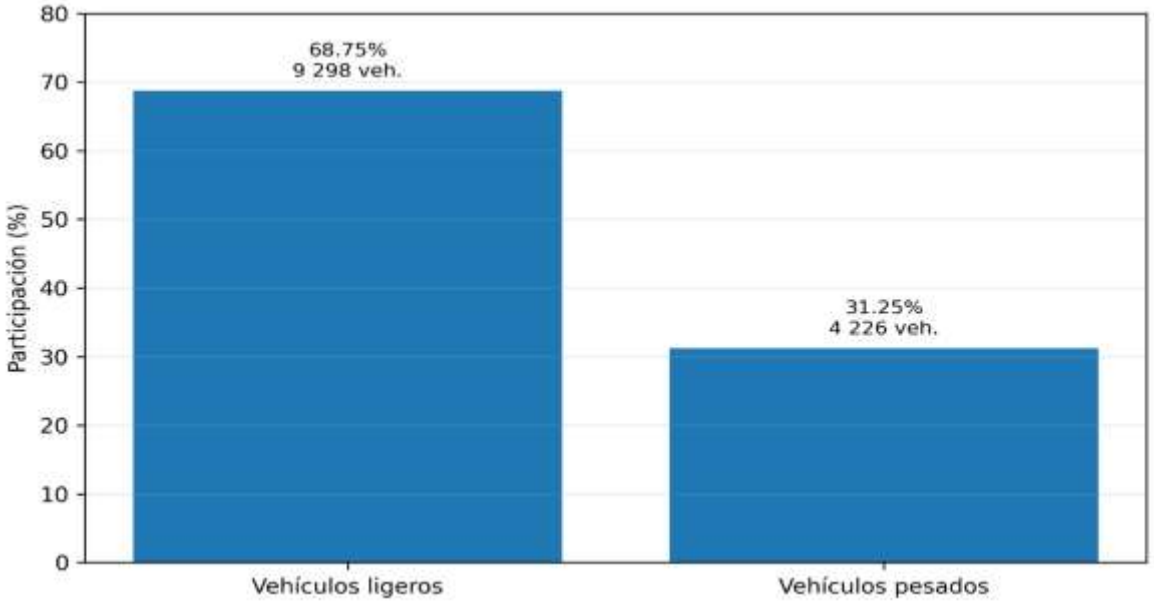
Nota. Los valores corresponden al aforo vehicular semanal realizado en la estación ubicada en la progresiva km 32+600.

Para complementar los resultados de la Tabla 24, la Figura 21 muestra la participación porcentual de vehículos ligeros y pesados registrados durante el aforo semanal. Esta representación permite identificar con mayor claridad la composición del tránsito y resaltar

la presencia de vehículos pesados, debido a su mayor incidencia en el deterioro estructural del pavimento.

Figura 21

Composición vehicular semanal del tránsito registrado



Nota. La figura muestra la participación porcentual de vehículos ligeros y pesados respecto al tránsito semanal registrado.

Aunque los vehículos ligeros representan la mayor proporción del tránsito, el componente más relevante para el diseño estructural corresponde a los vehículos pesados. Esto se debe a que las cargas por eje de este grupo vehicular generan una mayor contribución al deterioro acumulado del pavimento. Por tanto, la participación de vehículos pesados, equivalente al 31.25 %, constituye un indicador importante para la estimación de los ejes equivalentes de diseño.

4.8.2 Cálculo del tránsito promedio diario semanal e IMDA

El tránsito promedio diario semanal se obtuvo dividiendo el tránsito semanal registrado entre los siete días de aforo. Este cálculo permite convertir el volumen semanal en un indicador diario representativo del tramo evaluado.

$$TPDS = \frac{TS}{7} \tag{24}$$

Donde:

$TPDS$: tránsito promedio diario semanal.

TS: tránsito semanal registrado.

$$TPDS = \frac{13\,524}{7} = 1\,932.00\ veh/día$$

Para los vehículos ligeros y pesados se obtuvo:

$$TPDS_{ligeros} = \frac{9\,298}{7} = 1\,328.29\ veh/día$$

$$TPDS_{pesados} = \frac{4\,226}{7} = 603.71\ veh/día$$

Posteriormente, se aplicó el factor de corrección estacional para estimar el Índice Medio Diario Anual (IMDA). Este indicador permite representar el tránsito promedio diario del tramo en condiciones anuales, por lo que sirve como base para clasificar la vía y proyectar la demanda vehicular del periodo de diseño.

$$IMDA = TPDS \times FCe \quad (25)$$

Donde:

IMDA = Índice Medio Diario Anual.

TPDS = tránsito promedio diario semanal.

FCe = factor de corrección estacional.

Tabla 25

Cálculo del tránsito promedio diario semanal (TPDS) y del índice medio diario anual (IMDA) del tramo evaluado

Tipo de vehículo	Tránsito semanal	TPDS	FCe	IMDA
Vehículos ligeros	9 298	1 328.29	0.936	1 243.52
Vehículos pesados	4 226	603.71	1.022	617
Total	13 524	1 932.00	—	1 860.52

Nota. El TPDS se obtuvo dividiendo el tránsito semanal entre siete días. El IMDA fue calculado mediante la aplicación del factor de corrección estacional correspondiente a cada grupo vehicular.

Por redondeo, el Índice Medio Diario Anual (IMDA) adoptado para el tramo evaluado es:

$$\boldsymbol{IMDA = 1\,861\ veh/día}$$

Este resultado representa la demanda vehicular anualizada del tramo San Miguel–El Descanso. Desde el punto de vista del diseño vial, permite clasificar la carretera por demanda; desde el enfoque estructural, constituye la base para proyectar el tránsito y estimar la carga acumulada que actuará sobre el pavimento durante el periodo de diseño.

4.8.3 Proyección del tránsito y clasificación según DG-2018

La proyección del tránsito se realizó mediante una relación de crecimiento geométrico, considerando tasas diferenciadas para vehículos ligeros y pesados. Este procedimiento permite estimar la demanda futura de la vía y evaluar la condición de servicio esperada durante la vida útil del pavimento.

$$T_n = T_0(1 + r)^n \qquad (26)$$

Donde:

T_n: tránsito proyectado al año n.
T_0: tránsito del año base.
r: tasa anual de crecimiento del tránsito.
n: número de años de proyección.

Para el presente estudio se consideró una tasa de crecimiento de 2.768 % para vehículos ligeros y 3.071 % para vehículos pesados. La proyección considera un periodo previo de documentación técnica y ejecución, seguido de un periodo de servicio de 20 años, comprendido entre el año 2029 y el año 2048.

Tabla 26

Resumen de la proyección del tránsito vehicular

Año	Condición evaluada	Tránsito proyectado
2026	Año base	1 860.52 veh/día
2029	Inicio del periodo de diseño	2 025.27 veh/día
2048	Año final del periodo de diseño	3 467.47 veh/día

Nota. La proyección presenta los años principales considerados para el análisis de tránsito.

Por redondeo, el tránsito proyectado al final del periodo de diseño es:

$$T_{2048} = 3\,467\ veh/día$$

El incremento del tránsito entre el año base y el año final se obtiene de la siguiente manera:

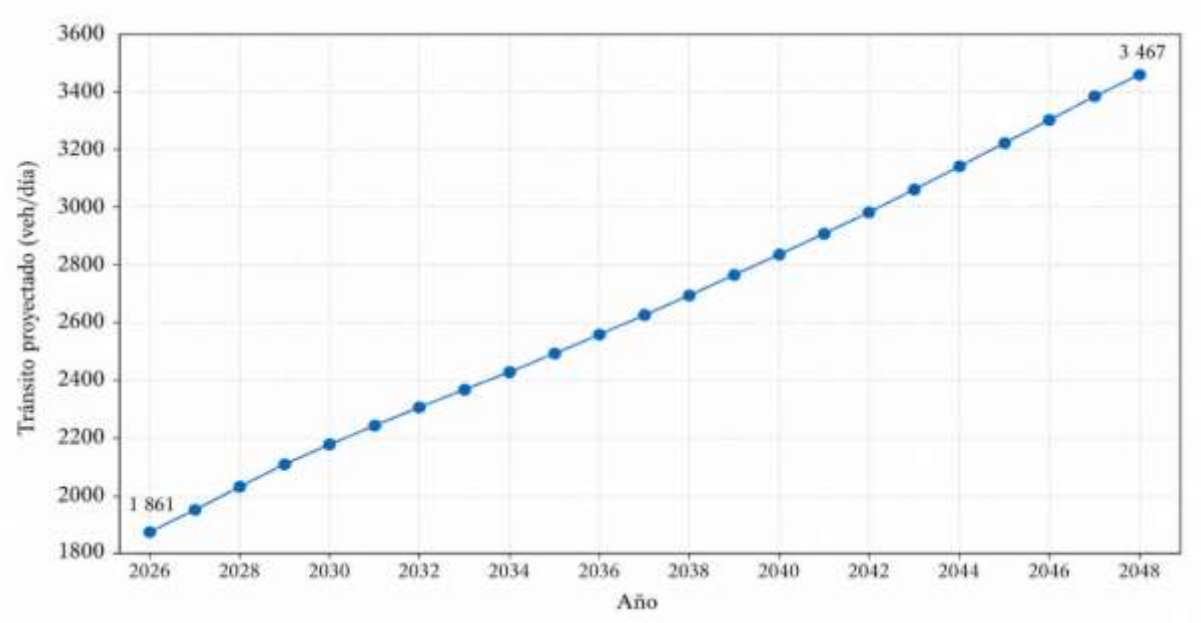
$$Variación = \frac{3\,467.47 - 1\,860.52}{1\,860.52} \times 100$$

$$Variación = 86.37\%$$

Este resultado evidencia que la demanda vehicular proyectada presenta un crecimiento considerable durante el periodo de servicio. Por ello, el diseño estructural del pavimento no debe responder únicamente al tránsito actual, sino a la carga acumulada esperada durante la vida útil del proyecto.

Figura 22

Proyección del tránsito vehicular durante el periodo de diseño



Nota. La figura muestra la evolución del tránsito proyectado desde el año base hasta el año final del periodo de diseño.

De acuerdo con los rangos de clasificación por demanda del Manual DG-2018 del MTC (2018), la condición actual y la condición proyectada del tramo se interpretan de la siguiente manera:

Tabla 27

Clasificación de la carretera según la demanda vehicular

Condición evaluada	Valor de tránsito	Rango de clasificación DG-2018	Clasificación
Año base 2026	1 861 veh/día	400 a 2 000 veh/día	Carretera de segunda clase
Inicio del diseño 2029	2 025 veh/día	2 001 a 4 000 veh/día	Carretera de primera clase
Año final 2048	3 467 veh/día	2 001 a 4 000 veh/día	Carretera de primera clase

Nota. La clasificación se interpreta considerando la demanda actual y la demanda proyectada para el periodo de diseño.

En la condición actual, el tramo corresponde a una carretera de segunda clase, debido a que el Índice Medio Diario Anual (IMDA) del año base es de 1 861 veh/día. Sin embargo, para fines de diseño se debe considerar la demanda proyectada, ya que la vía debe operar durante todo el periodo de servicio. En ese escenario, el tránsito alcanza 3 467 veh/día, valor que corresponde a una carretera de primera clase.

Por tanto, para el análisis de diseño se adopta la condición proyectada como referencia principal. Esta decisión es técnicamente coherente, porque permite evaluar la vía con base en la demanda futura que deberá atender durante su vida útil y no solo con el tránsito registrado en el año inicial.

4.8.4 Determinación del tránsito pesado de diseño

Para el diseño estructural del pavimento flexible se consideró el tránsito pesado, debido a que este grupo vehicular concentra el mayor efecto sobre el deterioro acumulado de la estructura. En el método AASHTO 1993, dicho efecto se expresa mediante el número acumulado de ejes equivalentes de 8.2 toneladas.

El tránsito promedio diario anual de vehículos pesados fue:

$$TPDA_{\ pesados} = 617.00\ veh/día$$

El factor de distribución direccional y de carril se determinó mediante la siguiente expresión:

$$Fd = Fd_1 \times Fd_2 \qquad (27)$$

Donde:

Fd_1: factor de distribución direccional.

Fd_2: factor de distribución de carril.

$Fd = 0.50 \times 1.00 = 0.50$

Con este valor se obtuvo el tránsito promedio diario inicial en el carril de diseño:

$TPDI = TPDA \times Fd$

$TPDI = 617.00 \times 0.50 = 308.50\ veh/día$

Tabla 28

Parámetros principales para el cálculo de las cargas equivalentes de eje simple (ESAL)

Parámetro	**Valor adoptado**
TPDA de vehículos pesados	617.00 veh/día
Factor direccional Fd_1	0.50
Factor de carril Fd_2	1.00
Factor total Fd	0.50
TPDI de vehículos pesados	308.50 veh/día
Factor de presión de neumáticos Fp	1.24
Factor de crecimiento acumulado Fca	32.728
Periodo de diseño	20 años

Nota. Los parámetros corresponden al tránsito pesado considerado para el carril de diseño del pavimento flexible.

El valor de 308.50 veh/día representa el tránsito pesado promedio diario que actúa sobre el carril de diseño. Este dato permite pasar de un análisis general de demanda vehicular a una condición específica de carga estructural sobre el pavimento.

4.8.5 Cálculo de ejes equivalentes de diseño

El número acumulado de ejes equivalentes se determinó considerando el tránsito pesado, los factores camión por tipo de vehículo, el factor de presión de neumáticos, el factor de crecimiento acumulado y el periodo anual de circulación.

$$ESALs = \sum(TPDI_i \times FC_i \times Fp \times 365 \times Fca) \quad (28)$$

Donde:

$TPDI_i$: tránsito promedio diario inicial del vehículo pesado tipo i.

FC_i: factor camión del vehículo tipo i.

Fp: factor de presión de neumáticos.

Fca: factor de crecimiento acumulado.

365: número de días del año.

$ESALs$: número acumulado de ejes equivalentes de 8.2 toneladas.

Se presenta una tabla resumida con los vehículos de mayor incidencia estructural y se agrupan los demás tipos vehiculares en la categoría "otros vehículos pesados". El detalle completo por cada configuración vehicular se mantiene en la memoria de cálculo.

Tabla 29

Aporte al ESAL total según el tipo de vehículo pesado

Tipo de vehículo	ESALs acumulados	Participación
T3S3	9 343 449	49.14%
C2	4 563 145	24.00%
C3	1 612 483	8.48%
B2	1 607 084	8.45%
Otros vehículos pesados	1 886 135	9.92%
Total	19 012 296	100.00%

Nota. La tabla resume los vehículos de mayor aporte al daño estructural.

Por lo tanto, el número acumulado de ejes equivalentes de diseño es:

$$W_{18} = 19\,012\,296\ ESALs$$

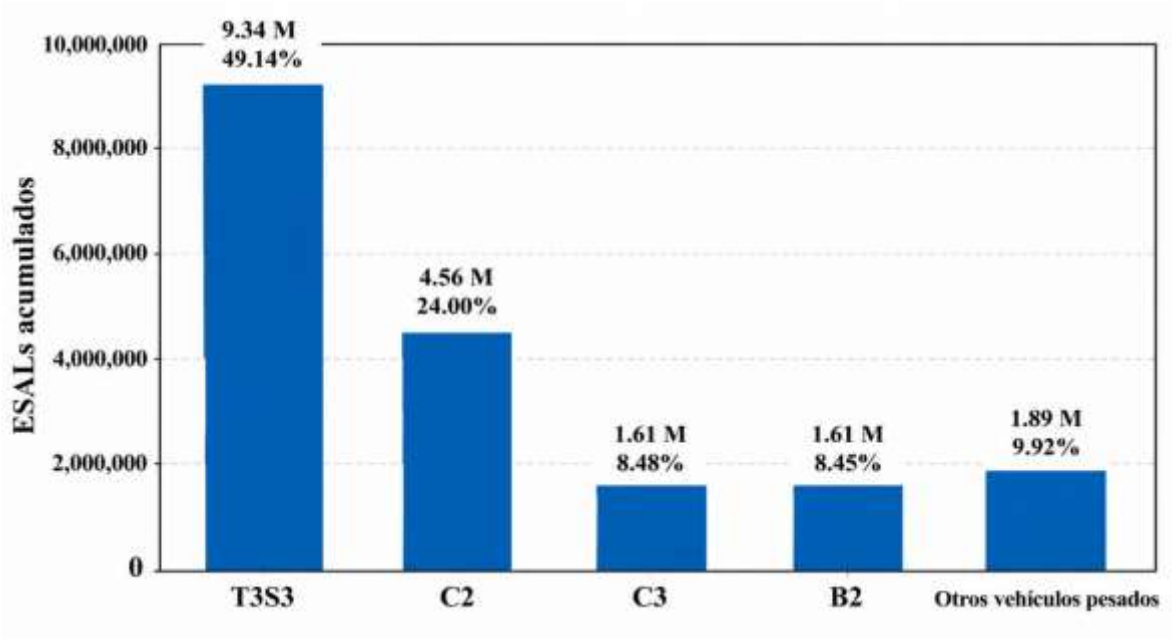
Para fines de diseño estructural, el valor se expresa como:

$$W_{18} = 19.0 \times 10^6\ ESALs$$

El resultado obtenido evidencia una demanda estructural elevada. El vehículo tipo T3S3 concentra casi la mitad del daño acumulado, con 49.14 % del total de ESALs, seguido por el vehículo tipo C2, con 24.00 %. Esto demuestra que el diseño del pavimento no debe evaluarse únicamente a partir del volumen total de vehículos, sino principalmente desde la composición y magnitud del tránsito pesado.

Figura 23

Aporte al ESAL total según el tipo de vehículo pesado



Nota. La figura compara el aporte acumulado de ejes equivalentes generado por los vehículos pesados de mayor incidencia estructural durante el periodo de diseño.

4.8.6 Clasificación del tránsito pesado para pavimento

Desde el enfoque estructural del pavimento, el tránsito de diseño también puede clasificarse en función del número acumulado de ejes equivalentes. En el presente caso, el valor obtenido fue:

$W_{18} = 19\,012\,296\ EE$

Este resultado se ubica dentro del rango de **15 000 000 a 20 000 000 de ejes equivalentes**, por lo que corresponde a la clasificación **TP12** para camino pavimentado.

Tabla 30

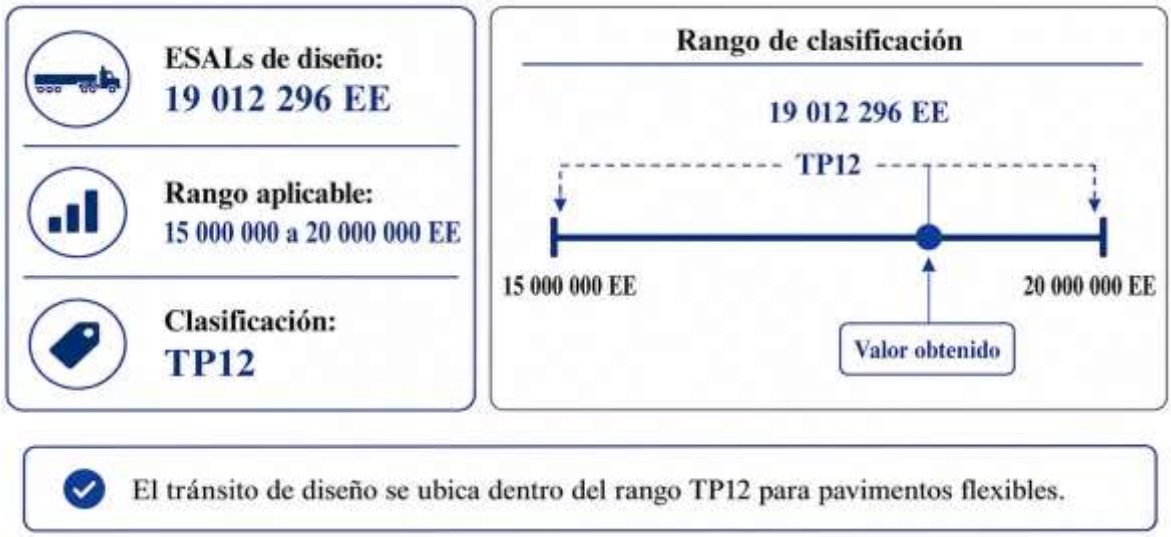
Clasificación del tránsito pesado para el diseño del pavimento

Parámetro	Valor obtenido	Rango aplicable	Clasificación
ESALs de diseño	19 012 296 EE	15 000 000 a 20 000 000 EE	TP12

Nota. La clasificación TP12 corresponde al rango de tránsito pesado acumulado considerado para el diseño estructural del pavimento.

Figura 24

Clasificación del tránsito pesado de diseño según el ESALs



Nota. La clasificación del tránsito permite definir la solicitación estructural considerada en el diseño AASHTO 1993.

Esta clasificación complementa la interpretación realizada con el Manual DG-2018 del MTC (2018). La clasificación geométrica permite reconocer el tipo de carretera según la demanda vehicular, mientras que la clasificación TP12 permite interpretar la magnitud del tránsito pesado desde el punto de vista estructural. Ambos criterios son necesarios para sustentar el diseño del pavimento flexible.

4.8.7 Síntesis técnica del tránsito de diseño

Los resultados obtenidos muestran que el tramo San Miguel–El Descanso presenta un Índice Medio Diario Anual (IMDA) = 1 861 veh/día en el año base y un tránsito proyectado de 3 467 veh/día al año 2048. Con base en la condición actual, la vía se clasifica como carretera de segunda clase; sin embargo, al considerar la demanda proyectada durante el periodo de diseño, corresponde a una carretera de primera clase, de acuerdo con los rangos de clasificación por demanda del Manual DG-2018 del MTC (2018).

Desde el punto de vista estructural, el parámetro más importante corresponde al tránsito pesado. El tránsito promedio diario anual (TPDA) de vehículos pesados fue de 617 veh/día, mientras que el tránsito promedio diario inicial (TPDI) en el carril de diseño alcanzó 308.50 veh/día. A partir de estos valores y de los factores de equivalencia aplicados, se obtuvo un

tránsito acumulado de diseño de 19 012 296 ESALs, equivalente aproximadamente a 19.0 millones de ejes equivalentes de 8.2 toneladas.

El análisis también evidencia que el vehículo tipo T3S3 representa el mayor aporte al daño estructural del pavimento, con 49.14 % del total de ESALs. Esta condición confirma que el diseño estructural debe estar condicionado principalmente por la presencia, crecimiento y configuración del tránsito pesado, más que por el volumen total de vehículos registrados.

En conjunto, el tránsito de diseño calculado permite sustentar técnicamente el dimensionamiento del pavimento flexible mediante el método AASHTO 1993, asegurando que el paquete estructural propuesto responda a la demanda vehicular proyectada durante el periodo de servicio.

4.9 Resultados geotécnicos y módulo resiliente de la subrasante

La caracterización geotécnica de la subrasante permitió determinar la capacidad de soporte del terreno de fundación en los sectores representativos del tramo evaluado. Este resultado es importante para el diseño estructural del pavimento flexible, debido a que el módulo resiliente de la subrasante (Mr) interviene directamente en la determinación del Número Estructural requerido (SN requerido) mediante el método AASHTO 1993.

En la presente investigación, el módulo resiliente de la subrasante (Mr) fue estimado a partir del California Bearing Ratio (CBR) de diseño adoptado para cada sector de análisis. Esta relación permite convertir un parámetro geotécnico usual en estudios de suelos, como el CBR, en un valor compatible con el procedimiento estructural utilizado para el diseño del pavimento flexible.

Para estimar el módulo resiliente se empleó la Ecuación 29. Posteriormente, los valores obtenidos en libras por pulgada cuadrada (psi) se convirtieron a megapascales (MPa) mediante la siguiente relación:

$$M_r(MPa) = \frac{M_r(psi)}{145.038} \quad (29)$$

Donde:

Mr = módulo resiliente de la subrasante.
psi = libra por pulgada cuadrada.
MPa = megapascal.

Esta conversión permite presentar los resultados en unidades compatibles con el análisis estructural y, al mismo tiempo, facilita la interpretación técnica de la capacidad de soporte de la subrasante.

Como soporte técnico del diseño estructural, los valores de California Bearing Ratio (CBR) fueron consolidados a partir de nueve calicatas ubicadas en los tres sectores representativos del tramo. Esta información permitió obtener un CBR de diseño por sector y estimar el módulo resiliente de la subrasante (Mr), parámetro necesario para el cálculo del Número Estructural requerido (SN requerido) mediante el método AASHTO 1993. Asimismo, la revisión permitió identificar puntos con CBR menor a 8 %, los cuales se consideran zonas de control constructivo y verificación durante la ejecución, sin invalidar el valor representativo adoptado para cada sector.

Tabla 31

Módulo resiliente adoptado a partir del índice de soporte de California (CBR) de diseño

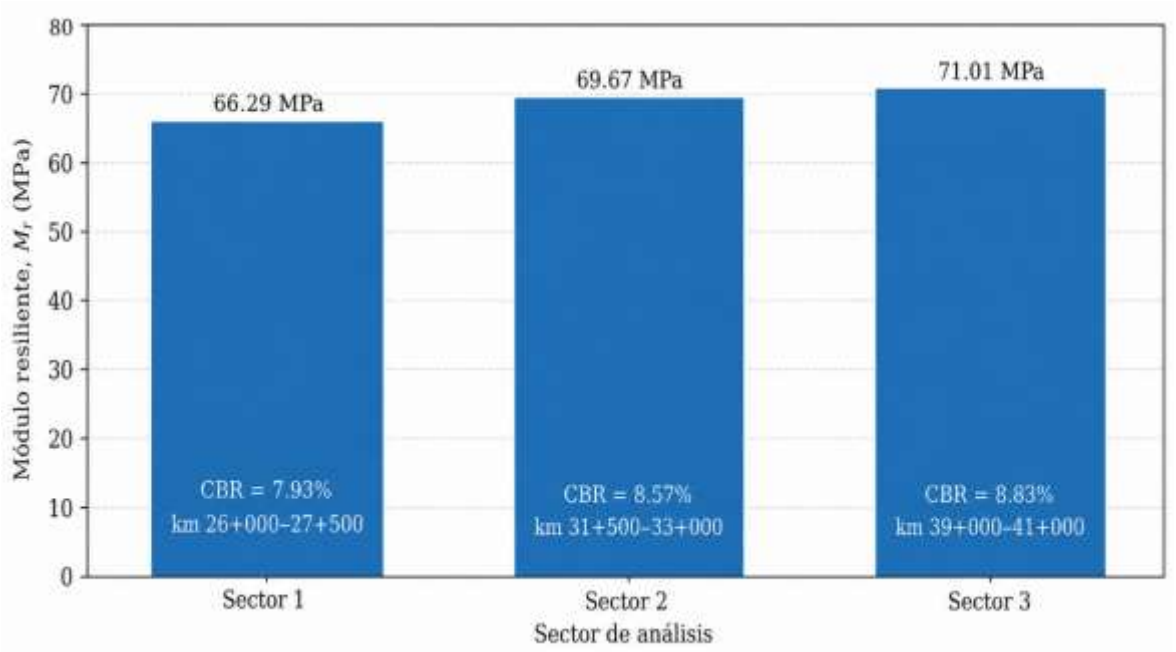
Sector	Progresiva	CBR de diseño (%)	Mr (psi)	Mr (MPa)	Condición técnica
Sector 1	km 26+000 – km 27+500	7.93	9 614	66.29	Menor capacidad de soporte
Sector 2	km 31+500 – km 33+000	8.57	10 104	69.67	Capacidad intermedia
Sector 3	km 39+000 – km 41+000	8.83	10 299	71.01	Mayor capacidad de soporte

Nota: Se aprecia un aumento de capacidad de soporte en los tres tramos.

Con la finalidad de comparar la capacidad de soporte de la subrasante entre los sectores evaluados, se muestran los valores del módulo resiliente (Mr) adoptados para cada sector de análisis, lo que permite identificar de manera clara sus diferencias y su influencia en el diseño estructural del pavimento.

Figura 25

Módulo resiliente de la subrasante por sector de análisis



Nota. La figura compara los valores de módulo resiliente estimados a partir del CBR de diseño para los sectores evaluados.

Los resultados muestran que la subrasante presenta un comportamiento relativamente homogéneo entre los sectores analizados. El menor valor corresponde al Sector 1, con un CBR de diseño de 7.93 % y un módulo resiliente de 66.29 MPa. En cambio, el mayor valor se presenta en el Sector 3, con un CBR de diseño de 8.83 % y un módulo resiliente de 71.01 MPa.

La diferencia entre el menor y el mayor módulo resiliente es:

$$\Delta M_r = 71.01 - 66.29 = 4.72\ MPa$$

En términos relativos, esta diferencia representa:

$$Variación = \frac{4.72}{66.29} \times 100 = 7.12\%$$

Este resultado indica que la variación de la capacidad de soporte entre sectores no es elevada; sin embargo, sí tiene incidencia en el diseño estructural del pavimento. En el método AASHTO 1993, una subrasante con menor módulo resiliente requiere una mayor

contribución estructural de las capas superiores, mientras que una subrasante con mejor capacidad de soporte reduce ligeramente la exigencia estructural del paquete de pavimento.

Desde el punto de vista técnico, el Sector 1 representa la condición más crítica, debido a que presenta el menor CBR de diseño y, por consiguiente, el menor módulo resiliente. Por esta razón, si el diseño se realiza de manera sectorizada, corresponde utilizar el módulo resiliente de la subrasante (Mr) específico de cada sector. No obstante, si se adopta un paquete estructural único para todo el tramo evaluado, el criterio más conservador consiste en considerar el valor del Sector 1, ya que representa la condición geotécnica menos favorable.

En síntesis, los valores de módulo resiliente de la subrasante (Mr) obtenidos permiten sustentar el ingreso del parámetro de subrasante en el diseño AASHTO 1993. Además, la identificación del sector crítico contribuye a una mejor interpretación del Número Estructural requerido (SN requerido) y de los espesores finales adoptados para el pavimento flexible.

4.10 Diseño estructural mediante el método AASHTO 1993

El diseño estructural del pavimento flexible se desarrolló mediante el método AASHTO 1993, con la finalidad de evaluar el comportamiento del paquete estructural frente a diferentes condiciones de drenaje. Este análisis permitió determinar la variación de los espesores de base granular y subbase granular cuando se consideran distintos valores del coeficiente de drenaje (m), manteniendo constantes los principales parámetros de diseño: tránsito equivalente, Confiabilidad (R), Serviciabilidad inicial (Pi), Serviciabilidad terminal (Pt), Pérdida de serviciabilidad (ΔPSI), módulo resiliente de la subrasante (Mr) y espesor de carpeta asfáltica.

Para el análisis se consideraron tres escenarios. El primero corresponde a una línea base con coeficiente de drenaje (m) = 1.00; el segundo incorpora el valor obtenido a partir de información observada del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI); y el tercero considera el valor derivado de la información grillada PISCOp 3.0. De esta manera, fue posible comparar el diseño referencial frente a escenarios ajustados por condiciones climáticas y de drenaje.

El objetivo principal de esta etapa no fue modificar la carpeta asfáltica, sino analizar cómo el coeficiente de drenaje (m) influye directamente en las capas granulares del pavimento. Por ello, la carpeta asfáltica se mantuvo fija en 16 cm para todos los escenarios, lo que

permitió aislar el efecto del coeficiente de drenaje de la base granular (m_2) y del coeficiente de drenaje de la subbase granular (m_3).

4.10.1 Parámetros generales de diseño

Para el diseño estructural se empleó un tránsito equivalente de diseño de 19 012 296 ejes equivalentes acumulados de 8.2 toneladas (ESALs), correspondiente a un horizonte de diseño de 20 años. Asimismo, se consideró una Confiabilidad (R) de 95 %, una Desviación normal estándar (ZR) de -1.65, una Desviación estándar global (S0) de 0.45 y una Pérdida de serviciabilidad (ΔPSI) de 1.20, obtenida a partir de una Serviciabilidad inicial (Pi) de 4.20 y una Serviciabilidad terminal (Pt) de 3.00.

Tabla 32

Parámetros generales empleados en el diseño mediante AASHTO 1993

Parámetro	Valor	Unidad
ESAL / W18	19,012,296	repeticiones equivalentes
Log ESAL	7.28	-
Confiabilidad, R	95	%
Zr	-1.65	-
So	0.45	-
Serviciabilidad inicial, PI	4.2	-
Serviciabilidad terminal, PT	3	-
ΔPSI	1.2	-
Horizonte de diseño, n	20	Años

Nota. Los parámetros se mantuvieron constantes en todos los escenarios para aislar el efecto del coeficiente de drenaje (m) sobre las capas granulares.

Asimismo, se definieron los coeficientes estructurales de las capas que conforman el paquete de pavimento flexible. Estos coeficientes representan el aporte relativo de la carpeta asfáltica, la base granular y la subbase granular dentro del Número Estructural calculado (SN calculado).

Tabla 33

Coeficientes estructurales y sustento técnico de las capas del pavimento

Capa	Símbolo	Coeficiente estructural	Dosificación adoptada	Resultado de control	Uso técnico en el diseño
Carpeta asfáltica	a_1	0.17	Espesor fijo de 16 cm	Parámetro estructural adoptado para AASHTO 1993	Se mantiene constante para evaluar con claridad el efecto del drenaje en la base y subbase.
Base granular	a_2	0.055	40 % Hant'a retenido 1/2" + 30 % Hant'a pasante 1/2" + 30 % arena río Queroruma	IP = NP; EA = 63 %; abrasión = 31.59 %; CBR 100 % MDS = 164.5 %	Respalda la capacidad estructural de la base granular considerada en el diseño.
Subbase granular	a_3	0.05	80 % cantera Hant'a Taypitinga + 20 % arena río Payacchuma	IP = 3 %; EA = 50 %; abrasión = 29.28 %; CBR 100 % MDS = 92.8 %	Sustenta la calidad y el soporte de la subbase dentro del paquete estructural.

Nota. Los resultados de control corresponden a los materiales de base y subbase granular empleados para sustentar el diseño estructural.

Los resultados de laboratorio de base y subbase permiten sustentar que el análisis del coeficiente de drenaje se aplica sobre capas granulares técnicamente viables. En ese sentido, la variación de espesores evaluada en la tesis no se apoya en materiales hipotéticos, sino en capas con dosificación, cantera y propiedades físico-mecánicas verificadas.

La carpeta asfáltica se adoptó con un espesor fijo de 16 cm. Este valor se consideró como condición estructural principal del análisis, debido al nivel de tránsito equivalente, al Número Estructural requerido (SN requerido) y al criterio de diseño base. Además, mantener constante esta capa permite evaluar de forma directa la influencia del drenaje sobre las capas granulares, sin introducir variaciones adicionales en la carpeta asfáltica.

4.10.2 CBR de diseño y módulo resiliente de la subrasante

El módulo resiliente de la subrasante fue estimado a partir del California Bearing Ratio (CBR) de diseño mediante la Ecuación 1, donde el módulo resiliente de la subrasante (Mr) se expresa en psi y el CBR en porcentaje. Esta correlación permitió obtener el módulo resiliente para cada sector evaluado, el cual fue utilizado como parámetro de entrada en el diseño estructural AASHTO 1993.

Tabla 34

CBR de diseño y módulo resiliente por sector

Sector	Tramo	CBR diseño (%)	*Mr* (psi)	*Mr* (MPa)
Sector 1	km 26+000 – 27+500	7.93	9614.5	66.3
Sector 2	km 31+500 – 33+000	8.57	10104.1	69.7
Sector 3	km 39+000 – 41+000	8.83	10299.3	71

Nota. El CBR de diseño y el módulo resiliente fueron adoptados por sector como parámetros de entrada para el cálculo del Número Estructural requerido.

El Sector 1 presentó el menor CBR de diseño y, por lo tanto, el menor módulo resiliente. Esta condición explica que dicho sector requiera un mayor número estructural en comparación con los sectores 2 y 3. Este comportamiento es coherente con el diseño de pavimentos flexibles, ya que una subrasante con menor capacidad de soporte exige un mayor aporte estructural del paquete de pavimento.

4.10.3 Número estructural requerido

El Número Estructural requerido (SN requerido) fue determinado mediante el procedimiento AASHTO 1993, considerando el tránsito de diseño, la Confiabilidad (R), la Desviación estándar global (S0), la Pérdida de serviciabilidad (ΔPSI) y el módulo resiliente de la subrasante (Mr).

Tabla 35

Número estructural requerido (SN requerido) por sector

Sector	Tramo	SN requerido
Sector 1	km 26+000 – 27+500	5.87
Sector 2	km 31+500 – 33+000	5.77
Sector 3	km 39+000 – 41+000	5.74

Nota. El Sector 1 presenta la mayor demanda estructural debido a su menor capacidad de soporte de subrasante.

El Número Estructural requerido representa la demanda estructural mínima que debe cumplir el paquete de pavimento. Para verificar el aporte de las capas consideradas en el diseño, donde D_1, D_2 y D_3 corresponden a los espesores de carpeta asfáltica, base granular y subbase granular, respectivamente. Los coeficientes de drenaje de la base granular (m_2) y de la subbase granular (m_3) representan el efecto del drenaje en las capas granulares.

En el presente análisis no se empleó un coeficiente de drenaje para la carpeta asfáltica, debido a que el efecto del drenaje, según la formulación empleada en AASHTO 1993, se aplica a las capas granulares no tratadas. Por ello, el drenaje se incorporó mediante el coeficiente de drenaje de la base granular (m_2) y el coeficiente de drenaje de la subbase granular (m_3).

4.10.4 Aporte estructural de la carpeta asfáltica

La carpeta asfáltica se mantuvo fija en 16 cm para todos los sectores y escenarios. Su aporte estructural se calculó mediante:

$$SN_{asfalto} = a_1 \times D_1$$

$$SN_{asfalto} = 0.170 \times 16$$

$$SN_{asfalto} = 2.72$$

Por lo tanto, la carpeta asfáltica aporta 2.72 unidades de Número Estructural (SN). El aporte restante debe ser cubierto por la base granular y la subbase granular.

$$SN_{granular} = SN_{requerido} - SN_{asfalto} \quad (30)$$

Tabla 36

Distribución del número estructural (SN) entre la carpeta asfáltica y las capas granulares

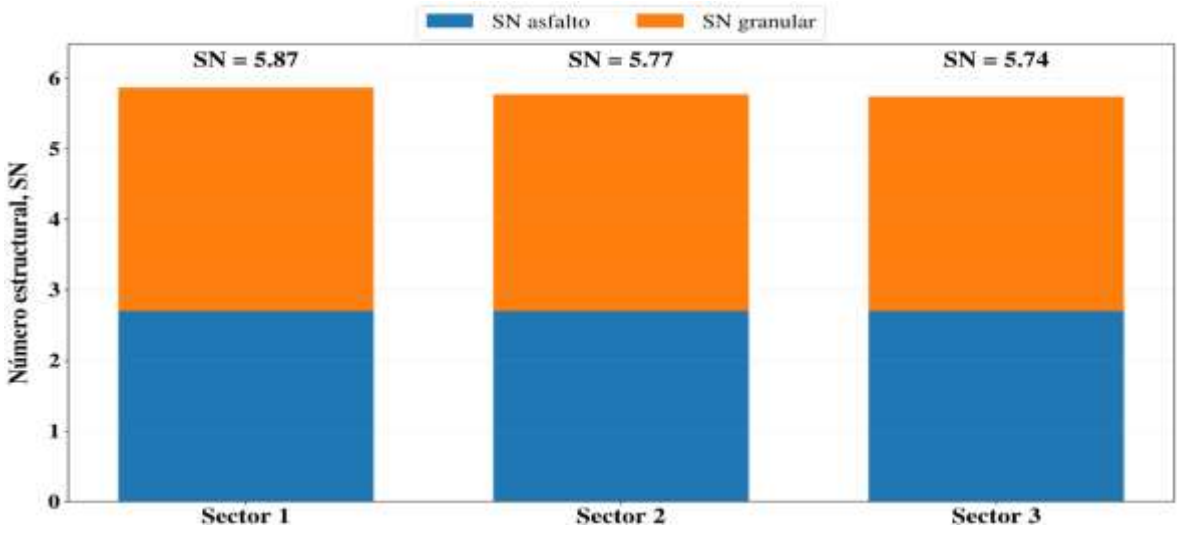
Sector	SN requerido	SN asfalto	SN granular faltante
Sector 1	5.87	2.72	3.15
Sector 2	5.77	2.72	3.05
Sector 3	5.74	2.72	3.02

Nota. La tabla permite identificar el aporte estructural que debe ser cubierto por la base granular y la subbase granular en cada sector.

Los coeficientes estructurales fueron considerados en sistema métrico, por lo que los espesores se expresaron en centímetros. Estos coeficientes representan el aporte estructural de cada capa dentro del paquete de pavimento flexible y permiten verificar el cumplimiento del Número Estructural requerido (SN requerido).

Figura 26

Distribución del número estructural requerido (SN requerido) entre la carpeta asfáltica y las capas granulares



Nota. La figura muestra la distribución del Número Estructural requerido entre la carpeta asfáltica y las capas granulares del paquete estructural.

4.10.5 Escenarios de coeficiente de drenaje

Para evaluar la influencia del drenaje en el paquete estructural, se definieron tres escenarios de análisis. La línea base representa una condición neutra sin ajuste por drenaje, con coeficiente de drenaje (m) = 1.00, mientras que los escenarios SENAMHI y PISCOp 3.0 incorporan coeficientes obtenidos a partir del análisis climático.

Tabla 37

Escenarios del coeficiente de drenaje empleados en el diseño estructural

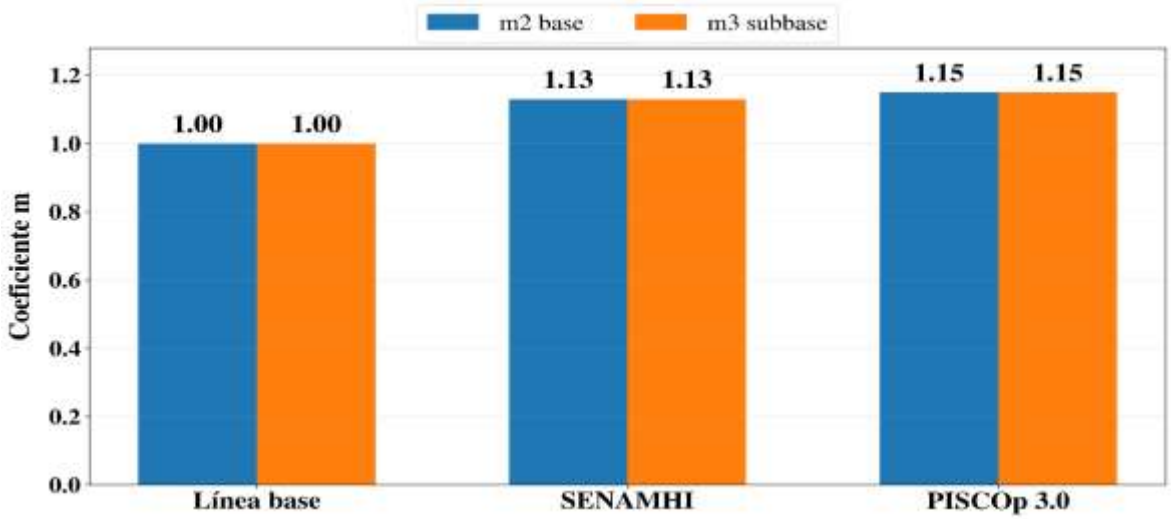
Escenario	Fuente	*tS* (%)	m2 base	m3 subbase
Línea base	Patrón neutro	No aplica	1	1
SENAMHI	Datos observados	7.91	1.13	1.13
PISCOp 3.0	Datos grillados	4.96	1.15	1.15

Nota. Los valores de m2 y m3 se aplican a la base y subbase granular para comparar la línea base con los escenarios SENAMHI y PISCOp 3.0.

La carpeta asfáltica se mantuvo en 16 cm para evaluar de manera aislada el efecto del coeficiente de drenaje sobre la base y la subbase, ya que este parámetro no modifica directamente el aporte estructural de la carpeta asfáltica.

Figura 27

Coeficientes de drenaje considerados en los escenarios de diseño mediante AASHTO 1993



Nota. La figura compara los coeficientes de drenaje (m) aplicados a la base y subbase granular en la línea base y en los escenarios SENAMHI y PISCOp 3.0.

4.10.6 Criterio de distribución del SN granular

Para comparar los escenarios de manera controlada, el Número Estructural granular (SN granular) fue distribuido en partes iguales entre la base y la subbase. Es decir, se asignó el 50 % del SN granular a la base granular y el 50 % a la subbase granular.

$$SN_{base} = 0.50 \times SN_{granular}$$

$$SN_{subbase} = 0.50 \times SN_{granular}$$

Con base en ello, los espesores se determinaron mediante:

$$D_2 = \frac{SN_{base}}{a_2 m_2} \tag{31}$$

$$D_3 = \frac{SN_{subbase}}{a_3 m_3} \tag{32}$$

Este criterio permite que la comparación sea consistente, ya que todos los escenarios mantienen el mismo reparto estructural. Por lo tanto, las diferencias observadas en los espesores se deben únicamente a la variación del coeficiente de drenaje.

4.10.7 Diseño estructural calculado sin redondeo

El primer análisis se desarrolló utilizando los espesores obtenidos directamente mediante el procedimiento de diseño AASHTO 1993, sin aplicar redondeos ni aproximaciones constructivas. De esta manera, fue posible identificar con mayor precisión las variaciones producidas por el coeficiente de drenaje (m) en los espesores de la base y la subbase granular para los escenarios de línea base, SENAMHI y PISCOp 3.0.

Los valores presentados en esta etapa corresponden a espesores teóricos de cálculo y se utilizaron principalmente con fines comparativos. Esto permitió evaluar de manera aislada el efecto del coeficiente de drenaje, evitando que el redondeo constructivo reduzca u oculte las diferencias entre los escenarios analizados. Posteriormente, estos resultados se ajustaron considerando criterios prácticos de diseño y ejecución.

Tabla 38

Diseño estructural calculado sin redondeo

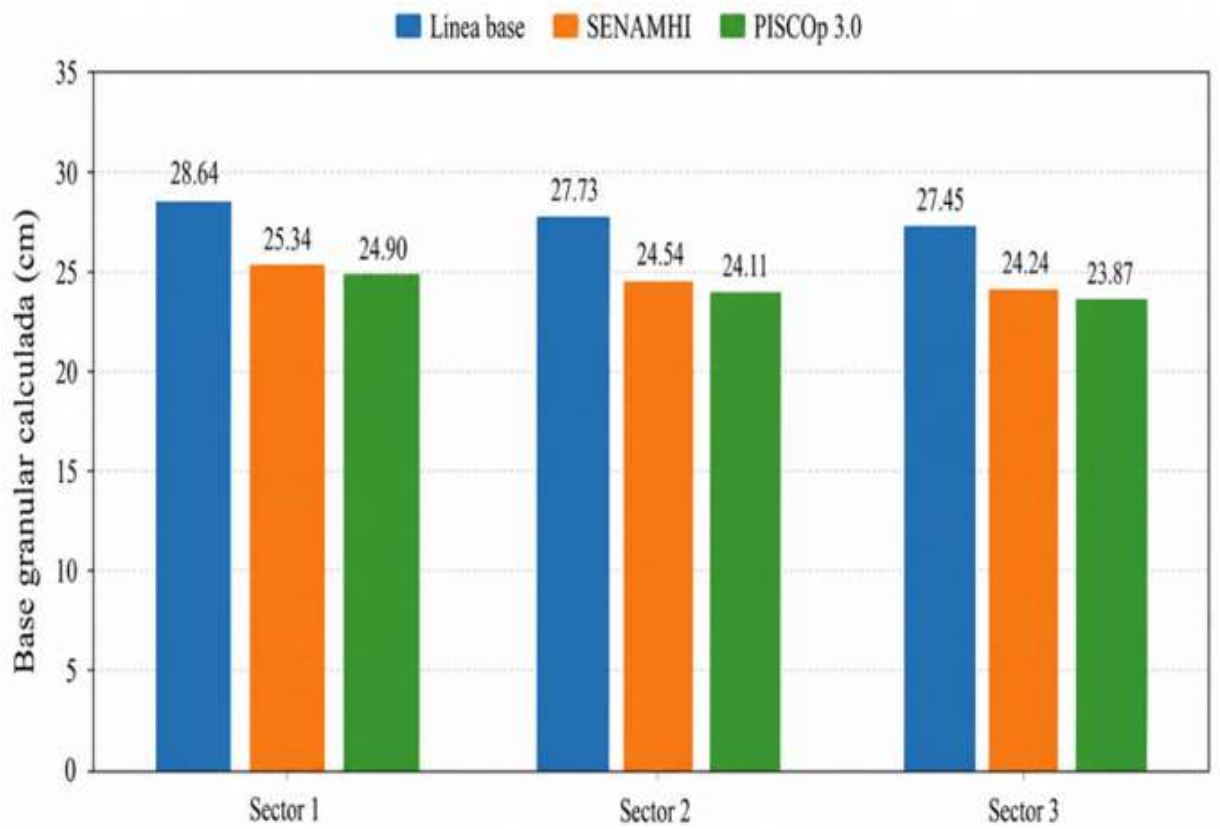
Sector	Escenario	m2	m3	Asfalto (cm)	Base calculada (cm)	Subbase calculada (cm)	SN requerido	SN calculado
Sector 1	Línea base	1	1	16	28.64	31.5	5.87	5.87
Sector 1	SENAMHI	1.13	1.13	16	25.34	27.88	5.87	5.87
Sector 1	PISCOp 3.0	1.15	1.15	16	24.9	27.39	5.87	5.87
Sector 2	Línea base	1	1	16	27.73	30.5	5.77	5.77
Sector 2	SENAMHI	1.13	1.13	16	24.54	26.99	5.77	5.77
Sector 2	PISCOp 3.0	1.15	1.15	16	24.11	26.52	5.77	5.77
Sector 3	Línea base	1	1	16	27.45	30.2	5.74	5.74
Sector 3	SENAMHI	1.13	1.13	16	24.3	26.73	5.74	5.74
Sector 3	PISCOp 3.0	1.15	1.15	16	23.87	26.26	5.74	5.74

Nota. Los espesores corresponden al diseño estructural calculado sin redondeo constructivo; por ello, se emplean para el análisis de sensibilidad.

Los resultados evidencian que, al pasar de la línea base a los escenarios con coeficiente de drenaje, los espesores calculados de base granular y subbase granular disminuyen. Esta reducción se debe a que el incremento del coeficiente de drenaje de la base granular (m_2) y del coeficiente de drenaje de la subbase granular (m_3) aumenta el aporte estructural de las capas granulares dentro de la ecuación AASHTO 1993.

Figura 28

Variación del espesor calculado de la base granular según el escenario de drenaje

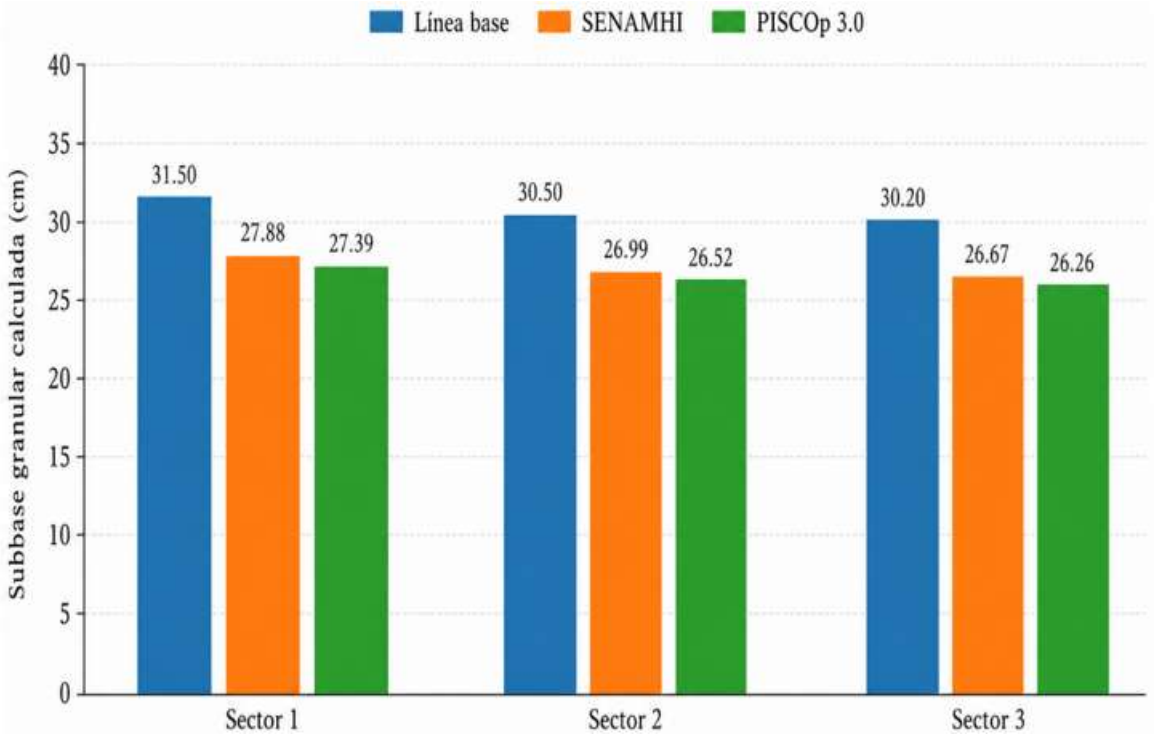


Nota. La figura muestra la variación del espesor calculado de base granular al modificar el coeficiente de drenaje en los escenarios evaluados.

De manera similar, se evaluó la variación del espesor calculado de la subbase granular en los tres escenarios de drenaje. Esta capa también se ve influenciada por el coeficiente de drenaje, debido a que su aporte estructural dentro del método AASHTO 1993 depende del espesor, del coeficiente estructural y del coeficiente de drenaje de la subbase granular (m_3) adoptado. Por ello, la comparación permite observar cómo cambia el espesor requerido de subbase cuando se incorpora una condición de drenaje más favorable.

Figura 29

Variación del espesor calculado de la subbase granular según el escenario de drenaje



Nota. La figura muestra la variación del espesor calculado de subbase granular al modificar el coeficiente de drenaje en los escenarios evaluados.

4.10.8 Figuras esquemáticas del paquete estructural calculado sin redondeo

Para representar los resultados del diseño estructural sin redondeo, se elaboraron figuras esquemáticas del paquete de pavimento correspondiente a cada sector. Estas muestran los espesores de la carpeta asfáltica, la base granular y la subbase granular en los escenarios línea base, SENAMHI y PISCOp 3.0.

Las Figuras 30, 31 y 32 muestran que la carpeta asfáltica se mantiene constante en 16 cm y que el Número Estructural requerido (SN requerido) no varía entre escenarios. Las diferencias se concentran en los espesores de la base y subbase granular, debido a que el coeficiente de drenaje (m) modifica el aporte estructural efectivo de estas capas.

Se presentan los espesores sin redondeo porque permiten observar con mayor precisión la variación producida por el coeficiente de drenaje. El redondeo constructivo puede reducir o absorber parte de estas diferencias; por ello, los valores calculados resultan más apropiados para el análisis comparativo.

Figura 30

Comparación esquemática del paquete estructural calculado sin redondeo para el sector 1, tramo km 26+000–27+500

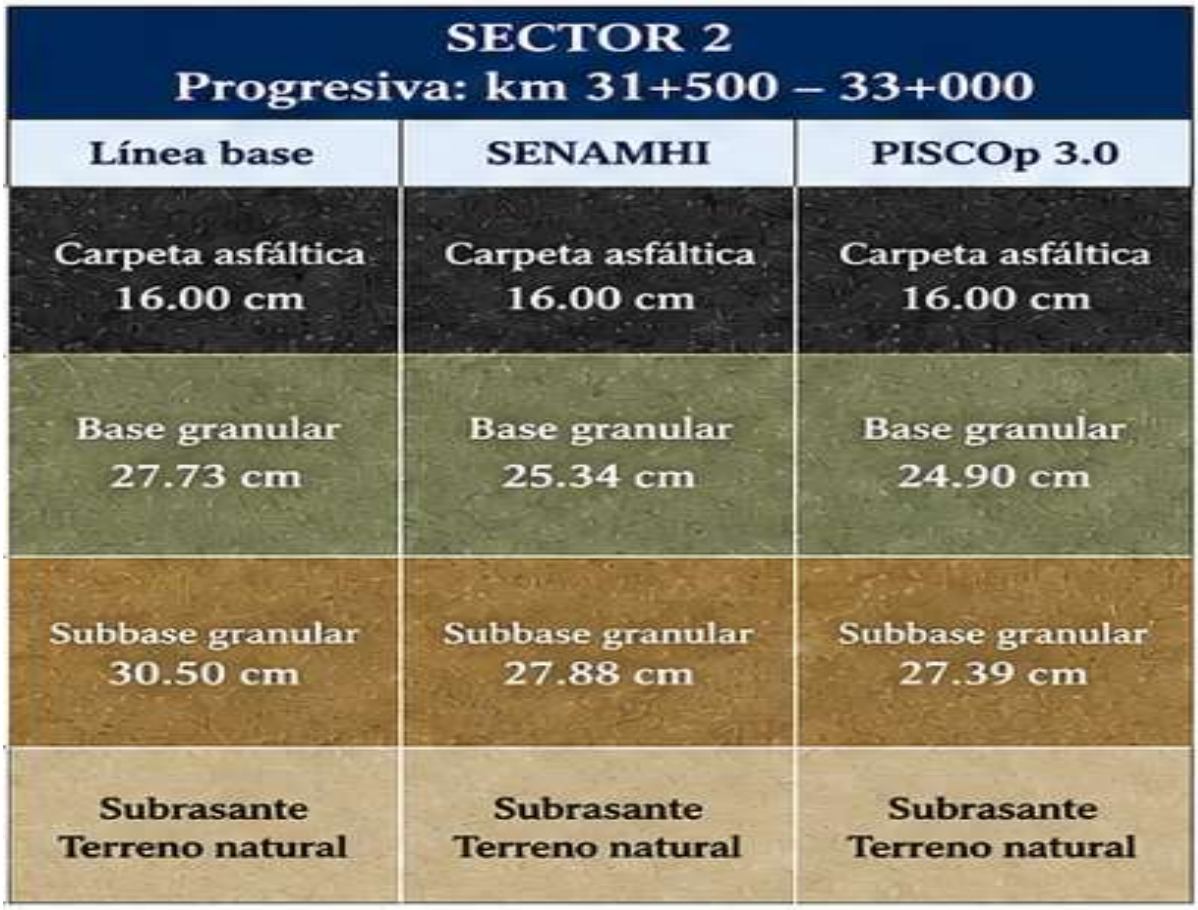


Nota. El esquema compara los espesores calculados sin redondeo para el Sector 1 en los escenarios línea base, SENAMHI y PISCOp 3.0.

En el Sector 1 se observa que la línea base presenta una base granular de 28.64 cm y una subbase granular de 31.50 cm. Al incorporar el coeficiente de drenaje (m) obtenido con SENAMHI, los espesores disminuyen a 25.34 cm para la base granular y 27.88 cm para la subbase granular. Esta reducción se debe a que un mayor valor de m incrementa el aporte estructural efectivo de las capas granulares dentro del método AASHTO 1993, sin modificar el espesor de la carpeta asfáltica. Con PISCOp 3.0, los espesores se reducen ligeramente más, alcanzando 24.90 cm en la base granular y 27.39 cm en la subbase granular. Este comportamiento confirma que, para el Sector 1, la mejora del coeficiente de drenaje se refleja principalmente en una menor exigencia de espesor en la base y subbase granular, siempre que el sistema de drenaje conserve una condición funcional.

Figura 31

Comparación esquemática del paquete estructural calculado sin redondeo para el sector 2, tramo km 31+500–33+000



Nota. El esquema compara los espesores calculados sin redondeo para el Sector 2 en los escenarios línea base, SENAMHI y PISCOp 3.0.

En el Sector 2 se mantiene la carpeta asfáltica de 16 cm, lo que permite evaluar de manera directa la variación de la base granular y la subbase granular frente al cambio del coeficiente de drenaje (m). En la línea base, la base granular presenta un espesor calculado de 27.73 cm; al incorporar el coeficiente de drenaje (m) obtenido con SENAMHI, este espesor disminuye a 24.54 cm, y con PISCOp 3.0 se reduce ligeramente más hasta 24.11 cm. De manera similar, la subbase granular pasa de 30.50 cm en la línea base a 26.99 cm con SENAMHI y a 26.52 cm con PISCOp 3.0. Este comportamiento evidencia que el incremento del coeficiente de drenaje (m) mejora el aporte estructural efectivo de las capas granulares dentro del método AASHTO 1993, siempre que las condiciones de drenaje del tramo se mantengan funcionales.

Figura 32

Comparación esquemática del paquete estructural calculado sin redondeo para el sector 3, tramo km 39+000–41+000



Nota. El esquema compara los espesores calculados sin redondeo para el Sector 3 en los escenarios línea base, SENAMHI y PISCOp 3.0.

En el Sector 3, la línea base presenta una base granular de 27.45 cm y una subbase granular de 30.20 cm. Al incorporar el coeficiente de drenaje (m) obtenido con SENAMHI, los espesores disminuyen a 24.30 cm para la base granular y 26.73 cm para la subbase granular. En el escenario PISCOp 3.0, los espesores calculados alcanzan 23.87 cm y 26.26 cm, respectivamente. Esta reducción confirma que el incremento del coeficiente de drenaje (m) mejora el aporte estructural efectivo de las capas granulares dentro del método AASHTO 1993. Además, al mantener constante la carpeta asfáltica de 16 cm, la variación observada se atribuye principalmente al comportamiento de la base y subbase granular frente a las condiciones de drenaje consideradas.

En conjunto, las figuras permiten visualizar que la carpeta asfáltica permanece constante, mientras que la base y subbase disminuyen conforme se incrementa el coeficiente de drenaje. Esto confirma que el drenaje influye directamente en las capas granulares del paquete estructural.

4.10.9 Comparación de espesores calculados

Para cuantificar el efecto del coeficiente de drenaje, se compararon los espesores calculados de los escenarios SENAMHI y PISCOp 3.0 respecto a la línea base. Asimismo, se comparó el escenario PISCOp 3.0 respecto al escenario SENAMHI, con el fin de evaluar la diferencia entre ambas fuentes climáticas.

Tabla 39

Variación de los espesores calculados respecto de la línea base

Sector	Comparación	Δ Base (cm)	Δ Subbase (cm)	Δ Base (%)	Δ Subbase (%)
Sector 1	SENAMHI vs Línea base	-3.29	-3.62	-11.50%	-11.50%
Sector 1	PISCOp 3.0 vs Línea base	-3.74	-4.11	-13.04%	-13.04%
Sector 1	PISCOp 3.0 vs SENAMHI	-0.44	-0.48	-1.74%	-1.74%
Sector 2	SENAMHI vs Línea base	-3.19	-3.51	-11.50%	-11.50%
Sector 2	PISCOp 3.0 vs Línea base	-3.62	-3.98	-13.04%	-13.04%
Sector 2	PISCOp 3.0 vs SENAMHI	-0.43	-0.47	-1.74%	-1.74%
Sector 3	SENAMHI vs Línea base	-3.16	-3.47	-11.50%	-11.50%
Sector 3	PISCOp 3.0 vs Línea base	-3.58	-3.94	-13.04%	-13.04%
Sector 3	PISCOp 3.0 vs SENAMHI	-0.42	-0.46	-1.74%	-1.74%

Nota. Las variaciones negativas indican reducción de espesor respecto al escenario de comparación.

Los resultados muestran que el escenario SENAMHI reduce los espesores calculados de base y subbase en aproximadamente 11.50 % respecto a la línea base. Por su parte, el escenario PISCOp 3.0 genera una reducción aproximada de 13.04 %. La diferencia entre ambos escenarios es menor, cercana a 1.74 %, debido a que los coeficientes de drenaje adoptados para SENAMHI y PISCOp 3.0 presentan valores relativamente próximos.

Estos porcentajes constituyen la referencia principal para interpretar la sensibilidad del diseño estructural, debido a que corresponden al análisis calculado sin redondeo constructivo. En ese sentido, la reducción de espesores se explica por el incremento del

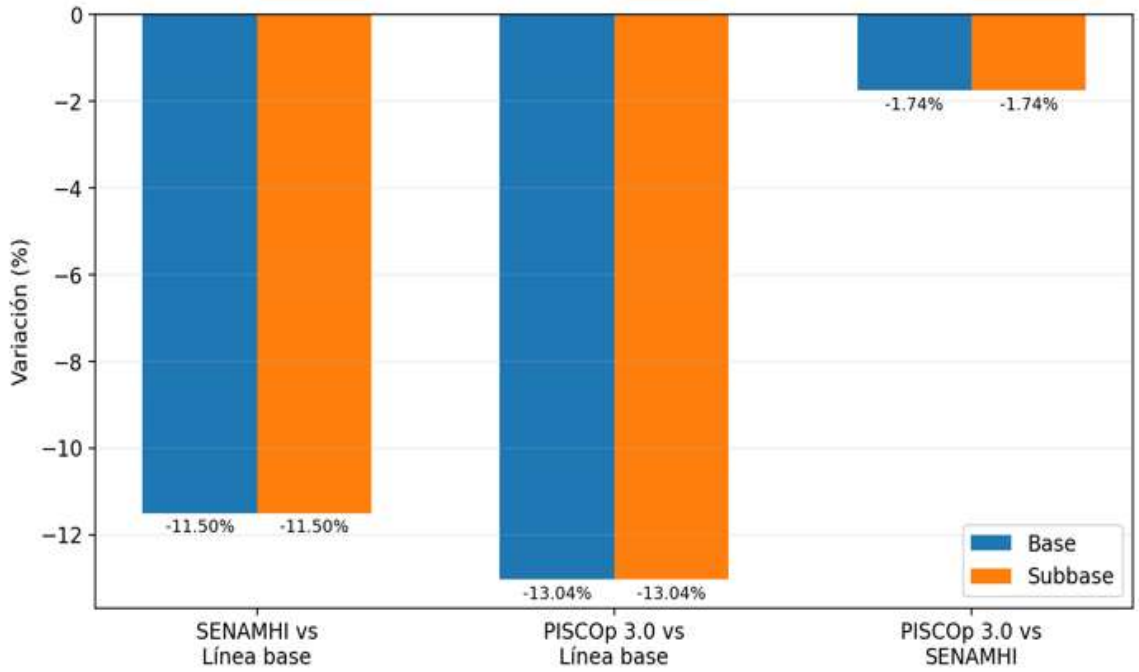
coeficiente de drenaje (m) en el aporte estructural de la base granular y subbase granular dentro del método AASHTO 1993.

Sin embargo, esta reducción no debe entenderse como una disminución automática de espesores, sino como una respuesta del modelo bajo el supuesto de que el sistema de drenaje del tramo mantiene una condición funcional compatible con los valores de coeficiente de drenaje (m) adoptados. Por ello, la aplicabilidad de estos resultados depende de que las cunetas, alcantarillas, bombeo transversal y zonas de evacuación superficial se conserven operativas durante la vida útil del pavimento.

La comparación entre SENAMHI y PISCOp 3.0 también muestra que la diferencia entre ambas fuentes climáticas es baja. Este comportamiento aporta consistencia al análisis, ya que permite contrastar la estimación del coeficiente de drenaje (m) con una fuente observada y una fuente grillada. En términos de diseño, la línea base representa una condición referencial sin ajuste climático específico, mientras que los escenarios SENAMHI y PISCOp 3.0 incorporan la influencia de la precipitación histórica y la exposición potencial a humedad.

Figura 33

Reducción porcentual promedio de los espesores por efecto del coeficiente de drenaje



Nota. Se resume la reducción porcentual promedio de espesores respecto a la línea base.

4.10.10 Diseño con redondeo constructivo

Luego del análisis sin redondeo, se aplicó un redondeo constructivo de 2.50 cm hacia arriba. Este criterio permite obtener espesores adoptados compatibles con una posible ejecución en obra y evita utilizar espesores menores a los calculados.

Tabla 40

Espesores adoptados mediante redondeo constructivo

Sector	Escenario	Base calculada (cm)	Base adoptada (cm)	Subbase calculada (cm)	Subbase adoptada (cm)	SN adoptado
Sector 1	Línea base	28.64	30	31.5	32.5	6
Sector 1	SENAMHI	25.34	27.5	27.88	30	6.12
Sector 1	PISCOp 3.0	24.9	25	27.39	27.5	5.88
Sector 2	Línea base	27.73	30	30.5	32.5	6
Sector 2	SENAMHI	24.54	25	26.99	27.5	5.83
Sector 2	PISCOp 3.0	24.11	25	26.52	27.5	5.88
Sector 3	Línea base	27.45	27.5	30.2	32.5	5.86
Sector 3	SENAMHI	24.3	25	26.73	27.5	5.83
Sector 3	PISCOp 3.0	23.87	25	26.26	27.5	5.88

Nota. Los espesores adoptados consideran redondeo constructivo hacia arriba y se emplean como propuesta compatible con criterios de ejecución de obra.

Se observa que, al aplicar redondeo constructivo, algunas diferencias se mantienen y otras se reducen visualmente. Esto es normal, debido a que el redondeo transforma los espesores calculados en espesores adoptados. Por ello, la tabla sin redondeo es la más representativa para demostrar la sensibilidad estructural, mientras que la tabla con redondeo permite definir espesores constructivos.

4.10.11 Análisis complementario de sensibilidad con carpeta asfáltica de 12, 14 y 16 cm

De manera complementaria, se desarrolló un análisis de sensibilidad considerando tres espesores de carpeta asfáltica: 12 cm, 14 cm y 16 cm. Este análisis no reemplaza el diseño principal, sino que permite observar cómo cambia el Número Estructural granular faltante (SN granular) cuando varía el aporte estructural de la carpeta asfáltica.

$$SN_{asfalto} = a_1 D_1 \quad (33)$$

Tabla 41

Aporte estructural de la carpeta asfáltica en el análisis de sensibilidad

Carpeta asfáltica (cm)	SN asfalto
12	2.04
14	2.38
16	2.72

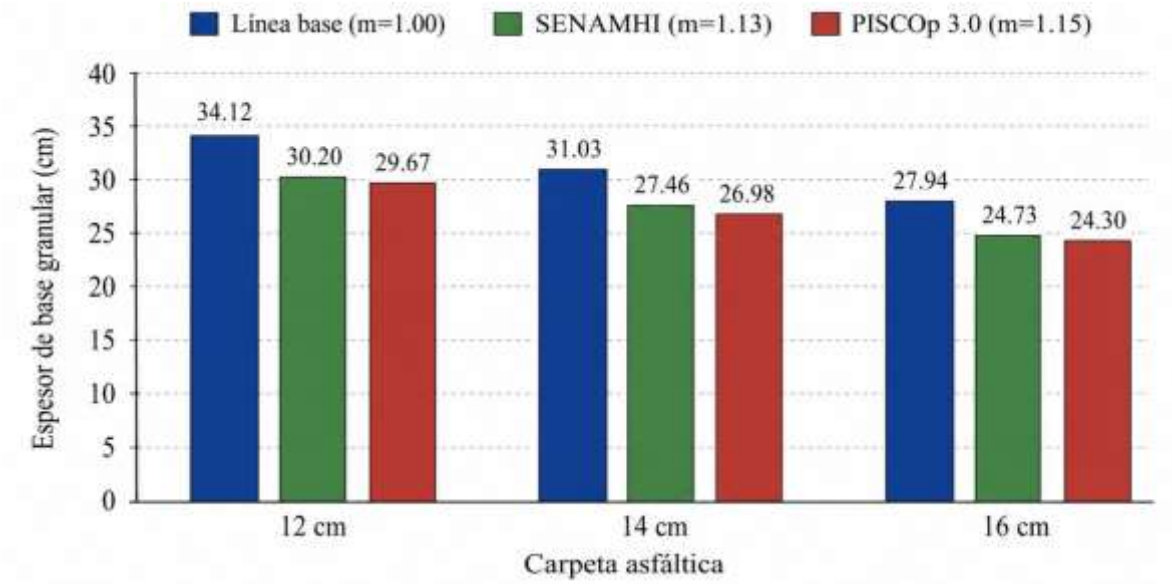
Nota. El aporte estructural de la carpeta asfáltica se utiliza para evaluar la sensibilidad de la base y subbase ante diferentes espesores de carpeta.

Los resultados muestran que, al reducir el espesor de la carpeta asfáltica, disminuye su aporte estructural y aumenta el Número Estructural (SN) que debe ser cubierto por la base y subbase granular. Por ello, la influencia del coeficiente de drenaje (m) se vuelve más evidente cuando el espesor asfáltico es menor.

Este análisis complementario permite reforzar la interpretación estructural del diseño, ya que demuestra que la sensibilidad de las capas granulares frente al drenaje depende también del aporte previo de la carpeta asfáltica. Sin embargo, para el diseño principal se mantiene la carpeta de 16 cm, por corresponder al criterio base del análisis y por permitir evaluar de manera aislada el efecto del drenaje en la base y subbase.

Figura 34

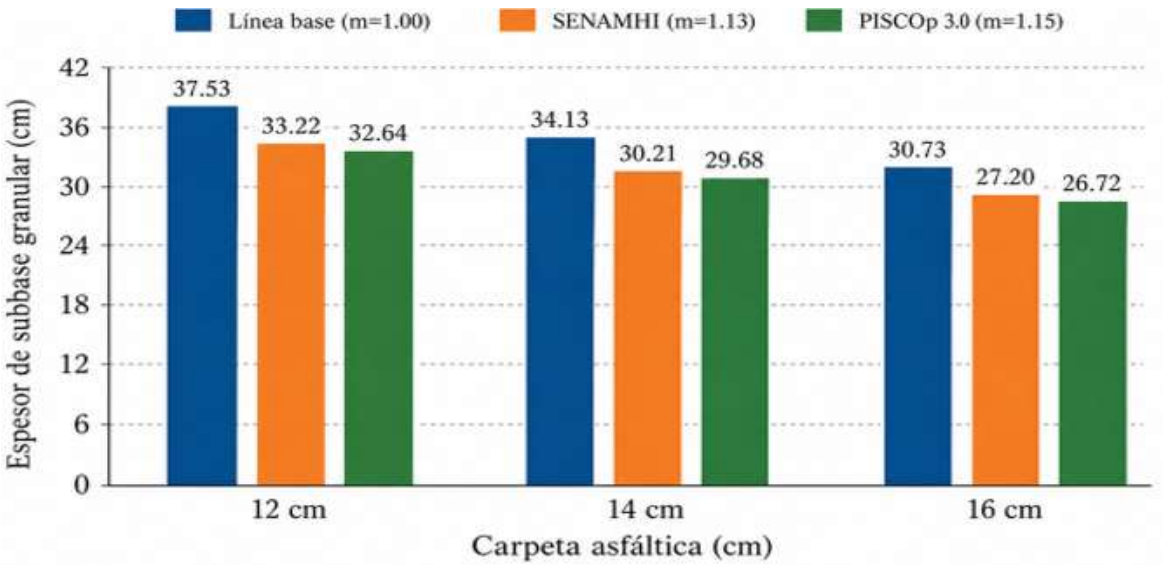
Análisis de sensibilidad de la base granular para espesores de carpeta asfáltica de 12, 14 y 16 cm



Nota. Se presenta la sensibilidad del espesor de base granular frente a diferentes espesores de carpeta asfáltica.

Figura 35

Análisis de sensibilidad de la subbase granular para espesores de carpeta asfáltica de 12, 14 y 16 cm



Nota. Se presenta la sensibilidad del espesor de subbase granular frente a diferentes espesores de carpeta asfáltica.

4.10.12 Interpretación final del diseño estructural

Los resultados obtenidos evidencian que el coeficiente de drenaje (m) influye directamente en el diseño de las capas granulares del pavimento flexible. Al mantener constantes el tránsito de diseño, la Confiabilidad (R), la Serviciabilidad inicial (Pi), la Serviciabilidad terminal (Pt), la Pérdida de serviciabilidad (ΔPSI), el módulo resiliente de la subrasante (Mr) y el espesor de carpeta asfáltica, la variación observada en los espesores de base y subbase se atribuye al cambio del coeficiente de drenaje de la base granular (m_2) y del coeficiente de drenaje de la subbase granular (m_3).

En comparación con la línea base, el escenario SENAMHI reduce los espesores calculados de base y subbase en aproximadamente 11.50 %, mientras que el escenario PISCOp 3.0 genera una reducción cercana al 13.04 %. Esto confirma que el incremento del coeficiente de drenaje (m) aumenta la eficiencia estructural de las capas granulares y, por tanto, reduce el espesor requerido para cumplir el mismo Número Estructural requerido (SN requerido).

No obstante, al aplicar criterios constructivos de redondeo, parte de esta variación puede quedar absorbida. Por esta razón, el análisis sin redondeo resulta fundamental para demostrar la sensibilidad estructural, mientras que el análisis con redondeo permite definir espesores adoptados para una posible aplicación constructiva.

En síntesis, el diseño estructural mediante AASHTO 1993 demuestra que la incorporación del coeficiente de drenaje (m) no modifica directamente la carpeta asfáltica, pero sí afecta el aporte estructural de la base y subbase granular. Esta condición permite sustentar técnicamente que el drenaje es una variable relevante en el diseño del paquete estructural de pavimentos flexibles, especialmente en tramos donde las condiciones climáticas y de saturación pueden modificar el desempeño de las capas granulares.

4.10.13 Condiciones de aplicabilidad del coeficiente de drenaje adoptado

Los coeficientes de drenaje adoptados en la investigación, coeficiente de drenaje (m) = 1.13 para el escenario SENAMHI y coeficiente de drenaje (m) = 1.15 para el escenario PISCOp 3.0, representan condiciones de drenaje que deben mantenerse durante la vida útil del pavimento. Por ello, su aplicación no debe entenderse como un valor fijo independiente de la realidad del tramo, sino como un parámetro técnico condicionado al funcionamiento del sistema de drenaje.

Para que dichos valores sean aplicables, el tramo debe conservar condiciones mínimas de evacuación de agua superficial y control de humedad. Entre estas condiciones se consideran: cunetas longitudinales limpias y con pendiente funcional; alcantarillas sin obstrucciones; ausencia de empozamientos persistentes sobre la calzada o bermas; bombeo transversal que facilite la salida del agua; control de material fino que pueda colmatar estructuras de drenaje; y mantenimiento periódico antes y durante la temporada de lluvias.

Si estas condiciones no se cumplen, el coeficiente de drenaje (m) debería revisarse, debido a que una pérdida de funcionalidad hidráulica reduce la representatividad del valor adoptado. En ese caso, el diseño podría requerir espesores mayores o medidas complementarias de drenaje para conservar el cumplimiento estructural. Esta precisión es importante porque el método AASHTO 1993 permite ajustar el aporte estructural de las capas granulares mediante el coeficiente de drenaje, pero dicho ajuste solo es válido si la calidad de drenaje asumida se mantiene en campo.

En consecuencia, la presente investigación valida el uso del coeficiente de drenaje (m) no solo mediante el procesamiento climático y la comparación de escenarios, sino también mediante la definición de condiciones de aplicabilidad. De esta manera, el diseño estructural queda vinculado con una exigencia técnica de conservación del drenaje, evitando que la reducción calculada de espesores sea interpretada como una optimización aislada del contexto hidráulico del tramo.

4.11 Discusión de resultados

Los resultados muestran que el coeficiente de drenaje (m) influye directamente en el aporte estructural de la base y la subbase granulares. En el método AASHTO 1993, este efecto se incorpora mediante m_2 y m_3. Por ello, al mantenerse constantes el tránsito, el módulo resiliente de la subrasante (M_r), la confiabilidad, la serviciabilidad y la carpeta asfáltica, las variaciones de los espesores granulares se atribuyen principalmente al cambio de dichos coeficientes (AASHTO, 1993).

El Sector 1 presentó el menor CBR de diseño, con 7,93 %, y el menor M_r, con 9 614,5 psi, por lo que alcanzó el mayor Número Estructural requerido (*SN* requerido), equivalente a 5,87. En los sectores 2 y 3, la mayor capacidad de soporte de la subrasante permitió reducir el *SN* requerido a 5,77 y 5,74, respectivamente. Este comportamiento concuerda con los fundamentos del diseño de pavimentos flexibles, debido a que una subrasante de menor

resistencia exige un mayor aporte estructural de las capas superiores (AASHTO, 1993; Huang, 2004).

Para comparar el efecto del drenaje, la carpeta asfáltica se mantuvo en 16 cm, con un aporte estructural de 2,72. En la línea base se utilizaron $m_2 = m_3 = 1{,}00$; en el escenario SENAMHI, $m_2 = m_3 = 1{,}13$; y en el escenario PISCOp 3.0, $m_2 = m_3 = 1{,}15$. En los cálculos sin redondeo, el escenario SENAMHI redujo los espesores de la base y la subbase en aproximadamente 11,50 % respecto de la línea base, mientras que PISCOp 3.0 produjo una reducción de 13,04 %. La diferencia entre ambas fuentes fue cercana a 1,74 %, debido a la proximidad de los coeficientes estimados. Aunque la diferencia entre los valores de *m* fue solamente de 0,02, su efecto resultó medible en los espesores calculados. Esto evidencia que el dimensionamiento de las capas granulares es sensible incluso a pequeñas variaciones del coeficiente de drenaje.

La magnitud de estas variaciones se aproxima al promedio del 12 % reportado por Pérez-González et al. (2024) al comparar el procedimiento convencional de AASHTO 1993 con una estimación local del coeficiente de drenaje. La reducción de 11,50 % obtenida con SENAMHI y la de 13,04 % calculada con PISCOp 3.0 se encuentran alrededor de ese valor, lo que muestra una correspondencia razonable con el antecedente. Sin embargo, esta semejanza no constituye una validación automática, porque las características climáticas, los materiales y las condiciones de drenaje son diferentes en cada proyecto.

Los resultados también son coherentes con investigaciones que demuestran la influencia de la humedad en la respuesta estructural del pavimento. Mousavi et al. (2021) relacionaron la precipitación, la infiltración y las propiedades hidráulicas con el comportamiento de los pavimentos flexibles. Rokitowski et al. (2021) observaron mayores deflexiones y una pérdida de rigidez en sectores expuestos a humedad elevada, mientras que Yu-Shan y Shakiba (2021) identificaron incrementos de deformación y presión de poros bajo condiciones de saturación. Asimismo, Saride et al. (2022) comprobaron que las cargas repetidas pueden reducir la capacidad de drenaje de las capas granulares. Estos antecedentes respaldan la necesidad de relacionar la estimación de *m* con las condiciones climáticas y funcionales del tramo.

El análisis sin redondeo permitió reconocer con mayor precisión la sensibilidad de los espesores frente a la variación de *m*. En cambio, el redondeo constructivo absorbió parte de

las diferencias entre los escenarios, aunque facilitó la definición de espesores aplicables en obra. El análisis complementario con carpetas asfálticas de 12, 14 y 16 cm también mostró que, al disminuir el aporte de la carpeta, aumenta el *SN* granular faltante y las capas de base y subbase se vuelven más sensibles al coeficiente de drenaje. Para el diseño principal se mantuvo la carpeta de 16 cm, con la finalidad de evaluar el efecto de *m* bajo una condición estructural constante.

La estimación de *m* siguió un procedimiento trazable basado en la precipitación histórica, el tiempo de exposición a saturación (*tS*) y la condición funcional del drenaje observada en campo. El Índice de Saturación Climática (ISC) se utilizó de manera complementaria para caracterizar y comparar la exposición climática de SENAMHI y PISCOp 3.0, pero no sustituyó los intervalos establecidos por AASHTO 1993 ni intervino directamente en la interpolación de *m*. Esta diferenciación permite mantener la consistencia entre el procedimiento propuesto y los fundamentos del método. Debe precisarse que el *tS* representa una aproximación climática de la exposición potencial a la humedad y no una medición directa de la saturación interna del pavimento. Por esta razón, sus resultados se interpretaron junto con las condiciones de drenaje observadas en el tramo.

En síntesis, el coeficiente de drenaje no modifica directamente el *SN* requerido, pero sí el aporte estructural calculado de la base y la subbase y, por consiguiente, los espesores necesarios para satisfacerlo. Las reducciones obtenidas no deben interpretarse como una disminución automática de las capas, ya que la aplicación de valores de *m* superiores a 1,00 requiere cunetas funcionales, alcantarillas sin obstrucciones, bombeo transversal adecuado, evacuación oportuna del agua y mantenimiento durante la vida útil del pavimento. Bajo estas condiciones, el procedimiento desarrollado permite representar con mayor objetividad la influencia de la precipitación y del drenaje en el diseño de la carretera San Miguel–El Descanso.

4.12 Verificación de los objetivos específicos

La verificación de los objetivos específicos se realizó a partir de los resultados del análisis climático, la inspección de las condiciones de drenaje, la caracterización geotécnica, el estudio de tránsito y el dimensionamiento estructural mediante el método AASHTO 1993. Esta revisión permitió comprobar la correspondencia entre los objetivos planteados, los procedimientos aplicados y los resultados desarrollados en el Capítulo IV.

Tabla 42

Verificación del cumplimiento de los objetivos específicos

Objetivo específico	Resultado obtenido	Cumplimiento
Analizar la precipitación histórica y determinar el tiempo de exposición a saturación (tS) y el Índice de Saturación Climática (ISC).	El procesamiento de los registros diarios permitió obtener un tS promedio de 7,91 % con SENAMHI y de 4,96 % con PISCOp 3.0. El ISC se utilizó como indicador complementario para caracterizar y comparar la exposición climática de ambas fuentes.	Cumplido
Estimar y comparar el coeficiente de drenaje (m) en los escenarios evaluados.	Se estableció una línea base con m = 1,00 y se estimaron valores de m = 1,13 con SENAMHI y m = 1,15 con PISCOp 3.0. La diferencia entre las dos fuentes climáticas fue de aproximadamente 0,02.	Cumplido
Evaluar el efecto del coeficiente de drenaje (m) sobre el aporte estructural calculado de la base y subbase granular y su incidencia en los espesores requeridos para satisfacer el Número Estructural requerido (SN requerido).	Se comprobó que la variación de m_2 y m_3 modificó el aporte estructural calculado de la base y la subbase granulares. El SN requerido permaneció constante en cada sector, mientras que cambiaron los espesores necesarios para satisfacerlo.	Cumplido
Cuantificar la variación de los espesores y establecer las condiciones de aplicabilidad de los coeficientes adoptados.	Respecto de la línea base, los espesores calculados disminuyeron aproximadamente 11,50 % con SENAMHI y 13,04 % con PISCOp 3.0. Su aplicación requiere cunetas funcionales, alcantarillas sin obstrucciones, bombeo transversal adecuado y control de empozamientos.	Cumplido

Nota. La tabla relaciona cada objetivo específico con los resultados obtenidos mediante el análisis climático, la inspección de campo y el diseño estructural.

En conjunto, los resultados muestran que se cumplieron los objetivos específicos. El análisis permitió estimar el coeficiente de drenaje (*m*), evaluar su efecto en los escenarios de diseño y establecer las condiciones necesarias para aplicarlo en el tramo estudiado.

4.13 Verificación del objetivo general

El objetivo general fue evaluar la influencia del coeficiente de drenaje (*m*), estimado a partir de indicadores climáticos derivados de la precipitación histórica, en el diseño estructural del pavimento flexible de la carretera San Miguel–El Descanso, Cusco, mediante el método AASHTO 1993.

Para verificar su cumplimiento, se compararon tres escenarios: una línea base con $m = 1{,}00$, un escenario SENAMHI con $m = 1{,}13$ y un escenario PISCOp 3.0 con $m = 1{,}15$. Los resultados mostraron que la variación de este coeficiente modifica el aporte estructural calculado de la base y la subbase granulares, sin alterar directamente el Número Estructural requerido (*SN* requerido).

En el diseño sin redondeo, el escenario SENAMHI redujo aproximadamente 11,50 % los espesores de las capas granulares respecto de la línea base, mientras que PISCOp 3.0 produjo una reducción de 13,04 %. La diferencia entre ambos escenarios fue cercana a 1,74 %, lo que muestra resultados próximos entre la información observada y la información grillada. Asimismo, el análisis permitió comprobar que la incorporación del tiempo de exposición a saturación (*tS*) aporta un criterio cuantitativo para seleccionar *m* de acuerdo con las condiciones climáticas del tramo.

En consecuencia, el objetivo general fue cumplido, debido a que se demostró una influencia cuantificable de *m* sobre el aporte estructural y los espesores de las capas granulares. Sin embargo, los valores adoptados solo son aplicables si el tramo conserva las condiciones funcionales de drenaje consideradas en el diseño. De esta manera, la comparación climática, la inspección de campo y la evaluación estructural proporcionan el sustento técnico del procedimiento desarrollado.

5. CAPÍTULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones

Conclusión general

Se concluye que el coeficiente de drenaje (m) estimado a partir de indicadores climáticos derivados de la precipitación histórica influye de manera cuantificable en el diseño estructural del pavimento flexible de la carretera San Miguel–El Descanso, Cusco, según el método AASHTO 1993. Esta influencia se refleja principalmente en el aporte estructural calculado de la base granular y subbase granular, debido a que el coeficiente de drenaje (m) interviene en dichas capas, pero no modifica directamente el Número Estructural requerido (SN requerido).

Los resultados muestran que el coeficiente de drenaje (m) estimado con información SENAMHI fue m = 1.13, mientras que el estimado con información PISCOp 3.0 fue m = 1.15. En el diseño sin redondeo, estos valores produjeron reducciones aproximadas de 11.50 % y 13.04 % en los espesores calculados de base y subbase respecto a la línea base. Sin embargo, su aplicación técnica depende de mantener condiciones funcionales de drenaje durante la vida útil del pavimento.

Conclusión específica 1

Se analizó la precipitación histórica mediante información SENAMHI y PISCOp 3.0, obteniéndose un tS operativo promedio de 7.91 % para SENAMHI y de 4.96 % para PISCOp 3.0. Estos resultados, interpretados como indicadores indirectos de exposición climática potencial a humedad y no como mediciones de saturación real, se analizaron conjuntamente con la calidad funcional del drenaje para respaldar la estimación del coeficiente de drenaje (m). El ISC se utilizó de manera complementaria para comparar ambas fuentes climáticas.

Conclusión específica 2

Se estimó y comparó el coeficiente de drenaje (m) en tres escenarios de análisis: línea base con m = 1.00, SENAMHI con m = 1.13 y PISCOp 3.0 con m = 1.15. La diferencia de 0.02 entre SENAMHI y PISCOp 3.0 evidencia resultados cercanos entre ambas fuentes climáticas, aunque con efectos medibles en el diseño estructural del pavimento flexible.

Conclusión específica 3

Se verificó que la variación del coeficiente de drenaje (m) modifica cuantificablemente el aporte estructural de la base y subbase granular. Este parámetro no cambia directamente el Número Estructural requerido (SN requerido); su incidencia se manifiesta en los espesores necesarios para que las capas granulares satisfagan dicha demanda estructural. En el diseño sin redondeo, los escenarios SENAMHI y PISCOp 3.0 produjeron variaciones aproximadas de 11.50 % y 13.04 %, respectivamente, frente a la línea base.

Conclusión específica 4

Se cuantificó la variación de espesores en los escenarios evaluados. El coeficiente de drenaje (m) estimado con información SENAMHI produjo una reducción aproximada de 11.50 %, mientras que el coeficiente estimado con información PISCOp 3.0 generó una reducción aproximada de 13.04 % respecto a la línea base. Estos resultados son técnicamente aplicables siempre que se mantengan cunetas funcionales, alcantarillas sin obstrucción, bombeo transversal adecuado y control de empozamientos durante la vida útil del pavimento.

Los resultados obtenidos evidencian que el tS operativo, interpretado como una aproximación climática indirecta, y la verificación funcional del drenaje permiten respaldar la estimación del coeficiente de drenaje dentro de los rangos de AASHTO 1993. El ISC, propuesto por los tesistas, cumple una función complementaria de caracterización y comparación climática y no interviene directamente en la interpolación de m.

5.2 Recomendaciones

Recomendación específica 1

Se recomienda incorporar información histórica de precipitación en el diseño de pavimentos flexibles ubicados en zonas altoandinas como insumo para construir indicadores indirectos de exposición climática potencial a humedad. El coeficiente de drenaje (m) no debería seleccionarse únicamente mediante valores referenciales; su estimación debe considerar el tS operativo, la calidad funcional del drenaje verificada en campo y, de manera complementaria, el ISC propuesto en esta investigación, sin interpretar estos indicadores como mediciones directas de la saturación interna del pavimento.

Recomendación específica 2

Se recomienda utilizar de manera complementaria la información del SENAMHI y PISCOp 3.0 para contrastar la precipitación y los indicadores climáticos derivados. Esta comparación mejora la caracterización de la exposición climática potencial del tramo, pero no constituye una medición directa de la humedad o saturación de las capas ni sustituye la verificación funcional del drenaje en campo.

Recomendación específica 3

Se recomienda complementar el análisis climático con una verificación de campo de las condiciones de drenaje. La revisión de cunetas, alcantarillas, bombeo transversal, puntos de descarga y zonas de posible empozamiento permite comprobar si el coeficiente de drenaje (m) adoptado es compatible con la condición real de la vía.

Recomendación específica 4

Se recomienda diferenciar claramente el Número Estructural requerido (SN requerido) del Número Estructural calculado (SN calculado). El coeficiente de drenaje (m) no modifica directamente la demanda estructural del pavimento, pero sí influye en el aporte de la base granular y subbase granular dentro del método AASHTO 1993.

Recomendación específica 5

Se recomienda que los expedientes técnicos incluyan condiciones mínimas de conservación del drenaje cuando se adopten coeficientes de drenaje mayores al valor referencial. Esto implica mantener cunetas limpias, alcantarillas sin obstrucción, bombeo transversal adecuado y control de empozamientos durante la vida útil del pavimento.

Recomendación específica 6

Se recomienda que futuras investigaciones amplíen la validación con más estaciones meteorológicas, puntos PISCOp 3.0, mediciones de humedad en campo y evaluación hidráulica de las obras de drenaje. Asimismo, conviene presentar los resultados con gráficos comparativos e indicadores porcentuales, porque ello facilita la interpretación técnica y fortalece la sustentación de los resultados ante el jurado.

Referencias

American Association of State Highway and Transportation Officials. (1993). *AASHTO guide for design of pavement structures*. https://store.transportation.org/item/collectiondetail/87

Arias Gonzáles, J. L., & Covinos Gallardo, M. (2021). *Diseño y metodología de la investigación*. Enfoques Consulting EIRL. https://hdl.handle.net/20.500.12390/2260

Aybar, C., Fernández, C., Huerta, A., Lavado, W., Vega, F., & Felipe-Obando, O. (2020). Construction of a high-resolution gridded rainfall dataset for Peru from 1981 to the present day. *Hydrological Sciences Journal*, *65*(5), 770–785. https://doi.org/10.1080/02626667.2019.1649411

Cedergren, H. R. (1987). *Drainage of highway and airfield pavements* (Updated reprint ed.). R. E. Krieger Publishing Company. https://trid.trb.org/View/285614

Chu, X., Campos-Guereta, I., Dawson, A., & Thom, N. (2023). Sustainable pavement drainage systems: Subgrade moisture, subsurface drainage methods and drainage effectiveness. *Construction and Building Materials*, *364*, 129950. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129950

Creswell, J. W., & Creswell, J. D. (2023). *Research design: Qualitative, quantitative, and mixed methods approaches* (6th ed.). SAGE Publications. https://uk.sagepub.com/en-gb/eur/research-design-international-student-edition/book280802

Haslett, K. E., Knott, J. F., Stoner, A. M. K., Sias, J. E., Dave, E. V., Jacobs, J. M., Mo, W., & Hayhoe, K. (2021). Climate change impacts on flexible pavement design and rehabilitation practices. *Road Materials and Pavement Design*, *22*(9), 2098–2112. https://doi.org/10.1080/14680629.2021.1880468

Hernández-Sampieri, R., & Mendoza Torres, C. P. (2023). *Metodología de la investigación: Las rutas cuantitativa, cualitativa y mixta* (2.ª ed.). McGraw Hill. https://search.worldcat.org/search?q=Metodolog%C3%ADa+de+la+investigaci%C3%B3n+las+rutas+cuantitativa+cualitativa+y+mixta+Hern%C3%A1ndez+Sampieri

Huang, Y. H. (2004). *Pavement analysis and design* (2nd ed.). Pearson Prentice Hall. https://www.pearson.com/en-us/subject-catalog/p/redirected-product/P200000003346/9780131424739

Maadani, O., Shafiee, M., & Egorov, I. (2021). Climate change challenges for flexible pavement in Canada: An overview. *Journal of Cold Regions Engineering, 35*(4), 03121002. https://doi.org/10.1061/(ASCE)CR.1943-5495.0000262

Mendoza-Sanchez, J. F., Alonso-Guzman, E. M., Martinez-Molina, W., Chavez-Garcia, H. L., Soto-Espitia, R., Delgado-Alamilla, H., & Obregon-Biosca, S. A. (2024). A critical review of pavement design methods based on a climate approach. *Sustainability, 16*(16), 7211. https://doi.org/10.3390/su16167211

Ministerio de Transportes y Comunicaciones. (2014). *Manual de carreteras: Suelos, geología, geotecnia y pavimentos: Sección suelos y pavimentos*. Dirección General de Caminos y Ferrocarriles. https://portal.mtc.gob.pe/transportes/caminos/normas_carreteras/manuales.html

Ministerio de Transportes y Comunicaciones. (2018). *Manual de carreteras: Diseño geométrico DG-2018*. Dirección General de Caminos y Ferrocarriles. https://portal.mtc.gob.pe/transportes/caminos/normas_carreteras/manuales.html

Moulton, L. K. (1980). *Highway subdrainage design* (FHWA-TS-80-224). Federal Highway Administration. https://www.fhwa.dot.gov/pavement/pub_details.cfm?id=420

Mousavi, S., Ghayoomi, M., & Dave, E. V. (2021). A system dynamics framework for mechanistic analysis of flexible pavement systems under moisture variations. *Transportation Geotechnics, 30*, 100619. https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2021.100619

Pérez-González, E. L., Heredia, J. V., & Bilodeau, J.-P. (2024). Revisiting the drainage coefficient of the AASHTO93: A method for improving local flexible pavements design. *Journal of Civil Engineering and Construction, 13*(3), 97–109. https://doi.org/10.32732/jcec.2024.13.3.97

Rokitowski, P., Bzówka, J., & Grygierek, M. (2021). Influence of high moisture content on road pavement structure: A Polish case study. Case Studies in Construction Materials, 15, e00594. https://doi.org/10.1016/j.cscm.2021.e00594

Saride, S., Huchegowda, B. K., & Vyas, S. (2022). Evaluation of drainage coefficients for 2D and 3D-geocomposite embedded subbase layers. *Geotextiles and Geomembranes*, *50*(6), 1110–1119. https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2022.07.003

Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú. (2014). *Estimación de umbrales de precipitaciones extremas para la emisión de avisos meteorológicos* (Nota Técnica 001 SENAMHI-DGM). https://www.gob.pe/institucion/senamhi/informes-publicaciones/656506-estimacion-de-umbrales-de-precipitaciones-extremas-para-la-emision-de-avisos-meteorologicos

Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú. (2024). *Base de datos hidrometeorológica nacional* [Conjunto de datos]. https://www.senamhi.gob.pe/?p=descarga-datos-hidrometeorologicos

Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú. (2026, 28 de mayo). *PISCOp v3.0: La nueva referencia de datos de precipitación para la gestión hídrica y el monitoreo climático en el Perú*. https://www.gob.pe/institucion/senamhi/noticias/1398654-piscop-v3-0-la-nueva-referencia-de-datos-de-precipitacion-para-la-gestion-hidrica-y-el-monitoreo-climatico-en-el-peru

Gutierrez, L., & Lavado-Casimiro, W. (2026). *High-resolution grids of rainfall for Peru: PISCOp v3.0 dataset* [Conjunto de datos]. Figshare. https://doi.org/10.6084/m9.figshare.32411886

Ullah, S., Jamal, A., Almoshaogeh, M., Alharbi, F., & Hussain, J. (2022). Investigation of resilience characteristics of unbound granular materials for sustainable pavements. *Sustainability*, *14*(11), 6874. https://doi.org/10.3390/su14116874

Yu-Shan, A., & Shakiba, M. (2021). Flooded pavement: Numerical investigation of saturation effects on asphalt pavement structures. *Journal of Transportation Engineering, Part B: Pavements*, *147*(3), 04021025. https://doi.org/10.1061/JPEODX.0000276

Yoder, E. J., & Witczak, M. W. (1975). *Principles of pavement design* (2nd ed.). John Wiley & Sons. https://doi.org/10.1002/9780470172919

Anexo(s)

Este anexo consolida los parámetros finales, resultados principales y evidencias técnicas que respaldan la trazabilidad de la presente tesis.

ANEXO A

Tabla 43

Matriz de trazabilidad técnica de la investigación

Componente técnico	Respaldo técnico	Dato consolidado	Aplicación en la tesis
Tránsito	Memoria de cálculo IMDA, TPDA y ESALs	Tránsito de diseño	Cálculo de cargas mediante AASHTO 1993
Subrasante	Ensayos CBR y clasificación SUCS/AASHTO	CBR 95 % y Mr	Determinación del SN requerido
SENAMHI	Registros históricos de precipitación	tS y m = 1,13	Escenario climático observado
PISCOp 3.0	Base climática grillada	tS y m = 1,15	Escenario climático de contraste
Comparativo climático	Análisis SENAMHI–PISCOp 3.0	Variación de tS y m	Validación y sensibilidad del coeficiente m
Diseño estructural	Memoria AASHTO 1993	SN y espesores	Evaluación del efecto del drenaje
Base granular	Ensayos y diseño de material granular	Gradación y calidad	Verificación técnica de la base
Subbase granular	Ensayos y diseño de material granular	Gradación y calidad	Verificación técnica de la subbase
Evidencia fotográfica	Registro de campo y laboratorio	Fotografías seleccionadas	Soporte visual del proceso técnico

Nota. La información corresponde a los documentos técnicos, registros de campo, ensayos y memorias de cálculo utilizados durante la investigación.

ANEXO B

Síntesis del tránsito de diseño

Tabla 44

Síntesis del estudio de tránsito

Indicador	Valor	Interpretación técnica
IMDA año base 2026	1 861 veh/día	Condición actual: carretera de segunda clase
IMDA inicio de diseño 2029	2 025 veh/día	Condición proyectada: carretera de primera clase
IMDA final 2048	3 467 veh/día	Demanda de operación al final del periodo
TPDA de vehículos pesados	617.00 veh/día	Tránsito pesado promedio diario anual
TPDI en carril de diseño	308.50 veh/día	TPDA pesado x factor direccional x factor de carril
Factor de presión neumáticos	1.24	Ajuste aplicado al daño acumulado
Factor crecimiento acumulado	32.728	Crecimiento para periodo de diseño
Periodo de diseño	20 años	Horizonte estructural adoptado
ESALs de diseño	19 012 296 EE	Demanda acumulada de ejes equivalentes
Clasificación estructural	TP12	Rango 15 000 000 a 20 000 000 EE

Tipo de vehículo	ESALs acumulados	Participación
T3S3	9 343 449	49.14%
C2	4 563 145	24.00%
C3	1 612 483	8.48%
B2	1 607 084	8.45%
Otros vehículos pesados	1 886 135	9.92%
Total	19 012 296	100.00%

Nota. Los valores resumen los parámetros de tránsito empleados para el cálculo de cargas mediante AASHTO 1993.

ANEXO C

Resumen geotécnico de subrasante

Tabla 45

Síntesis geotécnica de la subrasante

Calicata	Sector	Progresiva	SUCS	AASHTO	CBR 95 %	Criterio
C-01	1	km 26+000	CL	A-6(3)	7.80%	Crítico: CBR < 8 %
C-02	1	km 27+000	SC	A-4(1)	8.70%	Cumple umbral
C-03	1	km 27+500	CL	A-6(3)	7.30%	Crítico: CBR < 8 %
C-04	2	km 31+500	SC-SM	A-2-4(0)	8.00%	En el umbral
C-05	2	km 32+000	SC	A-2-4(0)	7.50%	Crítico: CBR < 8 %
C-06	2	km 33+000	GM	A-1-b(0)	10.20%	Cumple umbral
C-07	3	km 39+000	SP-SM	A-1-b(0)	11.10%	Cumple umbral
C-08	3	km 40+000	CL	A-4(3)	7.60%	Crítico: CBR < 8 %
C-09	3	km 41+000	CL-ML	A-4(5)	7.80%	Crítico: CBR < 8 %

Indicador estadístico	Resultado
Número total de calicatas	9
CBR mínimo / máximo	7.30 % / 11.10 %
CBR promedio general	8.44%
Calicatas con CBR < 8 %	5 de 9 (55.6 %)
Categoría predominante	S2 - Subrasante regular
Calicatas en categoría S3	2 de 9

Nota. Los resultados corresponden a los ensayos utilizados para definir el CBR de diseño y el módulo resiliente.



ANEXO D

CBR de diseño y módulo resiliente adoptado

Tabla 46

CBR de diseño y módulo resiliente adoptado

Sector	Inicio	Fin	N.° datos	CBR mín.	CBR prom.	CBR máx.	CBR diseño	Mr (psi)	Mr (MPa)
Sector 1	km 26+000	km 27+500	3	7.30%	7.93%	8.70%	7.93%	9 614.48	66.29
Sector 2	km 31+500	km 33+000	3	7.50%	8.57%	10.20%	8.57%	10 104.12	69.67
Sector 3	km 39+000	km 41+000	3	7.60%	8.83%	11.10%	8.83%	10 299.25	71.01

Sector	Interpretación para diseño AASHTO 1993
Sector 1	Subrasante regular con puntos críticos; controla la mayor demanda estructural entre sectores.
Sector 2	Subrasante regular con variabilidad y presencia de humedad puntual; requiere control de compactación y drenaje.
Sector 3	Subrasante regular a buena con puntos críticos; presenta el mayor Mr adoptado de los sectores evaluados.

Nota. El CBR de diseño corresponde al promedio sectorial adoptado.

ANEXO E

Síntesis climática SENAMHI

Tabla 47

Procesamiento de los registros de precipitación de las estaciones del SENAMHI

Estación	Periodo analizado	tS calculado	tS redondeado	m para drenaje bueno
Llally	2017-2026	8.88%	8.88%	1.12
Huayhuahuasi	2021-2026	8.99%	8.99%	1.12
Sicuani	1993-2023	5.79%	5.79%	1.14
Santa Rosa	1989-2013	6.98%	6.98%	1.14
Payapunku	2021-2026	8.93%	8.93%	1.12
Promedio	-	7.91%	7.91%	1.13 adoptado

Criterio	Resultado
Rango observado de tS	5.79 % a 8.99 %
Promedio tS SENAMHI	7.91%
Condición interpretativa	Exposición moderada a humedad
Coeficiente adoptado para diseño	m = 1.13
Rol en el análisis	Escenario observado principal

Nota. Los valores resumen el análisis de precipitación histórica empleado para estimar el tiempo de exposición a saturación.

ANEXO F

Síntesis climática PISCOp 3.0

Tabla 48

Procesamiento de la información climática de PISCOp 3.0

Punto de análisis	Tipo	Días analizados	Días saturados	tS PISCOp	m interpolado
Tramo I	Tramo vial	16 436	987	6.01%	1.142
Tramo II	Tramo vial	16 436	679	4.13%	1.157
Llally	Estación control	16 436	1 065	6.48%	1.139
Huayhuahuasi	Estación control	16 436	863	5.25%	1.148
Sicuani	Estación control	16 436	900	5.48%	1.146
Santa Rosa	Estación control	16 436	682	4.15%	1.156
Payapunku	Estación control	16 436	567	3.45%	1.162

Indicador	Resultado adoptado
Rango tS PISCOp 3.0	3.45 % a 6.48 %
Promedio estaciones de control	4.96%
m promedio para condición de drenaje bueno	1.15
Coeficiente adoptado para diseño	m = 1.15
Función técnica	Contraste climático y análisis de sensibilidad

Nota. Los resultados corresponden al análisis de información climática grillada utilizada como escenario de contraste.

ANEXO G

Comparativo SENAMHI vs PISCOp 3.0 y escenarios adoptados

Tabla 49

Comparación climática entre el SENAMHI y PISCOp 3.0

Estación	tS SENAMHI	m SENAMHI	tS PISCOp	m PISCOp	ΔtS (p.p.)	Δm	Var. rel. m
Llally	8.88%	1.121	6.48%	1.139	-2.4	0.018	1.60%
Huayhuahuasi	8.99%	1.12	5.25%	1.148	-3.74	0.028	2.50%
Sicuani	5.79%	1.144	5.48%	1.146	-0.31	0.002	0.20%
Santa Rosa	6.98%	1.135	4.15%	1.156	-2.83	0.021	1.87%
Payapunku	8.93%	1.121	3.45%	1.162	-5.48	0.041	3.67%
Promedio	7.91%	1.128	4.96%	1.15	-2.95	0.022	1.97%

Escenario	Criterio de análisis	m adoptado
Línea base	Condición referencial sin ajuste climático específico	1
SENAMHI	Registros históricos observados y condición de drenaje del tramo	1.13
PISCOp 3.0	Información climática grillada PISCOp 3.0 y condición de drenaje del tramo	1.15

Nota. La comparación permite verificar la consistencia entre fuentes climáticas y la variación del coeficiente de drenaje.

ANEXO H

Diseño estructural AASHTO 1993 por escenarios

Tabla 50

Síntesis del diseño estructural mediante AASHTO 1993

Sector	Escenario	m2	m3	Asfalto	Base calc.	Subbase calc.	SN req.	SN calc.
1	Línea base	1	1	16	28.64	31.5	5.87	5.87
1	SENAMHI	1.13	1.13	16	25.34	27.88	5.87	5.87
1	PISCOp 3.0	1.15	1.15	16	24.9	27.39	5.87	5.87
2	Línea base	1	1	16	27.73	30.5	5.77	5.77
2	SENAMHI	1.13	1.13	16	24.54	26.99	5.77	5.77
2	PISCOp 3.0	1.15	1.15	16	24.11	26.52	5.77	5.77
3	Línea base	1	1	16	27.45	30.2	5.74	5.74
3	SENAMHI	1.13	1.13	16	24.3	26.73	5.74	5.74
3	PISCOp 3.0	1.15	1.15	16	23.87	26.26	5.74	5.74

Comparación	Δ Base prom.	Δ Subbase prom.	Reducción porcentual
SENAMHI vs línea base	-3.21 cm	-3.53 cm	-11.50 %
PISCOp 3.0 vs línea base	-3.65 cm	-4.01 cm	-13.04 %
PISCOp 3.0 vs SENAMHI	-0.43 cm	-0.47 cm	-1.74 %

Nota. Los resultados presentan el número estructural y los espesores obtenidos para los escenarios evaluados.

ANEXO I

Respaldo de materiales granulares: base y subbase

Tabla 51

Verificación técnica de la base y la subbase granulares

Base granular	Resultado técnico
Dosificación	40 % Hant'a Taypitunga retenido 1/2" + 30 % Hant'a Taypitunga pasante 1/2" + 30 % Arena Río Queroruma
Gradación adoptada	Gradación A para altitud mayor a 3000 m s. n. m.
Índice de plasticidad	NP - Cumple
Equivalente de arena	63 % - Cumple
Abrasión Los Ángeles	31.59 % - Cumple
CBR al 100 % de MDS	164.5 % - Cumple
Densidad máxima seca / humedad óptima	2.292 g/cm³ / 6.60 %
Subbase granular	**Resultado técnico**
Dosificación	80 % Cantera Hant'a Taypitunga + 20 % Arena Río Payacchuma
Gradación adoptada	Gradación A para zona mayor o igual a 3000 m s. n. m.
Límite líquido / índice de plasticidad	13 % / 3 % - Cumple
Equivalente de arena	50 % - Cumple
Abrasión Los Ángeles	29.28 % - Cumple
CBR al 100 % de MDS	92.8 % - Cumple
Humedad óptima de compactación	5.30 % - Control constructivo

Nota. La información resume los controles de gradación, calidad y viabilidad técnica de los materiales granulares.

La firma del especialista respalda la revisión técnica de los resultados geotécnicos y de los materiales granulares empleados en la presente tesis, incluyendo la subrasante, los materiales de cantera y su aplicación como subbase granular y base granular.

Especialista revisor:



ANEXO J

Panel fotográfico técnico integrado

Figura 36

Panel fotográfico de las actividades de campo y de la verificación técnica



Fot. 1. Reconocimiento del tramo.



Fot. 2. Verificación del pavimento.



Fot. 3. Control de sección vial.



Fot. 4. Nivelación de bombeo de la vía.



Fot. 5. Registro de calicata.



Fot. 6. Identificación de muestra.



Fot. 7. Ensayo de laboratorio.



Fot. 8. Verificación en laboratorio.



Fot. 9. Evaluación de drenaje.



Fot. 10. Inspección de alcantarilla.



Fot. 11. Verificación de escorrentía.



Fot. 12. Registro de cantera.

Nota. Fotografías de las actividades de campo y verificación técnica realizadas durante la investigación en la carretera San Miguel – El Descanso – Cusco