



**UNIVERSIDAD NACIONAL DE CHIMBORAZO
FACULTAD DE INGENIERÍA
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL**

“Características físicas, mecánicas e hidráulicas evaluadas en el pavimento flexible del
corredor vial el Arenal-Guaranda”

Trabajo de Titulación para optar al título de Ingeniero Civil

Autor:

Caspi Taris Danny Joel
Solorzano Garcia Edison Escot

Tutor:

Ing. Pazmiño Chiluiza Hernán Vladimir, Mgs

Riobamba, Ecuador. 2025.

DECLARATORIA DE AUTORÍA

Nosotros, **Caspi Taris Danny Joel**, con cédula de ciudadanía **0202341103** y **Solorzano Garcia Edison Escot** con cédula de ciudadanía **0604298596**, autores del trabajo de investigación titulado: “**CARACTERÍSTICAS FÍSICAS, MECÁNICAS E HIDRÁULICAS EVALUADAS EN EL PAVIMENTO FLEXIBLE DEL CORREDOR VIAL EL ARENAL-GUARANDA**”, certifico que la producción, ideas, opiniones, criterios, contenidos y conclusiones expuestas son de mí exclusiva responsabilidad.

Asimismo, cedo a la Universidad Nacional de Chimborazo, en forma no exclusiva, los derechos para su uso, comunicación pública, distribución, divulgación y/o reproducción total o parcial, por medio físico o digital; en esta cesión se entiende que el cesionario no podrá obtener beneficios económicos. La posible reclamación de terceros respecto de los derechos de autor (a) de la obra referida, será de mi entera responsabilidad; librando a la Universidad Nacional de Chimborazo de posibles obligaciones.

En Riobamba, 27 de junio de 2025.



Caspi Taris Danny Joel

C.I. 0202341103



Solorzano García Edison Escot

C.I. 0604298596

DICTAMEN FAVORABLE DEL PROFESOR TUTOR

Quien suscribe, **Ing. Hernán Vladimir Pazmiño Chiluiza, Mgs**, catedrático adscrito a la Facultad de Ingeniería, por medio del presente documento certifico haber asesorado y revisado el desarrollo del trabajo de investigación titulado: **“CARACTERÍSTICAS FÍSICAS, MECÁNICAS E HIDRÁULICAS EVALUADAS EN EL PAVIMENTO FLEXIBLE DEL CORREDOR VIAL EL ARENAL-GUARANDA”**, bajo la autoría de **Caspi Taris Danny Joel y Solorzano Garcia Edison Escot**; por lo que se autoriza ejecutar los trámites legales para su sustentación.

Es todo cuanto informar en honor a la verdad; en Riobamba, a los 11 días del mes de junio de 2025.



Ing. Hernán Vladimir Pazmiño Chiluiza, Mgs
C.I: 0603123464

CERTIFICADO DE LOS MIEMBROS DEL TRIBUNAL

Quienes suscribimos, catedráticos designados Miembros del Tribunal de Grado para la evaluación del trabajo de investigación “**CARACTERÍSTICAS FÍSICAS, MECÁNICAS E HIDRÁULICAS EVALUADAS EN EL PAVIMENTO FLEXIBLE DEL CORREDOR VIAL EL ARENAL - GUARANDA**”, presentado por **Caspi Taris Danny Joel**, con cédula de ciudadanía **0202341103** y **Solorzano Garcia Edison Escot** con cédula de ciudadanía **0604298596**, bajo la tutoría de **Ing. Hernán Vladimir Pazmiño Chiluiza Mgs.**; certificamos que recomendamos la **APROBACIÓN** de este con fines de titulación. Previamente se ha evaluado el trabajo de investigación y escuchada la sustentación por parte de su autor; no teniendo más nada que observar.

De conformidad a la normativa aplicable firmamos, en Riobamba 27 de junio de 2025.

Dr. Guillermo Machado.
PRESIDENTE DEL TRIBUNAL DE GRADO



Mgs. Alfonso Arellano.
MIEMBRO DEL TRIBUNAL DE GRADO



Mgs. Ángel Paredes.
MIEMBRO DEL TRIBUNAL DE GRADO

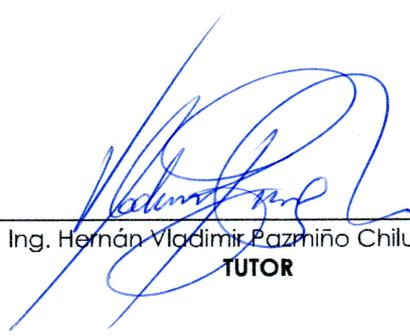




CERTIFICACIÓN

Que, **CASPI TARIS DANNY JOEL** con CC: **0202341103** y **SOLORZANO GARCIA EDISON ESCOT** con CC: **0604298596**, estudiantes de la Carrera de **INGENIERIA CIVIL**, Facultad de **INGENIERIA**; ha trabajado bajo mi tutoría el trabajo de investigación titulado "**CARACTERÍSTICAS FÍSICAS, MECÁNICAS E HIDRÁULICAS EVALUADAS EN EL PAVIMENTO FLEXIBLE DEL CORREDOR VIAL EL ARENAL- GUARANDA**", cumple con el 6 %, de acuerdo al reporte del sistema Anti plagio **COMPILATIO**, porcentaje aceptado de acuerdo a la reglamentación institucional, por consiguiente autorizo continuar con el proceso.

Riobamba, 16 de junio de 2025


Ing. Hernán Vladimir Pazmiño Chiluzza, Mgs
TUTOR

DEDICATORIA

A mis padres, Miguel Caspi e Inés Tavis, con todo mi cariño y profunda gratitud, les dedico este trabajo de investigación. Su rol fundamental en mi proceso académico y personal ha sido innegable desde el comienzo. Gracias a su guía constante, sus valores inculcados, su amor incondicional y su apoyo en cada momento, he logrado superar varios obstáculos y así alcanzar mis objetivos. Ustedes son mi mayor inspiración y les agradezco de corazón por creer siempre en mí.

A mis hermanas, Emily y Allisson, a quienes mi corazón reconoce como dos hijas maravillosas, les dedico con amor este trabajo de investigación. Su incondicional apoyo a lo largo de este camino ha sido mi mayor fortaleza. Gracias por sus palabras de aliento que me impulsan y su amor infinito que me sostiene.

Inspirado por mi profundo amor y agradecimiento hacia ustedes, presento este trabajo de investigación.

Danny J. Caspi T.

DEDICATORIA

El presente trabajo de investigación se lo dedico a Dios, por brindarme la fuerza, sabiduría y fe necesarias para no rendirme en este largo camino; a mis padres, Edison Solórzano y Cruz García, por su amor incondicional, su apoyo constante y por ser el motor que me impulsó a seguir adelante ;a mi hermana, Nayeli Solórzano, por ser parte fundamental en mi vida, por su cariño y por acompañarme en cada paso de esta etapa; a mi novia, por su amor, paciencia, comprensión y por creer en mí incluso en los momentos más difíciles.; a mis familiares cercanos, amigos y compañeros de universidad, con quienes compartí risas, desafíos, desvelos y aprendizajes. Gracias por hacer de este proceso una experiencia inolvidable.

Edison E. Solorzano G.

AGRADECIMIENTOS

Mi más profundo agradecimiento lo dirijo a Dios, quien me ha guiado y fortalecido en cada etapa de este proceso académico.

Expreso mi profunda gratitud a toda mi familia y amigos, cuyo apoyo fue mi fortaleza en los momentos más desafiantes.

Un agradecimiento especial a mis hermanos Matías y Doris, mis más grandes confidentes, a quienes amo profundamente y agradezco por su incondicional apoyo.

Este proceso ha estado significativamente marcado por la presencia y guía de dos personas importantes: mis tíos Crithian Taris y Marcelo Caspi. Su constante apoyo, la sabiduría de sus consejos y su afecto incondicional han sido esenciales.

A mi prima Rosi Caspi por su constante apoyo, manifestado en cada una de sus palabras y consejos de ánimo, especialmente en los momentos más difíciles. Deseo igualmente expresar mi agradecimiento a mis primos Anthony, Gisela y Thalía por el constante ánimo que me ofrecieron durante todo este camino recorrido. Les aprecio mucho y agradezco el afecto que siempre me han brindado.

Reconozco la valiosa contribución de cada uno de los docentes en mi proceso formativo. De manera especial, agradezco la tutela y guía de los ingenieros Vladimir Pazmiño y Alfonso Arellano. Asimismo, valoro el apoyo brindado por mi compañero Edison Solorzano en la elaboración de esta tesis.

¡Mi más sincero agradecimiento por todo!

Danny J. Caspi T.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco con todo mi corazón a mis padres, Ediosn Solórzano y Cruz Gracia, por su amor incondicional, su esfuerzo incansable y su constante apoyo en cada etapa de mi vida; sin ustedes, este logro no habría sido posible. A mi hermana Nayli Solórzano, gracias por ser mi fuente de motivación y compañía en los momentos más exigentes.

Expreso también mi sincera gratitud a mis tutores de tesis, Vladimir Pazmiño y Alfonso Arellano, por su guía, paciencia y valiosos aportes académicos que enriquecieron el desarrollo de este trabajo. Su experiencia y dedicación fueron fundamentales para alcanzar los objetivos propuestos.

Finalmente, gracias a mi amigo Danny Caspi, por su constante apoyo, palabras de aliento y por estar presente cuando más lo necesitaba.

Edison E. Solorzano G.

ÍNDICE GENERAL

DECLARATORIA DE AUTORIA	
DICTAMEN FAVORABLE DEL TUTOR	
CERTIFICADO DE LOS MIEMBROS DEL TRIBUNAL	
CERTIFICACION ANTIPLAGIO.....	
DEDICATORIA	
AGRADECIMIENTOS	
ÍNDICE GENERAL	
ÍNDICE DE TABLAS	
ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	
ÍNDICE DE ANEXOS	
TABLA DE ACRONIMOS.....	
RESUMEN	
ABSTRACT	
CAPITULO I. INTRODUCCIÓN	20
1.1. Zona de estudio	20
1.2. Antecedentes de investigación.....	20
1.3. Planteamiento del problema.....	23
1.4. Justificación	23
1.5. Objetivos.....	24
1.5.1. General.....	24
1.5.2. Específicos	24
CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO.	25
2.1. PAVIMENTO FLEXIBLE	25
2.1.1. Aspectos generales sobre las capas granulares del pavimento	25
2.1.2. Capa de rodadura asfáltica	25
2.1.3. Base.....	25
2.1.3.1. Clasificación de bases en pavimentos flexibles	26
2.1.4. Subbase	26

2.1.4.1.	Clasificación de subbases en pavimentos flexibles	27
2.1.5.	Subrasante	27
2.1.6.	Caracterización del del terreno natural de la zona	28
2.2.	PROPIEDADES FÍSICAS DEL PAVIMENTO FLEXIBLE	31
2.2.1.	Granulometría	31
2.2.2.	Límites de consistencia	31
2.2.3.	Clasificación del suelo	31
2.2.3.1.	Clasificación SUCS	32
2.2.4.	Absorción de material granular.....	32
2.2.5.	Compactación de materiales granulares de pavimentos flexibles.....	32
2.2.6.	Espesores de capas.....	32
2.2.7.	Humedad.....	32
2.2.8.	Pesos unitarios	33
2.2.9.	Porcentaje de Vacíos	33
2.2.10.	Macro textura	33
2.2.11.	Desgaste a la abrasión.....	34
2.2.12.	Densidad capas granulares	34
2.3.	PROPIEDADES MECANICAS DEL PAVIMENTO FLEXIBLE.....	34
2.3.1.	Módulo de Rigidez.....	34
2.3.2.	Módulo de Young.....	34
2.3.3.	Relación de Soporte de California (CBR)	35
2.3.4.	Relaciones para la estimación del CBR.	35
2.3.5.	Estabilidad y flujo Marshall.....	36
2.4.	PROPIEDADES HIDRAULICAS DEL PAVIMENTO FLEXIBLE	36
2.4.1.	Permeabilidad	36
2.4.2.	Velocidad de escorrentía	37
2.4.3.	Coefficiente de escorrentía.....	37
2.5.	INVESTIGACIONES RECIENTES RELACIONADAS AL TEMA.	38
CAPÍTULO III. METODOLOGIA.		39

3.1.	Tipo de Investigación.....	39
3.2.	Diseño de la investigación.	39
3.3.	Definición de la muestra.	39
3.3.1.	Población.....	39
3.3.2.	Muestra	39
3.3.3.	Tipo de muestreo.....	39
3.3.4.	Tamaño de la muestra	39
3.3.5.	Ubicación de las muestras.....	40
3.4.	Diagrama Metodológico.	41
3.5.	Procedimientos.....	41
3.5.1.	Ensayos de laboratorio.....	41
3.5.1.1.	Granulometría de materiales granulares	41
3.5.1.2.	Límites de Atterberg.....	41
3.5.1.3.	Compactación Proctor Estándar.....	42
3.5.1.4.	Densidad relativa y absorción de materiales granulares	42
3.5.1.5.	Desgaste.	42
3.5.1.6.	Estabilidad y flujo Método Marshall	43
3.5.1.7.	Volumetría y ensayos de desempeño en núcleos	44
3.5.2.	Ensayos in situ	45
3.5.2.1.	Extracción de núcleos	45
3.5.2.2.	Macro textura del pavimento	46
3.5.2.3.	Elasticidad y rigidez in situ – Método “GeoGauge”.....	46
3.5.2.4.	Tasa de infiltración en pavimento flexible.....	47
CAPÍTULO IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....		49
4.1.	PROPIEDADES FÍSICAS DEL PAVIMENTO FLEXIBLE.	49
4.1.1.	Comparativa con datos geológicos.	49
4.1.2.	Granulometría.	50
4.1.3.	Ensayo limite líquido y plástico.....	53
4.1.4.	Compactación Proctor estándar.....	55

4.1.5.	Densidad y absorción del agregado (Grueso y fino).....	57
4.1.6.	Abrasión.....	58
4.1.7.	Macrotextura.....	59
4.1.8.	Datos núcleos.....	60
4.1.9.	Densidades de núcleos.....	60
4.1.10.	Resultados de volumetría de núcleos.....	60
4.2.	PROPIEDADES MECÁNICAS DEL PAVIMENTO FLEXIBLE.....	62
4.2.1.	Resiliencia, Rigidez y CBR.....	62
4.2.2.	Estabilidad y flujo Marshall.....	62
4.3.	PROPIEDADES HIDRÁULICAS DEL PAVIMENTO FLEXIBLE.....	63
4.3.1.	Datos de las pruebas de infiltración.....	63
4.3.2.	Resultados de las pruebas de infiltración.....	63
4.3.3.	Comportamientos de las curvas de infiltración.....	66
4.3.4.	Análisis de los Coeficientes de Escorrentía.....	67
4.4.	RELACIONES ENTRE LAS PROPIEDADES FISICO-MECÁNICAS Y PROPIEDADES HIDRÁULICAS DEL PAVIMENTO FLEXIBLE.....	68
4.4.1.	Absorción Material Fino Subbase vs Fracción de Infiltración.....	68
4.4.2.	Densidad Proctor Estándar vs Fracción de infiltración (%).....	69
4.5.	DISCUSIÓN.....	71
CAPÍTULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....		73
5.1.	CONCLUSIONES.....	73
5.2.	RECOMENDACIONES.....	75
BIBLIOGRAFIA.....		76
ANEXOS.....		81

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Requisitos granulométricos para bases granulares de pavimento flexible. Adaptado de MTOP, 2002.	26
Tabla 2. Requisitos granulométricos para subbases de pavimento flexible. Adaptado de MTOP, 2002.	27
Tabla 3. Análisis comparativo entre los ensayos de laboratorio y la información proporcionada por el ministerio.	49
Tabla 4. Resultados del análisis granulométrico – Capa base.	50
Tabla 5. Resultados del análisis granulométrico – Capa Subbase.	50
Tabla 6. Resultados del análisis granulométrico – Capa Subrasante.	51
Tabla 7. Resultados de las características plásticas de las capas granulares en pavimentos flexibles.	53
Tabla 8. Resultados del ensayo Proctor estándar.	55
Tabla 9. Resultados de densidad y absorción del agregado fino.	57
Tabla 10. Resultados de densidad y absorción del agregado grueso.	58
Tabla 11. Resultados de la degradación en Base.	58
Tabla 12. Resultado del ensayo del círculo de arena.	59
Tabla 13. Resultados de caracterización de núcleos.	60
Tabla 14. Resumen de resultados densidad bruta (bulk) y teórica máxima (rice).	60
Tabla 15. Volumetría y vacíos de núcleos.	60
Tabla 16. Datos obtenidos a través del GeoGauge.	62
Tabla 17. Resultados ensayo Marshall.	62
Tabla 18. Resultados del ensayo de infiltración.	64

INDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1. Ubicación geográfica del tramo vial de análisis. Fuente Propia.	22
Ilustración 2. Mapa de caracterización del suelo en el tramo vial. Adaptado de MAG et al. 2015.....	29
Ilustración 3. Mapa de formación geológica tramo vial. Adaptado de MAG et al. 2015.	30
Ilustración 4. Perforaciones de extracción de muestras planificadas. Fuente Propia.	40
Ilustración 5. Metodología propuesta.	41
Ilustración 6. Esquema gráfico del GeoGauge. Adaptado de: ASTM, 2007.....	46
Ilustración 7. Esquema Infiltrómetro de doble anillo. Fuente: (Cepeda & Rosero, 2024).	47
Ilustración 8. Vista lateral del Infiltrómetro. Fuente: (Cepeda & Rosero, 2024).....	47
Ilustración 9. Perfiles burletes alambrados 341.	48
Ilustración 10. Vista lateral y superior del caucho	48
Ilustración 11. Colocación del caucho en el infiltrómetro.	48
Ilustración 12. Colocación de silicona en el caucho.	48
Ilustración 13. Curvas Granulométricas – Capa Base.....	52
Ilustración 14. Curvas granulométricas – Capa Subbase.	52
Ilustración 15. Curvas Granulométricas – Capa Subrasante.	52
Ilustración 16. Limite liquido correspondiente a la Sub-Rasantes, Subbases y Bases.....	54
Ilustración 17. Carta de plasticidad para las muestras de subrasante.	54
Ilustración 18. Curvas de compactación de la Base.	56
Ilustración 19. Curvas de compactación de la Subbase.....	56
Ilustración 20. Curvas de compactación de la Subrasante.	56
Ilustración 21. Absorción material fino.	58
Ilustración 22. Absorción material grueso.	58
Ilustración 23. Macrotextura del pavimento flexible.	59
Ilustración 24. Resultados obtenidos de densidades en los núcleos.....	61
Ilustración 25. Valores obtenidos del porcentaje de humedad y absorción.....	61
Ilustración 26. Gráfica de estabilidad vs flujo de núcleos.....	63
Ilustración 27. Curvas de infiltración pavimento flexible.....	65
Ilustración 28. Porcentaje de escurrimiento por punto.....	65
Ilustración 29. Diagrama de relación Absorción Fino y Fracción de Infiltración.....	68
Ilustración 30. Diagrama de relación Densidad Proctor estándar y Fracción de infiltración.	69
Ilustración 31. Diagrama de relación entre el Coeficiente de escorrentía y Macrotextura. ...	70
Ilustración 32. Diagrama de relación Absorción Finos y CBR -SUBASE.	70

INDICE DE ANEXOS

Anexo 1. Extracción del material de cada punto.	81
Anexo 2. Capas granulares.	81
Anexo 3. Medición de capas granulares.	81
Anexo 4. Ensayo Granulométrico.	81
Anexo 5. Ensayo Límite Líquido.	81
Anexo 6. Límite Plástico.	81
Anexo 7. Muestras de límites en el horno.	81
Anexo 8. Absorción y densidad-material fino.	81
Anexo 9. Absorción y densidad-material grueso.	81
Anexo 10. Ensayo Proctor Estándar.	82
Anexo 11. Ensayo de abrasión.	82
Anexo 12. Extracción de núcleos.	82
Anexo 13. Ensayo Marshall.	82
Anexo 14. Ensayo Porcentaje de vacíos.	82
Anexo 15. Ensayo macrotextura.	82
Anexo 16. Ensayo GeoGauge.	82
Anexo 17. Ensayo Infiltrómetro.	82
Anexo 18. Toma de datos en campo del Infiltrómetro.	82
Anexo 19. Cálculo granulométrico de la Base punto 1.	83
Anexo 20. Calculo limite liquido de la Base punto 5.	84
Anexo 21. Calculo limite plástico de la Subrasante y Subbase punto 4.	84
Anexo 22. Cálculo del ensayo Proctor estándar.	85
Anexo 23. Cálculo del ensayo de macrotextura.	86
Anexo 24. Cálculos Porcentaje de vacíos.	86
Anexo 25. Cálculo del ensayo de infiltración.	87
Anexo 26. Resumen de datos finales recolectados IN-SITU.	88
Anexo 27. Resumen de datos finales recolectados NUCLEOS.	89

TABLA DE ACRONIMOS

SUCS: Sistema Unificado de Clasificación de Suelos.

LP: límite plástico.

Cu: Coeficiente de uniformidad.

Cc: Coeficiente de curvatura.

ω : Humedad óptima %

$\gamma_{dm\acute{a}x}$: Masa volumétrica seca máxima.

NEVI: Norma Ecuatoriana Vial

MTOP: Ministerio de Transporte y Obras Públicas del Ecuador.

IEOS: Instituto Ecuatoriano de Obras Sanitarias

C: Coeficiente de escurrimiento

NTE INEN: Norma Técnica Ecuatoriana – Instituto Ecuatoriano de Normalización

ASTM: American Society for Testing and Materials, traducido al español como la Sociedad Americana para Pruebas y Materiales

K: Velocidad de infiltración.

GEOGAUGE: Traducido al español como geo medidor.

CBR: "California Bearing Ratio", o en español "Relación de Soporte de California"

G_{mm}: Gravedad Específica Máxima Teórica

RESUMEN

En el ámbito de la infraestructura vial, los pavimentos flexibles son ampliamente utilizados debido a su estructura estratificada y a su eficiencia técnica y económica. Sin embargo, factores como el cambio climático y la variabilidad de los materiales locales representan desafíos crecientes para su durabilidad y funcionalidad. En particular, las precipitaciones intensas afectan de manera significativa el desempeño estructural de estos pavimentos, al alterar sus propiedades físicas, mecánicas e hidráulicas. El presente estudio se enfoca en el análisis de dichas propiedades en el corredor vial el Arenal-Guaranda, ubicado en la provincia de Bolívar, Ecuador. Esta vía constituye un eje estratégico para el desarrollo comercial y económico de la región, con un flujo diario estimado de 2760 vehículos, entre livianos y pesados, según datos del Ministerio de Transporte y Obras Públicas (MTO). La investigación aborda las propiedades físicas del pavimento, como la densidad y el espesor de las capas; las propiedades mecánicas, incluyendo la capacidad de soporte, resistencia y módulo de elasticidad; y las propiedades hidráulicas, centradas en la permeabilidad, escorrentía y capacidad de infiltración. El objetivo principal es comprender cómo estas características influyen en la eficiencia del drenaje y en la durabilidad del pavimento flexible, considerando además las condiciones climáticas y geográficas específicas de la zona de estudio. Con ello, se busca aportar criterios técnicos que permitan optimizar el diseño y mantenimiento de este tipo de infraestructura vial. Este estudio busca actualizar el coeficiente de escorrentía del pavimento flexible en el tramo el Arenal-Guaranda, mediante el análisis de sus propiedades físico-mecánicas e hidráulicas. Se cuestiona la validez de normativas antiguas (INEN, 1992), al emplear datos obsoletos que no reflejan la realidad actual de la construcción en Ecuador. Los resultados permitirán mejorar el diseño hidráulico vial, promover pavimentos permeables y optimizar el manejo de aguas pluviales.

Palabras clave: pavimento flexible, físicas, mecánicas, hidráulicas, drenaje, coeficiente de escorrentía, infraestructura vial, diseño hidráulico.

ABSTRACT

In the field of road infrastructure, flexible pavements are widely used due to their layered structure and technical and economic efficiency. However, factors such as climate change and variability in local materials pose increasing challenges to their durability and functionality. Intense rainfall significantly affects the structural performance of these pavements by altering their physical, mechanical, and hydraulic properties. This study examines these properties along the El Arenal–Guaranda road corridor, situated in Bolívar Province, Ecuador. This road serves as a strategic axis for the region's commercial and economic development, with an estimated daily traffic flow of 2760 vehicles, including both light and heavy vehicles, according to data from the Ministry of Transport and Public Works (MTO). The research examines the physical properties of the pavement, including density and layer thickness, as well as its mechanical properties, such as support capacity, strength, and modulus of elasticity.

Additionally, it focuses on the pavement's hydraulic properties, specifically permeability, runoff, and infiltration capacity. The primary objective is to understand how these characteristics affect drainage efficiency and the durability of flexible pavements, considering the specific climatic and geographical conditions of the study area. The study aims to update the runoff coefficient for flexible pavements in the El Arenal–Guaranda section by analyzing their physical-mechanical and hydraulic properties. It questions the validity of outdated regulations (INEN, 1992), which employ obsolete data that do not reflect the current construction reality in Ecuador. The results will contribute to improving road hydraulic design, promoting permeable pavements, and optimizing stormwater management.

Keywords: Flexible pavement, physical properties, mechanical properties, hydraulic properties, drainage, runoff coefficient, road infrastructure, hydraulic design.

Translation reviewer: MSc. Andrea Paola Goyes R.

Date: 12/06/2025

Signature:



Andrea Paola Goyes
Robalino
Time Stamping
Security Data

CAPITULO I. INTRODUCCIÓN

1.1. Zona de estudio

El corredor vial el Arenal-Guaranda forma parte de la carretera Babahoyo-Guaranda, situada en la provincia de Bolívar. La carretera ha sido objeto de trabajos de mejoramiento y mantenimiento en diferentes momentos del tiempo por el Ministerio de Transporte y Obras Públicas (MTO), facilitando así la conectividad entre la Sierra y la Costa. Este sentido de obras ha beneficiado a varias parroquias, tales como Arenal, Facundo Vela, San Simón y Guaranda, las cuales cuentan con una población aproximada de 31 825 habitantes (INEC, 2010).

El tramo vial objeto de análisis conecta las parroquias rurales del Arenal y Guaranda, con una longitud aproximada de 32 km. Según estudios realizados por el Ministerio de Transporte y Obras Públicas (MTO), circulan alrededor de 2760 vehículos al día, entre livianos y de carga pesada.

1.2. Antecedentes de investigación

A nivel global, la infraestructura vial ha evolucionado con la implementación de diversos tipos de pavimentos, entre los cuales destacan los pavimentos flexibles por su adaptabilidad y menor costo inicial. Estos pavimentos, caracterizados por una estructura estratificada conformada por capas granulares y una delgada capa de ligante asfáltico (Wright y Paquete, 1987), son comúnmente utilizados en países en vías de desarrollo debido a su facilidad constructiva y comportamiento estructural bajo cargas vehiculares.

Diversos estudios han abordado los factores que intervienen en el diseño y desempeño de los pavimentos flexibles, considerando aspectos como la resistencia de los materiales, las características del suelo, el volumen de tránsito proyectado y la funcionalidad para el usuario. No obstante, las condiciones climáticas extremas, especialmente las precipitaciones intensas, se han convertido en un reto adicional para garantizar la durabilidad de estas estructuras, en un contexto donde los efectos del cambio climático son cada vez más notorios (Sánchez y Palomares, 2018).

En este sentido, la capacidad de los pavimentos para resistir el deterioro causado por la infiltración de agua y mantener un adecuado sistema de drenaje ha adquirido gran relevancia en la investigación técnica. A esto se suma la variabilidad regional de los materiales utilizados en la construcción de carreteras, los cuales muchas veces se asumen como homogéneos en los

modelos de diseño, cuando en realidad presentan heterogeneidad significativa que puede afectar el comportamiento mecánico e hidráulico del pavimento (Brandão, 2021).

Los trabajos desarrollados por Menéndez (2013), Anguas, López y Martínez (2002), y Zepeda (1989) han proporcionado marcos teóricos valiosos para la comprensión de las propiedades físicas (como densidad, espesor y resistencia), mecánicas (resistencia estructural, módulo de elasticidad, CBR) e hidráulicas (permeabilidad, escorrentía, grado de saturación) de los pavimentos. Estas propiedades afectan de manera directa la forma en la que el sistema vial soporta las cargas, drena el agua y aborda las degradaciones a través del tiempo.

En el contexto ecuatoriano el corredor vial el Arenal-Guaranda, localizado en la provincia Bolívar, es un corredor de gran importancia para la conectividad regional y el desarrollo económico; de acuerdo con el MTOP, por esa vía circulaban al día alrededor de 2760 vehículos livianos y pesados, lo que subraya la importancia de garantizar la estabilidad estructural y funcional.

Ante este panorama, la presente investigación se justifica en la necesidad de estudiar detalladamente las características físicas, mecánicas e hidráulicas del pavimento flexible en este tramo específico, como base técnica para mejorar las estrategias de diseño, construcción y mantenimiento en zonas con condiciones climáticas variables y materiales de origen local.

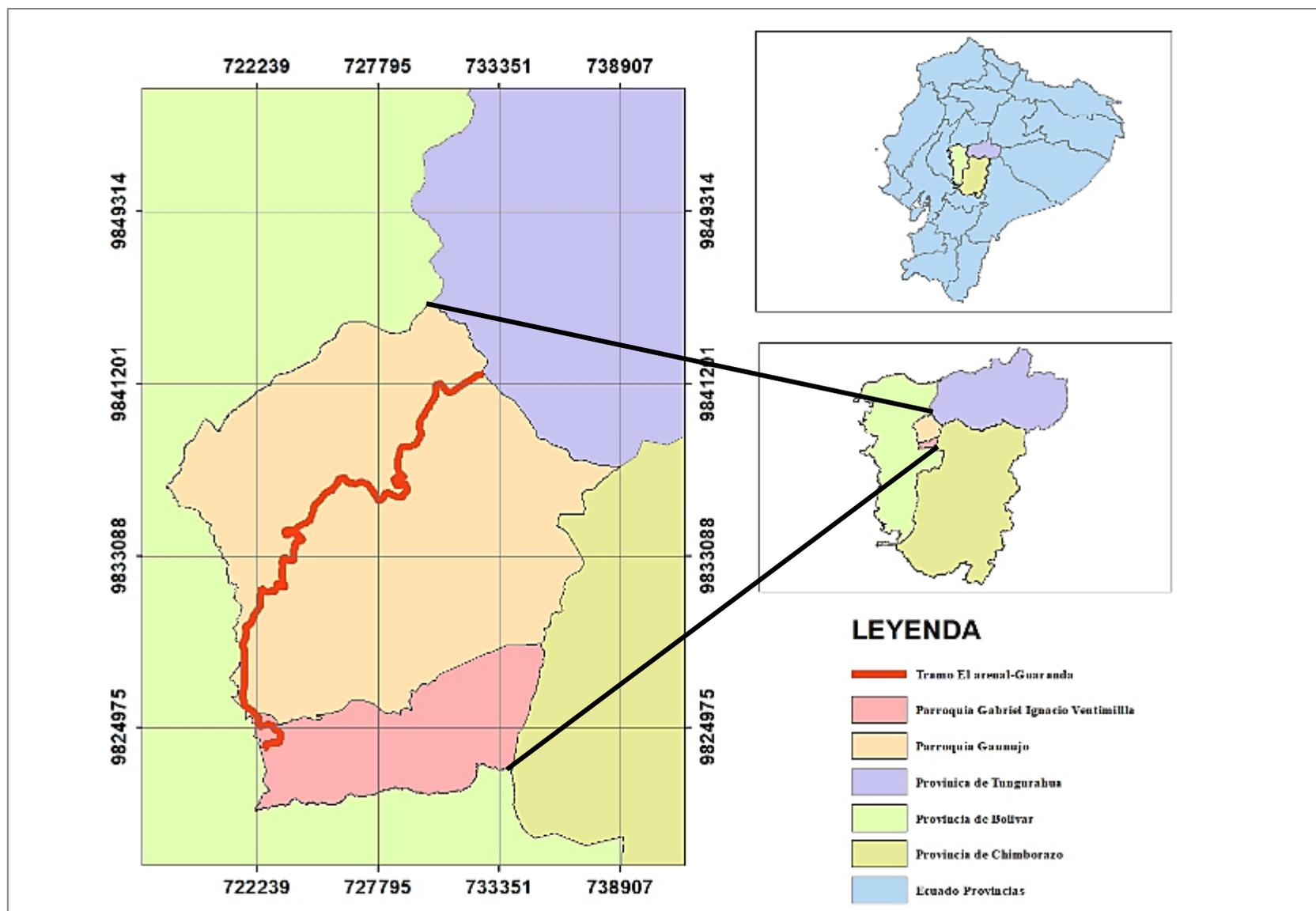


Ilustración 1. Ubicación geográfica del tramo vial de análisis. Fuente Propia.

1.3. Planteamiento del problema

El corredor el Arenal-Guaranda es una infraestructura de pavimento flexible sometida a cambios extremos de temperatura y condiciones climáticas muy variables, situación que se evidencia en las múltiples paralizaciones del tránsito debido a la congelación de su calzada, dado que esta vía presenta una de las altitudes más altas del país al bordear el nevado Chimborazo. En lapsos cortos de tiempo, este congelamiento, que generalmente ocurre durante las horas de la noche, se pierde al mediodía, hora de mayor radiación solar, produciendo efectos de contracción y dilatación en periodos cíclicos breves que afectan la estructura granular y bituminosa del pavimento. La expansión producida en las capas granulares cuando se congelan provoca cambios en sus características físicas, tales como la variación volumétrica, el aumento de vacíos y la pérdida de densidad. En la calzada bituminosa se observan, en lapsos cortos de tiempo, indicios de fatiga debido al efecto de las bajas temperaturas que rigidizan el asfalto, volviéndolo frágil frente a la acción repetida de los ejes de carga de vehículos pesados. Esto se manifiesta en la aparición de fisuras que degeneran en grietas y huecos, con la respectiva pérdida de capacidad mecánica resistente. Durante las precipitaciones pluviales, el agua que infiltra genera presión interna; su flujo modifica la disposición de los tamaños de grano en las capas de base y subbase por el fenómeno de arrastre de finos. Esto afecta el factor de escurrimiento, dado que cambia las condiciones del agua superficial. En la calzada, el agua congelada provoca un nulo contacto del neumático con el pavimento, derivando en derrapes y pérdida del nivel de seguridad vial. En conjunto, estos factores aceleran el deterioro y reducen la durabilidad y resistencia del pavimento. Por este motivo, se plantea la siguiente pregunta de investigación: ¿Qué relación existe entre las características físico-mecánicas e hidráulicas del pavimento flexible en el corredor vial el Arenal-Guaranda, evaluadas en campo y laboratorio?.

1.4. Justificación

Las propiedades físico-mecánicas juegan un papel en la estructura del pavimento y la durabilidad del pavimento, mientras que las características hidráulicas son responsables de gestionar el agua y prevenir situaciones relacionadas.

Evaluar esas características utilizando herramientas manuales y eléctricas (en campo y en laboratorio) permite recabar información útil para un correcto control de los pavimentos flexibles.

El patrón de escorrentía se encuentra determinado por las propiedades físico-mecánicas. Una superficie porosa, rugosa y con buen drenaje permite que el agua fluya en

dirección de los drenajes y que no se acumule en la vía. Los coeficientes de escorrentía actuales se basan en datos de hace unas cuantas décadas; en el tramo vial el Arenal-Guaranda no reflejan las características físicas y mecánicas de la base, de la subbase y de la subrasante actuales. Al calcular nuevos coeficientes específicos para los pavimentos flexibles es posible mejorar el diseño hidráulico y la protección contra el deterioro por agua, así como la estabilidad estructural, reducir accidentes y costes de mantenimiento y conseguir beneficios con el medio ambiente.

El corredor vial el Arenal-Guaranda, al encontrarse a gran altitud y cercano al nevado Chimborazo, enfrenta constantes cambios de temperatura que causan congelamientos nocturnos y descongelamientos diurnos, generando ciclos de contracción y dilatación que deterioran su estructura. Las capas granulares se ven afectadas por variaciones volumétricas, pérdida de densidad y arrastre de finos debido a la infiltración de agua, alterando su estabilidad. Por otro lado, el congelamiento de la calzada también causa una reducción del contacto neumático-pavimento, aumentando las posibilidades de accidentes, con los consiguientes riesgos de la seguridad vial.

1.5. Objetivos

1.5.1. General

- Establecer la relación de las características físicas mecánicas en pavimentos flexibles con el comportamiento hidráulico.

1.5.2. Específicos

- Determinar las características físicas y mecánicas del pavimento flexible usando equipos y materiales de laboratorio.
- Evaluar las propiedades hidráulicas en el pavimento flexible mediante la prueba del infiltrómetro de doble anillo.

CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO.

2.1. PAVIMENTO FLEXIBLE

2.1.1. Aspectos generales sobre las capas granulares del pavimento

Las capas granulares son los componentes del pavimento que se sitúan entre la subrasante y la superficie de rodadura (subbase y base granular). Las capas granulares están formadas por materiales (grava, arena, mezclas trituradas) y tienen como función canalizar las cargas del tránsito, aumentar la capacidad de soporte del terreno, mejorar el drenaje del sistema en su conjunto y evitar deformaciones y fallos estructurales. Los materiales deben ser resistentes, duraderos, bien gradados y de baja plasticidad. La correcta compactación y el control de calidad son claves para su buen desempeño (Invías, 2013).

2.1.2. Capa de rodadura asfáltica

La capa de rodadura asfáltica es la parte superior del pavimento y está en contacto directo con el tránsito vehicular. Su función principal es proporcionar una superficie de circulación segura, cómoda y resistente al desgaste. Se trata de mezclas asfálticas que incluyen los agregados pétreos y los ligantes bituminosos, para las situaciones climáticas y las cargas de tráfico a las que debe someterse. Al tiempo, contribuye al sellado del pavimento, evitando el paso de agua hacia las capas subyacentes. La calidad de sus materiales, el diseño correspondiente de la mezcla, la adecuada colocación y la correcta compactación son aspectos imprescindibles para asegurar la durabilidad de la mezcla y el correcto comportamiento estructural (Huang, 1993).

2.1.3. Base

Su propósito principal es proporcionar la resistencia estructural necesaria para soportar las cargas verticales generadas por el paso de los vehículos. Debe contar con un espesor adecuado que le permita absorber dichas presiones antes de que lleguen a la subbase, facilitar el drenaje del agua infiltrada, evitar el ascenso capilar del agua subterránea y minimizar las deformaciones por tracción que las cargas ejercen sobre la capa de rodadura (MTOP, 2002).

2.1.3.1. Clasificación de bases en pavimentos flexibles

De acuerdo con el Ministerio de Transporte y Obras Públicas (MTOP, 2002), se efectúan cuatro clases de bases que suelen usarse en estructuras de pavimento flexible. Las clases 1, 2 y 3 se han experimentado con un porcentaje de material triturado del 100%, 50% y 25% respectivamente, con lo que se produce por lo general en plantas centralizadas ya que el control de calidad puede desempeñar un mejor papel en su elaboración. En contraste, la clase 4 se compone de material obtenido mediante el cribado de agregados naturales, sin requerir necesariamente trituración adicional.

Las especificaciones granulométricas exigidas para cada una de estas clases de base están detalladas en la Tabla 1, y son fundamentales para asegurar el buen desempeño estructural del pavimento, ya que influyen directamente en su capacidad de soporte, estabilidad y durabilidad.

Tabla 1. Requisitos granulométricos para bases granulares de pavimento flexible. Adaptado de MTOP, 2002.

Tamiz ASTM	Abertura en [mm]	Porcentaje que pasa el tamiz [%]				
		Clase 1		Clase 2	Clase 3	Clase 4
		Tipo A	Tipo B			
2"	50	100 máx.	100 máx.	-	-	100
1 ½"	38.1	70 – 100	70 – 100	-	-	-
1"	25	55 – 85	55 – 85	100	-	60 – 90
¾"	19	50 – 80	60 – 90	70 – 100	100	-
⅜"	9.5	35 – 70	45 – 75	50 – 80	-	-
No. 4	4.75	25 – 50	30 – 60	35 – 65	45 – 80	20 – 50
No. 10	2	20 – 40	20 – 50	25 – 30	30 – 60	-
No. 40	0.425	10 – 25	10 – 25	15 – 30	20 – 35	-
No. 200	0.075	2 – 12	2 – 12	2 – 12	3 – 15	0 – 15

2.1.4. Subbase

Es la capa de material colocada directamente sobre el mejoramiento de la subrasante (afirmado típico), cuya finalidad principal es optimizar los costos de

construcción del pavimento, permitiendo sustituir parte del espesor de la base por un espesor equivalente de subbase. Además, cumple funciones importantes como proteger la base frente a fenómenos de capilaridad, variaciones volumétricas y pérdida de resistencia, así como evitar la migración de finos hacia las capas superiores del pavimento (Lizcano y Quintana, 2015).

2.1.4.1. Clasificación de subbases en pavimentos flexibles

De acuerdo con el Ministerio de Transporte y Obras Públicas (MTO, 2002), existen tres clases de subbase, las cuales se diferencian según el procedimiento de obtención del material. La subbase clase 1 se obtiene a través del proceso de trituración de piedras y gravas; la clase 2 se logra mediante el procedimiento de cribado de materiales; y la clase 3 se realiza mediante los materiales extraídos de la excavación para conformar la plataforma de la vía. Para cada una de estas clases existen requisitos granulométricos propios, que se encuentran listados en la Tabla 2. Para la garantía de un comportamiento adecuado de la subbase, son fundamentales el diseño como la correcta ejecución de la misma y duradero del pavimento. Esta capa no solo mejora la distribución de las cargas transmitidas desde las capas superiores hacia la subrasante, sino que también contribuye a prolongar la vida útil del sistema vial, disminuyendo la frecuencia y el costo de las intervenciones de mantenimiento.

Tabla 2. Requisitos granulométricos para subbases de pavimento flexible. Adaptado de MTO, 2002.

Tamiz ASTM	Abertura [mm]	Porcentaje que pasa el tamiz [%]		
		Clase 1	Clase 2	Clase 3
3"	75	-	-	100
2"	50	-	100	80 – 100
1 ½"	38.1	100	70 – 100	-
No. 4	4.75	30 – 70	30 – 70	30 – 70
No. 40	0.425	10 – 35	15 – 40	15 – 45
No. 200	0.075	0 – 15	0 – 20	0 – 20

2.1.5. Subrasante

La subrasante constituye la capa más baja dentro de la estructura del pavimento flexible. Generalmente, está formada por el terreno natural del sitio, aunque en

algunos casos puede ser mejorado para alcanzar las condiciones necesarias de soporte. Sobre ella se colocan las demás capas estructurales, como la subbase, base y superficie de rodadura. Su función esencial es recibir y disipar las cargas inducidas por el tránsito vehicular, transfiriéndolas de manera gradual hacia el suelo de fundación (Lizcano y Quintana ,2015).

2.1.6. Caracterización del del terreno natural de la zona

Con el objetivo de realizar un análisis comparativo del suelo recolectado in situ para los ensayos de laboratorio correspondientes a la subrasante, la ilustración 2 presenta una caracterización detallada del mismo. Esta información se basa en los datos proporcionados por el Ministerio de Agricultura y Ganadería del Ecuador (MAG et al., 2015), donde se evidencia la presencia de materiales de tipo arenoso y franco en las zonas aledañas a la infraestructura vial.

La ilustración 3 muestra igualmente la conformación geológica del terreno correspondiente al tramo en análisis, destacándose la existencia de tres unidades geológicas diferenciadas a lo largo del trazado vial las cuales son Formación Pisayambo, Piroclastos del Chimborazo y Volcánicos Guaranda.

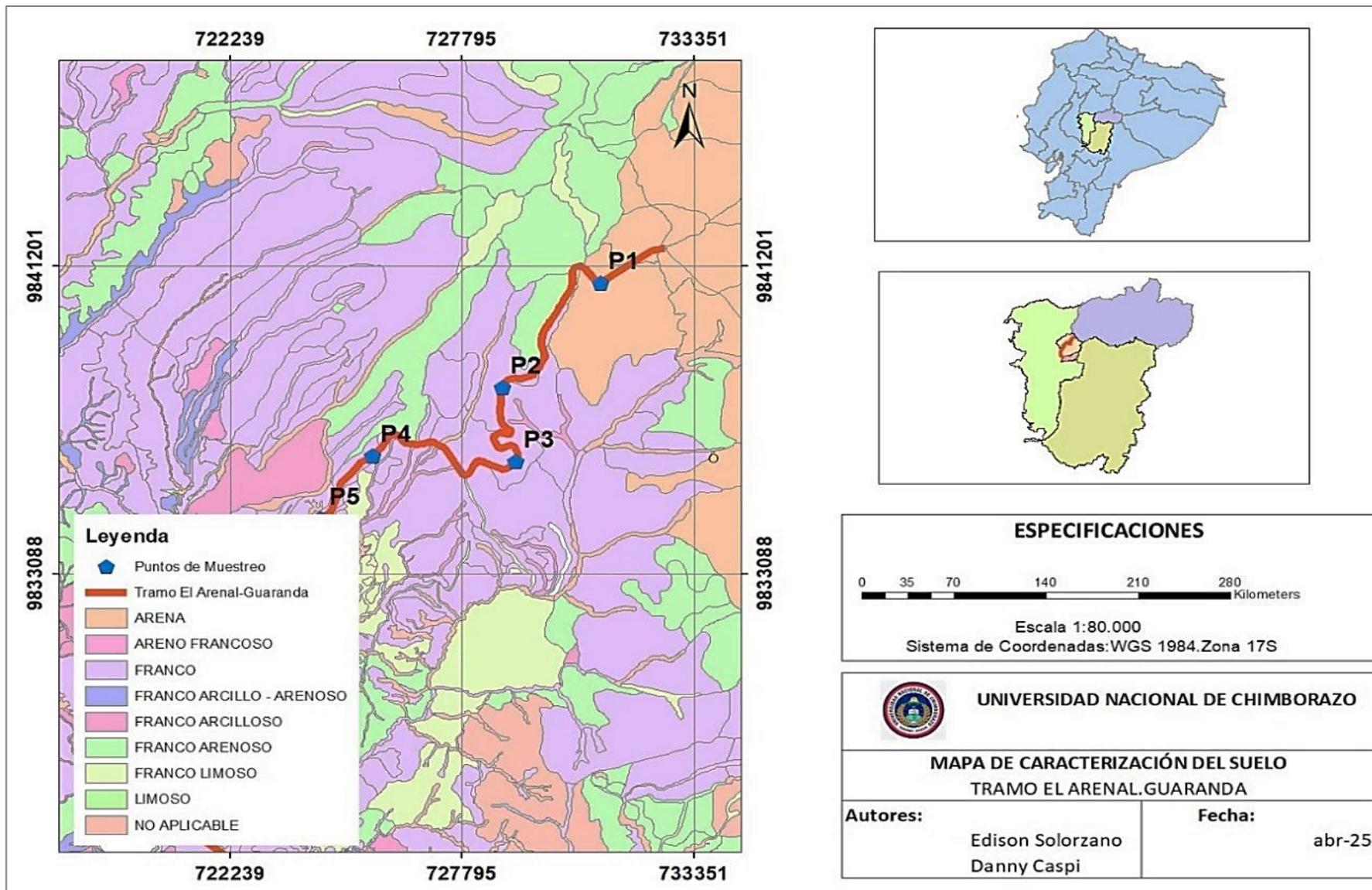


Ilustración 2. Mapa de caracterización del suelo en el tramo vial. Adaptado de MAG et al. 2015.

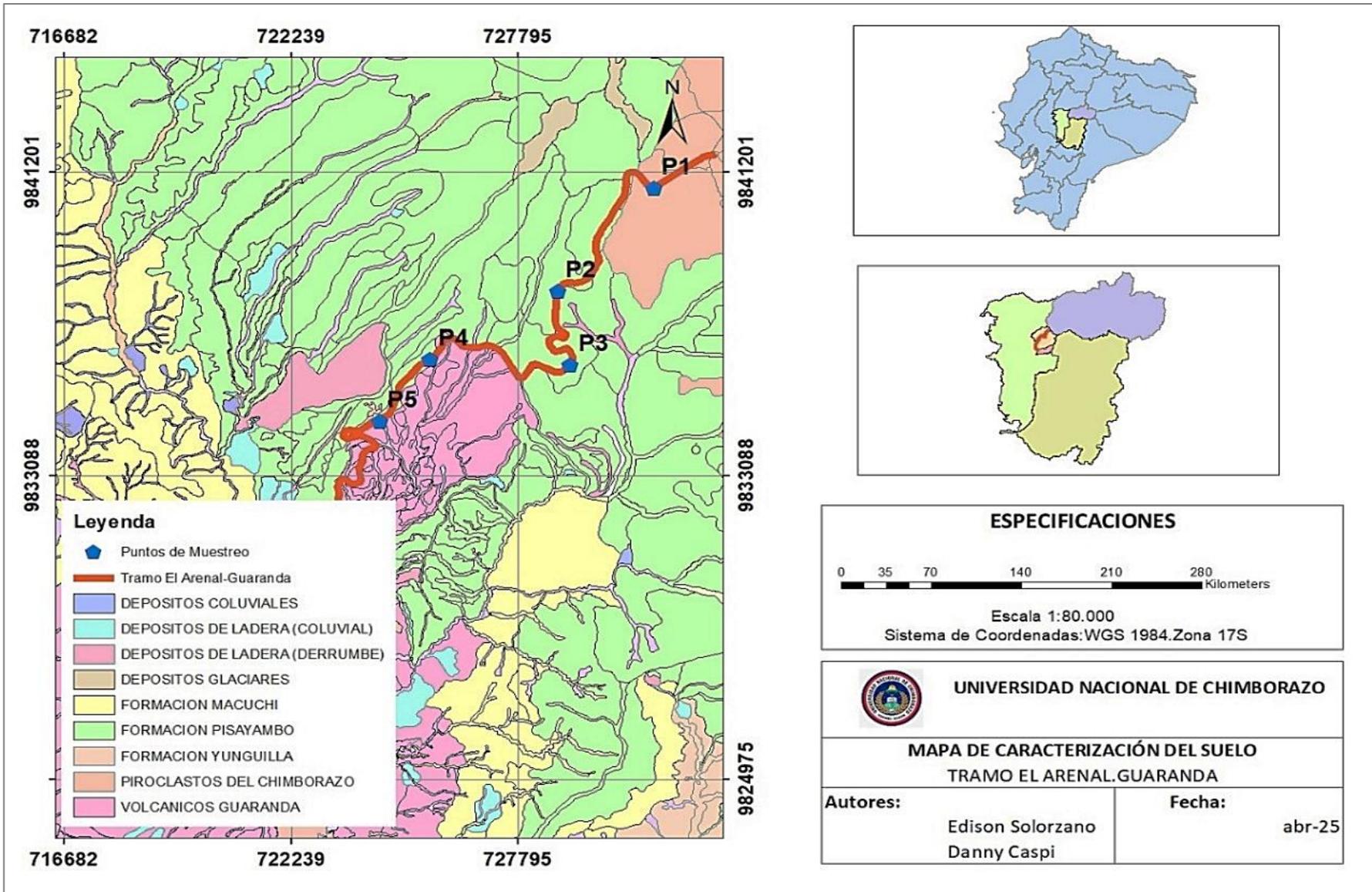


Ilustración 3. Mapa de formación geológica tramo vial. Adaptado de MAG et al. 2015.

2.2. PROPIEDADES FÍSICAS DEL PAVIMENTO FLEXIBLE

2.2.1. Granulometría

Se trata de separar y clasificar el suelo según el tamaño y porcentaje de sus granos. La cantidad de suelo necesaria para el análisis de granulometría depende de la cantidad de partículas finas presentes. La fase sólida afecta significativamente el comportamiento mecánico del suelo, lo que resalta la importancia de conocer sus características. Los suelos granulares son favorables para la ingeniería civil y pueden densificarse mediante compactación, mejorando su resistencia al eliminar partículas finas. Por otro lado, los suelos cohesivos tienden a comportarse desfavorablemente, presentando problemas de consolidación y asentamientos. Para clasificar los suelos, se requieren normas generales basadas en diversas características (Montejo, 2010).

2.2.2. Límites de consistencia

El **límite plástico** es un procedimiento de ensayo en virtud del cual se determina el contenido de agua del suelo en el punto de transición entre los estados plástico y el sólido. Para ello, se emplea el método del rolado, que trata de evaporar el agua despacio hasta que el suelo empieza a agrietarse o a desintegrarse (NTE INEN 692, 1982).

El **límite líquido** es un procedimiento centrado en determinar el contenido de agua del suelo en el punto de transición entre un comportamiento líquido y plástico. Para ello se dispone de un dispositivo mecánico llamado Copa de Casagrande, el cual se utilizará aplicando un determinado número de golpes que se aplican para la medida de la fluidez del suelo en condiciones normalizadas (NTE INEN 691, 1982).

2.2.3. Clasificación del suelo

La clasificación de suelos representa un paso fundamental en ingeniería civil, pues permite entender cómo se comportará el suelo para diferentes propósitos como la pavimentación, la cimentación, construcción de diferentes infraestructuras, entre otros muchos casos a los cuales se tiene que someter el suelo. Los dos sistemas que son más comúnmente utilizados para clasificar los suelos son el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS) y el Sistema de Clasificación de Materiales de la Asociación Americana de Carreteras y Transporte (AASHTO). (Santamarina & Narsilio, s. f.).

2.2.3.1. Clasificación SUCS

Clasifica los suelos según sus características físicas, granulometría y plasticidad. Este sistema categoriza los suelos en dos grupos principales: suelos gruesos (granulares) y suelos finos. A continuación, se ofrece un resumen de la clasificación del suelo según el (SUCS).

2.2.4. Absorción de material granular

La absorción hace referencia al aumento de peso del agregado debido a la entrada de agua en los poros de las partículas durante un periodo de tiempo definido, excluyendo el agua que queda en la superficie de las partículas. Se expresa como un porcentaje del peso seco del material. También se le conoce como higroscopicidad, una característica de los materiales granulares que depende de su porosidad. Esta se define como la capacidad de absorber o liberar humedad del entorno (Díaz, 2005). Según HOLCIM S.A. (2022), la absorción para una base granular es inferior al 5%.

2.2.5. Compactación de materiales granulares de pavimentos flexibles

Se encuentra de manera directa y explícita con el proceso de la compactación, dado que la compresión de los agregados provoca que se acreciente el contacto entre las superficies y la fricción entre las partículas, generando para así una mayor estabilidad y resistencia, contribuyendo a mejorar la integridad de la estructura del pavimento (Zambrano Mesa, Tejeda Piusseaut, & Aaenlle, 2020).

2.2.6. Espesores de capas

Es un factor que influye en su capacidad de soporte, rendimiento y durabilidad. Este espesor tiene varias capas, en función de las cualidades de soportar los pesos y las cargas que soportará el pavimento. El diseño del espesor de cada una de las capas tiene que atender a factores como puede ser la clase de tráfico, las condiciones del suelo, y el clima, para que el pavimento consiga soportar las cargas y la capacidad de resistir el deterioro con el paso del tiempo (Montejo, 2010).

2.2.7. Humedad

La cantidad de agua en un suelo se determina en función de la masa de sólidos o bien del volumen del suelo evaluado, en porcentaje (%). Este valor representa la relación que existe entre el valor del peso de agua y el peso de los sólidos de este.

Pero, surge la pregunta de ¿cómo obtener el peso del agua?, ya que existe diferente tipología de agua en el suelo, que requiere diferente temperatura y tiempo para ser eliminada. Por lo tanto, el concepto de "suelo seco" es subjetivo, al igual que la cantidad de agua medida en la muestra.

Se considera que el suelo está seco cuando ha sido secado en horno a una temperatura de 105°C a 110°C durante un período de 18 a 24 horas, hasta alcanzar un peso constante (Geomecánica ,2016).

2.2.8. Pesos unitarios

La norma ASTM C 29 define la densidad total o bruta de los agregados como la masa de un volumen unitario de estos, que incluye tanto el volumen de las partículas individuales como el de los espacios vacíos entre ellas. En resumen, el peso unitario se determina dividiendo la masa de un agregado seco (a un nivel específico de consolidación o compactación) por el volumen que ocupa, considerando los vacíos de aire y de absorción. Esta medida se expresa en lbf/pie³ (kg/m³) (ASTM C 29 ,2003).

2.2.9. Porcentaje de Vacíos

Se refiere al grado de organización que logran las partículas del suelo, lo que genera más o menos vacíos entre ellas. En suelos compactos, las partículas sólidas están bien organizadas, lo que resulta en una menor capacidad de deformación al aplicar cargas. En contraste, en suelos poco compactos, hay un mayor volumen de vacíos y, por lo tanto, una mayor capacidad de deformación. Para entender mejor la compacidad de una estructura simple, se puede estudiar la disposición de un conjunto de esferas del mismo tamaño (Geomecánica ,2016).

2.2.10. Macro textura

La macrotextura del pavimento se refiere a las irregularidades superficiales que afectan la adherencia de los neumáticos y el drenaje del agua, mejorando la seguridad vial. Se mide en un rango de 0,5 mm a 50 mm de profundidad.

Según el departamento de Transporte del Estado de Washington (WSDOT), recomienda una profundidad promedio de macrotextura de 0,65 mm para pavimentos flexibles con alto tráfico. Esta textura superficial es crucial para asegurar una buena fricción y drenaje, especialmente en condiciones de lluvia, mejorando la seguridad vial al reducir el riesgo de hidroplaneo (Cabrera & Stammitti ,2005).

2.2.11. Desgaste a la abrasión

El desgaste por abrasión es un mecanismo de deterioro superficial que ocurre cuando una superficie sólida se ve sometida al roce continuo contra partículas duras o una superficie rugosa. Según Falcon & Santos (2016), este tipo de desgaste representa una de las formas más comunes de daño en componentes mecánicos, especialmente en ambientes industriales o con presencia de materiales abrasivos.

2.2.12. Densidad capas granulares

La densidad de las capas granulares es un parámetro fundamental en el diseño y la ejecución de pavimentos, ya que permite determinar la resistencia, la estabilidad y la duración de la estructura vial. De forma que aseguran que la correcta densidad de las capas granulares proporcionará una correcta compactación, y por tanto una menor deformación de la capa granular bajo carga, una mejor capacidad de soporte y una menor capacidad de penetración de agua en el pavimento.

Los factores fundamentales que intervienen en la densidad son el tipo de material, la energía de compactación y el contenido de humedad. Para asegurar el rendimiento esperado, es esencial realizar ensayos de control de calidad y seguir especificaciones técnicas que aseguren una compactación óptima (Chapoñan & Quispe,2017).

2.3. PROPIEDADES MECANICAS DEL PAVIMENTO FLEXIBLE

2.3.1. Módulo de Rigidez

La rigidez de un material granular se define como la resistencia a experimentar deformaciones al aplicar cargas, siendo las cargas repetitivas las de mayor interés (por ejemplo, las cargas del tráfico en el caso de los pavimentos) , y se mide a través del módulo resiliente, que expresa la relación entre el esfuerzo aplicado con la deformación elástica recuperada, siendo el módulo resiliente un parámetro que, si resulta elevado, describe un material cuyo comportamiento es más rígido y con mayor resistencia a las cargas cíclicas.

2.3.2. Módulo de Young

El módulo de Young es una propiedad fundamental en la ingeniería de pavimentos, pues expone la rigidez de los materiales empleados en las distintas capas que componen la estructura. En la evaluación de pavimentos a partir del uso de un geo

gauge, el módulo de Young es esencial puesto que permite determinar las propiedades mecánicas de los materiales que componen las capas de un pavimento. Un elevado módulo de Young indica una mayor rigidez del material, lo que es fundamental para definir la rigidez de la estructura en pavimentos (Freire, 2005).

2.3.3. Relación de Soporte de California (CBR)

Se trata de una prueba que evalúa la resistencia del suelo, tomándose como criterio para determinar la capacidad de subrasante, subbase y base para el análisis de pavimentos. La prueba consiste en compactar una muestra de suelo en un molde cilíndrico elaborado en condiciones de humedad y densidad controladas (Córdova, 2015).

2.3.4. Relaciones para la estimación del CBR.

Los valores de CBR pueden determinarse a partir de las mediciones obtenidas del GeoGauge, sirviéndose para ello de las ecuaciones que se enuncian en el apéndice que se presenta a continuación.

La norma AASHTO 1993 es básica para el diseño de pavimentos de carreteras y es una guía sumamente utilizada para la selección de los materiales y para concretar la capacidad de carga de los suelos. Esta norma concluye que el CBR puede estimarse mediante la aplicación de la ecuación 1. Una de sus principales recomendaciones establece la relación entre el valor del CBR y la resistencia estructural, así como el comportamiento del pavimento frente a las cargas.

$$E(\text{psi}) = 1500 * CBR \quad [\text{Ec.1}]$$

La fórmula de Poulsen y Stubstad (1980), propuesta para caracterizar subrasantes en Dinamarca para suelos con contenido de arenas, limos y arcillas, se emplea principalmente para obtener de manera rápida el valor del CBR en el campo a partir de las mediciones del GeoGauge, un dispositivo más práctico y veloz en comparación con los ensayos tradicionales de CBR. La ecuación 2 muestra la fórmula descrita, que utiliza el módulo resiliente en MPa.

$$MR = (Mpa) = 10 * CBR^{0,73} \quad [\text{Ec.2}]$$

La correlación directa GeoGauge–CBR mostrada en la ecuación 3 establece una relación empírica entre el California Bearing Ratio (CBR) y el módulo de

elasticidad (E) del suelo. En esta fórmula, el CBR es proporcional al módulo de elasticidad medido en megapascuales (MPa), multiplicado por un factor de 0,1.

$$CBR = 0,1 * E(MPa) \quad [Ec.3]$$

2.3.5. Estabilidad y flujo Marshall

La estabilidad Marshall se caracteriza como la máxima carga que una probeta, compuesta de mezcla asfáltica, puede aguantar a una temperatura determinada (usualmente, 60 °C) bajo una carga, en la que se aplica esa carga a una velocidad constante de deformación. Esto representa la cohesión interna y la fricción de las partículas de agregado que hay en la mezcla asfáltica. Una buena estabilidad nos indicará que la mezcla asfáltica es más resistente a la deformación plástica continua debida a las cargas de tráfico (ASTM D6927, 2021).

El flujo Marshall es la deformación, considerada como total, que sufre la probeta en el momento que se pierde esa carga máxima (estabilidad). Este flujo se mide en milímetros (mm) en unidades de 0.25 mm (0.01 pulgadas). El flujo nos da un indicativo de la plasticidad o de la susceptibilidad al flujo de la mezcla asfáltica que testeamos. Un flujo demasiado bajo puede indicarnos que la mezcla es rústica, rígida y quebradiza, mientras que un flujo muy alto puede indicarnos que la mezcla es inestable y susceptible al flujo (AASHTO T 245-15, 2019).

2.4. PROPIEDADES HIDRAULICAS DEL PAVIMENTO FLEXIBLE

2.4.1. Permeabilidad

La permeabilidad se define como la capacidad que tiene un material para que en él pase el fluido sin alterar su estructura interna; se califica como permeable un material que deja pasar cierto volumen de fluido en un tiempo determinado, en tanto que se califica como impermeable un material que deja pasar un volumen mínimo de fluido. La cantidad de fluido que va pasando depende de la velocidad del paso del fluido; la misma se determina a partir de tres factores:

- La porosidad del material.
- La densidad del fluido (dependiendo de su temperatura).
- La presión que ejercen sobre el fluido.

- Infiltración de la capa de rodadura.

La infiltración de la capa de rodadura es el proceso por el cual el agua atraviesa la superficie del pavimento; la infiltración de este tipo puede convertir en peligrosa la durabilidad y estabilidad del pavimento aplicado, sobre todo en climas muy lluviosos. La infiltración depende de la porosidad, textura y estado de conservación del pavimento. Para minimizar el daño por infiltración, es importante tener un buen diseño y drenaje de la capa de rodadura. Por otra parte, la utilización de mezclas porosas o sistemas de drenaje superficial aumenta la eficiencia del drenaje en la capa de rodadura (Rebolledo, 2010).

2.4.2. Velocidad de escorrentía

Es el tiempo que toma para que la escorrentía generada en la parte más distante de la cuenca llegue a la sección de salida. Este tiempo está determinado por la distancia recorrida (influenciada por la longitud y forma de la cuenca) y por la velocidad de las escorrentías (dependiente de la cantidad de escorrentía, la pendiente de la cuenca y del cauce principal, así como la rugosidad de la superficie (Dunne & Leopold ,1978).

2.4.3. Coeficiente de escorrentía

El coeficiente de escorrentía, o bien coeficiente de escurrimiento, es definido como la relación que existe entre el agua que escurre por la superficie del terreno y el agua que cae de una determinada lluvia o precipitación, y su cantidad dependiente a la vez del tipo de lluvia que cae y de la cobertura del área que se estudia. Se caracteriza por un valor establecido entre 0 y 1 (Institutodelagua.es, 2024). En este sentido un valor igual a 0 hará alusión a que toda el agua de lluvia se infiltra sin que nada de ella sea escurrido, mientras que un valor igual a 1 significará que toda el agua queda escurrida con el posterior proceso de absorción (Institutodelagua.es, 2024). Este coeficiente va estrechamente ligado a otras características, como la composición del terreno, el nivel de saturación del suelo, la inclinación del terreno, la vegetación, la lluvia (su intensidad) y otras condiciones locales (Institutodelagua.es, 2024).

2.5. INVESTIGACIONES RECIENTES RELACIONADAS AL TEMA.

Esta investigación analiza las características físicas e hidráulicas de los suelos encontrados en el tramo vial El arenal- Guaranda El presente estudio centra su desarrollo en el objetivo de estimar la velocidad de infiltración del agua en el suelo a partir de su granulometría y su textura, utilizando la clasificación de suelos por medio del AASHTO para clasificar los tipos de suelos. Para ello, se realizaron ensayos de granulometría, ensayos de límites de atterberg y el infiltrómetro de cilindro doble para la evaluación de la infiltración. Se analizaron 40 muestras para determinar a través de sus características como tipos de suelo, encontrándose predominantemente el tipo A-2-4 85%, luego A-2-5, A-2-6 y A-2-7. Cada tipo mostró distintas velocidades de infiltración correspondiendo el tipo A-2-4 el de mayor velocidad de infiltración 120–330 mm/h y el tipo A-2-7 el de menor velocidad de infiltración 6–12 mm/h. De tal forma, de modo general, podemos indicar que esta investigación pretende favorecer un estudio geotécnico a modo de caracterizar tipos de suelos a partir de su velocidad de infiltración de agua y su clasificación mecánica a partir de normas técnicas, ya que permite conocer el comportamiento del suelo respecto al agua, información importante para las obras de infraestructura. Esta investigación guarda relación directa con una tesis sobre la determinación de las características mecánicas, características físicas e hidráulicas del pavimento flexible, ya que la clasificación de suelos según SUCS es importante para el diseño de la subrasante en pavimentos flexibles; además, la velocidad de infiltración afecta la manera en que drenará el pavimento y, por lo tanto, su durabilidad y capacidad estructural. Por último, propiedades físicas como la granulometría y límites de atterberg están directamente relacionadas con el comportamiento mecánico del suelo bajo cargas de tránsito. Por último, identificar tipos de suelo como A-2-4 o A-2-7 ayuda a determinar si son adecuados o necesitan mejoramiento para el uso en estructuras de pavimento (Barrigas & Pilamunga, 2017).

CAPÍTULO III. METODOLOGIA.

3.1. Tipo de Investigación.

La investigación se basa en un enfoque cuantitativo, debido a que se recopilarán datos numéricos mediante ensayos realizados tanto en campo como en laboratorio sobre muestras de un pavimento flexible. Su propósito es evaluar las propiedades físicas, mecánicas e hidráulicas de las distintas capas del pavimento, con el fin de establecer un coeficiente de escurrimiento actualizado.

3.2. Diseño de la investigación.

El estudio adopta un diseño descriptivo, ya que pretende caracterizar dichas propiedades a partir de los resultados obtenidos en los ensayos.

3.3. Definición de la muestra.

3.3.1. Población

La población de interés en este estudio hace referencia a las capas granulares que conforman el pavimento flexible del tramo vial que conecta las localidades de El Arenal y Guaranda, en la provincia de Bolívar.

3.3.2. Muestra

La muestra escogida corresponde al material granular de las capas de base, subbase y subrasante, recolectado realizadas a lo largo de la vía con una longitud aproximada de 32 kilómetros. Dichas perforaciones se efectuaron en zonas identificadas como las más adecuadas en términos de accesibilidad y seguridad para la extracción de las muestras requeridas.

3.3.3. Tipo de muestreo

Se implementó un muestreo sistemático estratificado, aplicando un método sistemático al efectuar perforaciones a intervalos regulares a lo largo del tramo vial, y estratificado al tener en cuenta la homogeneidad del material presente en dicho tramo.

3.3.4. Tamaño de la muestra

El tramo vial entre El Arenal y Guaranda tiene una longitud aproximada de 32 kilómetros. A lo largo de este recorrido se realizaron perforaciones cada cierto kilómetro, distribuidas estratégicamente en cinco puntos.

3.3.5. Ubicación de las muestras

A continuación, en la ilustración 4 se indican las respectivas ubicaciones de la extracción de núcleos del pavimento flexible.

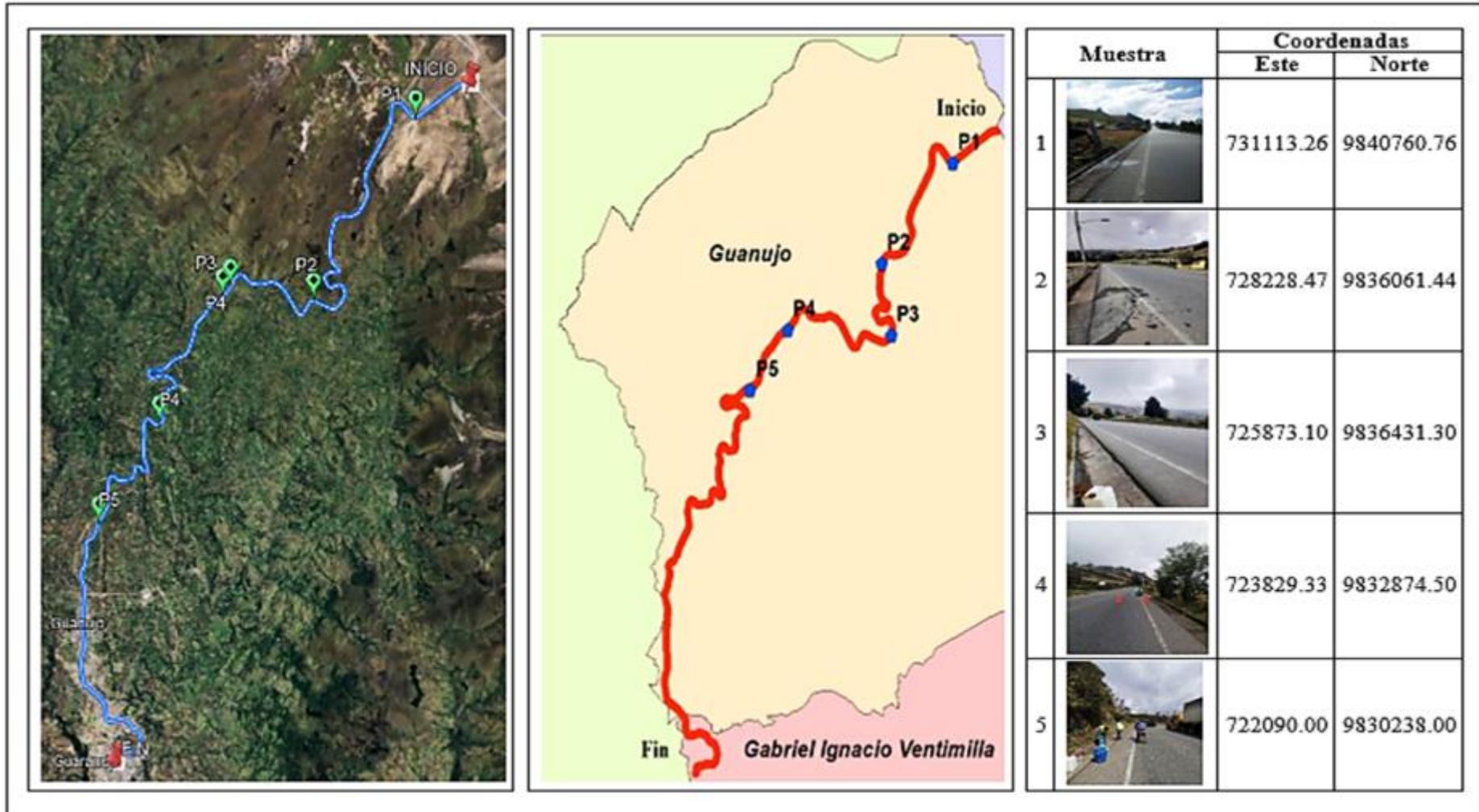


Ilustración 4. Perforaciones de extracción de muestras planificadas. Fuente Propia.

3.4. Diagrama Metodológico.

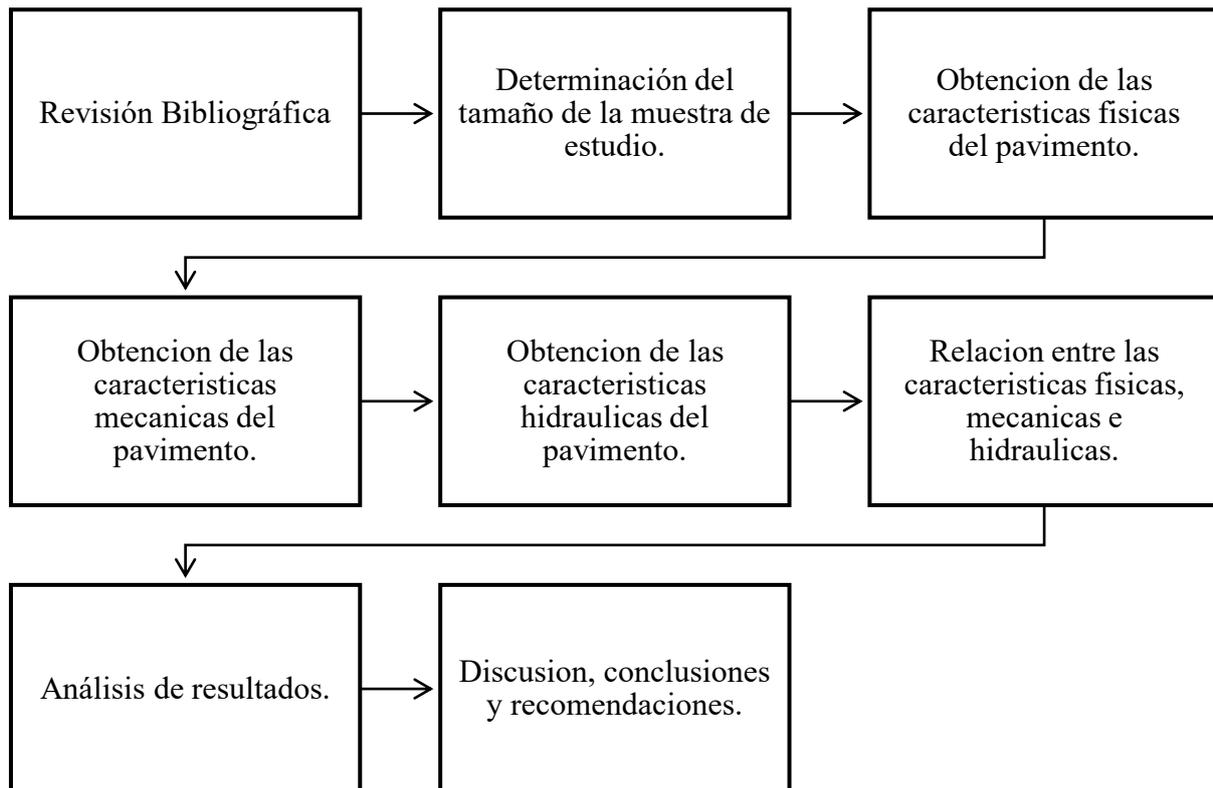


Ilustración 5. Metodología propuesta.

3.5. Procedimientos.

3.5.1. Ensayos de laboratorio

3.5.1.1. Granulometría de materiales granulares

Es el análisis que determina la distribución porcentual de las partículas de un material (como suelo, arena, grava o agregado) según su tamaño, utilizando tamices de diferentes aberturas o métodos de sedimentación (INEN, 2011).

3.5.1.2. Límites de Atterberg

Las fronteras de contenido de agua que separan los estados de consistencia de un suelo fino: líquido, plástico y semisólido. Se determinan mediante ensayos de laboratorio para establecer el límite líquido, límite plástico y límite de contracción (INEN, 2011).

La NTE INEN 0691 describe el método para obtener el límite líquido, que corresponde al contenido de humedad en el cual el suelo cambia de un estado plástico a uno líquido.

La NTE INEN 0692 especifica cómo determinar el límite plástico, el contenido de humedad a partir del cual el suelo empieza a comportarse de forma plástica y el índice de plasticidad, que se calcula como la diferencia entre el límite líquido y el límite plástico.

Estas características permiten clasificar los suelos y comprender su comportamiento ante variaciones de la humedad.

3.5.1.3. Compactación Proctor Estándar

La norma ASTM D698-12e2 (2012) describe el procedimiento para determinar la relación que existe entre el contenido de agua y la densidad máxima de un suelo mediante un compactador estándar. Este ensayo se utiliza comúnmente para evaluar la capacidad de los suelos para compactarse; siendo uno de los ensayos más frecuentes para determinar la densidad seca máxima de un tipo de material y el contenido óptimo de agua que el material ha de llevar para que el suelo adquiera la máxima densidad.

3.5.1.4. Densidad relativa y absorción de materiales granulares

La densidad mide la relación existente entre su masa y el volumen que ocupa, en estado seco, y con la capacidad de desplazar el agua; esta propiedad es fundamental a la hora de evaluar cómo el agregado se comportará en las mezclas de concreto y en la construcción de pavimentos, ya que, además de influir en su resistencia, está relacionada con el desempeño.

La absorción es la cantidad de agua que sujeta el material al ser inmerso en ella, durante un tiempo determinado. Este parámetro es crucial, ya que un agregado con alta absorción puede alterar la cantidad de agua en la mezcla de concreto, afectando así su calidad.

Para agregados finos se sigue la norma INEN 856 (2010a), y para agregados gruesos se realiza conforme a la norma INEN 857 (2010b), mismos que en los anexos 8 y 9 se pueden apreciar de mejor manera.

3.5.1.5. Desgaste.

En la norma INEN 852 se establece que los agregados deben cumplir con unas determinadas características de desgaste determinadas por el ensayo de abrasión Los Ángeles tal como hace referencia a la norma en específico, norma que

requiere la realización del ensayo de abrasión de la Máquina de Los Ángeles según procedimiento correspondiente a la norma ASTM C131 para áridos que pasen el tamiz de 37,5 mm y la norma ASTM C535 para áridos que no lo pasen.

La Máquina de Los Ángeles, tal como aparece en la fotografía anterior, es un tipo de equipo de laboratorio que permite evaluar mediante el ensayo de abrasión e impacto la resistencia de los agregados al desgaste y a la fragmentación. Puede ser considerada la aplicación práctica de dicho ensayo en la construcción de carreteras, el concreto y las obras civiles, siendo fundamental la durabilidad de los áridos que repercutirá en la calidad de la obra final.

Características del equipo:

- Tambor cilíndrico de acero, de un determinado diámetro y longitud (en el caso del ingenio: aproximadamente 70 cm de diámetro, aproximadamente 50 cm de longitud).
- Bolas de acero de forma esférica y de peso específico (en general: de 390 a 445 gramos cada una).
- Velocidad de la máquina, manteniéndola a una velocidad constante de 30 a 33 revoluciones por minuto.
- Puerta de carga, la que permite introducir los agregados y las bolas de acero.
- Contador de vueltas, el que detiene automáticamente la máquina al alcanzar el número de revoluciones requerido.

3.5.1.6. Estabilidad y flujo Método Marshall

El flujo Marshall es la medida de la deformación total de una mezcla asfáltica que se produce durante el ensayo de estabilidad y abarca todo el comportamiento de la mezcla, tanto el elástico como el plástico. El flujo se determina a partir del punto inicial en el que la curva de carga-deformación presenta una tangente que se secciona con el eje de las deformaciones hasta el punto en el que la curva de carga-deformación comienza a estabilizarse, coincidiendo casi siempre con la carga máxima. En el caso de no existir fallo definido, el flujo se determina desplazando 0.01 pulgadas (equivalente a unos 1.5 mm) de la tangente inicial hacia la derecha. Los valores de flujo más allá del rango asignado pueden suponer una mezcla plástica muy elevada o una fragilidad no estructural.

La estabilidad Marshall, en cambio, es la carga máxima que puede soportar una mezcla asfáltica bajo una aplicación de carga a velocidad de deformación

constante. También puede considerarse como el punto en el que el incremento de carga comienza a disminuir, generando una tendencia horizontal en la curva de carga. La magnitud de la estabilidad depende de factores como el tipo de agregado, el contenido y tipo de asfalto, y las condiciones de compactación de la mezcla.

Para realizar el ensayo se prepararán probetas cilíndricas compactadas mediante golpes de martillo Marshall. Se acondicionarán las muestras sumergiéndolas en un baño de agua a 60 ± 1 °C durante 30 a 40 minutos. Se colocará la probeta en el dispositivo Marshall y se aplicará una carga a una velocidad constante de 50 mm/min hasta alcanzar el fallo. Se registrará la carga máxima (estabilidad) y se medirá la deformación correspondiente (flujo). Finalmente, se analizarán los resultados comparándolos con los requisitos establecidos para asegurar el cumplimiento de las especificaciones de la mezcla asfáltica (ASTM D6927, 2015).

3.5.1.7. Volumetría y ensayos de desempeño en núcleos

- **Método de prueba para determinar la gravedad específica bruta y densidad de la mezcla asfáltica compactada**

El propósito de este procedimiento es calcular la gravedad específica bruta (bulk) y la densidad de una mezcla asfáltica compactada, parámetros esenciales para determinar sus propiedades volumétricas y su peso específico.

Densidad bulk

$$\rho_{bulk} = \frac{W_s}{W_{SSS} - W_{sum}}$$

W_s = *Peso Seco* (g)

W_{SSS} = *Peso en estado saturado superficialmente seco* (g)

W_{sum} = *Peso sumergido* (g)

Este método es fundamental para evaluar la calidad de la compactación y el desempeño estructural de la mezcla en servicio. Para la prueba se utilizará equipo especializado, incluyendo:

- Una balanza con resolución de 0.1 g, que permita pesar el espécimen suspendido en agua.

- Un baño de agua a temperatura constante de 25 ± 1 °C.
- Un termómetro con resolución mínima de 0.5 °C.
- Una canastilla apropiada para el sumergido o el sostén de las muestras. •
Método de ensayo para determinar la gravedad específica teórica máxima y la densidad de la mezcla asfáltica.
- **Método de prueba para determinar la gravedad específica teórica máxima y densidad de la mezcla asfáltica.**

El método de determinación de la gravedad específica teórica máxima (Gmm) y la densidad de la mezcla asfáltica tiene la finalidad de calcular la densidad máxima de la mezcla sin vacíos de aire. El equipo utilizado en el método es el matraz de vacío, la bomba de vacío, la balanza de precisión y el baño de agua (25 ± 1 °C). El procedimiento consiste en disgregar la mezcla, aplicar vacío para eliminar el aire atrapado, llenar el matraz con agua y pesar la mezcla tal como es, para finalmente calcular el volumen desplazado. La Gmm se obtiene dividiendo la masa seca de la mezcla entre la masa de agua desplazada, lo que permite conocer la densidad máxima teórica sin vacíos.

Densidad teorica maxima

$$\rho_{rice} = \frac{C}{C + F - E}$$

$C =$ Peso de la mezlccla (g)

$F =$ Peso del picnómetro calibrado a la temperatura de prueba (g)

$E =$ Peso del picnómetro con mezcla aforado (g)

3.5.2. Ensayos in situ

3.5.2.1. Extracción de núcleos

La extracción de núcleos de pavimento flexible implica perforar una parte del pavimento utilizando una perforadora de núcleo, lo que permite obtener cilindros de material asfáltico que serán analizados posteriormente en el laboratorio. Estas muestras se utilizan para evaluar características como la densidad, el contenido de aire y la homogeneidad del material asfáltico (ASTM D5361, 2006).

3.5.2.2. Macro textura del pavimento

La macrotextura de un pavimento hace referencia a las heterogeneidades o rugosidades de la superficie a una escala superior a la macrotextura. De este modo, estas particularidades afectan a la capacidad de los neumáticos para alcanzar el contacto de la superficie de la carretera, aspecto importante para el rendimiento de la tracción y el control del deslizamiento del vehículo, en especial en condiciones húmedas.

3.5.2.3. Elasticidad y rigidez in situ – Método “GeoGauge”

Es un instrumento portátil diseñado para la medición de la rigidez estructural y el módulo de Young de los suelos y los materiales no estabilizados directamente sobre el terreno o la obra en construcción. Consideramos que este dispositivo es especialmente útil en obras de construcción de carreteras y pavimentos e infraestructuras en general; pues permite, sin necesidad de perforar ni realizar ensayos invasivos, estimar la calidad de la compactación y la capacidad de carga del suelo.

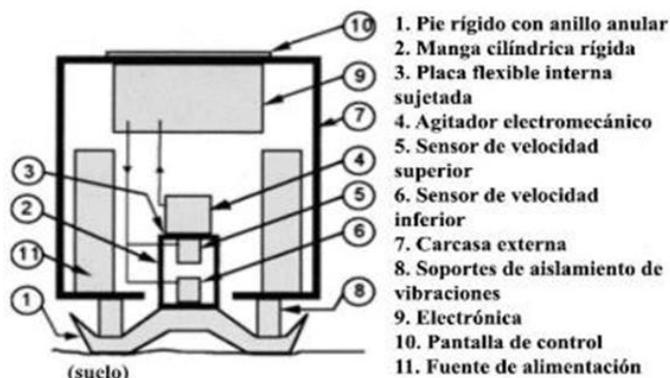


Ilustración 6. Esquema gráfico del GeoGauge. Adaptado de: ASTM, 2007.

La rigidez de la capa, que es una medida de la resistencia a la flexión, se utiliza para determinar la deflexión necesaria que asegure que las cargas en tránsito se distribuyan de manera eficiente desde la superficie del pavimento hasta las capas inferiores, como la base y la subbase. El módulo de Young, una propiedad del material mide su compresibilidad y garantiza que cada material utilizado en la construcción se comportará según lo proyectado.

El GeoGauge funciona mediante la aplicación de vibraciones a 25 frecuencias específicas, lo que genera pequeñas deflexiones en el material. Luego, mide el desplazamiento resultante para determinar la rigidez del suelo.

3.5.2.4. Tasa de infiltración en pavimento flexible

El método del infiltrómetro de doble anillo consiste en insertar dos cilindros concéntricos en el suelo, llenándolos parcialmente con agua u otro líquido. Se mantiene el nivel del líquido constante, y la cantidad de agua que se debe agregar al anillo interior para mantener dicho nivel se utiliza como medida de la tasa de infiltración del suelo. Este procedimiento también se aplica en pavimentos rígidos, pero con consideraciones especiales para su colocación en la superficie (ASTM, 2003).

Las dimensiones de los dos cilindros fueron las siguientes: el diámetro del cilindro exterior era de 450 mm, el del cilindro interior de 250 mm, y ambos tenían una altura de 600 mm. Los cilindros fueron fabricados con acero galvanizado de 1.5 mm de grosor, con un peso total de 22.5 kg.

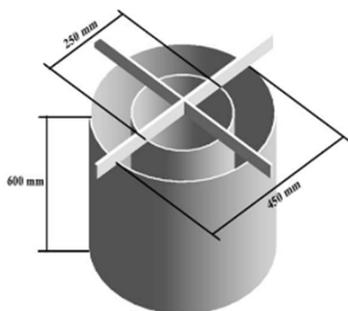


Ilustración 7. Esquema Infiltrómetro de doble anillo. Fuente: (Cepeda & Rosero, 2024).

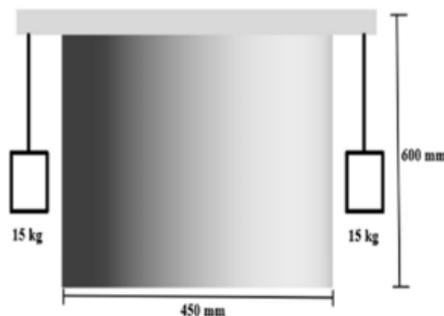


Ilustración 8. Vista lateral del Infiltrómetro. Fuente: (Cepeda & Rosero, 2024).

Para asegurar un buen contacto entre la base del infiltrómetro de doble anillo y la superficie a ensayar, se colocó un caucho (burlete) con alma metálica en el contorno de ambos cilindros. Este caucho se eligió por su flexibilidad para ajustarse al borde del cilindro, como se muestra en las ilustraciones 9 y 10, que ilustran cómo está conformado.



Ilustración 9. *Perfiles burletes alambrados 341.*



Ilustración 10. *Vista lateral y superior del caucho*

Una vez colocado el caucho en los cilindros, este se sitúa en los puntos de control donde se realizará el ensayo. En los cuatro extremos portantes del infiltrómetro se colocará un peso de 15 kg por lado, dando un total de 60 kg, con el fin de evitar la filtración de agua por los contornos de los cilindros.



Ilustración 11. *Colocación del caucho en el infiltrómetro.*



Ilustración 12. *Colocación de silicona en el caucho.*

A fin de asegurar una mejor seguridad, se procederá a aplicar el adhesivo sellador en los límites acotados del caucho así como en el resguardo de la unión entre el caucho y el cerrado de la goma que lo inicia y permite evitar el paso de agua entre el pavimento rígido y el caucho; para concluir, la silicona se distribuirá en los contornos inferiores de los cilindros, aplicando este material mediante una pistola para cartuchos.

CAPÍTULO IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.

4.1. PROPIEDADES FÍSICAS DEL PAVIMENTO FLEXIBLE.

4.1.1. Comparativa con datos geológicos.

Los datos obtenidos en este estudio sobre la caracterización del terreno natural se comparan con los datos presentes en la base cartográfica nacional, mostrando en la Tabla 4 las similitudes y discrepancias encontradas.

Tabla 3. *Análisis comparativo entre los ensayos de laboratorio y la información proporcionada por el ministerio.*

Muestra	Clasificación SUCS	Caracterización del suelo (MAG, 2015)	Formación Geológica (MAG, 2015)	Descripción de la Formación (IGM, 2022)
P1	SP	ARENA	Piroclastos del Chimborazo	Los piroclastos del Chimborazo son fragmentos volcánicos (ceniza, lapilli, bloques y bombas) que fueron expulsados durante erupciones explosivas del volcán Chimborazo. Estos fragmentos pueden variar en tamaño, desde ceniza (menos de 2 mm) hasta bloques y bombas (más de 64 mm).
P4	SC	ARENO FRANCOSO	Formación Pisayambo	La Formación Pisayambo, aflorando al este de la Cuenca Latacunga-Ambato, se extiende desde Píllaro hasta la Laguna de Anteojos y cubre la Cordillera Real del Parque Nacional Llanganates. Su origen volcánico, aún sin precisar, se asocia a fisuras de la Cordillera Real. De edad Pliocénica, se encuentra sobre las Formaciones Macuchi o Yunguilla y bajo la Formación Latacunga.
P5	SW	ARENO FRANCOSO	Volcánicos Guaranda	La Formación Volcánicos Guaranda (PG) se refiere a tobas andesíticas de edad cuaternaria, con permeabilidad baja a media, que pueden estar tectonizadas y ser fácilmente deleznable. Se encuentran comúnmente en la región de Guaranda, Ecuador, y son un componente importante de la geología local.

4.1.2. Granulometría.

Las tablas 4, 5 y 6 presentan los porcentajes de material que atraviesan cada tamiz, junto con su clasificación SUCS y el tipo de material correspondiente a la base, subbase y subrasante del pavimento flexible, respectivamente:

Tabla 4. Resultados del análisis granulométrico – Capa base.

Tamiz (ASTM)	Abertura (mm)	P1 % PASA	P4 % PASA	P5 % PASA	Denominación
1 1/2"	38.100	100.00%	96.73%	100.00%	GRAVA GRUESA
1"	25.400	98.20%	93.32%	97.60%	
3/4"	19.000	96.02%	86.05%	94.41%	
1/2"	12.500	87.95%	71.82%	89.96%	GRAVA FINA
3/8"	9.500	80.94%	61.37%	83.72%	
No. 4	4.750	58.89%	39.69%	54.42%	ARENA GRUESA
No. 10	2.000	26.84%	20.49%	32.56%	
No. 40	0.425	6.64%	3.50%	9.63%	ARENA FINA
No. 100	0.150	1.52%	1.29%	2.84%	
No. 200	0.075	0.37%	0.60%	1.20%	LIMOS
Coefficiente de Uniformidad (CU)		8.944	11.828	12.438	
Coefficiente de Curvatura (CC)		1.754	1.348	1.199	
Clasificación SUCS		SW	GW	SW	
Clase de Base		Clase 4	Clase 2	Clase 4	

Tabla 5. Resultados del análisis granulométrico – Capa Subbase.

Tamiz (ASTM)	Abertura (mm)	P1 % PASA	P4 % PASA	P5 % PASA	Denominación
1 1/2"	38.100	100.00%	100.00%	97.56%	GRAVA GRUESA
1"	25.400	96.76%	98.46%	94.83%	
3/4"	19.000	92.70%	95.57%	92.36%	
1/2"	12.500	77.23%	89.04%	88.28%	GRAVA FINA
3/8"	9.500	68.64%	84.65%	84.97%	
No. 4	4.750	45.41%	67.98%	68.41%	ARENA GRUESA
No. 10	2.000	26.61%	46.14%	48.84%	
No. 40	0.425	9.13%	13.77%	17.83%	ARENA FINA
No. 100	0.150	2.60%	3.03%	4.04%	
No. 200	0.075	1.19%	1.45%	1.64%	LIMOS
Coefficiente de Uniformidad (CU)		15.987	11.743	13.922	
Coefficiente de Curvatura (CC)		1.621	0.836	0.791	
Clasificación SUCS		GW	SC	SW	
Clase de Subbase		Clase 2	Clase 2	Clase 2	

Tabla 6. Resultados del análisis granulométrico – Capa Subrasante.

Tamiz (ASTM)	Abertura (mm)	P1 % PASA	P4 % PASA	P5 % PASA	Denominación
1 1/2"	38.100	100.00%	100.00%	100.00%	GRAVA GRUESA
1"	25.400	100.00%	100.00%	100.00%	
3/4"	19.000	100.00%	100.00%	100.00%	
1/2"	12.500	100.00%	100.00%	100.00%	GRAVA FINA
3/8"	9.500	100.00%	100.00%	100.00%	
No. 4	4.750	100.00%	100.00%	100.00%	ARENA GRUESA
No. 10	2.000	97.574%	97.75%	91.106%	
No. 40	0.425	62.939%	64.750%	63.555%	ARENA FINA
No. 100	0.150	38.049%	36.130%	36.955%	
No. 200	0.075	22.202%	19.82%	19.098%	LIMOS
Coefficiente de Uniformidad (CU)		4.440	7.494	6.726	
Coefficiente de Curvatura (CC)		0.752	0.851	0.960	
Clasificación SUCS		SP	SC	SW	

A continuación, se muestran las curvas granulométricas generadas a partir de las muestras analizadas en todo el segmento vial, tanto para la base, la subbase como para la subrasante. Es importante mencionar que, al realizar el ensayo granulométrico, se encontraron las mismas características, tanto en el porcentaje de agregados como en el tipo de material, en los puntos P2 y P3, los cuales presentan similitud con los puntos P1 y P4, respectivamente. Por esta razón, los demás ensayos se realizaron únicamente en los puntos P1, P4 y P5, tomando en cuenta lo antes descrito.

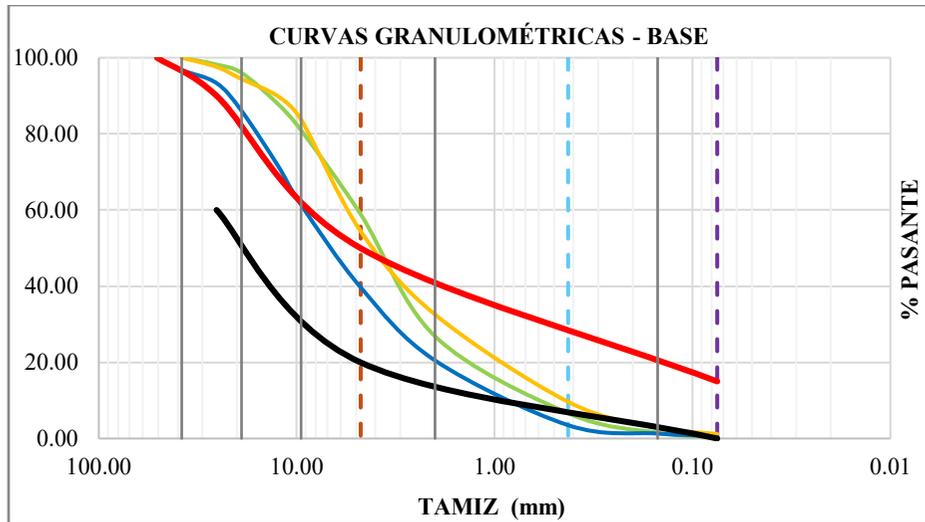


Ilustración 13. *Curvas Granulométricas – Capa Base.*

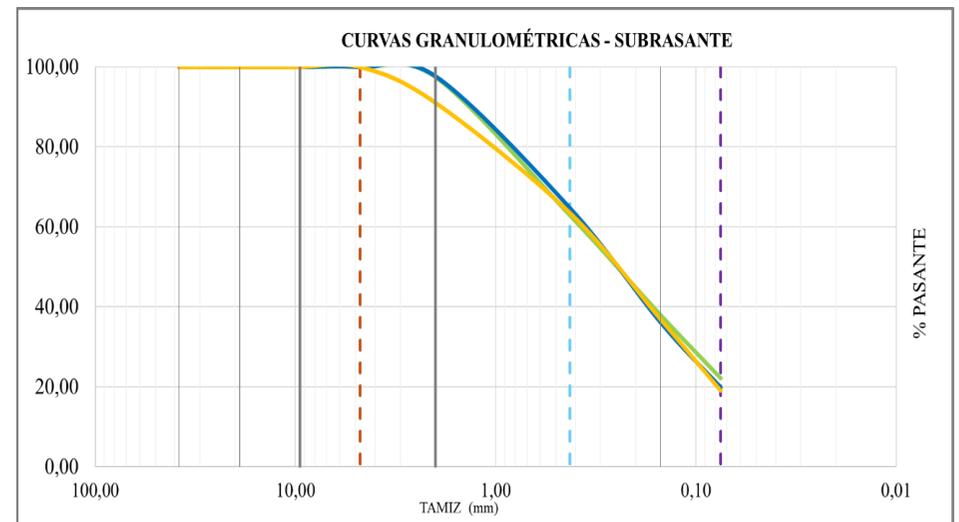


Ilustración 15. *Curvas Granulométricas – Capa Subrasante.*

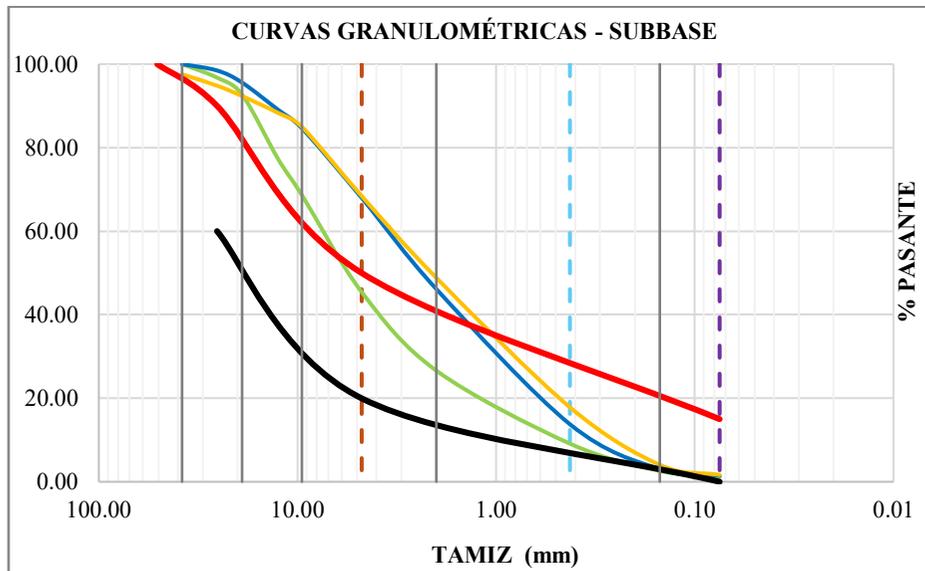


Ilustración 14. *Curvas granulométricas – Capa Subbase.*

- Tamiz No. 4 (SUCS) Divide gravas de arena
- Tamiz No. 200 (SUCS). Divide Limo de arena
- Tamiz No. 40 (SUCS). Divide Arena Gruesa de Fina
- P1 % PASA
- P4 % PASA
- P5 % PASA
- Lim. Sup
- Lim. Inf

Leyenda de las Curvas Granulométricas

Las ilustraciones 13 y 14 muestran las curvas granulométricas correspondientes a las capas de base y subbase. En la ilustración 13, las muestras de base presentan un comportamiento irregular, alternando posiciones dentro y fuera de los rangos establecidos para las clases 4 y 2; destacándose que los puntos P1, P4 y P5 oscilan entre ambos límites. La ilustración 14, por otro lado, pone de manifiesto que dichas curvas de P1, P4 y P5 cumplen con los valores de los parámetros requeridos y, por tanto, corresponde a clasificarla como subbase clase 2.

El análisis granulométrico pone de manifiesto que la base consiste principalmente en arena, como evidencia el hecho de que más de la mitad del material pase el tamiz N°4 (el destinado a diferenciar las arenas de las gravas), mientras que la subbase exhibe menos del 50% de paso por el tamiz crítico, evidenciando un contenido de gravas superior al de la base.

La ilustración 15 muestra que el análisis granulométrico de la subrasante exhibe variaciones en las curvas de las tres muestras objeto de análisis, resultado de la heterogeneidad de los suelos que se forman en el estrato analizado. No obstante, se identifica un comportamiento recurrente: más del 60% del material atraviesa el tamiz N°4, lo que indica una composición predominantemente arenosa con presencia de limos y la ausencia de gravas en esta capa.

4.1.3. Ensayo límite líquido y plástico.

Tabla 7. Resultados de las características plásticas de las capas granulares en pavimentos flexibles.

Número de Muestra		Límite Líquido	Límite Plástico	Índice de Plasticidad	Presencia de Plasticidad
Base	1	23.67%	-	-	NP
	4	24.28%	-	-	NP
	5	32.20%	-	-	NP
Subbase	1	33.10%	-	-	NP
	4	42.60%	-	-	SI
	5	40.87%	-	-	NP
Subrasante	1	50.03%	45.88%	4.15%	SI
	4	48.87%	44.95%	3.92%	SI
	5	49.69%	45.84%	3.85%	SI

Mientras que en el análisis de los límites de los estados, la Tabla 7 destaca la presencia del límite líquido con valores más altos en las capas más hondas y una menor resistencia, la ausencia del límite plástico pone de manifiesto que el objetivo del ensayo plástico de determinar la formación de cilindros de 3 mm de diámetro con el material no fue alcanzado, ya que se obtuvieron valores nulos. De ello se deduce que la base y la subbase granular son materiales no plásticos (NP). La subrasante, que es la representación de un terreno natural estabilizado para la colocación de las capas superiores del pavimento flexible, pone de manifiesto características propias de los dos estratos analizados antes. Sin embargo, en las muestras de la subrasante se utilizó la carta de plasticidad para identificar el tipo de material fino presente en el terreno natural. Nos dio como resultado que tiene presencia de limos. Tal como se muestra en la ilustración 17.

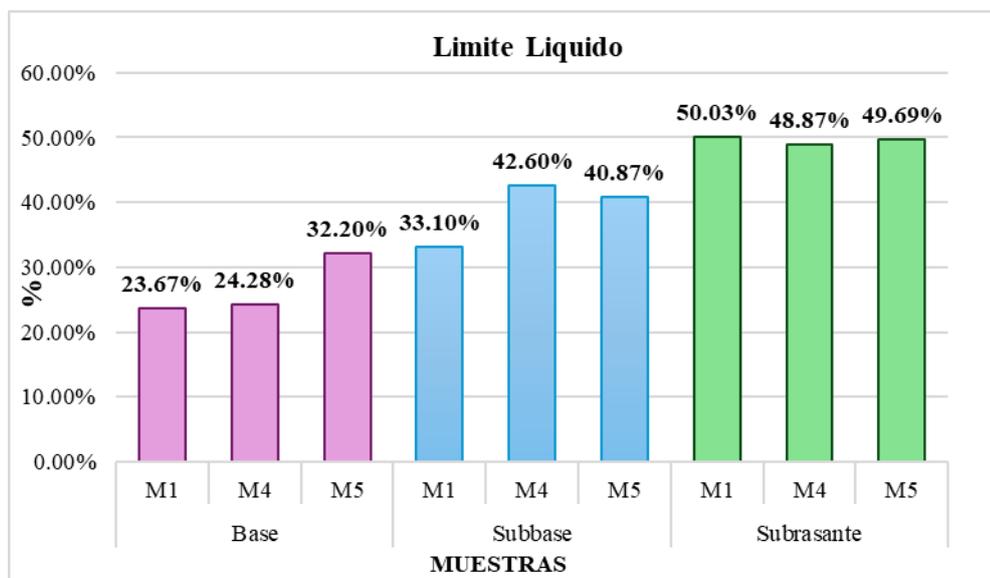


Ilustración 16. Limite liquido correspondiente a la Sub-Rasantes, Subbases y Bases.

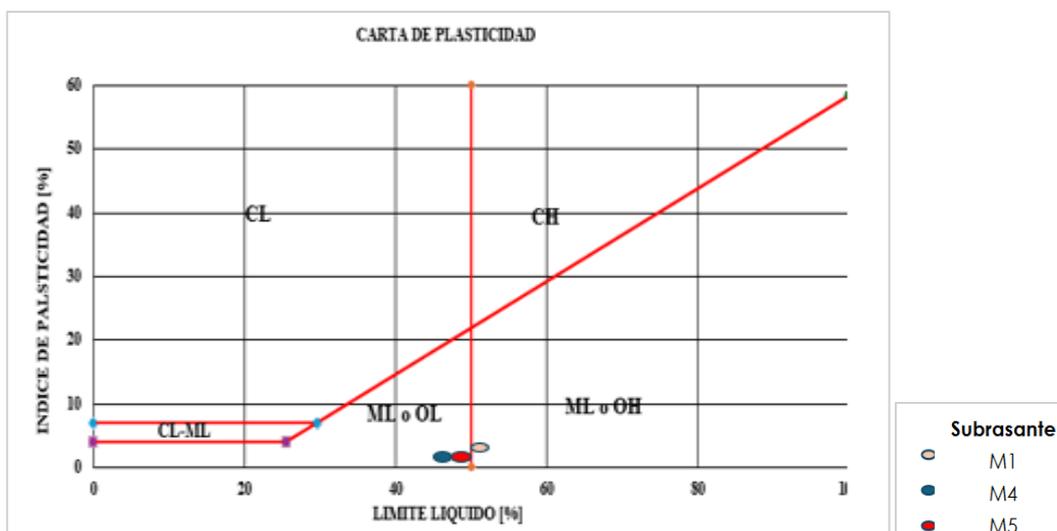


Ilustración 17. Carta de plasticidad para las muestras de subrasante.

4.1.4. Compactación Proctor estándar.

En el ensayo Proctor se presentan las curvas de compactación correspondientes a las tres muestras tomadas de las dos capas granulares y de la subrasante del pavimento flexible en el tramo estudiado. La Tabla 8 muestra un resumen de los resultados obtenidos en el ensayo Proctor para las muestras de la base, subbase y subrasante.

Tabla 8. Resultados del ensayo Proctor estándar.

Densidad Máxima Seca y Humedad Óptima				
Características	Estrato	Muestras		
		1	4	5
Humedad Óptima [%]	Base	11.37%	14.28%	16.45%
Densidad Máxima Seca [T/m ³]		1.80	1.85	1.74
Humedad Óptima [%]	Subbase	12.58%	26.26%	25.53%
Densidad Máxima Seca [T/m ³]		1.81	1.66	1.50
Humedad Óptima [%]	Subrasante	32.83%	33.14%	30.04%
Densidad Máxima Seca [T/m ³]		1.28	1.32	1.31

A continuación, en las ilustraciones siguientes se presentan las curvas de compactación correspondientes a las capas granulares y a la subrasante.

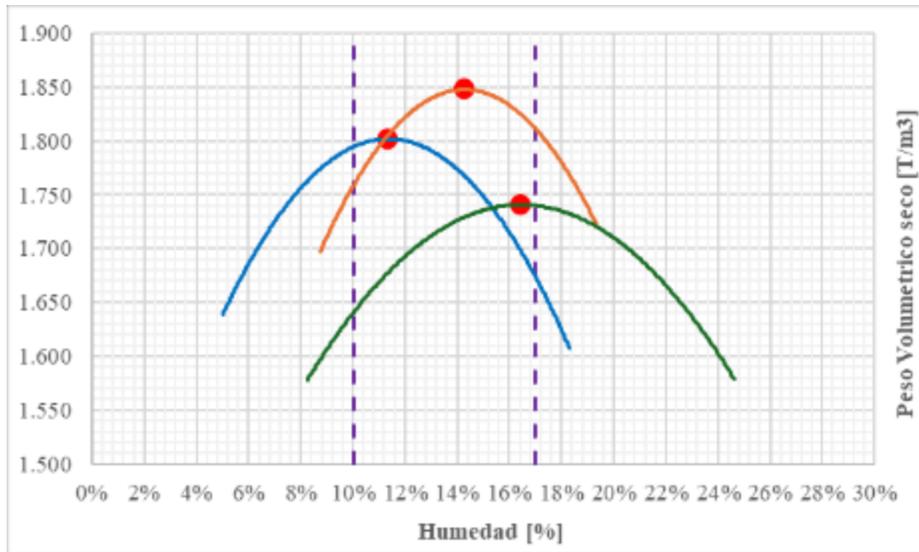


Ilustración 18. Curvas de compactación de la Base.

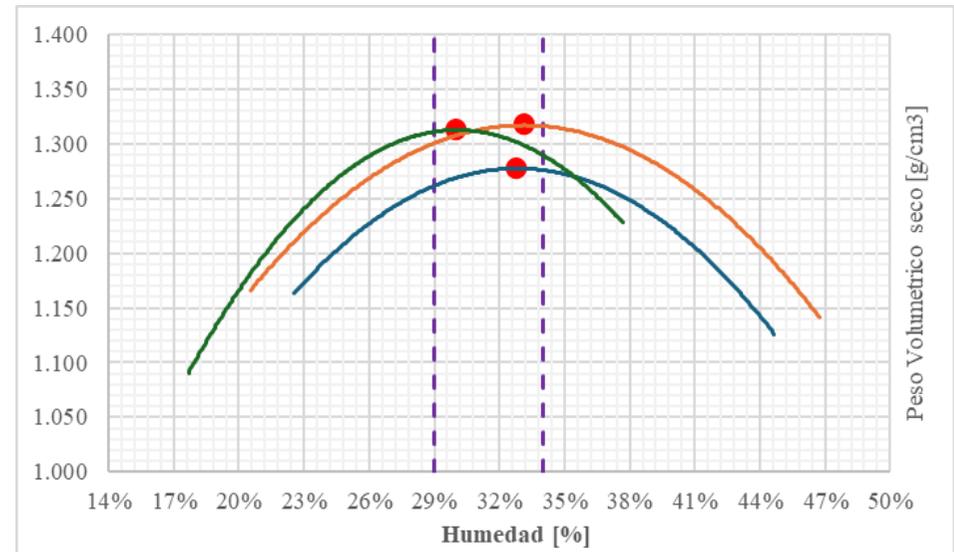


Ilustración 20. Curvas de compactación de la Subrasante.

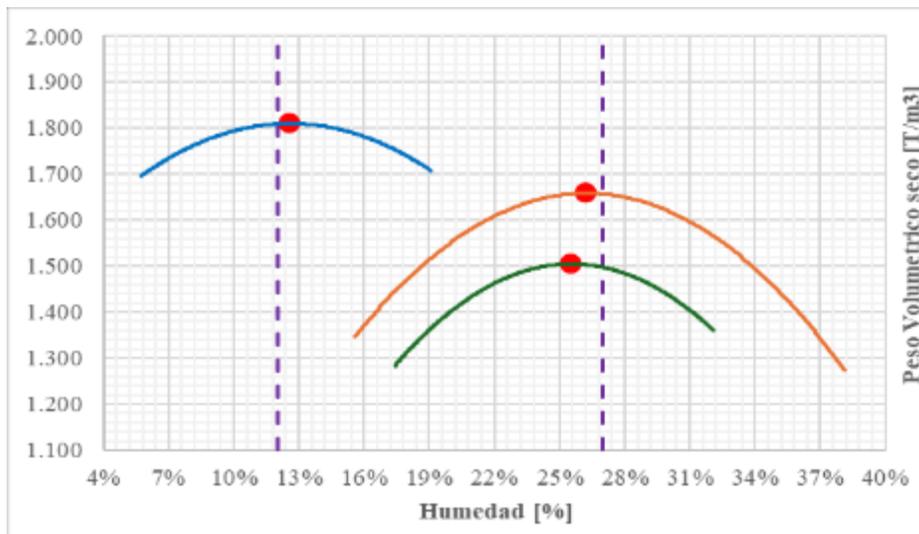


Ilustración 19. Curvas de compactación de la Subbase.

- Densidad Seca Maxima
- - - Rango de Humedades Optimas
- M1
- M2
- M3

Leyenda de las curvas de compactación.

El análisis de los gráficos de compactación llevados a cabo con las muestras de base, subbase y subrasante, correspondientes a la vía El Arenal - Guaranda, indica que existe una diferencia ostensible en cuanto a los contenidos de humedad óptima que se necesitarían para conseguir la densidad máxima seca del suelo de cada capa. En las capas de subbase se demandan mayores contenidos de humedad que oscilan entre el 12% y el 26% y, en el caso de la base, niveles mínimos de contenidos de humedad, el cual oscilaría entre el 11% y el 16%. La subrasante por su parte, que se caracteriza por ser más rica en material fino y que en algunos casos presenta arenas en sus granulometrías, demanda incluso más humedad que los otros estratos, los cuales sería mayores que el 30% y el 33%. Las curvas de compactación de base y subbase muestran variaciones tanto en la humedad óptima como en la densidad máxima seca.

4.1.5. Densidad y absorción del agregado (Grueso y fino).

Las tablas 9 y 10 muestran los resultados de los ensayos de densidad y absorción realizados tanto en los áridos gruesos como en los áridos finos de las capas base, subbase y subrasante. En el caso de la subrasante, solo se efectuó el ensayo en los materiales finos, ya que no se encontraron áridos gruesos en esta capa. El material extraído de la subrasante presenta un mayor porcentaje de absorción.

Tabla 9. Resultados de densidad y absorción del agregado fino.

Material Fino					
Muestra	Capa	Densidad seca al horno [g/cm³]	Densidad saturada superficialmente seca [g/cm³]	Densidad aparente [g/cm³]	Absorción del material [%]
P1	Base	1.61	1.64	1.66	2.04%
P4		2.18	2.21	2.24	1.21%
P5		2.11	2.14	2.16	1.01%
P1	Subbase	1.71	1.76	1.81	3.48%
P4		2.08	2.12	2.17	2.03%
P5		1.30	1.33	1.34	2.66%
P1	Subrasante	1.42	1.48	1.50	3.95%
P4		2.23	2.32	2.46	4.14%
P5		1.64	1.70	1.75	3.67%

Tabla 10. Resultados de densidad y absorción del agregado grueso.

Material Grueso					
Muestra	Capa	Densidad seca al horno [g/cm³]	Densidad saturada superficialmente seca [g/cm³]	Densidad aparente [g/cm³]	Absorción del material [%]
P1	Base	2.28	2.39	2.57	4.91%
P4		2.53	2.62	2.79	3.71%
P4	Subbase	2.37	2.49	2.68	4.89%

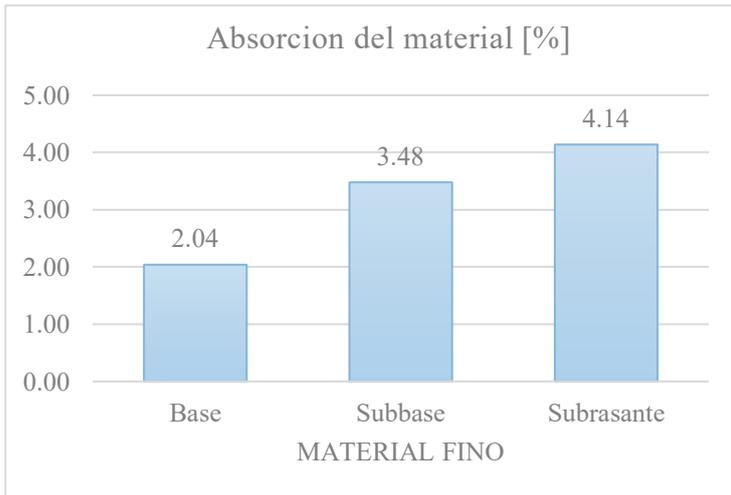


Ilustración 21. Absorción material fino.

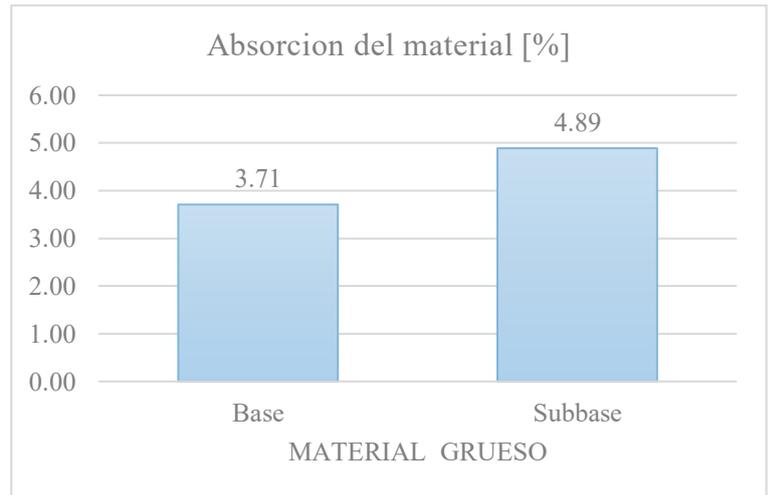


Ilustración 22. Absorción material grueso.

4.1.6. Abrasión.

El promedio del porcentaje de desgaste por abrasión ese tipo de agregado se muestra en la Tabla 11, en la que se observó una abrasión de un 29,78 %, cumpliendo así con lo exigido relacionado con el MOP (Ministerio de Obras Públicas), el cual establece que no debe ser superior al 40 % en el caso de materiales de base.

Tabla 11. Resultados de la degradación en Base.

Muestra	Clase	Esferas	Revoluciones	Degradación [%]
P1				32.84%
P4	B	11	500	26.26%
P5				30.24%
PROMEDIO				29.78%

4.1.7. Macrotextura.

De acuerdo con el MOP, el valor mínimo requerido en el ensayo de macrotextura, utilizando el círculo de arena, es de 0.5 mm. Los resultados obtenidos en esta prueba superan dicho umbral establecido, lo que indica que las mezclas permeables presentan una rugosidad adecuada. Para el ensayo se empleó un volumen de arena de 25,000 mm³.

Tabla 12. Resultado del ensayo del círculo de arena.

Nº Punto	Altura (mm)
Punto 1	0.666
Punto 2	0.577
Punto 3	0.635
Punto 4	0.634
Punto 5	0.585
Promedio	0.619

La Ilustración 23 presenta los valores obtenidos en el ensayo del círculo de arena para determinar la rugosidad de tramo vial.

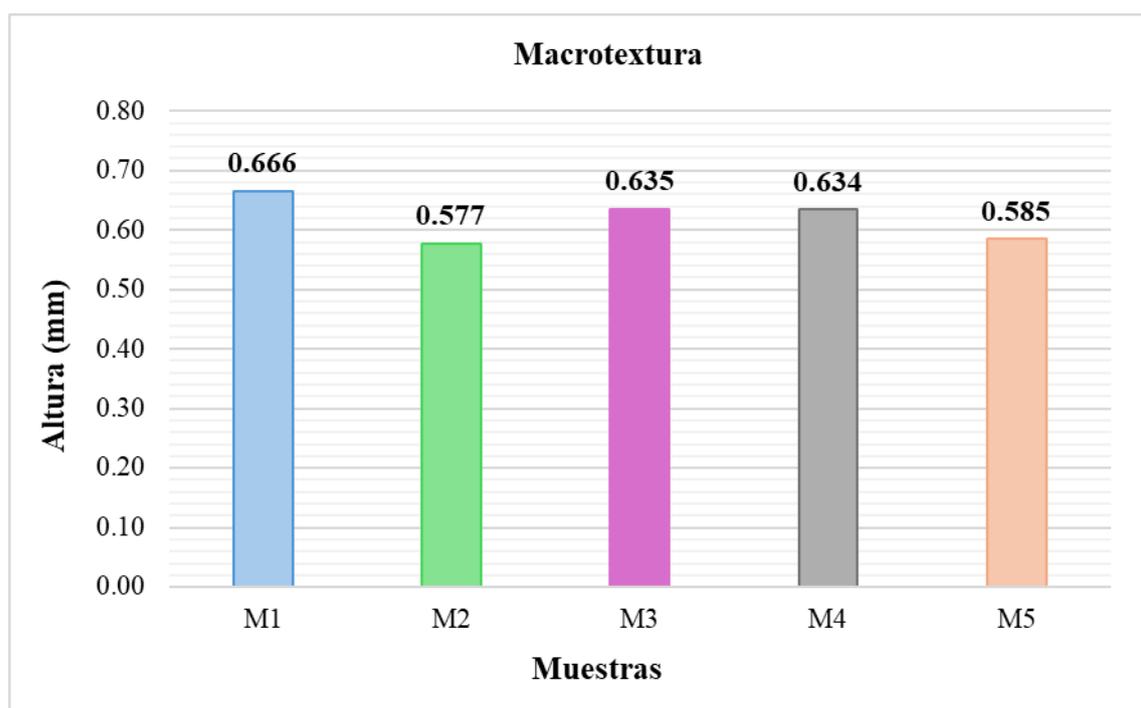


Ilustración 23. Macrotextura del pavimento flexible.

4.1.8. Datos núcleos.

Tabla 13. Resultados de caracterización de núcleos.

Briqueta	Coordenada X	Coordenada Y	Elevación Z	Diámetro (cm)	Altura (cm)
Núcleo 1	727512.20	9836187.09	3683.00	9.50	12.50
Núcleo 2	725805.14	9836345.08	3592.00	9.50	12.50
Núcleo 3	725011.84	9835613.98	3580.00	9.50	19.50
Núcleo 4	724150.08	9834449.04	3531.00	9.50	18.00
Núcleo 5	723908.03	9833192.21	3359.00	9.50	18.00

4.1.9. Densidades de núcleos.

En la tabla 14 se observa la densidad bruta resulta inferior a la densidad teórica máxima, la diferencia entre ambos valores refleja la cantidad de vacíos presentes o, en otras palabras, la eficiencia del proceso de compactación.

Tabla 14. Resumen de resultados densidad bruta (bulk) y teórica máxima (rice).

Briqueta	Densidad bruta (g/cm ³)	Densidad teórica máxima (g/cm ³)
Núcleo 1	2.374	2.508
Núcleo 2	2.395	2.496
Núcleo 3	2.379	2.491
Núcleo 4	2.367	2.457
Núcleo 5	2.356	2.451
PROMEDIO	2.374	2.481

4.1.10. Resultados de volumetría de núcleos.

La Tabla 15 muestra que, al presentar una absorción menor al 2%, los especímenes se consideran no absorbentes.

Tabla 15. Volumetría y vacíos de núcleos.

Briqueta	volumen del espécimen (cm ³)	% de vacíos	Volumen de Aire (cm ³)	Humedad	Absorción
Núcleo 1	570.602	4.56%	30.550	0.14%	0.34%
Núcleo 2	567.057	4.05%	22.969	0.15%	0.35%

Núcleo 3	563.513	4.51%	25.434	0.14%	0.34%
Núcleo 4	559.969	3.67%	20.559	0.14%	0.34%
Núcleo 5	567.057	3.87%	21.954	0.14%	0.33%
PROMEDIO	565.64	4.13%	24.29	0.14%	0.34%

La Ilustración 24 y 25 presenta los valores de densidades obtenidos en el ensayo de núcleos donde se determinó la densidad bulk y la densidad máxima seca del pavimento flexible, al igual que el porcentaje de humedad y absorción.

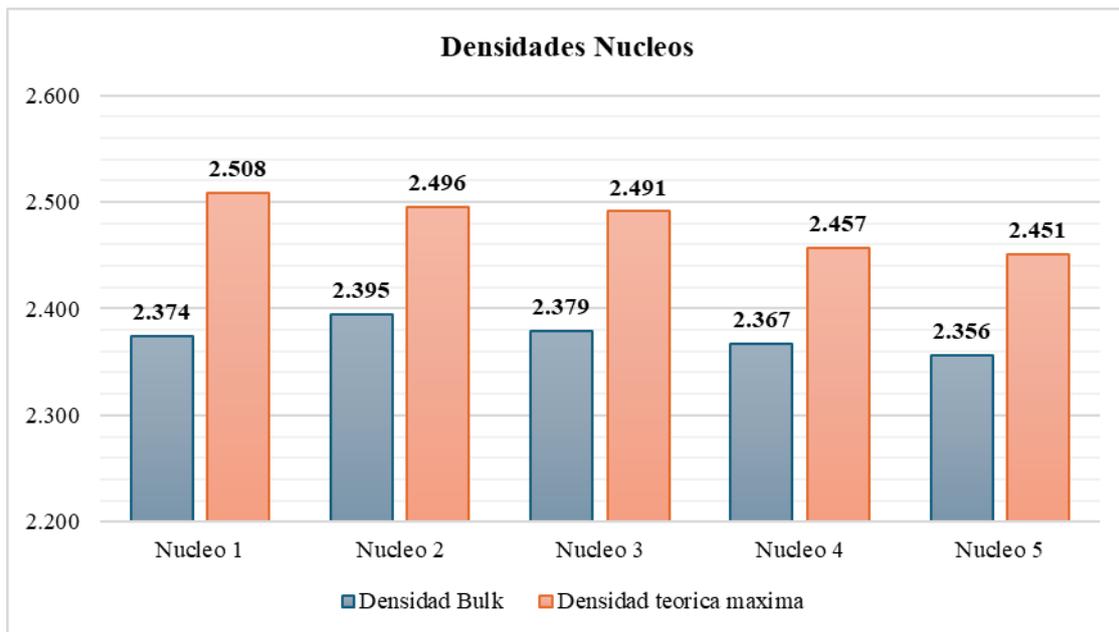


Ilustración 24. Resultados obtenidos de densidades en los núcleos.

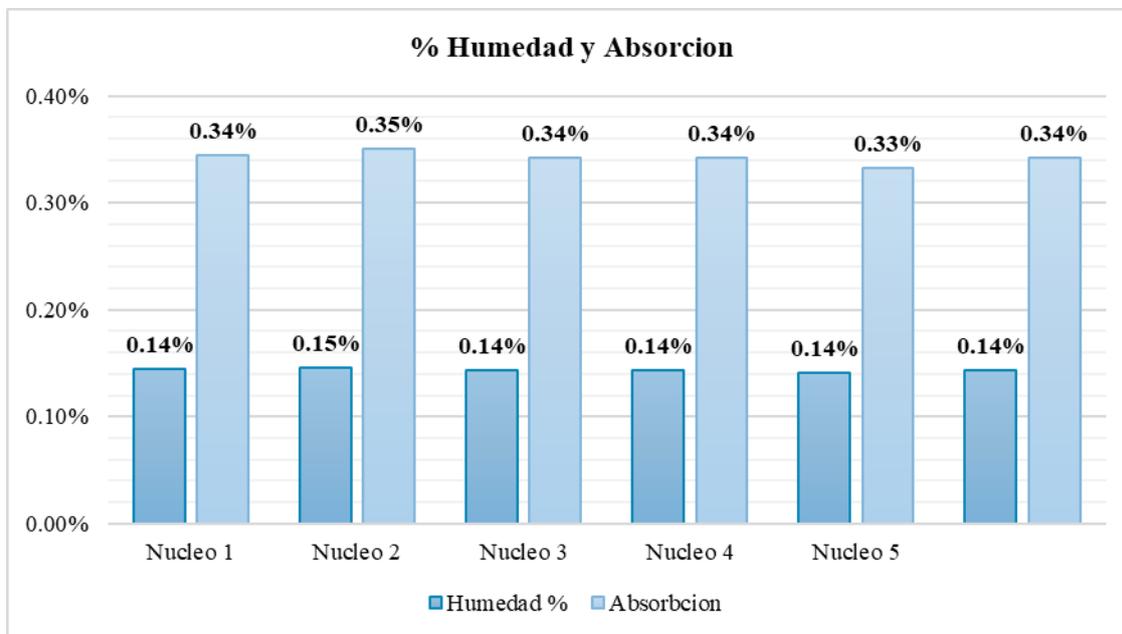


Ilustración 25. Valores obtenidos del porcentaje de humedad y absorción.

4.2. PROPIEDADES MECÁNICAS DEL PAVIMENTO FLEXIBLE.

La tabla 16 presenta las mediciones obtenidas mediante el equipo GeoGauge, donde se registran tanto el módulo resiliente como el módulo de rigidez. Con base en estos datos, se calculó el porcentaje estimado de CBR utilizando correlaciones desarrolladas por distintos autores, quienes formularon ecuaciones para relacionar el CBR con los módulos resiliente y de rigidez.

4.2.1. Resiliencia, Rigidez y CBR.

Tabla 16. Datos obtenidos a través del GeoGauge.

DATOS GEOGAUGE								
Muestra	Capa	Módulo Rigidez [MN/m]	Módulo Young [MPa]	Módulo de Young [PSI]	Desviación Estándar [-]	CBR Ec. [1] [%]	CBR Ec. [2] [%]	CBR Ec. [3] [%]
M2	Subrasante	3.69	27.37	3969.69006	1.05630	2.646	3.972	2.737
M3		4.02	29.83	4326.48354	1.0944	2.884	4.469	2.983
M5		3.17	23.51	3409.84338	1.05026	2.273	3.225	2.351
M2	Subbase	4.05	30	4351.1400	1.09316	2.90	4.504	3
M3		4.39	32.57	4723.88766	2.44121	3.15	5.041	3.257
M5		3.98	29.49	4277.17062	1.15306	2.85	4.399	2.949

4.2.2. Estabilidad y flujo Marshall.

En la ilustración 26 se observa una relación positiva entre el flujo y la estabilidad en todos los núcleos analizados, aunque la intensidad de esta relación varía según el tipo de núcleo. El núcleo 1 se destaca por brindar la mayor estabilidad en todo el rango de flujo, mientras que el núcleo 5 muestra la menor.

Tabla 17. Resultados ensayo Marshall.

Briqueta	Estabilidad (lb)	Flujo (in/100)
Núcleo 1	4455.00	45.00
Núcleo 2	3313.00	36.70
Núcleo 3	1960.00	28.50
Núcleo 4	1790.00	36.90
Núcleo 5	1887.00	31.00

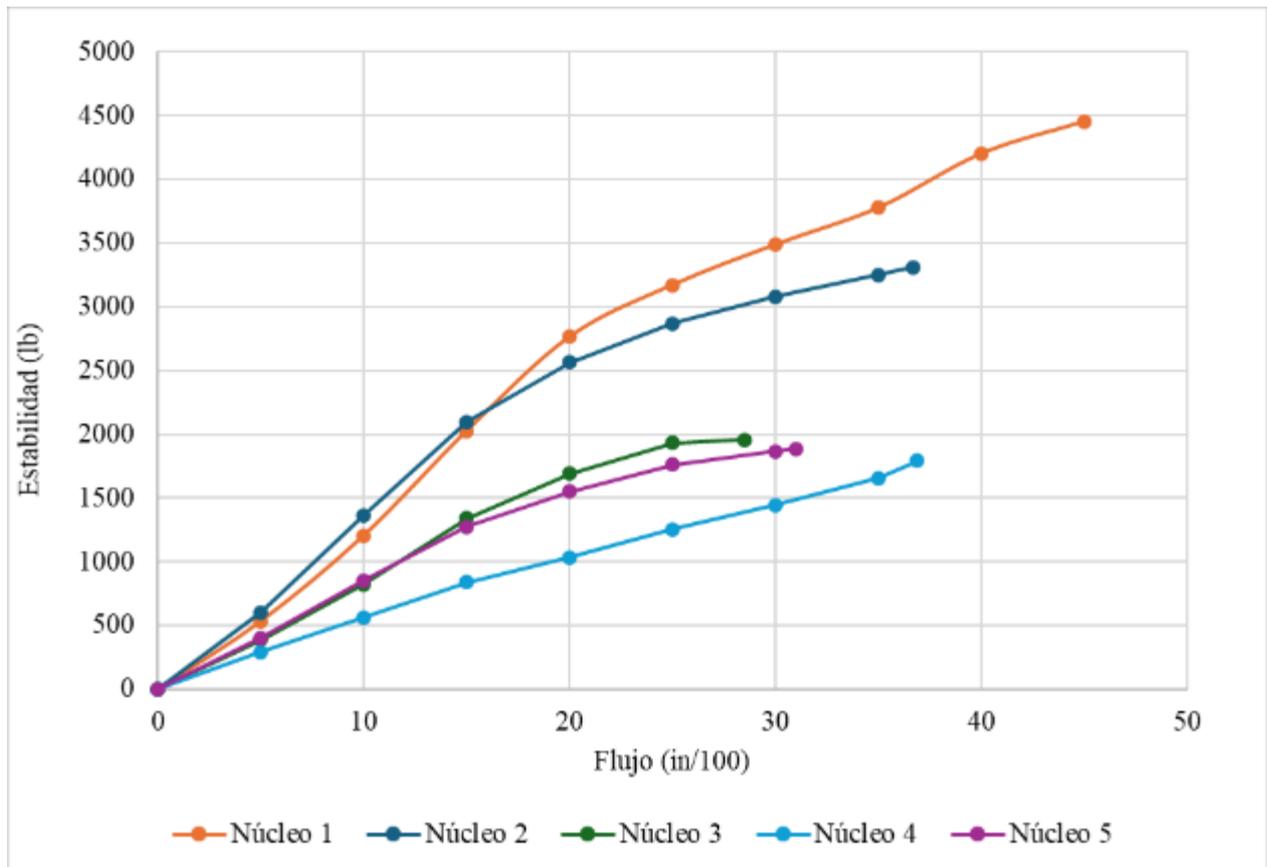


Ilustración 26. Gráfica de estabilidad vs flujo de núcleos.

4.3. PROPIEDADES HIDRÁULICAS DEL PAVIMENTO FLEXIBLE.

4.3.1. Datos de las pruebas de infiltración.

El procedimiento utilizado para determinar las propiedades hidráulicas del pavimento sigue los lineamientos de la norma ASTM, con adaptaciones introducidas por la Universidad Nacional de Chimborazo para optimizar la recolección de datos específicos. Esta modificación metodológica requiere un análisis detallado de las condiciones experimentales (humedad, textura del suelo y equipos empleados) que rigieron durante los ensayos.

4.3.2. Resultados de las pruebas de infiltración.

Se presentan los resultados obtenidos en las pruebas de infiltración; en la tabla 18 se detallan los valores numéricos correspondientes a la variación de la tasa de infiltración (K) a lo largo del tiempo para cada uno de los puntos evaluados.

Tabla 18. Resultados del ensayo de infiltración.

Velocidades de Infiltración vs Tiempo					
Tiempo Acumulado [Horas]	Velocidad de infiltración K [cm/hora]				
	Muestras				
	M1	M2	M3	M4	M5
0	0	0	0	0	0
0.5	0.2	0.2	0.4	0.8	0.6
1	0.2	0.2	0.2	0.4	0.4
1.5	0.2	0.2	0.2	0.4	0.2
2	0.2	0	0.2	0.4	0.2
2.5	0	0	0.2	0.4	0.2
3	0	0	0.2	0.4	0.2
3.5	0	0	0.2	0.4	0
4	0	0	0	0	0
4.5	-	0	0	0	0
5	-	-	0	0	-
5.5	-	-	-	-	-
6	-	-	-	-	-
Estado del pavimento	Bueno	Bueno	Bueno	Bueno	Bueno
Clima	Llovizna	Llovizna	Soleado	Soleado	Nublado
Fracción de infiltración (%)	0.8 %	0.6 %	1.6 %	2.9 %	1.8 %
Coefficiente de escurrimiento C (%)	99.20 %	99.40 %	98.40 %	97.10 %	98.20 %
Observaciones	Días anteriores al ensayo hubo lluvias en la zona, el suelo se encontraba saturado, el Infiltrómetro se colocó a un costado de la vía, el estado del asfalto era bueno.	Días anteriores al ensayo hubo lluvias en la zona, el suelo se encontraba saturado, el Infiltrómetro se colocó a un costado de la vía, el estado del asfalto era bueno.	Días anteriores al ensayo hubo lluvias en la zona, el suelo se encontraba saturado, el Infiltrómetro se colocó encima de un pavimento en buenas condiciones	Días anteriores al ensayo hubo lluvias en la zona, el Infiltrómetro se colocó a un lado de la vía, cercano a una zanja de desagüe, el estado del asfalto era bueno	Días anteriores al ensayo hubo lluvias en la zona, el Infiltrómetro se colocó a un lado de la vía, cercano a una zanja de desagüe, el estado del asfalto era bueno.

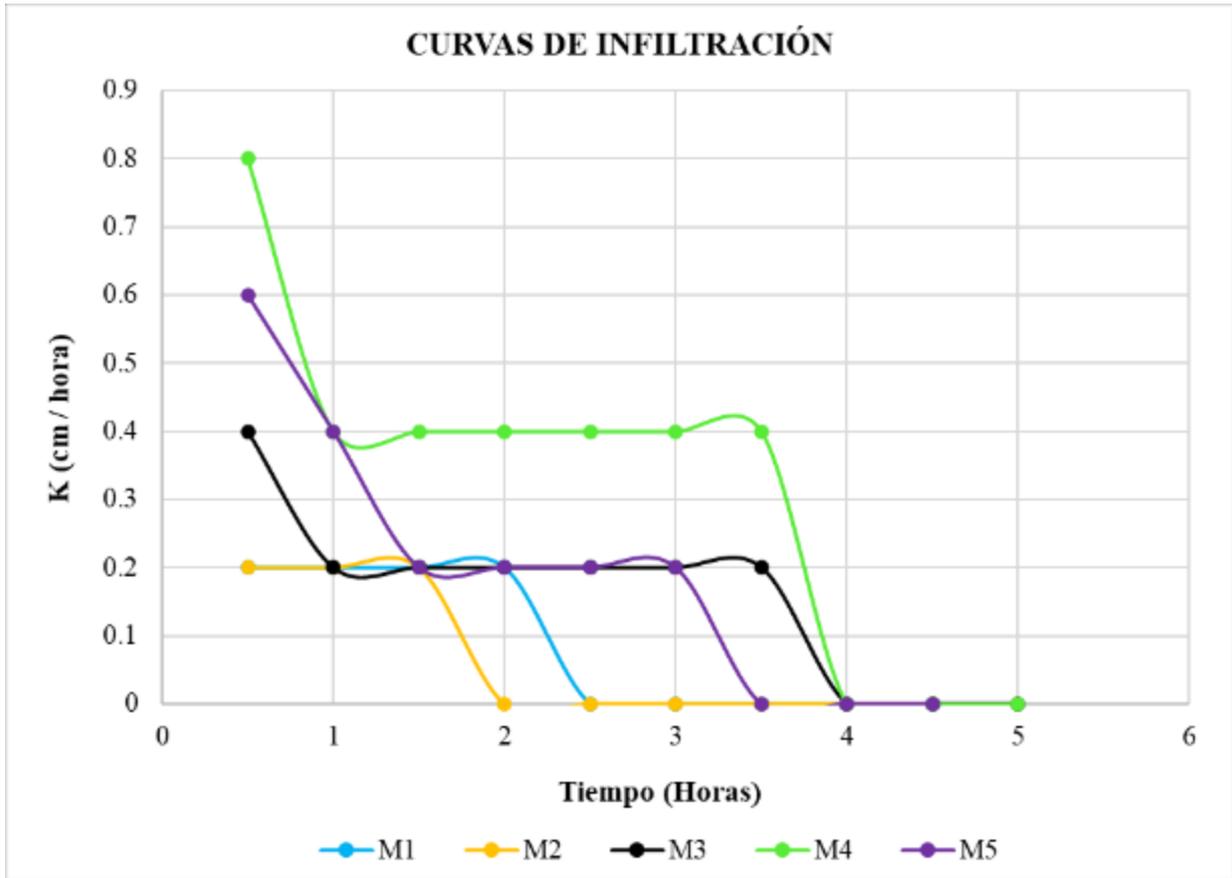


Ilustración 27. Curvas de infiltración pavimento flexible.

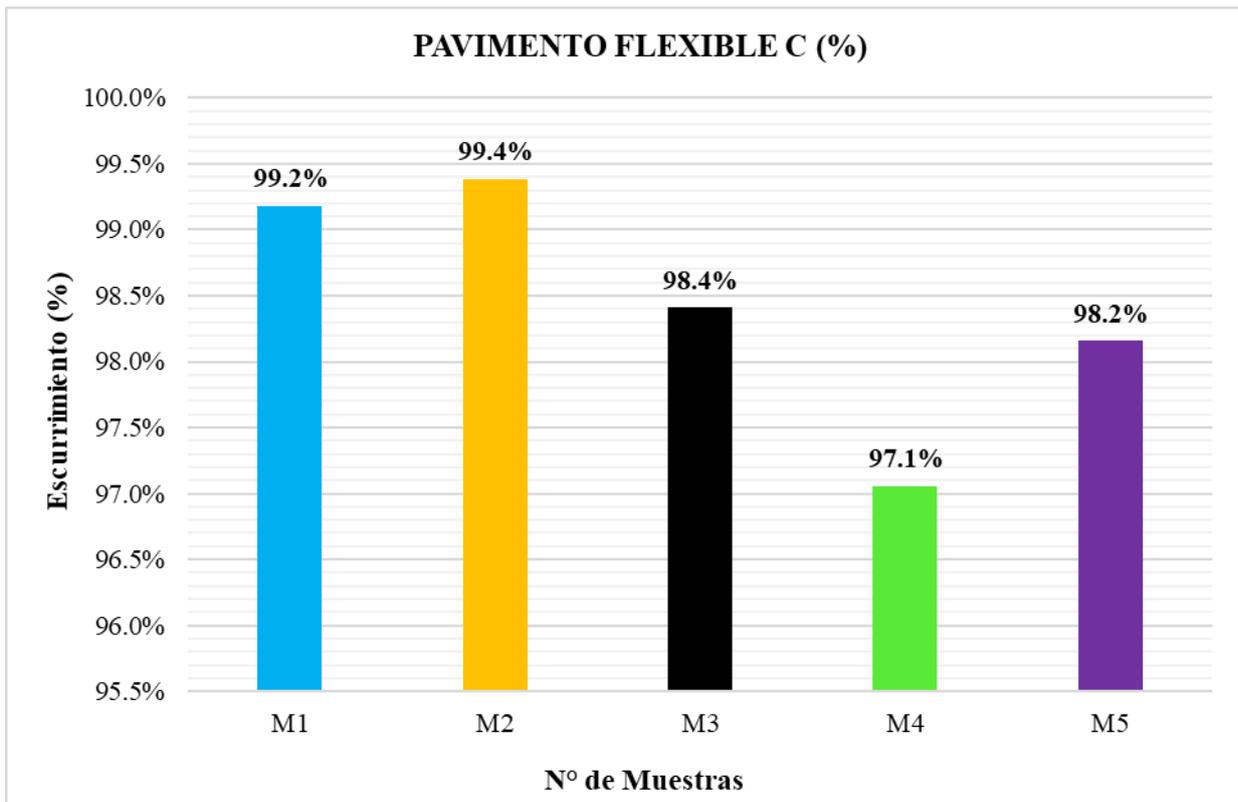


Ilustración 28. Porcentaje de escurrimiento por punto.

4.3.3. Comportamientos de las curvas de infiltración.

En la ilustración 27 se presentan las curvas de infiltración en función del tiempo, obtenidas en puntos clave a lo largo del corredor vial. El comportamiento de estas curvas está vinculado tanto al estado del pavimento como a los materiales obtenidos en ensayos previos realizados en los puntos P1, P4 y P5. Es importante mencionar que en el ensayo granulométrico realizado en estos puntos, se encontraron similitudes en las características de los materiales que los componen, donde P1 es equivalente a P2 y P3 es equivalente a P4; por esta razón, la comparación se realizará únicamente con los puntos antes descritos.

Densidad y absorción

Las curvas muestran cómo varía la velocidad de infiltración del agua (K , en cm/hora) a lo largo del tiempo. Muestras como M4 (línea verde) presentan una infiltración inicial muy alta que disminuye rápidamente, mientras que otras, como M1 y M5, exhiben tasas más bajas y estables. Este comportamiento se atribuye a las características del material fino encontrado en las muestras de P1, P4 y P5, donde la absorción aumenta progresivamente: un promedio general de 2.04% en bases, 3.48% en subbases y hasta 4.14% en subrasantes. Esto indica que los materiales más finos, localizados en las capas más profundas (subrasante), absorben mayor cantidad de agua, pero impiden que esta se desplace con rapidez a través de allí, debido a la escasa permeabilidad, lo que conlleva una infiltración baja y bastante estable. El material grueso localizado en P1, P4 y P5, en cambio, tiene una absorción elevada y bastante parecida, con un promedio genérico de 4,91% para bases y 4,89% para subbase, lo que hace deducir que los materiales gruesos, con una menor capacidad de absorción efectiva, posibilitan un desplazamiento más rápido del agua a través de los poros del material, evidenciando una infiltración elevada al principio de la prueba, pero decreciendo conforme los poros se saturan.

Macrotextura

En las muestras presentadas, M1 tiene la mayor macrotextura (0.666 mm) y es también la que muestra la mayor tasa de infiltración inicial en la curva azul. Los materiales que tienen las mayores macrotextura presentan, en consecuencia, poros y canales entre partículas más grandes; esto provoca que la velocidad de infiltración sea mayor al inicio. Por el contrario, la muestra M2 tiene la macrotextura más baja (0.577

mm) y su curva de infiltración (verde) es de las más bajas y se estabiliza rápidamente. Una menor macrotextura significa poros más pequeños y menos espacio por donde pueda transitar el agua; por lo que la filtración será menor. Las muestras M3, M4 y M5, en un intermedio de macrotextura (0.635, 0.634 y 0.585 mm respectivamente) muestran también curvas de infiltración intermedias, que se asemejan a los comportamientos de las muestras M1 y M2.

En resumen, la macrotextura y la infiltración están directamente relacionadas: los materiales más rugosos y porosos permiten que el agua pase más rápidamente, mientras que los materiales más finos y lisos la dejan pasar en menor cantidad. Esto impacta directamente en el comportamiento mecánico y la durabilidad de cada capa de un pavimento.

Porcentaje de Vacíos

Las muestras con mayor porosidad mostradas en la tabla 15, como el Núcleo 1 con un 4.56%, tienden a presentar una mayor conductividad hidráulica inicial (K), debido a que el agua encuentra menor resistencia para desplazarse a través de los vacíos del material. En contraste, las muestras con menor porosidad, como el Núcleo 4 y Núcleo 5 con 3.67% y 3.87% respectivamente, exhiben valores iniciales de conductividad hidráulica más bajos y alcanzan el estado estable de infiltración más rápidamente.

4.3.4. Análisis de los Coeficientes de Escorrentía.

Por su parte, la ilustración 28 propone comprobar los resultados obtenidos de los cálculos realizados para el ensayo de infiltración, todos ellos realizados sobre un pavimento en aceptables condiciones. Posteriormente, se expondrán los resultados de las muestras M1 y M2, ya que son las que muestran los valores más altos de escorrentía, así como de la muestra M4, que muestra la escorrentía más baja. La muestra M1 muestra un coeficiente de escurrimiento del 99.2% -indica que solo el 0.8% del agua se infiltra- se presenta, por tanto, un pavimento de tipo impermeable, aunque ligeramente más permeable que el obtenido en la muestra M2, que muestra el escurrimiento más alto de todas las muestras, presenta un coeficiente de 99.4% -un 0.6% de infiltración-. El coeficiente de escurrimiento obtenido para la muestra M4 es 0.971, esto indica que el 97.1% del volumen de precipitación se convierte en escorrentía superficial, mientras que el 2.9% se infiltra hacia el subsuelo. La mínima

infiltración observada se debe principalmente a las condiciones ambientales, como la presencia de lluvias constantes antes y durante el ensayo, así como a una superficie en excelente estado, sin fisuras ni porosidad, que mantiene el pavimento saturado.

4.4. RELACIONES ENTRE LAS PROPIEDADES FISICO-MECÁNICAS Y PROPIEDADES HIDRÁULICAS DEL PAVIMENTO FLEXIBLE.

4.4.1. Absorción Material Fino Subbase vs Fracción de Infiltración

El ensayo de absorción del agregado fino para la subbase se realizó en las muestras M1, M4 y M5, ya que las muestras M2 y M3 tienen las mismas características que las muestras M1 y M4, respectivamente, determinado por el ensayo granulométrico; por eso se establece la relación con estas muestras.

En la ilustración 29 se establece una correlación de $R^2= 0.9894$, es decir, existe gran correlación muy fuerte, a mayor fracción de infiltración menor absorción del material, lo que se traduce en el hecho de que a mayor porosidad de los materiales se transmite / infiltra más agua a través de su estructura. Por el contrario, en aquellos materiales cuya absorción es alta, estos tienden a retener el agua en su interior, pero infiltran poco lo que condiciona directamente la respuesta hidráulica de la subbase. En lotes con alta densidad, la menor porosidad interna; esto significaría menor absorción, pero podría darse mayor infiltración y viceversa. Pero en función de lo anterior se concluiría que los mayores valores de infiltración son correspondientes a los menores porcentajes de absorción, como representación clara la muestra M1.

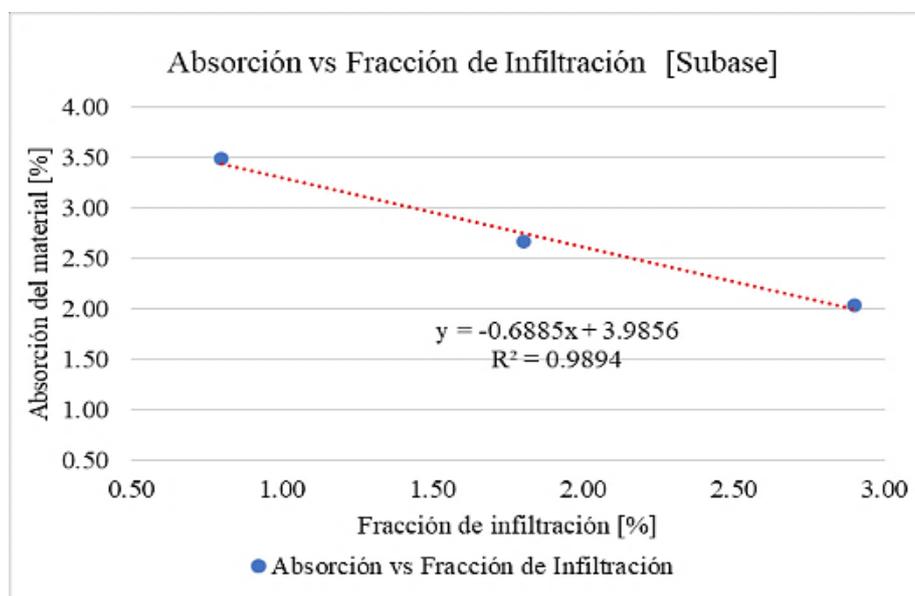


Ilustración 29. Diagrama de relación Absorción Fino y Fracción de Infiltración.

4.4.2. Densidad Proctor Estándar vs Fracción de infiltración (%)

El ensayo Proctor estándar para las bases se realizó en las muestras M1, M4 y M5, ya que las muestras M2 y M3 tienen las mismas características que las muestras M1 y M4, respectivamente, determinado por el ensayo granulométrico, donde presentan el mismo porcentaje de agregado y el mismo tipo de material. Por eso, se establece la relación únicamente con estas muestras. En la ilustración 30 se muestra que, en todos los puntos, a medida que la densidad determinada en el ensayo Proctor estándar aumenta, también tiende a incrementarse el porcentaje de infiltración, alcanzando ambos su valor máximo en el punto M4. Este punto presenta la mayor densidad Proctor estándar (1.85 t/m^3) y el mayor valor de infiltración (2.9 %), lo que indica una correlación directa entre la compactación del material y su capacidad para permitir el paso de agua.

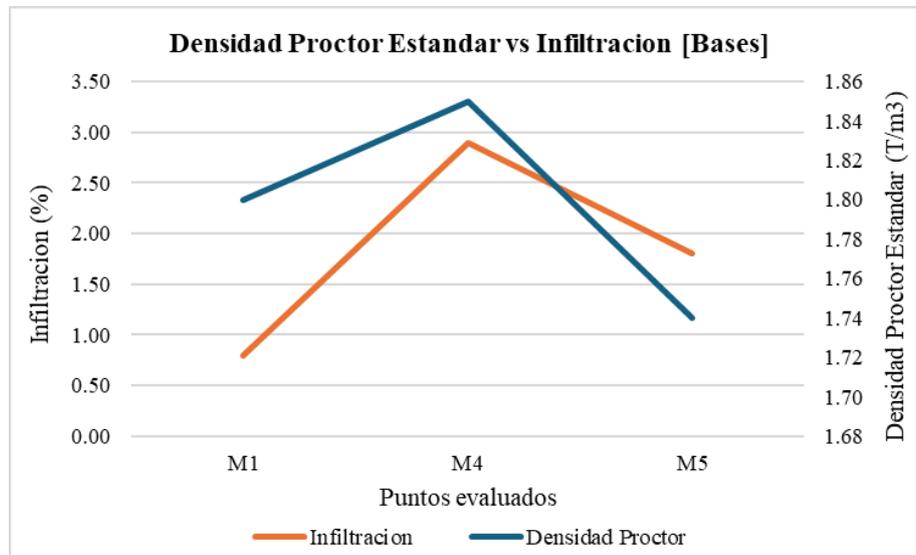


Ilustración 30. Diagrama de relación Densidad Proctor estándar y Fracción de infiltración.

4.4.3. Coeficiente de escurrentía vs Macrotextura

En la ilustración 31 se muestra que, existe una relación inversa entre el coeficiente de escurrentía (C) y la altura de la macrotextura. En la muestra M2 y M4 se puede observar que a mayor altura de macrotextura la escurrentía disminuye, lo que indica que superficies más rugosas o con mayor textura retienen mejor el agua y generan menor escurrimiento, mientras que superficies más lisas favorecen el escurrimiento y aumentan el valor del coeficiente de escurrentía.

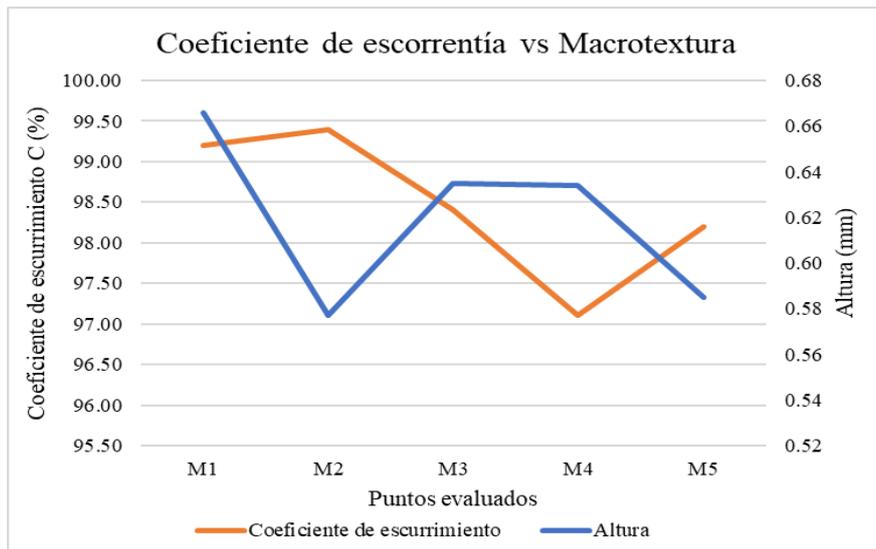


Ilustración 31. Diagrama de relación entre el Coeficiente de escurrimiento y Macrotextura.

4.4.4. Absorción Finos vs CBR -SUBASE

El ensayo de CBR con el GeoGauge se realizó en los puntos P2, P3 y P5, dado que los puntos P1 y P4 presentan las mismas características que los puntos P2 y P3 en función de ensayos anteriores. En el ensayo de separación granulométrica, se obtuvieron el mismo contenido de agregados que el de material. Ese es el motivo por el que las comparativas se volcaron únicamente a esos puntos. En la figura 31 se puede visualizar cómo a partir de la disminución de la absorción del material también se produce un aumento del CBR, tal y como se explica por el hecho de que los materiales más absorbentes poseen una menor capacidad de soporte; es decir, hay una relación inversa entre la absorción y la resistencia estructural.

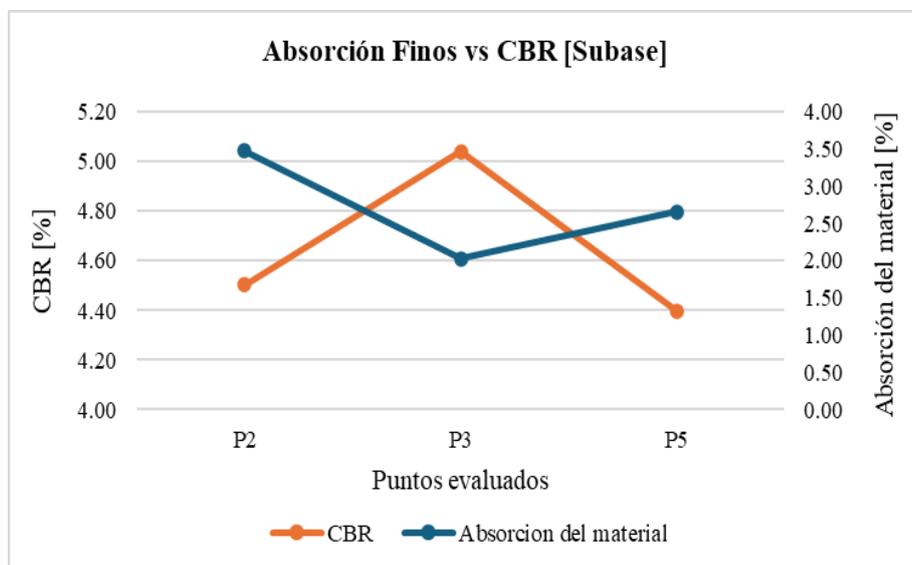


Ilustración 32. Diagrama de relación Absorción Finos y CBR -SUBASE.

4.5. DISCUSIÓN.

La tesis de Castillo (2024) reporta una estabilidad Marshall mayor de 3096 lb, en contraste con la obtenida en la presente tesis, que es de 2681 lb, lo que indica que la mayor resistencia a la carga es muy superior. Por otro lado, también obtiene un flujo superior, de 46 in/100 en comparación con el de esta tesis (35.62 in/100), lo que indica una mayor posibilidad de deformación. Ambos estudios sobrepasan los valores de flujo recomendados, por lo que queda patente la necesidad de optimizar el diseño de mezclas asfálticas para mejorar su rendimiento estructural y durabilidad.

En esta investigación, por su parte, se pudo obtener una densidad bulk de 2.241 g/cm³, la cual era levemente inferior al promedio de 2.374 g/cm³ recogido en estudios previos, al igual que la densidad rice que fue de 2.369 g/cm³, también inferior al promedio de 2.481 g/cm³. Sin embargo, ambos resultados eran coincidentes con las medias obtenidas por Castillo, quien reportó para ambos exactamente las mismas densidades bulk y rice, lo que podría señalar una altísima concordancia de resultados entre las dos investigaciones.

Una densidad bulk de 2.241 g/cm³ es un valor aceptable, pero debe contrastarse con la que se haya logrado de forma máxima en el laboratorio a partir del ensayo Proctor para poder determinar el porcentaje de compactación que exige la NEC (2012).

Las densidades bulk (2.374 g/cm³) y rice (2.481 g/cm³) permiten indicar que la mezcla asfáltica está muy compactada, con una porosidad efectiva baja próxima al 4.3%, lo que significa que la capacidad de infiltración del agua a través del pavimento es escasa, de tal manera que el pavimento actúa como una superficie prácticamente impermeable, lo que provoca un aumento notable de la escorrentía superficial y un aumento del coeficiente de escorrentía (C) próximo a 1.0, de tal forma que casi el total de las precipitaciones fluyen sobre la superficie sin poder infiltrarse.

El resultado de macrotextura de 0.619 mm está por encima del valor mínimo establecido por la normativa ecuatoriana para los pavimentos flexibles, que se establece en 0.40 mm; esto sugiere que la superficie tiene una textura apropiada a fin de mantener un buen comportamiento en cuanto a la fricción y la seguridad vial. Por lo tanto, desde el punto de vista de la adherencia superficial, el pavimento responde a las exigencias del MTOP (2012). El valor de macrotextura obtenido, de 0.619 mm, además de cumplir con el mínimo establecido por la normativa ecuatoriana (0.40 mm) para garantizar una adecuada fricción y seguridad vial, también tiene un impacto positivo en el comportamiento del agua sobre la superficie del pavimento. Una

macrotextura más elevada implica una mayor rugosidad, lo que favorece la retención temporal del agua, mejora su infiltración y disminuye la velocidad del escurrimiento superficial. Esto se traduce en una reducción del coeficiente de escorrentía (C). Por lo tanto, este nivel de macrotextura no solo satisface los requisitos del MTOP (2012) en cuanto a adherencia, sino que también ayuda a minimizar el escurrimiento del agua, mejorando el desempeño hidráulico del pavimento.

El porcentaje de vacíos promedio, de un 4.13 % que se ha conseguido en este estudio para pavimento flexible, pertenece al marco de trabajo óptimo recomendado de 3 % a 5 % por Villamizar y Torres (2013) y la norma MTOP (2012). La porosidad de este pavimento se considera correcta, garantizando correctamente una importante resistencia y una durabilidad sobresaliente de la mezcla asfáltica, asegurando así buenos desempeños mecánicos y resistencia de frente a cargas y condiciones ambientales.

Los ensayos in situ han conseguido un porcentaje de escurrimiento del 98.4 %, indicando que el pavimento presenta un escurrimiento superior al rango de escurrimiento propuesto en la norma INEN 5 (1992). Esto implica que las superficies analizadas presentan un comportamiento altamente impermeable, donde prácticamente la totalidad del agua de lluvia genera escorrentía superficial, con mínima o nula infiltración al subsuelo.

CAPÍTULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

5.1. CONCLUSIONES.

Las subrasantes analizadas en este estudio están vinculadas a distintas formaciones geológicas, tales como los Piroclastos del Chimborazo, la Formación Pisayambo y los Volcánicos Guaranda, cuya edad corresponde principalmente al Mioceno superior y al Plioceno temprano. El análisis edafológico mostró que la textura superficial predominante es arenoso francoso, lo cual coincide con las clasificaciones obtenidas a partir de los ensayos realizados en las subrasantes, las cuales están compuestas mayormente por arenas con presencia de limo y grava.

En el análisis de las características físicas de la estructura del pavimento flexible, se concluyó que, según la normativa SUCS, la base corresponde a una arena bien graduada y grava bien graduada (SW y GW). De igual manera, la subbase se clasifica como grava bien graduada con arena bien graduada (GW y SW), conforme a la misma normativa. Además, se determinaron la densidad y la absorción del agregado grueso y fino de la base. El porcentaje de abrasión fue de 29,78 %, cumpliendo con el límite máximo del 40 % establecido para bases por el MOP (2002). El porcentaje de vacíos fue de 4,13 %, factor que influye en la tasa de infiltración. Los espesores promedio de las capas fueron 125,0 mm para la capa de rodadura, 150 mm para la base y 190 mm para la subbase. Finalmente, la macrotextura presentó un valor de 0,619 mm.

Se aplicó el método de extracción de núcleos para la evaluación de propiedades mecánicas. Los resultados del ensayo de Marshall permitieron evaluar aquellas propiedades del comportamiento mecánico de la mezcla asfáltica aplicada a la vía Arenal-Guaranda. En este sentido se evidenció una notable variabilidad en los valores de estabilidad, que variaron entre 1790 lb y 4455 lb y en los valores de flujo que se distribuyeron entre 28.5 y 45 (1/100 in). Si bien algunos núcleos cumplen con los valores mínimos de estabilidad que establecen las especificaciones técnicas, el flujo de todos los especímenes supera el rango recomendado, lo que denota una mezcla con exceso de plasticidad y una mayor susceptibilidad a deformaciones permanentes como es el ahuellamiento.

Mediante el equipo GeoGauge se obtuvieron datos in situ de módulo de Young y de módulo de rigidez, como son las propiedades mecánicas de las capas granulares del pavimento flexible. De estos valores se estimó el CBR utilizando correlaciones ya establecidas y se pudo comprobar que en los tramos donde el pavimento se encontraba deteriorado, los valores

estimados de CBR fueron mucho menores que los de zonas en donde el pavimento se encuentra en buenas condiciones.

La estructura del corredor vial El Arenal–Guaranda fue comparada con el análisis de los resultados obtenidos en laboratorio, con los datos cuantificados in situ. Al mismo tiempo, se define la nueva metodología para el uso del infiltrómetro de doble anillo aplicado al pavimento flexible, con la posibilidad de medir no solo la infiltración, sino también el escurrimiento, ¡y se aplicó en cinco puntos elegidos previamente! La duración promedio de cada ensayo fue de 4.5 a 5 horas. Los resultados para la infiltración indican un 2.9 % de escurrimiento, con un 98.4 % de infiltración, con lo que se concluye que el pavimento tiene escurrimiento por encima de los límites de la normativa INEN 5 (1992).

Analizando las propiedades físicas, mecánicas e hidráulicas del pavimento flexible en el corredor vial El Arenal–Guaranda, se obtiene la asociación existente entre las propiedades físicas del material y su comportamiento hidráulico y estructural; en primer lugar, se define que a menor capacidad de absorción del material le corresponde una mayor infiltración; se sugiere que los materiales de baja absorción tienen mayor paso del agua por la existencia de poros comunicados o fisuras. En segundo lugar, se define la relación inversa entre la altura de la macrotextura y el coeficiente de escurrimiento (C), ya que una superficie más rugosa tiende a retener más agua y a disminuir el escurrimiento superficial, a diferencia de las superficies lisas que favorecen el escurrimiento. Por otro lado, se deduce que, a menor absorción, mayor valor del CBR, por lo que los materiales menos absorbentes tienen mayor capacidad de soporte estructural. En conclusión, los resultados son reveladores y muestran la necesidad de controlar parámetros de absorción, macrotextura y porosidad; su control permitirá una mejor optimización del comportamiento hidráulico y de la resistencia del material en el diseño de obras viales.

5.2. RECOMENDACIONES.

Se aconseja seguir un conjunto de normativas para la obtención de muestras de base, subbase y subrasante en las vías con tráfico de vehículos, de manera que se logre la representatividad de estas. Aparte de ello, será de vital importancia el uso de Equipos de Protección Individual y la adecuada señalización para preservar la seguridad del personal implicado. Resulta recomendable una correcta planificación de, la selección de los lugares de muestreo y el registro de los distintos tipos de condiciones del pavimento. Todas las muestras que sean extraídas deben estar correctamente identificadas mediante etiquetado y la debida documentación en la que se aporten los datos de interés.

Se aconseja proteger al infiltrómetro contra las variantes climáticas que pudieran comportar la evaporación del agua en los días soleados muy calorosos y el acceso del agua no deseado los días de lluvia, los cuales podían provocar variaciones volumétricas en el agua contenida en el infiltrómetro e indirectamente el valor del coeficiente de escorrentía y por ende la exactitud del equipo.

Se aconsejan también las determinaciones del coeficiente de escorrentía, mediante infiltrómetro de doble anillo aplicados sobre pavimentos flexibles, para tomarlo como parámetro indicativo del deterioro del pavimento dado que la permeabilidad está asociada al estado físico de las capas que configuran la asfaltada. También hay que asegurar la correcta evacuación del agua de la superficie, para que la seguridad no esté comprometida. De la misma manera, para promover la utilización de estructuras permeables, y hoy más, dada la existencia de una tasa de escorrentía superior a la que se define desde los reglamentos vigentes en el corredor vial objeto del estudio.

BIBLIOGRAFIA

- ASTM D5361. (2006). Práctica estándar para Muestreo de mezclas bituminosas compactadas para pruebas de laboratorio. American Society for testing and materials.
- ASTM D6927. (2015). Designación: ASTM D6927-2015 Página 1. American Society for testing and materials. <https://doi.org/10.1520/D6927-15>
- ASTM D698-12e2. (2012). Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort (12 400 ft-lbf/ft³ or 600 kN-m/m³). ASTM International. <https://doi.org/10.1520/D0698-12E02>
- ASTM International. (2007). ASTM D6758-02(2007): Standard Test Method for Measuring Stiffness and Apparent Modulus of Subgrade Soils Using the Portable Seismic Pavement Analyzer (GeoGauge). ASTM International. <https://doi.org/10.1520/D6758-02R07>
- ASTM International. (2007). ASTM D6758-02(2007): Standard Test Method for Measuring Stiffness and Apparent Modulus of Subgrade Soils Using the Portable Seismic Pavement Analyzer (GeoGauge). ASTM International. <https://doi.org/10.1520/D6758-02R07>
- ASTM International. (2009). ASTM C535-09: Standard Test Method for Resistance to Degradation of Large-Size Coarse Aggregate by Abrasion and Impact in the Los Angeles Machine. ASTM International. <https://doi.org/10.1520/C0535-09>
- ASTM International. (2011). ASTM D2041-11: Standard Test Method for Theoretical Maximum Specific Gravity and Density of Bituminous Paving Mixtures. ASTM International. <https://doi.org/10.1520/D2041-11>
- ASTM International. (2013). ASTM D2726-13: Standard Test Method for Bulk Specific Gravity and Density of Non-Absorptive Compacted Asphalt Mixtures. ASTM International. <https://doi.org/10.1520/D2726-13>
- ASTM International. (2016). ASTM C131/C131M-14: Standard Test Method for Resistance to Degradation of Small-Size Coarse Aggregate by Abrasion and Impact in the Los Angeles Machine. ASTM International. https://doi.org/10.1520/C0131_C0131M-14
- Barrigas, J., & Pilamunga, D. (2017). Caracterización física e hidráulica de los suelos en las comunidades de Tiquibuzo y San José de la Comuna, Chillanes, provincia de Bolívar. [Tesis de grado, Universidad Técnica de Ambato].
- Brandã o Ticianelli, M. (2021). Estudio de la variabilidad de los parámetros de diseño y sus efectos en el desempeño de los pavimentos urbanos.

- Cabrera, V., & Stammitti, C. (2005). Diseño y construcción de un sistema para mejorar la adherencia de los neumáticos.
- Cabrera, V., & Stammitti, C. (2005). Diseño y construcción de un sistema para mejorar la adherencia de los neumáticos.
- Castillo García, I. P., & Hidalgo Cisneros, J. S. (2024). Caracterización física e hidráulica del pavimento flexible en el tramo de la vía E35, sector San Andrés – Colta. Universidad Nacional de Chimborazo.
- Cepeda, M. E., & Rosero, R. (2024). Características físicas e hidráulicas del pavimento rígido en la circunvalación ubicada en la ciudad de Riobamba.
- Chapoñan, J., & Quispe, J. (2017). Análisis del comportamiento en las propiedades del concreto hidráulico para el diseño de pavimentos rígidos adicionando fibras de polipropileno en el A.A.H.H Villamaria-Nuevo Chimbote.
- Córdova, C. F. (19 de Enero de 2015). Método alternativo para predecir CBR en diseño de pavimentos. Obtenido de Universidad de Piura: <https://www.udep.edu.pe/hoy/2015/01/metodo-alternativo-cbr/>
- Díaz Ortiz, J. E. (10 de junio de 2005). Propuesta metodológica para determinar el potencial de humedad de un material granular a partir de la humedad relativa. Ingeniería y Competitividad, 7(1), 73-79. [Obtenido de <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=291323470007>
- Dunne, T., & Leopold, L. B. (1978). Water in environmental planning. Macmillan.
- Falcon, F., & Santos, J. (2016). Diseño de un pavimento rígido permeable, con agregados de la cantera Chullqui, para el drenaje urbano en estacionamientos en la ciudad de Huánuco.
- Freire, M. I. (2005). Evaluación En Campo Del Módulo De Young Equivalente y El Grado De Compactación Para Geo materiales. Escuela Superior Politécnica del Litoral. Obtenido de <http://www.dspace.espol.edu.ec/xmlui/handle/123456789/45041>
- Garnica, P., Gómez, L. J., & Sesma, M. J. (2002). Mecánica de materiales para pavimentos.
- GeoGauge. (s.f.). Portable stiffness and modulus gauge. Humboldt Mfg. Co. Recuperado el 13 de mayo de 2025, de <https://www.humboldtmfg.com/geogauge.html>
- Huang, Y. H. (2004). Pavement analysis and design (Vol. 2, pp. 401-409). Upper Saddle River, NJ: Pearson Prentice Hall.
- INEN. (2010). INEN 856: Agregados. Determinación de la densidad y absorción. Método para agregados finos. Instituto Ecuatoriano de Normalización.

- INEN. (2010). INEN 857: Agregados. Determinación de la densidad y absorción. Método para agregados gruesos. Instituto Ecuatoriano de Normalización.
- INEN. (2013). INEN 852: Agregados. Requisitos. Instituto Ecuatoriano de Normalización.
- Instituto Ecuatoriano de Normalización. (1992). Normas para estudio y diseño de sistemas de agua potable y disposición de aguas residuales para poblaciones mayores a 1000 habitantes. Código Ecuatoriano de la construcción. (CPE INEN 005-9-1)
- Instituto Nacional de Estadística y Censos. (2010). Censo de Población y Vivienda 2010. INEC. <https://www.ecuadorencifras.gob.ec/censo-de-poblacion-y-vivienda/>
- Instituto Nacional de Vías (INVIAS). (2013). Especificaciones generales de construcción de carreteras. Bogotá, Colombia. <https://www.invias.gov.co>
- Lizcano, F. R., & Quintana, H. R. (2015). Pavimentos: materiales, construcción y diseño. ECOE ediciones
- Mendoza Sanchez, Juan Fernando, y Omar Marcos Palomares. (2018). El efecto del cambio climático en los pavimentos carreteros.
- Menéndez, José. (2013) Ingeniería de pavimentos: materiales y variables de diseño. 43. Lima, Perú: ICG.
- Ministerio de Agricultura y Ganadería del Ecuador (MAG), Instituto de Estudios Ecuatorianos (IEE) y Secretaría Nacional de Planificación (SENPLADES). (2015). Proyecto de Servicio de Información Agropecuaria del Ministerio de Agricultura y Ganadería, Obtenido de: <http://geoportal.agricultura.gob.ec/geonetwork/srv/spa/catalog.search#/metadata/0a26e971-5722-4a10-8a5e-d04298b0f017>
- Ministerio de Transporte y Obras Públicas del Ecuador. (2011). Informe de viabilidad del tramo Guaranda – Las Herrerías – San Juan. Recuperado de <https://www.studocu.com/ec/document/universidad-de-guayaquil/economia-del-desarrollo/informe-de-viabilidad/8697815>
- Montejo Fonseca, A. (2002). "Ingeniería de pavimentos para carreteras", 2da edición.
- MTOP. (2002). Especificaciones generales para la construcción de caminos y puentes. Obtenido de: https://www.obraspublicas.gob.ec/wpcontent/uploads/downloads/2021/01/MPR_Chiborazo_Cumanda_Especificaciones-Tecnicas-MOP-001-F-2002.pdf
- NTE INEN 691. (1982). Determinación del límite líquido método de casa grande.
- NTE INEN 692. (1982). Determinación del límite plástico.

- Publicación técnica, 197, 1-234. Geomecánica. Duque Escobar, Gonzalo and Escobar P., Carlos Enrique. Universidad Nacional de Colombia (2016). Obtenido de <https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/57121/relacionesgravimetricasyvolumetricasdelsuelo.pdf>
- Rebolledo, R. (2010). Deterioros en pavimentos flexibles y rígidos. Universidad Austral de Chile.
- Romero Romero, R., & Sañac Vilca, C. (2016). Evaluación comparativa mediante la capacidad de soporte y densidad máxima de un suelo adicionado con polímero adhesivo natural en porcentajes de 0.5%, 1%, 2% y 3% frente a un suelo natural para subrasante de pavimento rígido de la Urb. San Judas Chico-Cu.
- S.A, H. E. (4 de febrero de 2022). Agregados Material Granular Base Clase 2 (0-25,4 mm). Obtenido de <https://www.holcim.com.ec/agregados-material-granular-baseclase-2>
- Sanchez San Roman , & F. Javier . (2016). Hidrología Superficial (III): Relación Precipitación -Escorrentía. . España : s.n., 2016. 22 Sanchez San Roman , & F. Javier . (2016). Hidrología Superficial (III): Relación Precipitación -Escorrentía. . España: s.n., 2016. 22.
- Santamarina, J. C., & Narsilio, G. A. (s. f.). Clasificación de suelos: fundamento físico, prácticas actuales y recomendaciones. Research Gate. Obtenido de: https://www.researchgate.net/publication/267203656_CLASIFICACION_DE_SUELOS_FUNDAMENTO_FISICO_PRACTICAS_ACTUALES_Y_RECOMENDACIONES
- Servicio Ecuatoriano de Normalización (INEN). (2011). NTE INEN 696: Suelos. Determinación de la granulometría. Quito, Ecuador: Instituto Ecuatoriano de Normalización.
- TM C 29/C 29M-97, Standard Test Method for Bulk density (“Unit Weight”) and Voids in Aggregate, Vol 04.02 American Standards of Testing of Materials, Edition 2003.
- TM C 29/C 29M-97, Standard Test Method for Bulk density (“Unit Weight”) and Voids in Aggregate, Vol 04.02 American Standards of Testing of Materials, Edition 2003.
- Villamizar, N., & Torres, I. (2013). Determinación del rango de porcentaje de vacíos en la base tratada con asfalto en caliente como parámetro de control de la mezcla.
- Wright, P. H. and Paquette, R. J. (1987) Highway Engineering, New York: John Wiley & Sons
- Zambrano Mesa, I., Tejada Piusseaut, E., & Aenlle, A. (2020). Materiales granulares

mejorados con emulsión asfáltica catiónica para subbases de pavimentos.
Infraestructura Vial, 22(39), 29-42.

Zepeda G. A. (1989). Propiedades Mecánicas e Hidráulicas en Suelos no Saturados. Curso Internacional de Mecánica de Suelos Arcillosos. Universidad Autónoma de Querétaro. México.

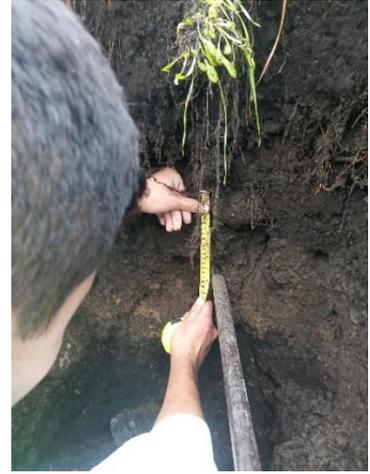
ANEXOS



Anexo 1. *Extracción del material de cada punto.*



Anexo 2. *Capas granulares.*



Anexo 3. *Medición de capas granulares.*



Anexo 4. *Ensayo Granulométrico.*



Anexo 5. *Ensayo Límite Líquido.*



Anexo 6. *Límite Plástico.*



Anexo 7. *Muestras de límites en el horno.*



Anexo 8. *Absorción y densidad-material fino.*



Anexo 9. *Absorción y densidad-material grueso.*



Anexo 10. *Ensayo Proctor Estándar.*



Anexo 11. *Ensayo de abrasión.*



Anexo 12. *Extracción de núcleos.*



Anexo 13. *Ensayo Marshall.*



Anexo 14. *Ensayo Porcentaje de vacíos.*



Anexo 15. *Ensayo macrotextura.*



Anexo 16. *Ensayo GeoGauge.*



Anexo 17. *Ensayo Infiltrómetro.*

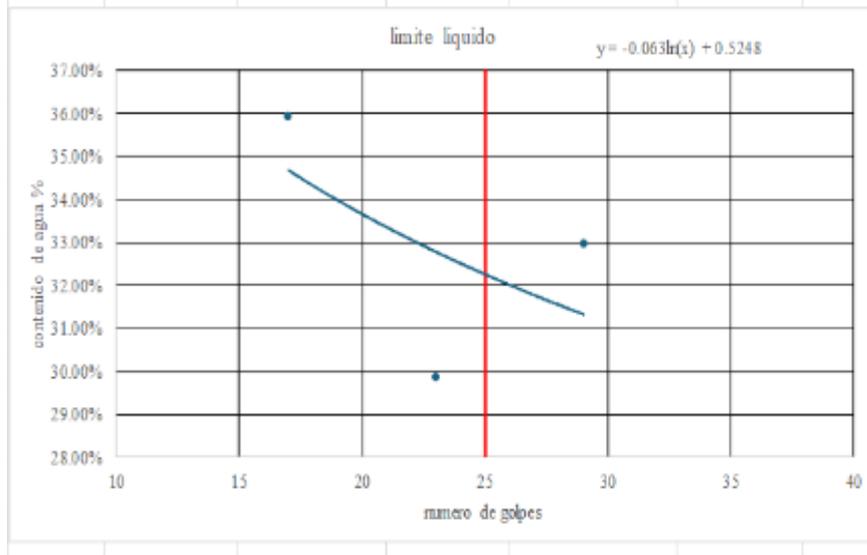


Anexo 18. *Toma de datos en campo del Infiltrómetro.*

Tamiz (ASTM)	Abertura (mm)	Masa Retenida	% Retenido	% Retenido acumulado	% Pasa
1 1/2"	38.100	0	0.00%	0.00%	100.00%
1"	25.400	0.044	1.80%	1.80%	98.20%
3/4"	19.000	0.053	2.17%	3.98%	96.02%
1/2"	12.500	0.197	8.07%	12.05%	87.95%
3/8"	9.500	0.171	7.01%	19.06%	80.94%
No. 4	4.750	0.538	22.05%	41.11%	58.89%
No. 10	2.000	0.782	32.05%	73.16%	26.84%
No. 40	0.425	0.493	20.20%	93.36%	6.64%
No. 100	0.150	0.125	5.12%	98.48%	1.52%
No. 200	0.075	0.028	1.15%	99.63%	0.37%
Fondo	0.000	0.009	0.37%	100.00%	
	TOTAL	2.44	100.00%		
	VARIACION	0.012			
	VARIACION				
Mayor a menor					
38.100	100.00%		D10	0.550	
25.400	98.20%		0.425	6.64%	
19.000	96.02%		2	26.84%	
12.500	87.95%				
9.500	80.94%				
4.750	58.89%		D30	2.178	
2.000	26.84%		2	26.84%	
0.425	6.64%		4.75	58.89%	
0.150	1.52%				
0.075	0.37%				
			D60	4.918	
Menor a mayor					
0.075	0.37%		4.75	58.89%	
0.150	1.52%		9.5	80.94%	
0.425	6.64%		Cu =	8.944	
2.000	26.84%		Cc =	1.754	
4.750	58.89%				
9.500	80.94%				
12.500	87.95%				
19.000	96.02%				
25.400	98.20%				
38.100	100.00%				

Anexo 19. Cálculo granulométrico de la Base punto 1.

		límite líquido							PROMEDIO
numero de golpes	Nº Tara	Masa tara + suelo húmedo	Masa tara + suelo seco	Masa del agua	Tara (g)	Masa del suelo seco	contenido de agua %	contenido de agua %	
15-25	8	17.60	14.90	2.70	7.30	7.60	35.53%	35.94%	
	D5	17.90	15.10	2.80	7.40	7.70	36.36%		
20-30	4A	14.80	13.00	1.80	7.10	5.90	30.51%	29.87%	
	34	15.50	13.60	1.90	7.10	6.50	29.23%		
25-35	5*	14.00	12.30	1.70	7.00	5.30	32.08%	32.97%	
	11A	15.70	13.60	2.10	7.40	6.20	33.87%		



x	y
25	0.28
25	0.37

límite líquido	32.20%
----------------	--------

Anexo 20. Cálculo límite líquido de la Base punto 5.

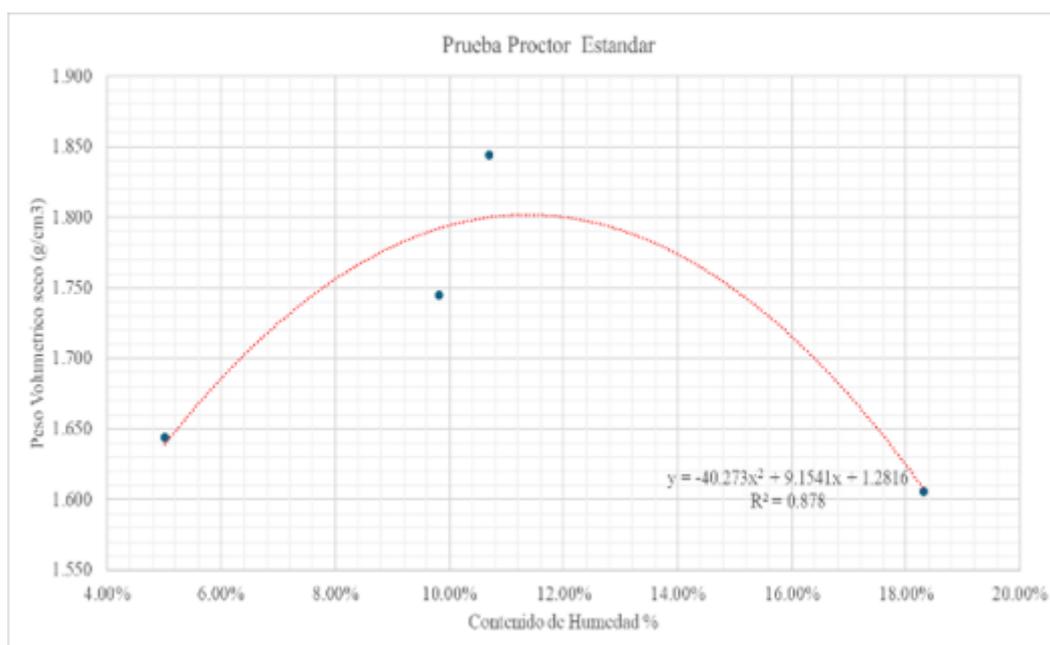
		límite plástico							PROMEDIO
numero de golpes	Nº Tara	Masa tara + suelo húmedo	Masa tara + suelo seco	Masa del agua	Tara (g)	Masa del suelo seco	contenido de agua %	contenido de agua %	
29	3	8.80	8.40	0.40	7.50	0.90	44.44%	44.95%	
	2	8.80	8.30	0.50	7.20	1.10	45.45%		
	IP	3.92%							

numero de golpes	Nº Tara	Masa tara + suelo húmedo	Masa tara + suelo seco	Masa del agua	Tara (g)	Masa del suelo seco	contenido de agua %	PROMEDIO
33	8A	7.30	7.20	0.10	6.90	0.30	33.33%	41.67%
	4A	7.70	7.50	0.20	7.10	0.40	50.00%	
	IP	0.93%						

Anexo 21. Cálculo límite plástico de la Subrasante y Subbase punto 4.

Peso (gramos)	4205												
Altura interior (cm)	11.5												
Diametro interior (cm)	10												
Volumen interior (cm ³)	903.208												

Muestra	Wm + molde	Wm	Ym	nombre tara	W tara	W h+tara	W h	W seco+tara	W seco	W %	Promedio W%	Yd
1	5764	1559	1.726	14DC	14.2	42.5	28.3	41.2	27	4.81%	5.01%	1.644
				17DC	14.3	42.6	28.3	41.2	26.9	5.20%		
2	5936	1731	1.917	12DC	14.2	43.2	29	40.5	26.3	10.27%	9.82%	1.745
				20DC	15.3	43.3	28	40.9	25.6	9.38%		
3	6049	1844	2.042	13DC	14.4	44.1	29.7	41.9	27.5	8.00%	10.69%	1.844
				4DC	14.8	41.9	27.1	38.7	23.9	13.39%		
4	5921	1716	1.900	6DC	14.8	55.5	40.7	48.9	34.1	19.35%	18.30%	1.606
				2DC	14	50.7	36.7	45.3	31.3	17.25%		



B	9.1541
C	1.2816
HUMEDAD OP %	11.37%
DENSIDAD MAXIMA	1.80

Anexo 22. Cálculo del ensayo Proctor estándar.

Nº Punto	Círculo 1				Diámetro promedio	Altura (mm)	Círculo 2				Diámetro promedio	Altura (mm)
	D1	D2	D3	D4			D1	D2	D3	D4		
Punto 1	200	210	220	200	207.5	0.739	200	250	230	230	227.5	0.615
Punto 2	240	230	230	240	235	0.576	250	200	250	220	230	0.602
Punto 3	220	220	230	210	220	0.658	260	250	230	260	250	0.509
Punto 4	210	250	230	220	227.5	0.615	240	200	220	230	222.5	0.643
Punto 5	220	230	230	240	230	0.602	250	210	230	240	232.5	0.589

volumen arena probeta	25000	mm ³
-----------------------	-------	-----------------

$$H = \frac{4V}{\pi D^2}$$

Donde:
H= Altura promedio de las depresiones [mm]
V= Volumen [m³]
D= Diámetro del círculo de arena [m]

Nº Punto	Altura (mm)
Punto 1	0.666
Punto 2	0.577
Punto 3	0.635
Punto 4	0.634
Punto 5	0.585
Promedio	0.619

Anexo 23. Cálculo del ensayo de macrotextura.

	DENSIDAD TEORICA MAXIMA	P2	P4	P1
A	PESO DEL PICNOMETRO	4270.00	4270.00	4270.00
B	PESO DEL PICNOMETRO + MEZCLA ASFALTICA	5586.00	5620.00	5585.00
C	PESO MEZCLA (B-A)	1316.00	1350.00	1315.00
D	TEMPERATURA	23°	23°	23°
E	PESO DEL PICNOMETRO CON MEZCLA AFOR	16563.00	16575.00	16565.00
F	PESO DEL PICNOMETRO CALIBRADO	15773.00	15773.00	15773.00
Gmm		2.496	2.457	2.508

Anexo 24. Cálculos Porcentaje de vacíos.

DATOS DE CAMPO				CÁLCULOS						
Fecha:	Sabado, 03 de Mayo de 2025			Diámetro interior del Infiltrómetro (cm):		2.5				
Ciudad:	Guaranda-Bolivar			Área total interna (cm ²):		490.87				
Lugar:	Tramo vial El arenal-Guaranda			Altura Total del infiltrómetro H (cm ³):		60.90				
Clima:	Soleado	Estado de la vía: Bueno		Altura del espejo de agua inicial (cm):		54.40				
Coordenada del punto:	NORTE		9834449.040	Volumen inicial de agua (cm ³):		26703.52				
	ESTE		724150.080							
INTERVALO	TIEMPO (Horas)		h (cm)	h	delta h	delta h acumulado	Tiempo	t acum	K	
-	7:55 a. m.	0 Horas		6.50	cm	cm	hora	hora	cm/hora	
7:55 a. m.	8:25 a. m.	0.5 Horas		6.90	6.50	0.00	0	0	0	
8:25 a. m.	8:55 a. m.	0.5 Horas		7.10	6.90	0.40	0.4	0.5	0.8	
8:55 a. m.	9:25 a. m.	0.5 Horas		7.30	7.10	0.20	0.6	0.5	1	
9:25 a. m.	9:55 a. m.	0.5 Horas		7.50	7.30	0.20	0.8	0.5	1.5	
9:55 a. m.	10:25 a. m.	0.5 Horas		7.70	7.50	0.20	1	0.5	2	
10:25 a. m.	10:55 a. m.	0.5 Horas		7.90	7.70	0.20	1.2	0.5	2.5	
10:55 a. m.	11:25 a. m.	0.5 Horas		8.10	7.90	0.20	1.4	0.5	3	
11:25 a. m.	11:55 a. m.	0.5 Horas		8.10	8.10	0.00	1.6	0.5	3.5	
11:55 a. m.	12:25 p. m.	0.5 Horas		8.10	8.10	0.00	1.6	0.5	4	
12:25 p. m.	12:55 p. m.	0.5 Horas		8.10	8.10	0.00	1.6	0.5	4.5	
					8.10	0.00	1.6	0.5	5	
Observaciones: Días anteriores al ensayo hubo lluvias en la zona, el Infiltrómetro se colocó a un lado de la vía, cercano a una zanja de desagüe, el estado del asfalto era bueno.				Sumatoria delta h (cm):		1.60				
Tipo de pavimento				Pavimento Asfáltico		Volumen de Infiltración (cm ³):		785.40		
Foto 1: entorno e infiltrómetro antes de verter el agua						Fracción de infiltración (%):		2.9%		
Foto 2: que se mire la base del infiltrómetro asentada sobre la capa de rodadura						Coeficiente de escurrimiento C (%):		97.1%		



Anexo 25. Cálculo del ensayo de infiltración.

VARIABLES	CONDICIONES DEL PAVIMENTO	UNIDADES	CAPAS DEL PAVIMENTO	Buenas Condiciones	PROMEDIO				
				M1	M2	M3	M4	M5	
1	C (Coeficiente de Escurrimiento)	[-]		99.200	99.400	98.400	97.100	98.200	98.460
2	Módulo de Young	Mpa	Subbase	-	30.000	35.570	29.490	-	31.687
3			Subrasante	-	23.370	29.830	23.510	-	25.570
4	Módulo de Rigidez	MN/m	Subbase	-	4.050	4.390	3.980	-	4.140
5			Subrasante	-	3.690	4.020	3.170	-	3.627
6	CBR	%	Subbase	-	4.502	5.041	4.399	-	4.647
7			Subrasante	-	3.972	4.469	3.225	-	3.889
8	Densidad Óptima Proctor	[gr/cm3]	Base	1.800	-	-	1.850	1.740	1.797
9			Subbase	1.810	-	-	1.660	1.500	1.657
10			Subrasante	1.280	-	-	1.320	1.310	1.303
11	Humedad Óptima	[%]	Base	11.370	-	-	14.280	16.450	14.033
12			Subbase	12.580	-	-	26.260	25.530	21.457
13			Subrasante	32.830	-	-	33.140	30.040	32.003
14	Absorción del Material Fino	[%]	Base	2.040	-	-	1.210	1.010	1.420
15			Subbase	3.480	-	-	2.030	2.660	2.723
16			Subrasante	3.950	-	-	4.140	3.670	3.920
17	Absorción del Material Grueso	[%]	Base	4.910	-	-	3.710	-	4.310
18			Subbase	-	-	-	4.890	-	4.890
19	Limite Líquido	[%]	Base	23.67	-	-	24.280	32.200	26.717
20			Subbase	33.10	-	-	42.600	40.870	38.857
21			Subrasante	50.30	-	-	48.870	49.690	49.620
23	Limite Plástico	[%]	Subrasante	45.88	-	-	44.950	45.84	45.557
25	Índice Plástico	[%]	Subrasante	4.15	-	-	3.920	3.85	3.973
26	% Gravas Gruesas	[%]	Base	3.980	-	-	13.950	5.590	7.840
27			Subbase	7.300	-	-	4.430	7.640	6.457
28			Subrasante	0.000	-	-	0.000	0.000	0.000
29	% Gravas Finas	[%]	Base	37.130	-	-	46.360	39.990	41.160
30			Subbase	47.280	-	-	27.590	23.090	32.653
31			Subrasante	9.570	-	-	8.640	8.790	9.000
32	% Arenas Gruesas	[%]	Base	52.250	-	-	36.190	44.790	44.410
33			Subbase	36.280	-	-	54.210	50.580	47.023
34			Subrasante	85.340	-	-	65.610	66.060	72.337
35	% Arenas Finas	[%]	Base	6.270	-	-	2.900	8.430	5.867
36			Subbase	7.940	-	-	12.320	16.190	12.150
37			Subrasante	4.980	-	-	23.820	23.070	17.290
38	% de Material Fino	[%]	Base	0.370	-	-	0.600	1.200	0.723
39			Subbase	1.190	-	-	1.450	1.640	1.427
40			Subrasante	0.110	-	-	1.930	2.080	1.373
41	Clasificación SUCS	[-]	Base	SW	-	-	GW	SW	SW
42			Subbase	GW	-	-	SW	SW	SW
43			Subrasante	SP	-	-	SW	SW	SW

Anexo 26. Resumen de datos finales recolectados IN-SITU.

	CONDICIONES DE LOS NUCLEOS		Buenas Condiciones	Buenas Condiciones	Buenas Condiciones	Buenas Condiciones	Buenas Condiciones	
VARIABLES		Unidad	M1	M2	M3	M4	M5	PROMEDIO
1	C (Coeficiente de Esguerrimiento)	[-]	99.200	99.400	98.400	97.100	98.200	98.460
2	Nucleos - Altura	[cm]	8.050	8.000	7.950	7.900	8.000	7.980
3	Nucleos - Diametro	[mm]	9.500	9.500	9.500	9.500	9.500	9.500
4	Densidad Bruta o Bulk	[g/cm ³]	2.374	2.395	2.379	2.367	2.356	2.374
5	Densidad teórica máxima	[g/cm ³]	2.508	2.496	2.491	2.457	2.451	2.481
6	Humedad	[%]	0.140	0.150	0.140	0.140	0.140	0.142
7	Absorcion	[%]	0.340	0.350	0.340	0.340	0.330	0.340
8	Volumen del espécimen	[cm ³]	570.602	567.057	563.513	559.969	567.057	565.640
9	Porcentaje de Vacios	[%]	4.560	4.050	4.510	3.670	3.870	4.132
10	Volumen de Aire	[cm ³]	30.550	22.969	25.434	20.559	21.954	24.293
11	% Compactacion	[%]	94.650	95.950	95.490	96.330	96.130	95.710
12	Carga Estabilidad	[lb]	4455.000	3313.000	1960.000	1790.000	1887.000	2681.000
13	Deformacion Flujo	[in/100]	45.000	36.700	28.500	36.900	31.000	35.620
14	Macrotectura (Altura promedio de las depresiones)	[mm]	0.666	0.577	0.635	0.634	0.585	0.6194
15	Abrasion Bases	[%]	32.840	-	-	26.260	30.240	29.78

Anexo 27. Resumen de datos finales recolectados NUCLEOS.