



**UNIVERSIDAD NACIONAL DE CHIMBORAZO**

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**CARRERA INGENIERÍA CIVIL**

Características físicas, mecánicas e hidráulicas evaluadas en el pavimento flexible del  
corredor vial Riobamba-Flores.

**Trabajo de Titulación para optar al título de Ingeniero Civil**

**Autor:**

Jiménez Guayanay Wilmer Francisco

Aucapiña Rodríguez Ricardo Javier

**Tutor:**

Mgs. Pazmiño Chiluiza Hernán Vladimir

**Riobamba, Ecuador, 2024**

## DECLARATORIA DE AUTORÍA

Nosotros, **Jiménez Guayanay Wilmer Francisco**, con cédula de ciudadanía **190081442-5**, y, **Aucapiña Rodríguez Ricardo Javier**, con cédula de ciudadanía **180446563-9** autores del trabajo de investigación titulado: “**CARACTERÍSTICAS FÍSICAS, MECÁNICAS E HIDRÁULICAS EVALUADAS EN EL PAVIMENTO FLEXIBLE DEL CORREDOR VIAL RIOBAMBA-FLORES**”, 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, 02 de abril de 2024.



Jiménez Guayanay Wilmer Francisco

CI: 190081442-5



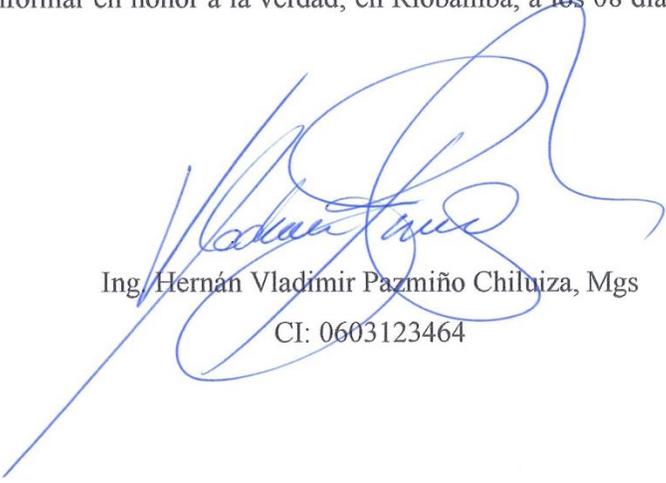
Aucapiña Rodríguez Ricardo Javier

CI: 1804465639

## 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 RIOBAMBA-FLORES”**, bajo la autoría de **Ricardo Javier Aucapiña Rodríguez y Wilmer Francisco Jiménez Guayanay**; 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 08 días del mes de mayo de 2024



Ing. Hernán Vladimir Pazmiño Chiluiza, Mgs

CI: 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 RIOBAMBA-FLORES**, presentado por **Wilmer Francisco Jimenez Guayanay** con cédula de identidad número **190081442-5** y **Ricardo Javier Aucapiña Rodríguez** con cédula de identidad número **180446563-9**, 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 13 de mayo de 2024.

Ing. Angel Edmundo Paredes García, Mgs  
**PRESIDENTE DEL TRIBUNAL DE GRADO**



---

Ing. Alfonso Patricio Arellano Barriga, PhD  
**MIEMBRO DEL TRIBUNAL DE GRADO**



---

Ing. Cesar Augusto Mora Cabrera, Mgs  
**MIEMBRO DEL TRIBUNAL DE GRADO**



---



Dirección  
Académica  
VICERRECTORADO ACADÉMICO



SISTEMA DE GESTIÓN DE LA CALIDAD  
UNACH-RGF-01-04-08.15  
VERSIÓN 01: 06-09-2021

## CERTIFICACIÓN

Que, **Aucapiña Rodríguez Ricardo Javier** con CC: **1804465639** y **Jiménez Guayanay Wilmer Francisco** con CC: **190081442-5**, estudiante de la Carrera de **INGENIERÍA CIVIL**, Facultad de **INGENIERÍA**; ha trabajado bajo mi tutoría el trabajo de investigación titulado "**CARACTERÍSTICAS FÍSICAS, MECÁNICAS E HIDRÁULICAS EVALUADAS EN EL PAVIMENTO FLEXIBLE DEL CORREDOR VIAL RIOBAMBA-FLORES**", cumple con el **10%** de acuerdo al reporte del sistema Anti plagio **TURNITIN**, porcentaje aceptado de acuerdo a la reglamentación institucional, por consiguiente autorizo continuar con el proceso.

Riobamba, 07 de mayo de 2024



Mgs. Vladimir Pazmiño  
TUTOR(A)

## **DEDICATORIA**

*El presente trabajo de investigación se lo dedico a Dios, a mis padres Orlando Jiménez Pintado y Victoria Elitalia Guayanay Cordero; a mis hermanos Geovanny Jiménez Guayanay, Lorena Jiménez Guayanay, Alexandra Jiménez Guayanay, Oscar Jiménez Guayanay, Yadira Jiménez Guayanay; a mis queridos sobrinos Ian Jiménez Castillo, Zoe Jiménez Castillo, Andrew Jiménez Jiménez, Sebastian Reyes Jimenez. Quienes han sido mi inspiración y pilar fundamental en todo este proceso universitario; a mis familiares cercanos, amigos y compañeros con los cuales he compartido momentos buenos y malos en todos estos años de universidad.*

***Wilmer F. Jiménez G.***

## **DEDICATORIA**

*A mis padres, Arnulfo Aucapiña y Laura Rodríguez, quienes han sido mi roca inquebrantable y mi fuente de amor y apoyo desde el primer día. Su sacrificio, dedicación y sabiduría han sido la guía constante que ha marcado mi camino hacia el éxito.*

*A mis queridas hermanas, Luz y Monserrath, por ser mis compañeras incondicionales en este viaje llamado vida. Gracias por su apoyo constante, sus palabras de aliento y su amor inquebrantable.*

*A mis amigos, les agradezco por su amistad sincera, su apoyo incondicional y por haber compartido conmigo risas, alegrías y momentos inolvidables.*

*A Jeicy Gaibor, por brindarme apoyo incondicional en los momentos más difíciles de este camino, tu presencia ha iluminado mis días más oscuros y ha hecho cada momento más especial.*

*Esta tesis está dedicada a todos ustedes, con profundo amor y agradecimiento.*

**Ricardo J. Aucapiña R.**

## **AGRADECIMIENTO**

*Agradecer desde lo más profundo de mi ser primeramente a Dios por darme la salud y sabiduría para poder concluir mi proceso con éxito; a mis padres Orlando Jimenez Pintado y Victoria Guayanay Cordero por todo ese apoyo incondicional tanto económico como moral, que pese a las dificultades siempre estuvieron presentes; a mi hermana Lorena Jiménez Guayanay le estoy infinitamente agradecido por direccionarme desde un principio por el camino correcto; a mis hermanos Geovanny Jiménez Guayanay, Oscar Jiménez Guayanay y hermanas Alexandra Jiménez Guayanay y Yadira Jiménez Guayanay infinitas gracias por sus consejos, motivación y apoyo económico sin condiciones; a mis primos José Guayanay, Alberto Sánchez y Jimmy Jiménez por apoyar con su grano de arena para que siga escalando en esta etapa; a mi compañero de tesis por ese buen trabajo en equipo; a los ingenieros por compartir sus conocimientos y consejos de la vida profesional.*

**Wilmer F. Jiménez G.**

## **AGRADECIMIENTO**

*En tiempos de adversidad, los desafíos nos fortalecen internamente, y los estudiantes de ingeniería civil mostramos una determinación inquebrantable para superar obstáculos y alcanzar nuestras metas más elevadas, elevándonos hacia nuevos horizontes.*

*Mi agradecimiento eterno y sincero a Dios, mi familia, profesores, amigos y compañeros, a la Universidad Nacional de Chimborazo y a la escuela de Ingeniería Civil por su apoyo invaluable durante estos años de formación académica.*

*A mi compañero de tesis por su dedicación y colaboración que fueron fundamentales para el éxito de nuestra tesis.*

*En especial a nuestros tutores Ing. Vladimir Pazmiño Mgs. y Ing. Alfonso Arellano PhD, por su orientación experta, paciencia y apoyo constante durante este proceso académico. Su guía ha sido fundamental para el éxito de este trabajo.*

*¡Gracias a todos!*

**Ricardo J. Aucapiña R.**

## RESUMEN

Las características físicas, mecánicas e hidráulicas son cruciales en el buen desempeño de una estructura de pavimento flexible. La problemática surge debido a que en épocas de alta precipitación, el exceso de infiltración provocado por las grietas; puede generar severos daños en las capas inferiores, por lo contrario si el agua no es evacuada rápidamente esto puede representar un riesgo a la seguridad vial, es por ello que el coeficiente de escurrimiento es muy importante en el análisis de un proyecto vial; por esta razón se planteó medir las características ya antes mencionadas en el corredor vial Riobamba – Flores, así como también determinar cierta relación existente entre ellas. La investigación tiene un enfoque cuantitativo de carácter descriptivo. El corredor vial está constituido por una base (SP) clase 2 compactada al 95% cuyo material grueso absorbe un 2.67% y el fino un 0.67. Subbase SW clase 1 compactada al 88% y una subrasante (SP-SM) respectivamente. El CBR en la base fue levemente inferior a 70%, la subbase presento un valor cercano al 50% y la subrasante con un valor menor a 4%. El coeficiente de escurrimiento promedio se mantuvo en 85.9%. Es importante mencionar que los puntos agrietados presentaron los valores más bajos en las distintas características evaluadas. Adicionalmente los parámetros que se relacionaron como compactación, CBR y escurrimiento resultaron ser directamente proporcionales.

**Palabras clave:** Compactación, módulo de Young, coeficiente de escurrimiento.

## ABSTRACT

The physical, mechanical, and hydraulic characteristics are crucial to the excellent performance of a flexible pavement structure. The problematic issue is that during high precipitation, the excess infiltration caused by cracks can damage the lower layers severely. Conversely, if the water is not evacuated quickly, it can risk road safety. Therefore, the runoff coefficient is significant when analyzing a road project. For this reason, it was proposed that the characteristics above be measured in the Riobamba-Flores Road corridor and that the existing relationship between them be determined. The research has a quantitative descriptive approach. The road corridor comprises a 95% compacted class 2 (SP) base, whose coarse material absorbs 2.67% and the fine material 0.67%. It also has a class 1 compacted 88% SW subbase and a (SP-SM) subgrade, respectively. The CBR in the base was slightly less than 70%, the sub-base presented a value close to 50%, and the subgrade had a value of less than 4%. The average runoff coefficient remained at 85.9%. It is important to note that the cracked points present the lowest values in the different characteristics evaluated. Additionally, the related parameters, such as compaction, CBR, and runoff, proved to be directly proportional.

**Keywords:** Compaction, Young's modulus, runoff coefficient.



REVISTA ELECTRONICA DE INVESTIGACION  
SOFIA FERNANDA  
FREIRE CARRILLO

Reviewed by:

Mgs. Sofia Freire Carrillo

**ENGLISH PROFESSOR**

C.C. 0604257881

## ÍNDICE GENERAL

DECLARATORIA DE AUTORÍA .....	
DICTAMEN FAVORABLE DEL TUTOR.....	
CERTIFICADO DE LOS MIEMBROS DEL TRIBUNAL .....	
CERTIFICADO ANTIPLAGIO.....	
DEDICATORIA.....	
DEDICATORIA.....	
AGRADECIMIENTO .....	
AGRADECIMIENTO .....	
RESUMEN.....	
ABSTRACT .....	
ÍNDICE GENERAL .....	
ÍNDICE DE TABLAS .....	
INDICE DE FIGURAS .....	
INDICE DE ANEXOS.....	
TABLA DE ACRONIMOS .....	
<b>CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>19</b>
1.1 Zona de estudio.....	19
1.2 Antecedentes.....	19
1.3 Planteamiento del problema.....	21
1.4 Justificación.....	22
1.5 Objetivos .....	22
1.5.1 Objetivo General.....	22
1.5.2 Objetivos Específicos.....	22
<b>CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO .....</b>	<b>23</b>
2.1 Aspectos generales.....	23
2.1.1 Pavimento flexible.....	23
2.1.2 Capas granulares del pavimento flexible.....	23
2.1.3 Estructura del pavimento flexible.....	23
2.1.3.1 Capa de rodadura.....	23
2.1.3.2 Base.....	24
2.1.3.3 Sub-base.....	24

2.1.3.4	Subrasante.....	24
2.2	Caracterización del terreno natural de la zona.....	24
2.3	PROPIEDADES FÍSICAS.....	27
2.3.1	Densidad.....	27
2.3.2	Grado de compactación.....	27
2.3.3	Absorción.....	27
2.4	PROPIEDADES MECÁNICAS.....	27
2.4.1	Módulo de Young.....	27
2.4.2	CBR.....	28
2.5	PROPIEDADES HIDRÁULICAS.....	28
2.5.1	Infiltración de la capa de rodadura.....	28
2.5.2	Infiltración en función de los estratos del pavimento flexible.....	28
2.5.3	Coeficiente de escorrentía.....	29
2.6	Equipos eléctricos.....	29
2.6.1	GeoGauge.....	29
2.6.2	Densímetro eléctrico EDG.....	30
<b>CAPÍTULO III. METODOLOGÍA .....</b>		<b>31</b>
3.1	Tipo y diseño de la investigación.....	31
3.2	Definición de la muestra.....	32
3.2.1	Población.....	32
3.2.2	Muestra.....	32
3.2.3	Tipo de muestreo.....	32
3.2.4	Tamaño de muestra.....	32
3.3	Criterios de evaluación.....	32
3.4	Técnicas de recolección de datos.....	35
3.5	Metodología de los ensayos en laboratorio.....	35
3.5.1	Ensayo Proctor Modificado.....	35
3.5.2	Ensayo de Granulometría de agregados.....	35

3.5.3	Ensayo de límites de Atterberg.....	35
3.5.3.1	Limite plástico.....	35
3.5.3.2	Limite líquido.....	36
3.5.4	Densidad y absorción del agregado fino.....	36
3.5.5	Densidad y absorción del agregado grueso.....	36
3.6	Metodología ensayos IN SITU.....	36
3.6.1	Ensayo cono de arena.....	36
3.6.2	CBR in situ con el equipo electro-mecánico GeoGuage. ....	36
3.6.2.1	Fórmulas de estimación de CBR.....	37
3.6.3	Ensayo in situ con el densímetro eléctrico (EDG) .....	38
3.6.3.1	Grado de compactación.....	39
3.6.4	Infiltración y escurrimiento, (Método de doble anillo – UNACH 2024). ....	39
<b>CAPÍTULO IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....</b>		<b>42</b>
4.1	RESULTADOS CARACTERÍSTICAS FÍSICAS.....	42
4.1.1	Características geológicas .....	42
4.1.2	Resultados ensayos de laboratorio.....	42
4.1.2.1	Ensayo Proctor Modificado.....	42
4.1.2.2	Ensayo de granulometría.....	46
4.1.2.2.1	Granulometría, base.....	46
4.1.2.2.2	Granulometría, subbase.....	51
4.1.2.2.3	Granulometría, subrasante.....	53
4.1.2.3	Ensayo limite líquido y plástico.....	54
4.1.2.4	Densidad y absorción del agregado (Grueso y fino). ....	55
4.1.3	Resultados de los ensayos IN-SITU .....	56
4.1.3.1	Ensayo cono de arena.....	56
4.1.3.2	Densímetro eléctrico (EDG).....	57
4.1.4	Comparación de densidades.....	59

4.1.5	Comparación grado de compactación.....	60
4.2	RESULTADOS DE LAS CARACTERÍSTICAS MECÁNICAS. ....	61
4.2.1	Ensayo in Situ.....	61
4.2.1.1	GeoGauge, base.....	61
4.2.1.2	GeoGauge, subbase.....	62
4.2.1.3	GeoGauge, subrasante.....	62
4.3	RESULTADOS DE LAS CARACTERÍSTICAS HIDRÁULICAS. ....	63
4.3.1	Ensayos In situ.....	63
4.3.1.1	Ensayo de infiltración con el instrumento de doble anillo.....	63
4.3.1.2	Curvas de infiltración.....	66
4.4	RELACIÓN DE LAS PROPIEDADES FÍSICO-MECÁNICAS Y LAS PROPIEDADES HIDRÁULICAS DEL PAVIMENTO FLEXIBLE. ....	68
4.4.1	Relación infiltración vs grado de compactación. ....	68
4.4.2	Relación grado de compactación vs Razón de Soporte California.....	69
4.4.3	Relación infiltración vs Razón de Soporte California. ....	70
<b>CAPÍTULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....</b>		<b>71</b>
5.1	Conclusiones.....	71
5.2	Recomendaciones .....	72
<b>BIBLIOGRAFÍA .....</b>		<b>73</b>
<b>ANEXOS 76</b>		

### ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.	Valores de C para diversos tipos de superficies.....	29
Tabla 2.	Descripción de los criterios de evaluación de los puntos de control.....	34
Tabla 3.	Coordenadas UTM-84, de los puntos evaluados. ....	35
Tabla 4.	Caracterización y formación geológica, sector estudiado .....	42
Tabla 5.	Cuadro de resumen de $\omega$ y $\gamma_{dm\acute{a}x}$ capas granulares y subrasante. ....	44
Tabla 6.	Granulometría promedio base.....	46
Tabla 7.	Caras fracturadas - base.....	47
Tabla 8.	Granulometría promedio subbase. ....	51

Tabla 9.	Caras fracturadas - subbase.....	52
Tabla 10.	Granulometría promedio subrasante. ....	53
Tabla 11.	Resultados de los límites de Atterberg, de la base .....	54
Tabla 12.	Densidad y absorción de agregados, capa granular base.....	55
Tabla 13.	Resultados grado de compactación. ....	56
Tabla 14.	Grado de compactación. Método alternativo (EDG).....	57
Tabla 15.	Estimación del CBR, base. ....	61
Tabla 16.	Estimación del CBR, subbase. ....	62
Tabla 17.	Estimación del CBR, subrasante. ....	62
Tabla 18.	Datos de campo ensayo infiltración. ....	63
Tabla 19.	Resultados de infiltración .....	64

## INDICE DE FIGURAS

Figura 1.	Tramo evaluado.....	19
Figura 2.	Composición de un pavimento flexible.....	23
Figura 3.	Tipo de suelo sector de estudio. Adaptado MAG et al.2015.....	25
Figura 4.	Formación geológica tramo de estudio. Adaptado MAG et al. 2015.....	26
Figura 5.	Metodología propuesta. ....	31
Figura 6.	Colocación del equipo. ....	37
Figura 7.	Conexión de sensores en la consola EDG. ....	39
Figura 8.	Perfiles burletes alambrados 341. ....	40
Figura 9.	Vista lateral y superior del caucho. ....	40
Figura 10.	Contorno inferior de cilindros con caucho. ....	41
Figura 11.	Esquema infiltrómetro de doble anillo. ....	41
Figura 12.	Vista lateral del infiltrómetro con los 15 kg por lado del marco portante.....	41
Figura 13.	Curvas de compactación, base. ....	43
Figura 14.	Curvas de compactación,subbase. ....	43
Figura 15.	Curvas de compactación, subrasante.....	43
Figura 16.	Curvas granulométricas, base. ....	48
Figura 17.	Curvas granulométricas, subbase. ....	48
Figura 18.	Curvas granulométricas, subrasante. ....	48
Figura 19.	Granulometría promedio, base.....	49
Figura 20.	Granulometría promedio, subbase.....	49
Figura 21.	Granulometría promedio, subrasante. ....	49

Figura 22. Carta de plasticidad subrasante, punto 4. ....	55
Figura 23. Densidades base .....	59
Figura 24. Densidades subbase .....	59
Figura 25. Densidades subrasante.....	59
Figura 26. Grado de compactación, base. ....	60
Figura 27. Grado de compactación, subbase. ....	60
Figura 28. Grado de compactación, subrasante. ....	60
Figura 29. Comparación entre coeficientes normativos y reales. ....	65
Figura 30. Curvas de infiltración del corredor vial Riobamba - Flores .....	66
Figura 31. Curvas de infiltración muestras 1,2 y 5. ....	66
Figura 32. Curvas de infiltración muestras 3 y 4. ....	66
Figura 33. Relación grado de compactación vs infiltración. ....	68
Figura 34. Relación Compactación vs soporte de California. ....	69
Figura 35. Relación infiltración vs CBR .....	70

## INDICE DE ANEXOS

<b>Anexo 1.</b> Ensayo cono y arena.....	76
<b>Anexo 2.</b> Extracción de muestras de base, subbase y subrasante. ....	76
<b>Anexo 3.</b> Ensayo Proctor Modificado, enrazado y pesaje del espécimen. ....	76
<b>Anexo 4.</b> Análisis granulométrico por tamizado.....	77
<b>Anexo 5.</b> Ensayo límite líquido (casa grande). ....	77
<b>Anexo 6.</b> Ensayo de plasticidad y toma de muestras para determinar humedad. ....	77
<b>Anexo 7.</b> Ensayo densidad y absorción del agregado fino. ....	78
<b>Anexo 8.</b> Ensayo GeoGauge. ....	78
<b>Anexo 9.</b> Ensayo en campo densímetro eléctrico, Punto 1 y Punto 2.....	78
<b>Anexo 10.</b> Ensayo de infiltracion, punto 3 .....	79
<b>Anexo 11.</b> Curva de compactación, base punto 2. ....	80
<b>Anexo 12.</b> Clasificación de suelos (SUCS), punto de control 1, base. ....	81
<b>Anexo 13.</b> Densidad base, punto de control 1. ....	82
<b>Anexo 14.</b> Limite líquido y plástico del punto de control 1, muestra base. ....	83
<b>Anexo 15.</b> Infiltración y escurrimiento punto de control 1. ....	84

## TABLA DE ACRONIMOS

$\omega$ = Humedad óptima %

$Y_{dm\acute{a}x}$ = Masa volumétrica seca máxima.

**TPDA**= Trafico promedio diario anual.

**NEVI**= Norma Ecuatoriana Vial

**MTOP**= Ministerio de Transporte y Obras Publicas 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

**SUCS**: Sistema Unificado de Clasificación de Suelos.

**K**= Velocidad de infiltración.

**LP**= límite plástico.

**UTM**= Universal Transverse Mercator.

**EDG**= Electrical Density Gauge, traducido al español como densímetro eléctrico.

**Cu**= Coeficiente de uniformidad.

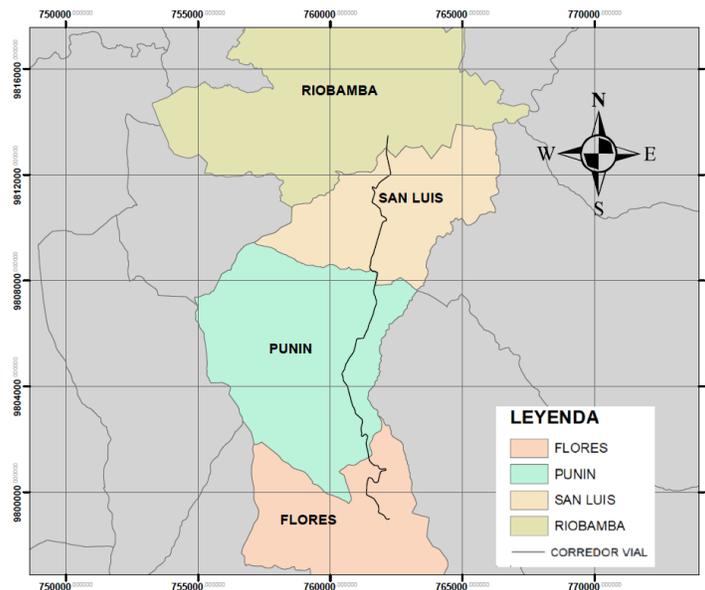
**Cc**= Coeficiente de curvatura.

**GEOGAUGE**= Traducido al español como geo medidor.

# CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN

## 1.1 Zona de estudio.

El proyecto de investigación se encuentra ubicado en la provincia de Chimborazo cantón Riobamba. Situado a 2754 msnm, cuenta con un clima regularmente frio, con dos estaciones húmeda y seca. El área del proyecto ha sido enfocada, en la vía de pavimento flexible, que conecta Riobamba con la ciudad de Macas. La misma que empezó a construirse en 1903 y concluyo en 2014; tiene una longitud de 154 km.



**Figura 1.** Tramo evaluado.

El tramo en análisis atraviesa las parroquias de San Luis, Punín y flores, la distancia del mismo es de 20 km aproximadamente como se observa en la **figura 1**.

## 1.2 Antecedentes

En el ámbito mundial de las carreteras, se pueden observar diversos tipos de pavimentos construidos con diferentes tecnologías. Entre ellos, los pavimentos flexibles son especialmente notables debido a su estructura estratificada, que consiste en capas granulares recubiertas por una delgada lámina de ligante asfáltico (Wright & Paquete, 1987). La construcción de este tipo de pavimentos se basa en consideraciones económicas y técnicas que abarcan aspectos como las propiedades del suelo, la estimación del tráfico esperado y la comodidad para los usuarios. No obstante, es crucial destacar el impacto que las condiciones climáticas, especialmente las precipitaciones, tienen sobre los pavimentos

flexibles. Este aspecto meteorológico se convierte en un enfoque fundamental para la presente investigación, ya que la correcta construcción de carreteras pavimentadas se ha vuelto cada vez más desafiante debido al impacto del clima (Sánchez y Palomares, 2018). Por lo tanto, comprender adecuadamente este fenómeno en las redes viales resultará de suma importancia para garantizar la eficiencia y durabilidad de los pavimentos flexibles en diferentes entornos geográficos y climáticos. La diversidad de los materiales de construcción, que varía según las características regionales, cobra una importancia significativa en el diseño de pavimentos. Actualmente, se suele ignorar la naturaleza heterogénea de estos materiales, asumiéndolos como tal (Brandão, 2021), lo que conlleva a diferencias que generan notables variaciones en las condiciones de drenaje. Por esta razón, es fundamental contar con un conocimiento detallado de las propiedades físicas, mecánicas e hidráulicas del pavimento, pues esto servirá como base esencial para adaptar eficazmente el diseño y construcción de un pavimento flexible de acuerdo con las circunstancias específicas de cada ubicación. Dentro del ámbito de las propiedades físicas del pavimento, se refiere a las características intrínsecas que describen su composición y estructura, lo cual engloba aspectos como la densidad de los materiales empleados, el espesor de las capas e incluso su resistencia (Menéndez, 2013). En contraste, al referirnos a las características mecánicas, estamos hablando de las propiedades vinculadas a la capacidad de los pavimentos para resistir las condiciones climáticas y el tráfico vehicular. Estas propiedades incluyen la resistencia a la flexión y compresión, la capacidad de soporte estructural, la fricción entre las partículas del suelo, la resistencia al desgaste y su módulo de elasticidad (Anguas, López & Martínez, 2002). Por último, las propiedades hidráulicas inherentes de los pavimentos hacen referencia a su capacidad para gestionar el flujo de agua en la superficie y el drenaje subterráneo. Dentro de este contexto, se incluyen varios atributos que vinculan al pavimento con el suelo, como la permeabilidad, la textura superficial, la saturación, la capacidad de infiltración y la inclinación del camino (Zepeda, 1989). El objetivo principal de esta investigación es medir las características físicas, mecánicas e hidráulicas relacionadas con la permeabilidad del pavimento flexible en el corredor vial Flores-Cebadas. Según estudios llevados a cabo por el Ministerio de Transporte y Obras Públicas (MTO), en este tramo circulan diariamente 600 vehículos, tanto livianos como de

carga pesada, lo que demuestra su importancia como una arteria vial crucial para el comercio y la economía de la provincia.

Es importante mencionar que este proyecto investigativo forma parte de una etapa de un proyecto mucho más amplio y complejo; es conveniente manifestar que se trata de una primera etapa donde básicamente consiste en el levantamiento de datos y algunas relaciones parciales de los mismos. En el mediano o largo plazo se pretende incursionar en el diseño de un pavimento permeable con la finalidad de reducir las inundaciones, los accidentes por hidroplaneo y a su vez recargar los acuíferos.

### **1.3 Planteamiento del problema**

El pavimento flexible puede enfrentar varios problemas relacionados con las características hidráulicas. Estas están relacionadas con el manejo y drenaje del agua en la superficie de la carretera. Estos problemas pueden afectar la seguridad vial y la durabilidad del pavimento. El debilitamiento del ligante asfáltico, la erosión de los materiales granulares y la reducción de la resistencia estructural del pavimento son factores que están relacionados con las características físicas y mecánicas de la estructura de pavimento asfáltico; sin embargo, la infiltración de agua en las capas del pavimento puede provocar los problemas mencionados anteriormente. Aunque el pavimento flexible es relativamente impermeable, las juntas de construcción y grietas pueden desarrollarse con el tiempo debido al envejecimiento, las cargas del tráfico, las condiciones climáticas y la falta de un sistema de drenaje adecuado. Esto puede ocasionar que el agua se infiltre en las capas inferiores del pavimento causando deformaciones, hundimientos y pérdida de capacidad portante; por lo tanto, el desafío radica en conocer el nivel de impermeabilidad del pavimento, buscando datos de campo que permitan actualizar los valores normativos que se tiene desde hace varias décadas. Por tales motivos, se ha planteado la siguiente pregunta de investigación: ¿Cómo se relaciona las características físico-mecánicas en pavimentos flexibles en el corredor vial San Luis –Flores con el comportamiento de las características hidráulicas de escorrentía, saturación y tiempos de infiltración evaluadas en campo y laboratorio con el uso de aparatos manuales y eléctricos?

## **1.4 Justificación**

Las propiedades físico-mecánicas y las características hidráulicas son elementos clave que influyen en la integridad estructural y la capacidad de drenaje de un pavimento. Evaluar estas cualidades, tanto en el terreno in-situ como en laboratorio mediante equipos manuales como eléctricos, es esencial para comprender y gestionar adecuadamente los pavimentos flexibles. La forma en que el agua fluye a través del pavimento está directamente relacionada con sus características físicas y mecánicas. Una superficie con textura y porosidad adecuadas, junto con una buena capacidad de drenaje, facilita el flujo eficiente del agua hacia los sistemas de drenaje, evitando así problemas como la acumulación de agua en la superficie de la carretera.

Actualizar los valores de escorrentía en corredor vial Riobamba-Flores es crucial debido a que los valores datan de décadas pasadas, con esto se lograra adaptarse a las condiciones cambiantes y mejorar el diseño hidráulico de las carreteras, lo que conlleva una serie de beneficios adicionales, como la protección contra daños causados por el agua, una mayor estabilidad estructural, una reducción en el riesgo de accidentes, y menos necesidades de mantenimiento, con impactos positivos para el medio ambiente.

## **1.5 Objetivos**

### **1.5.1 Objetivo General**

- Determinar las características físicas, mecánicas e hidráulicas del pavimento flexible realizando sondeos en campo con equipos eléctricos y valoración en laboratorio.

### **1.5.2 Objetivos Específicos**

- Medir en laboratorio características físicas del pavimento flexible.
- Evaluar IN SITU las características mecánicas e hidráulicas usando equipos eléctricos.
- Establecer la relación de las características físico-mecánicas en pavimentos flexibles con el comportamiento hidráulico.

## CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO

### 2.1 Aspectos generales.

#### 2.1.1 Pavimento flexible.

Es un tipo de carretera elaborada por una capa asfáltica a base de una mezcla bituminosa en caliente cuya capa permite absorber tensiones y redistribuir cargas, lo que contribuye a una mayor durabilidad y resistencia a las deformaciones causadas por el tráfico y las condiciones ambientales. (Giordani & Leone, 2015)

#### 2.1.2 Capas granulares del pavimento flexible.

Las capas granulares específicamente la base y subbase, son componentes fundamentales en la construcción de carreteras y otras superficies de rodadura. Están compuestas por materiales granulares, como grava y arena cuya función principal es distribuir las cargas del tráfico vehicular de manera uniforme, evitando deformaciones y asentamientos prematuros; adicionalmente influyen directamente en la resistencia, drenaje y capacidad de soporte de la estructura vial. (Quintana & Lizcano, 2007).

#### 2.1.3 Estructura del pavimento flexible

Los pavimentos flexibles suelen constar de varias capas, como la capa de rodadura, base, subbase y subrasante. En la **figura 2** se detalla la estructura del mismo.



**Figura 2.** Composición de un pavimento flexible.  
**Fuente:** (Giordani & Leone, 2020).

##### 2.1.3.1 Capa de rodadura.

La capa de rodadura es la capa superior diseñada para resistir las cargas y desgastes causados por el tráfico vehicular. Esta capa está compuesta típicamente por mezclas asfálticas, que son combinaciones específicas de agregados y asfalto bituminoso. Su función principal es proporcionar una superficie resistente, duradera y con adherencia para facilitar el rodamiento de los vehículos, mientras absorbe las tensiones dinámicas generadas

por el tráfico. La calidad y espesor de la capa de rodadura son fundamentales para la vida útil y el rendimiento del pavimento flexible, ya que juega un papel crucial en la resistencia a la fatiga, la abrasión y otros factores ambientales (MOP-001-F, 2002).

#### **2.1.3.2 Base.**

La base en un pavimento flexible tiene la función principal de proporcionar soporte estructural al sistema. Ayuda a distribuir uniformemente las cargas, evita la deformación excesiva del pavimento y contribuye a la estabilidad general del sistema. (MOP-001-F, 2002).

#### **2.1.3.3 Sub-base.**

Tiene como propósito disminuir el costo del pavimento al convertir un cierto grosor de la capa base en un equivalente en espesor de material de sub-base. Su función incluye la protección de la base contra fenómenos como capilaridad, cambios volumétricos y pérdida de resistencia (MOP-001-F, 2002).

#### **2.1.3.4 Subrasante.**

Es la capa más profunda y actúa como la base sobre la cual se construye la carretera. La subrasante debe prepararse adecuadamente para soportar las cargas del tráfico y para resistir la acción de las fuerzas naturales, como las variaciones de humedad y las fluctuaciones de temperatura (MOP-001-F, 2002).

### **2.2 Caracterización del terreno natural de la zona.**

Con el propósito de llevar a cabo un análisis comparativo con las muestras extraídas in situ de la clasificación de suelo en el sector evaluado, la **figura 4**, describe los tipos de suelo en función de la información proporcionada por el ministerio de agricultura y ganadería de Ecuador MAG, (2015). En donde los materiales que predominan en el tramo vial son arenosos y limosos. Así como también es importante detallar las formaciones geológicas presentes en la zona, la **figura 3** exhibe las mismas.

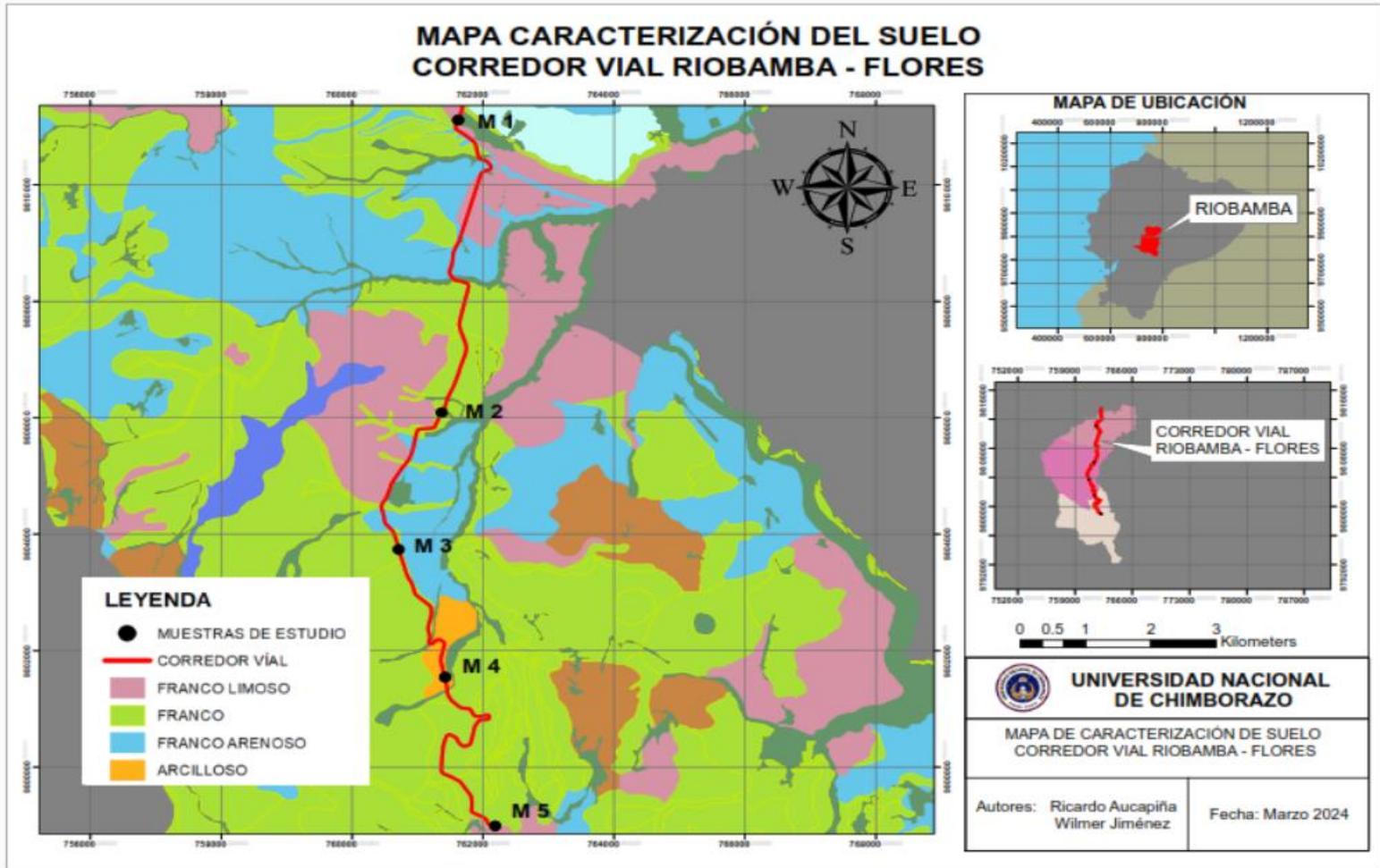


Figura 3. Tipo de suelo sector de estudio. Adaptado MAG et al.2015.

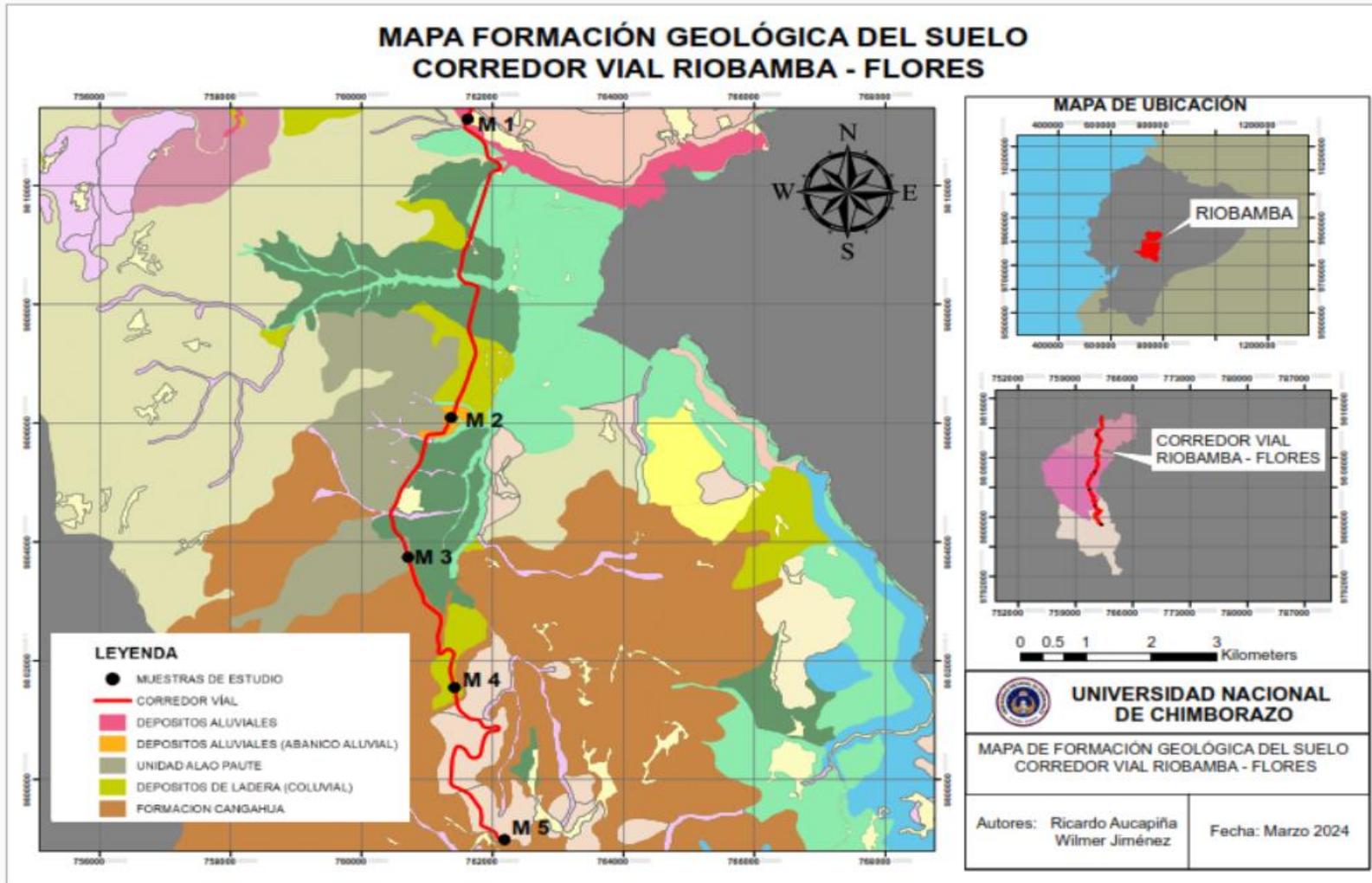


Figura 4. Formación geológica tramo de estudio. Adaptado MAG et al. 2015.

## **2.3 PROPIEDADES FÍSICAS.**

### **2.3.1 Densidad.**

Está relacionada directamente con la compactación, al comprimir los agregados, se aumenta el contacto entre las superficies y la fricción entre las partículas, lo que conduce a una mayor estabilidad y resistencia. Mejorando la integridad de la estructura del pavimento (Zambrano Mesa, Tejeda Piusseaut, & Aaenlle, 2020).

### **2.3.2 Grado de compactación.**

La compactación se evalúa generalmente como un porcentaje de la densidad óptima del material utilizado, y tanto los suelos de fundación como los de relleno deben alcanzar al menos el 95% del ensayo Proctor estándar o la máxima densidad del suelo (Romero & Vilca, 2016).

### **2.3.3 Absorción**

La absorción se refiere al aumento de peso del agregado causado por la entrada de agua en los poros de las partículas a lo largo de un intervalo de tiempo definido, sin contar el agua que permanece en la superficie de las partículas y se expresa como un porcentaje del peso en seco del material. También conocida como higroscopicidad que es una característica presente en los materiales granulares que está determinada por la porosidad del material. Se define como la habilidad para absorber o liberar la humedad del entorno circundante (Díaz, 2005).

Según HOLCIM S.A, (2022). La absorción para una base granular es inferior al 5%.

## **2.4 PROPIEDADES MECÁNICAS.**

### **2.4.1 Módulo de Young.**

El módulo de Young es una propiedad importante en la ingeniería de pavimentos, ya que describe la rigidez de los materiales utilizados en las diferentes capas de la estructura. En la evaluación de la estructura de pavimentos utilizando un geogauge, el módulo de Young juega un papel importante en la determinación de las propiedades mecánicas de los materiales que componen las distintas capas del pavimento. Un mayor módulo de Young indica una mayor rigidez del material en la determinación de la rigidez de la estructura del pavimento flexible. (Freire, 2005)

## **2.4.2 CBR.**

Conocido como California Bearing Ratio, es un indicador que mide la resistencia del suelo, utilizándose principalmente como criterio para evaluar la capacidad de subrasante, subbase y base en el diseño de pavimentos. Consiste en un test empírico realizado en condiciones de humedad y densidad controladas (Córdova, 2015).

## **2.5 PROPIEDADES HIDRÁULICAS.**

### **2.5.1 Infiltración de la capa de rodadura.**

La infiltración en la capa de rodadura se refiere al proceso en el que el agua penetra en la superficie del pavimento. Este fenómeno puede tener efectos negativos en la durabilidad y estabilidad del pavimento, especialmente en climas lluviosos. La capacidad de infiltración del pavimento depende de su porosidad, textura y estado de conservación. Un adecuado drenaje y diseño de la capa de rodadura son cruciales para minimizar el riesgo de daños causados por la infiltración de agua. Además, técnicas como el uso de mezclas porosas o sistemas de drenaje superficial pueden ayudar a mejorar la gestión del agua en la capa de rodadura (Rebolledo, 2010).

### **2.5.2 Infiltración en función de los estratos del pavimento flexible.**

La importancia de la infiltración del agua lluvia en el estrato granular de la base, radica en la necesidad de comprender su dinámica. En un pavimento flexible la capa más afectada por la infiltración de agua es comúnmente la base, la misma es crítica para la distribución de cargas y para proporcionar un drenaje adecuado

Según Garzón & Báez (2015). Es bien conocido que los pavimentos están sujetos a amplias áreas expuestas a condiciones ambientales adversas, como la lluvia. Al aumentar la cantidad de agua en la base, la capacidad de carga de la estructura se reduce, afectando directamente sus características funcionales y la calidad del servicio que proporcionan.

Según Martínez *et al* (2009). La permeabilidad secundaria de la capa de rodadura en pavimentos flexibles, puede ser más alta de lo que comúnmente se asume con rangos entre  $1 \times 10^{-3}$  y  $1 \times 10^{-4}$  cm/s. Esto permite que una cantidad significativa de las aguas de escorrentía se infiltre en esta capa. Inicialmente esta agua se acumula en la interfaz entre la carpeta asfáltica y la superficie de la base. Debido a que la base está altamente compactada y es semi-impermeable, impide que el agua drene eficientemente generando así que

responda a las cargas vehiculares, distribuyéndolas en todas las direcciones, incluso hacia arriba, generando subpresión bajo la carpeta asfáltica, lo que puede provocar su levantamiento y deterioro.

### 2.5.3 Coeficiente de escorrentía.

En el porcentaje de agua total precipitada tomada en consideración, puesto que no todo el volumen de precipitación pluvial drena por medio de alcantarilla natural o artificial. Esto se debe a la evaporación, infiltración, retención del suelo, etc... Este coeficiente está en función del material sobre el cual circula el agua y varía desde 0.01 a 0.95. (Sanchez San Roman & F. Javier , 2016).

En nuestro país están normados ciertos valores según el tipo de material como se muestra en la **Tabla 1**.

**Tabla 1.** Valores de C para diversos tipos de superficies

<b>TIPO DE SUPERFICIE</b>	<b>C</b>
Cubierta metálica o teja vidriada	0,95
Cubierta con teja ordinaria o impermeabilizada	0,9
Pavimentos asfálticos en buenas condiciones	0,85 a 0,9
Pavimentos de hormigón	0,8 a 0,85
Empedrados (juntas pequeñas)	0,75 a 0,8
Empedrados (juntas ordinarias)	0,4 a 0,5
Pavimentos de macadam	0,25 a 0,6
Superficies no pavimentadas	0,1 a 0,3
Parques y jardines	0,05 a 0,25

**Adaptado:** NORMA URBANA EXIEOS

## 2.6 Equipos eléctricos

### 2.6.1 GeoGauge.

GeoGauge se presenta como una herramienta exclusiva para el control de calidad en el campo, diseñada para evaluar la uniformidad de las capas de pavimento sin recurrir a mediciones unidas, sino midiendo la variabilidad de la rigidez en toda la estructura. Destaca

por su eficacia en la identificación de anomalías de construcción que podrían pasar desapercibidas con enfoques convencionales que solo consideran mediciones de densidad o porcentaje de compactación. Al centrarse en la medición de la rigidez, GeoGauge tiene la capacidad de revelar y contribuir a la reducción de las variabilidades en las propiedades de la capa. Este enfoque permite tomar medidas correctivas durante la construcción, asegurando la obtención de una base y subrasante de la más alta calidad, incluso ante las fluctuaciones en los materiales empleados. (COTECNO, 2022).

El GeoGauge es el instrumento complementario perfecto para los dispositivos de medición de densidad, como los medidores nucleares y el densímetro eléctrico. Los dispositivos de medición de densidad se pueden usar para asegurar que se logre una compactación adecuada y GeoGauge se puede usar para verificar que se cumplan los valores de rigidez / módulo asumidos en las especificaciones de diseño de estructuras de pavimento. (COTECNO, 2022).

GeoGauge funciona aplicando una fuerza vibratoria a 25 frecuencias específicas, que producen pequeñas desviaciones en el material. El desplazamiento resultante se mide con GeoGauge y se muestra como rigidez determinada por la relación entre la fuerza y la deflexión. GeoGauge produce niveles de tensión y tensión comunes para pavimentos, camas y aplicaciones de cimientos. Además, el módulo de Young y de cizalla se puede determinar a partir de las mediciones de GeoGauge (COTECNO, 2022).

GeoGauge admite la siguiente norma ASTM D6758.

### **2.6.2 Densímetro eléctrico EDG.**

El dispositivo de medición de densidad eléctrica (EDG) presenta una alternativa sin recurrir a la energía nuclear para evaluar la humedad y densidad de suelos compactados. Se emplea como una herramienta para supervisar las actividades diarias de compactación al proporcionar resultados de medición y rendimiento que son altamente comparables a los obtenidos mediante métodos tradicionales, como el cono de arena. El equipo EDG utiliza un modelo de suelo específico a través de un algoritmo de corrección patentado, lo que posibilita la determinación automática de la densidad (Humboldt, 2016).

## CAPÍTULO III. METODOLOGÍA

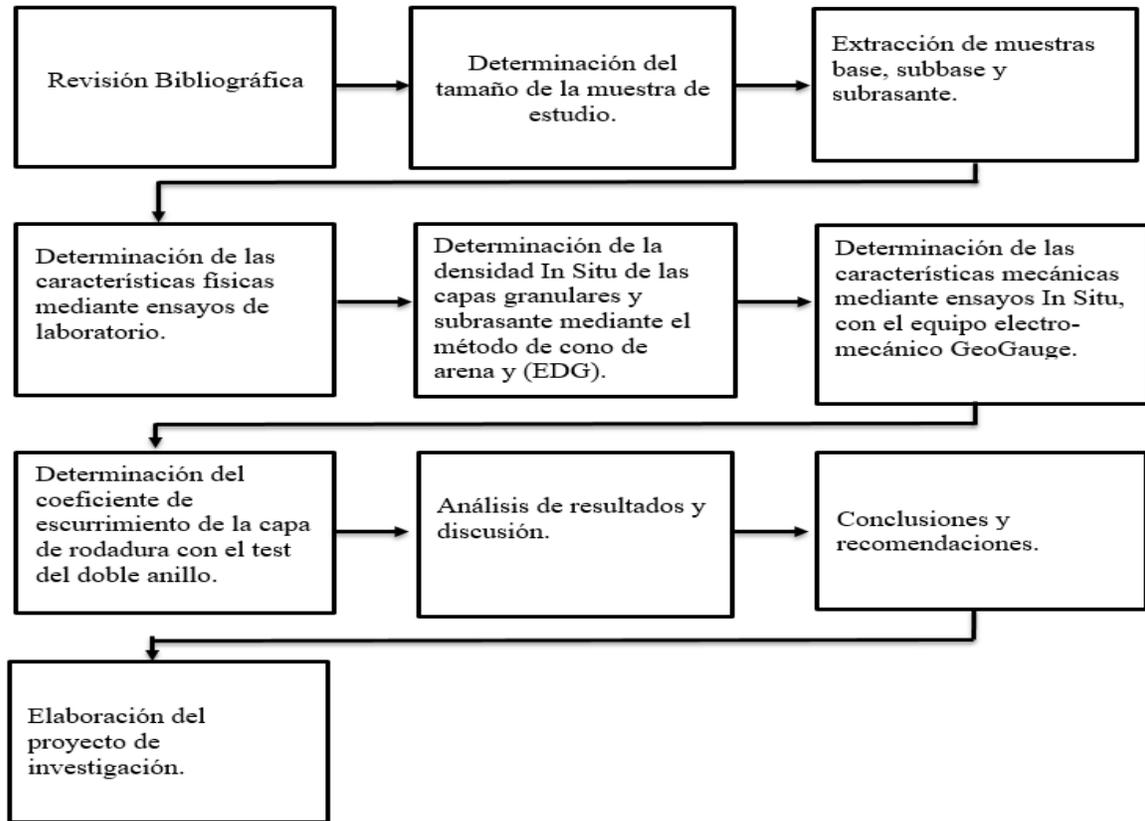


Figura 5. Metodología propuesta.

### 3.1 Tipo y diseño de la investigación

En el presente estudio se propone una metodología de enfoque cuantitativo, con la finalidad de alcanzar los objetivos planteados. Dada la índole de los datos que serán predominantemente derivados de ensayos tanto in situ como de laboratorio. Dicha metodología, se empleará, para la recopilación de datos relacionados con las características físicas, mecánicas e hidráulicas de las capas de un pavimento flexible, de un tramo vial.

El diseño de investigación propuesto, en este proyecto. Es descriptivo, dado que, mediante los resultados de los ensayos; se describirá las características de las capas del pavimento flexible.

## **3.2 Definición de la muestra.**

### **3.2.1 Población.**

La población hace referencia a las capas granulares de pavimento flexible del tramo que conecta los poblados de San Luis y Flores.

### **3.2.2 Muestra.**

Representa la base, subbase y subrasante de cinco perforaciones ejecutadas en dicho sector.

### **3.2.3 Tipo de muestreo.**

El tipo de muestreo que se empleo es sistemático estratificado. Considerado sistemático por las perforaciones regulares en cada uno de los puntos y estratificado considerando la uniformidad del material a lo largo de la vía.

### **3.2.4 Tamaño de muestra.**

La distancia entre San Luis – Flores es de aproximadamente 20 km, las perforaciones están separadas por cuatro kilómetros respectivamente.

## **3.3 Criterios de evaluación**

Los puntos se escogieron de acuerdo a los siguientes criterios:

### **➤ Uniformidad de la vía**

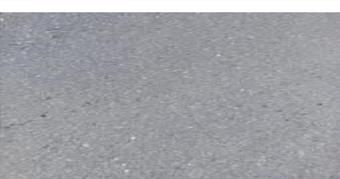
Mediante una inspección visual, se pudo determinar que el tramo de la vía en estudio tiene muchas irregularidades en la capa de rodadura como: Grietas en severidad baja, media y alta; como también existen partes en donde el pavimento se encuentra en buen estado y es por ello que, en base, a estas especificaciones se escogió estratégicamente tres puntos con un estado en la capa de rodadura bueno o regular y los otros dos con grietas en severidad baja y media.

### **➤ Ubicación estratégica**

La altitud también es un factor influyente, ya que en temporada de altas precipitaciones las zonas bajas de la vía se ven inundadas. Las zonas altas tienen un escurrimiento mucho más rápido; por este motivo se ha tomado en consideración la altitud

de cada punto. En la **tabla 2** se describe de una manera más detallada los criterios y ubicación de los mismos.

**Tabla 2.** Descripción de los criterios de evaluación de los puntos de control.

Puntos de control	Criterio de Evaluación	Descripción gráfica.	
Punto 1	Se encuentra ubicado en San Luis, en una zona baja con una altitud de 2680 msnm y la capa de rodadura está en estado regular.		
Punto 2	Se ubica en Punín en una zona media, a una altitud de 2803 msnm, con una diferencia de altura de 123 m por encima del anterior, desde este punto la vía empieza su ascenso. La capa de rodadura se visualiza regular.		
Punto 3	Se ubica en Punín y la altitud del mismo es 2846 msnm, con una diferencia de altura del anterior de 43 m, la capa de rodadura presenta grietas de grado severidad baja.		
Punto 4	Se encuentra a una altitud de 2984 msnm, en el sector de San Pedro de Cachiguayco, la capa de rodadura tiene agrietamiento de grado severidad media.		
Punto 5	Se ubica en el sector de Flores, es el punto más alto evaluado con 3057 msnm y una diferencia del anterior de 73 m, la capa de rodadura se encuentra en buenas condiciones.		

La **tabla 3** presenta las coordenadas UTM.

**Tabla 3.** Coordenadas UTM-84, de los puntos evaluados.

<b>Puntos de control</b>	<b>Este</b>	<b>Norte</b>	<b>Altitud</b>
Punto 1	761624	9811110	2680
Punto 2	761370	9806085	2803
Punto 3	760715	9803736	2846
Punto 4	761421	9801541	2984
Punto 5	762188	9798987	3057

### **3.4 Técnicas de recolección de datos.**

Para la recolección o levantamiento de datos se empleó los respectivos ensayos normativos de acuerdo a lo descrito por las normas NTE INEN y ASTM; así como también equipos eléctricos. Los cuales permitieron conocer las características físicas, mecánicas e hidráulicas.

### **3.5 Metodología de los ensayos en laboratorio.**

#### **3.5.1 Ensayo Proctor Modificado.**

En resumen, el ensayo consiste en compactar una muestra de suelo variando los porcentajes de agua con el fin de determinar la densidad máxima seca y la humedad óptima para alcanzar la misma. La norma que dictamina este procedimiento es la (ASTMD-1557, 1978).

#### **3.5.2 Ensayo de Granulometría de agregados.**

Los resultados obtenidos son utilizados para verificar si la distribución granulométrica de las partículas cumple con los requisitos establecidos y a su vez para determinar la clase a la que pertenece la muestra en base a la curva granulométrica. La normativa que dictamina el procedimiento para el respectivo ensayo es NTE INEN 696.

#### **3.5.3 Ensayo de límites de Atterberg.**

##### **3.5.3.1 Limite plástico.**

Este procedimiento de prueba implica la determinación del contenido de agua, de un suelo en el punto de transición entre su estado plástico y sólido. Para lograr esto, se emplea

el método rolado, el cual consiste en evaporar gradualmente el agua hasta que el suelo comience a agrietarse o desintegrarse (NTE INEN 692, 1982).

### **3.5.3.2 Limite líquido.**

Este procedimiento de prueba se enfoca en determinar el contenido de agua de un suelo, en el punto de transición entre su comportamiento líquido y plástico. Se realiza mediante el uso de un dispositivo mecánico conocido como Copa de Casagrande, donde se aplica un número específico de golpes para establecer la fluidez del suelo bajo condiciones normalizadas (NTE INEN 691, 1982).

### **3.5.4 Densidad y absorción del agregado fino.**

Este procedimiento de evaluación se emplea para calcular la densidad media de una muestra de material pétreo grueso (excluyendo el espacio vacío entre partículas), así como su densidad relativa (también conocida como gravedad específica) y su capacidad de absorción. La normativa que detalla el proceso es la (NTE INEN 856, 2010).

### **3.5.5 Densidad y absorción del agregado grueso.**

Este procedimiento de evaluación se emplea para calcular la densidad media de una muestra de material pétreo grueso (excluyendo el espacio vacío entre partículas), así como su densidad relativa (también conocida como gravedad específica) y su capacidad de absorción (NTE INEN 857, 2010).

## **3.6 Metodología ensayos IN SITU.**

### **3.6.1 Ensayo cono de arena.**

El procedimiento del ensayo implica la excavación manual de un hoyo en el suelo utilizando un combo y un cincel siguiendo las especificaciones de diámetro y profundidad que dicta la norma (ASTMD-1556, 2000). Los indicadores de este ensayo son respectivamente la densidad y humedad del suelo en campo.

### **3.6.2 CBR in situ con el equipo electro-mecánico GeoGuage.**

La ejecución de este ensayo implica la colocación del equipo GeoGuage en el área designada para la medición como se muestra en la **figura 6**. Si la superficie de contacto es de tierra, no es necesario prepararla previamente, aunque si es recomendable que tenga una nivelación considerada y a menudo se requiere ajustar ligeramente la posición del equipo

para asegurar un contacto total entre el pie del dispositivo y el suelo. En caso de superficies particularmente duras o ásperas se recomienda seguir la norma ASTM-C144, 1974. Que sugiere mejorar el contacto del pie utilizando material húmedo o mojado como arena de mortero.



**Figura 6.** Colocación del equipo.

Una vez ubicado el equipo en la posición de ensayo se enciende y se presiona la tecla MENSURE en la consola para iniciar la medición. El equipo genera una vibración durante 75 segundos, tras lo cual se obtienen los resultados. La utilización del equipo se rige por dos normas establecidas dentro del catálogo para su correcto manejo la primera es la (ASTMD-6758), establece un rango de medición del suelo para determinar la rigidez y el módulo de Young, y a la segunda norma es (ASTM – C144,1974), detalla los requerimientos básicos para tener un buen asentamiento del pie del equipo con la superficie, especialmente en suelos duros.

### **3.6.2.1 Fórmulas de estimación de CBR.**

Para estimar el CBR, de las capas ensayadas del pavimento flexible se empleó las siguientes formulas.

López (2019), presenta dicha fórmula en un estudio comparativo entre ensayos realizados en laboratorio de módulo de Young y CBR únicamente para bases y subbases de la cantera San Joaquín ubicada en la provincia de Cotopaxi.

Para calcular el CBR se aplicó la función solver que viene inmersa en el software Excel.

$$M.R (psi) = 7138.8e^{0.0203(\%C.B.R)} \quad [1]$$

Poulsen & Stubstad (1980). Presentaron una ecuación con la finalidad de caracterizar suelos con contenido de arenas, limos y arcillas; logrando determinar un valor del módulo resiliente en función del CBR.

$$Mr(MPa) = 10 * CBR^{0.73} \quad [2]$$

En 1984, Powell presenta una formula derivada de un exhaustivo análisis de suelos, que permite estimar el valor del módulo de resiliencia en suelos granulares.

$$Mr(psi) = 2555 * CBR^{0.64} \quad [3]$$

De acuerdo a la AASHTO (1993). La siguiente ecuación se emplea para suelos con un CBR < 10% por lo general se trata de subrasantes o materiales de mejoramiento.

$$Mr(psi) = 1500CBR \quad [4]$$

La expresión que se detallara a continuación no es aplicable para suelos granulares como bases y subbases. Según el instituto de pavimento es válida para materiales clasificados como CI, CH, ML, SC, SM y SP, (Montejo, 2002).

$$Mr(MPa) = 10.3CBR \quad [5]$$

### **3.6.3 Ensayo in situ con el densímetro eléctrico (EDG)**

El proceso para adquirir una firma eléctrica del suelo implica la evaluación de dos disposiciones de conexión de suelo en un único punto seleccionado para el ensayo. Los resultados eléctricos obtenidos se registran y se promedian. Esta firma eléctrica tiene dos propósitos principales; configurar un modelo de suelo y llevar a cabo mediciones en el terreno, es decir realizar el ensayo en campo.

Durante este ensayo, el sensor de temperatura y el de medición de suelo se conectan a la consola EDG como se muestra en la **figura 7**. Se procede a insertar los cuatro dardos de acero en la ubicación designada para el ensayo, los cuales sostendrán la plantilla y el sensor de medición de suelo. Este último está vinculado por dos cables de pinza, los cuales sirven para unir con los dardos de suelo. Además, se crea un pequeño agujero cerca de los dardos para insertar el sensor de temperatura.



**Figura 7.** Conexión de sensores en la consola EDG.

Después de ensamblar este equipo, se puede proceder a configurar un nuevo modelo de suelo o un ensayo en el sitio de trabajo. Este proceso implica enviar dos pulsos eléctricos a través de los dardos utilizando la consola EDG. Esto se logra al conectar los cables de pinza a los dardos que están posicionados opuestos entre sí, lo que permite obtener las firmas eléctricas del suelo.

Para configurar el modelo de suelo de la base, subbase y subrasante se procedió a tomar las cinco firmas eléctricas en los puntos de control, adicional se hizo ensayos de cono de arena para obtener la densidad y humedad. De lo que compete a la densidad del ensayo proctor modificado se trabajó con el promedio de los cinco puntos, valores que fueron ingresados a la consola para la respectiva configuración y ajuste del modelo de suelo.

Una vez creado el modelo de suelo se procede al levantamiento de información en los puntos de control, la consola EDG, genera valores de densidad húmeda, seca, humedad natural y grado de compactación.

Las normas que rigen la configuración del equipo son las mismas que rigen los ensayos de laboratorio del proctor modificado y cono de arena, (ASTMD-1556,2000) y (ASTMD-1557,1978) respectivamente.

#### **3.6.3.1 Grado de compactación.**

Se calculó la compactación del suelo en base a los datos de las densidades de campo (Cono de arena) y la densidad teórica (proctor modificado).

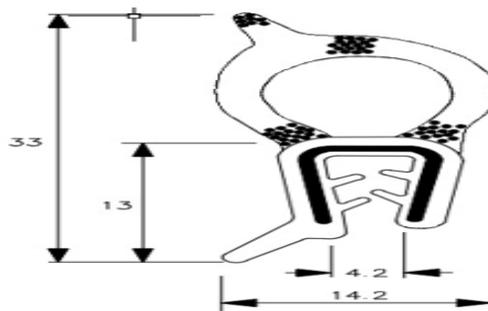
#### **3.6.4 Infiltración y escurrimiento, (Método de doble anillo – UNACH 2024).**

El procedimiento del infiltrómetro de doble anillo implica la inserción de dos cilindros uno dentro del otro, concéntricos en el suelo, parcialmente llenos de agua y luego

se mantiene este nivel constante. La cantidad de líquido añadido al anillo interior para mantener dicho nivel es la medida de infiltración del suelo (ASTM)

Similarmente se realiza un ensayo de infiltración en un pavimento flexible, aunque es crucial considerar ciertos aspectos al colocarlo en la superficie:

- Las dimensiones de los dos cilindros fueron: Diámetro cilindro exterior 450 mm, diámetro cilindro interior 250 mm, ambos con una altura de 600 mm.
- Los cilindros fueron elaborados con acero galvanizado de 1.5 mm de espesor con un peso total de 22.5 kg.
- Para lograr un buen contacto entre la base del infiltrómetro de doble anillo con la superficie a ensayar, en el contorno de ambos cilindros se colocará un caucho (burlate) con alma metálica de uso común para sellar contenedores. Se empleó este caucho por la versatilidad al encajar con el filo del toll, en la **figura 8** se puede apreciar cómo está constituido el perfil.



**Figura 8.** Perfiles burlates alambrados 341.

**Fuente:** Esquema adaptado de GLOBAL RUBBER CORPORATION S.A.C.

En la **figura 9** se visualiza el perfil en diferentes vistas.

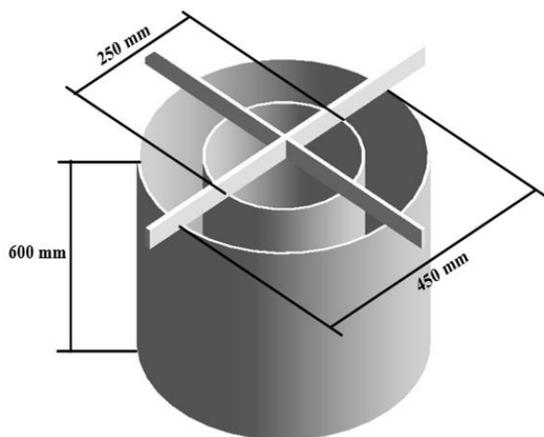


**Figura 9.** Vista lateral y superior del caucho.

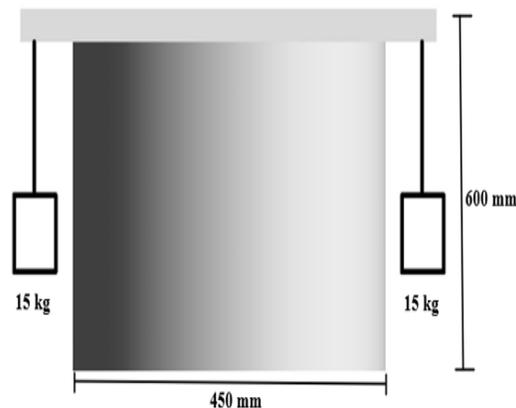


**Figura 10.** Contorno inferior de cilindros con caucho.

Una vez colocado el caucho en los cilindros se sienta en los puntos de control que se quiere realizar el ensayo y en los cuatro extremos portantes del infiltrómetro se colocara un peso de 15 kg por lado, dando un total de 60 kg con el que se va a ejecutar el mismo, esto se hace con la finalidad de evitar la filtración de agua por los contornos de los cilindros.



**Figura 11.** Esquema infiltrómetro de doble anillo.



**Figura 12.** Vista lateral del infiltrómetro con los 15 kg por lado del marco portante.

**Fuente:** (Cepeda & Rosero, 2024).

Para mayor seguridad se empleó una silicona de uso múltiple con la finalidad de impermeabilizar de una mejor manera la superficie de contacto del infiltrómetro y el pavimento flexible (pavimento –caucho).

Para calcular la fracción que se infiltra se utiliza la razón del volumen infiltrado sobre el volumen inicial con el que se empezó el ensayo multiplicado por cien para tener un valor porcentual. Y para determinar el coeficiente de escurrimiento es la diferencia de 100 menos la fracción infiltrada.

## CAPÍTULO IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 4.1 RESULTADOS CARACTERÍSTICAS FÍSICAS.

#### 4.1.1 Características geológicas

Es importante detallar y describir las formaciones geológicas que lo constituye al sector evaluado, así como también los diferentes tipos de suelo, la **tabla 4** detalla las características.

**Tabla 4.** Caracterización y formación geológica, sector estudiado

Muestra	Formación geológica del suelo (MAG, 2019).	Caracterización del suelo (MAG, 2019)	Información de la formación geológica (IGM, 2022).
M 1	Depósitos aluviales.	Franco limoso	Los depósitos aluviales son formaciones geológicas comunes compuestas por sedimentos depositados por ríos y arroyos Tienen presencia de suelos francos, que tienen una mezcla equilibrada de arena, limo y arcilla.
M 2	Depósitos aluviales (abanico aluvial).	Franco	Los depósitos aluviales son prominentes, de la cordillera de los Andes. su característica común en esta área es que los sedimentos transportados por los ríos se depositan en forma de abanicos en las zonas como valles o tierras bajas.
M 3	Unidad Alao Paute.	Franco arenoso	La formación geológica Alao-Paute, comprende una variedad de rocas ígneas, metamórficas y sedimentarias. Los suelos presentes en esta formación son principalmente suelos que se desarrollan a partir de la descomposición de cenizas volcánicas.
M 4	Depósito de ladera (Coluvial).	Arcilloso	Los depósitos de ladera se encuentran en zonas montañosas, se forman por la acumulación de materiales sueltos y fragmentados que descienden por las pendientes debido a la gravedad y la erosión.
M 5	Formación Cangahua.	Franco limoso	La Formación Cangahua es una formación geológica que consiste en depósitos volcánicos y piroclásticos de origen reciente, en Chimborazo los suelos en la Formación Cangahua son principalmente suelos que son ricos en minerales y materia orgánica conocidos como suelo negro o barro.

#### 4.1.2 Resultados ensayos de laboratorio.

##### 4.1.2.1 Ensayo Proctor Modificado.

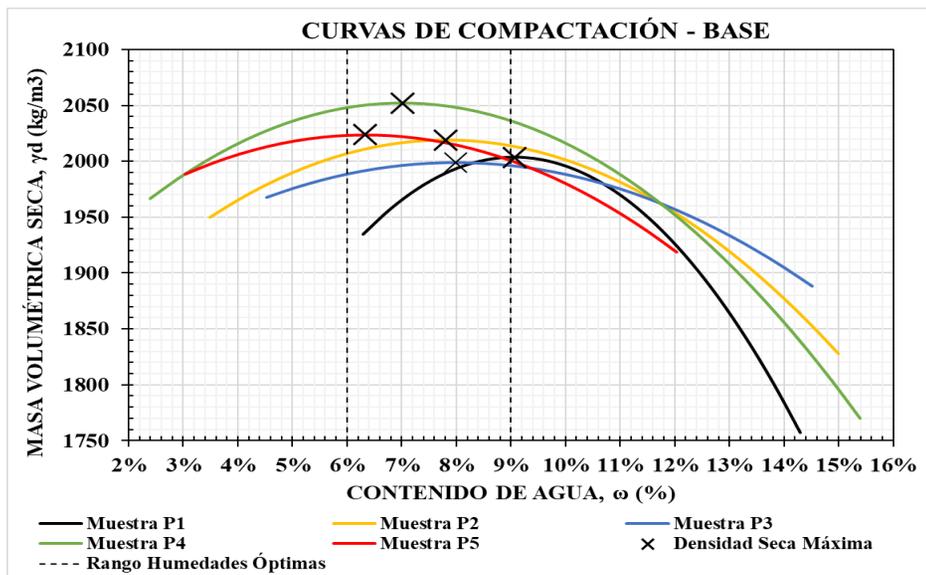


Figura 13. Curvas de compactación, base.

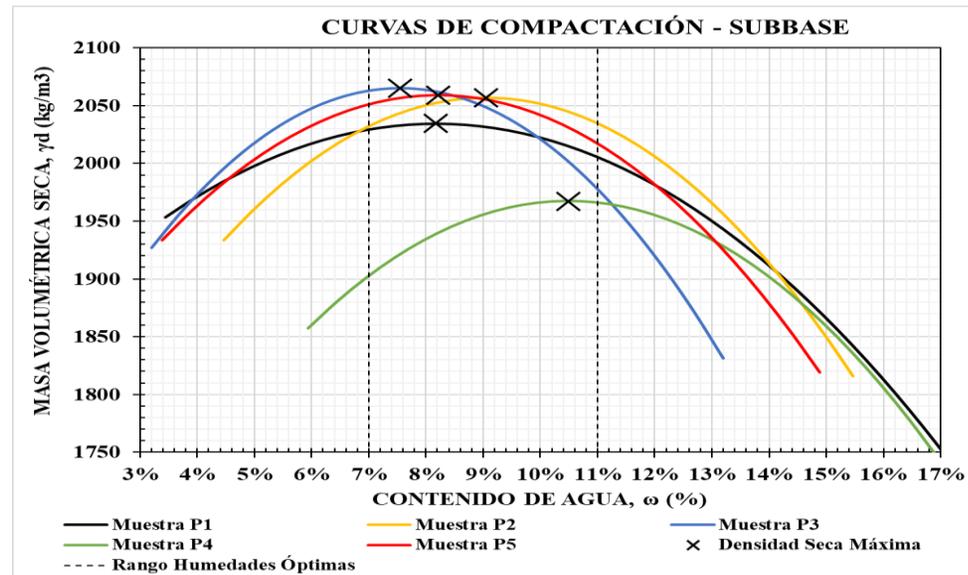


Figura 14. Curvas de compactación, subbase.

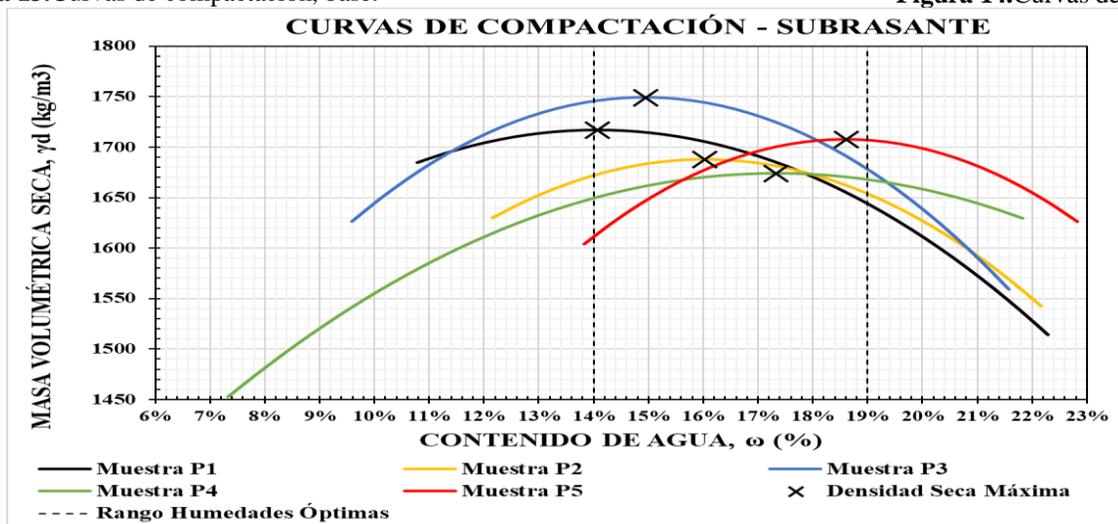


Figura 15. Curvas de compactación, subrasante.

La **figura 13,14 y 15**; muestran las curvas de compactación de las capas del pavimento flexible, en donde claramente tanto la subbase, base y subrasante presentan distintos requerimientos de humedad para alcanzar la máxima densidad seca. Mientras la subbase necesita niveles de humedad más altos (7-11%), la base requiere porcentajes bajos que están en el rango (6-9%). La subrasante, con más material fino y a veces limos, demanda niveles aún más altos (14-19%). Estas diferencias indican la diversidad del material a lo largo de la vía, especialmente en la subbase y la subrasante, cuyo tipo de suelo varía geográficamente entre arenoso y limoso, afectando sus niveles de humedad y densidad máxima seca. Analizando las humedades se puede evidenciar que las capas más permeables son la base y subbase por su bajo contenido de humedad.

La **tabla 5**, que se presenta a continuación muestra los valores de  $\omega$  y  $\gamma_{dm\acute{a}x}$  de los puntos de control evaluados.

**Tabla 5.** Cuadro de resumen de  $\omega$  y  $\gamma_{dm\acute{a}x}$  capas granulares y subrasante.

Capa del pavimento	Puntos de control	Contenido de agua óptima, $\omega$ (%):	Masa volumétrica seca máxima, $\gamma_{dm\acute{a}x}$ (kg/m <sup>3</sup> ):
BASE	P1	9.07%	2003.72
	P2	7.81%	2019.12
	P3	7.99%	1999.07
	P4	7.01%	2051.93
	P5	6.33%	2023.88
	<b>Promedio</b>	<b>7.64%</b>	<b>2019.54</b>
SUBBASE	P1	8.18%	2034.51
	P2	9.05%	2056.90
	P3	7.55%	2065.02
	P4	10.48%	1967.51
	P5	8.22%	2058.92
	<b>Promedio</b>	<b>8.70%</b>	<b>2036.57</b>
SUBRASANTE	P1	14.07%	1716.83
	P2	16.03%	1687.65
	P3	14.93%	1749.19
	P4	17.34%	1674.02
	P5	18.60%	1707.60
	<b>Promedio</b>	<b>16.19%</b>	<b>1707.06</b>

En la **tabla 5** se presenta el resumen de datos tanto de la base, subbase y subrasante del ensayo proctor modificado, si se analiza la humedad óptima se puede visualizar que la subrasante necesita mayor cantidad de agua para alcanzar la densidad máxima esto se debe a que al estar constituida por un gran porcentaje de material fino ya sea limo o arcilla estos materiales tienden a absorber gran cantidad de agua, cuanto más pequeñas sean las partículas mayor será el área de superficie en contacto, lo que permite mayor adhesión con el líquido. Mientras que la arena tiene partículas grandes y es el principal material por el que está constituida la base y subbase. Justamente los datos corroboran lo mencionado.

Es importante mencionar que un mayor porcentaje de humedad no garantiza mayor densidad, incluso se genera un proceso inversamente proporcional.

Según HOLCIM S.A, (2022). La masa unitaria compactada para una base corresponde a 2014.4 kg/m<sup>3</sup> con una humedad de 5.2% y para una subbase ronda los 1996.5 kg/m<sup>3</sup> con una humedad optima de 7.2%. Comparando estos resultados con los descritos en la **tabla 5** claramente se puede apreciar que los valores de densidad son bastante cercanos pese a que la humedad es un tanto superior.

#### 4.1.2.2 Ensayo de granulometría.

##### 4.1.2.2.1 Granulometría, base.

**Tabla 6.** Granulometría promedio base.

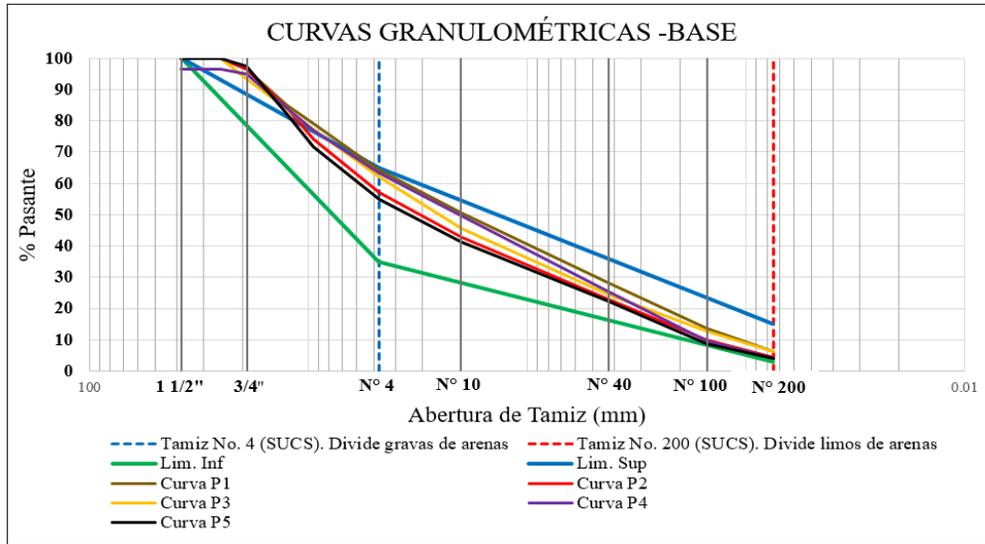
Abertura del Tamiz	P1	P2	P3	P4	P5	PROMEDIO	Material Obtenido	Límite superior (%)	Límite inferior (%)	Arenas (%)	Gravas (%)	DESCRIPCIÓN DE LA MUESTRA	
Tamiz (ASTM)	(mm)	Pasante %											
1 1/2"	38.1	100.00	100.00	100.00	96.43	100.00	99.29		100	100		<b>BASE CLASE 2</b>	
1"	25	100.00	100.00	100.00	96.43	100.00	99.29	Grava Gruesa	<b>GRAVA</b>	55.36	39.67	Procedencia del material: Vía Riobamba - Macas, tramo San Luis- Flores	
3/4"	19	96.67	96.55	93.40	94.98	97.34	95.78					Profundidad de la muestra: 30 cm	
1/2"	12.5	85.05	83.98	83.69	84.23	82.12	83.82					Peso de la muestra: 2000 g	
3/8"	9.5	79.19	74.12	77.39	77.00	71.72	75.88	Grava Fina				Tamaño máximo nominal: 1 1/2 "	
No. 4	4.75	64.32	57.06	62.13	63.18	54.95	60.33		65.00	35		<b>Límites de Atterberg</b>	
No. 10	2	50.50	42.89	45.72	49.57	41.39	46.02	Arena Gruesa	<b>ARENA</b>			LL 16.61%	
No. 40	0.425	28.12	23.02	24.46	25.57	22.40	24.71						LP NP
No. 100	0.15	13.62	9.76	12.81	9.49	8.74	10.88	Arena Fina					IP NP
No. 200	0.075	6.27	4.45	6.25	4.02	3.87	4.97		15.00	3			
Fondo		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00						
Coefficiente Uniformidad Cu		33.99	35.02	38.08	24.99	35.44	<b>33.50</b>					<b>Clasificación SUCS</b>	
Coefficiente Curvatura Cc		0.61	0.66	0.86	0.53	0.65	<b>0.66</b>					Arena pobremente gradada con grava (SP)	

**Tabla 7.** Caras fracturadas - base

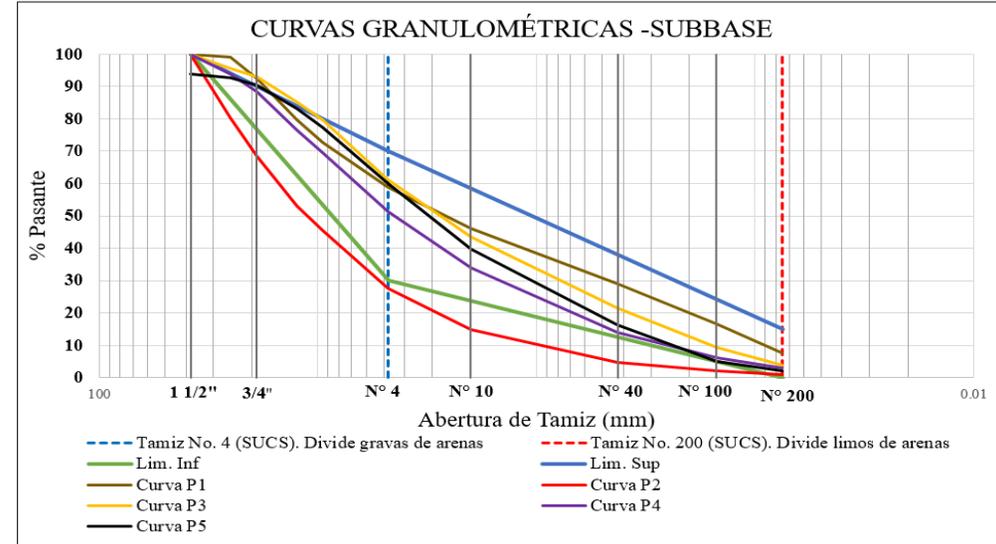
<b>Caras fracturadas de la muestra de la base</b>		
Puntos de control	Caras fracturadas	Descripción gráfica
P1	En todos los puntos evaluados el material presentaba más de dos caras fracturadas.	
P2		
P3		
P4		
P5		

En la **tabla 6** se muestran los resultados de los porcentajes pasantes de las muestras de la base, del cual se promedió los mismos, el material está constituido por 15.69% más de arena que grava. Conforme lo que determina el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS) no se empleó la carta de plasticidad. En promedio la muestra de suelo corresponde a una arena pobremente gradada con grava (SP), se nombra como pobremente gradada de acuerdo a los valores del coeficiente de uniformidad ( $C_u=33.50$ ) y coeficiente de curvatura ( $C_c=0.66$ ). De acuerdo a MOP la base corresponde a una clase 2, en la **figura 16** se visualiza las curvas granulométricas de los puntos.

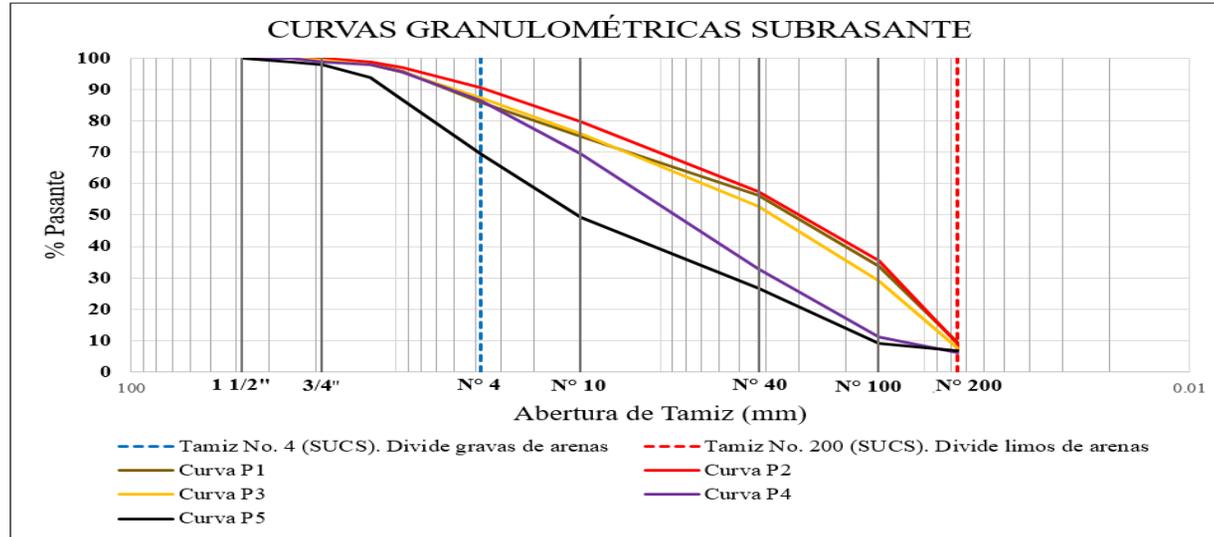
Si bien es cierto el MOP-001F, (2002). Establece ciertos requerimientos de gradación para determinar la clase a la que pertenece el suelo, en adición también menciona en la sección 404 que para una base clase 2, la fracción de agregado grueso debe ser triturado al menos un 50% en peso. La **tabla 7** corrobora la presencia de material triturado, ratificando el cumplimiento de ambos criterios impuestos por la normativa.



**Figura 16.**Curvas granulométricas, base.



**Figura 17.**Curvas granulométricas, subbase.



**Figura 18.**Curvas granulométricas, subrasante.

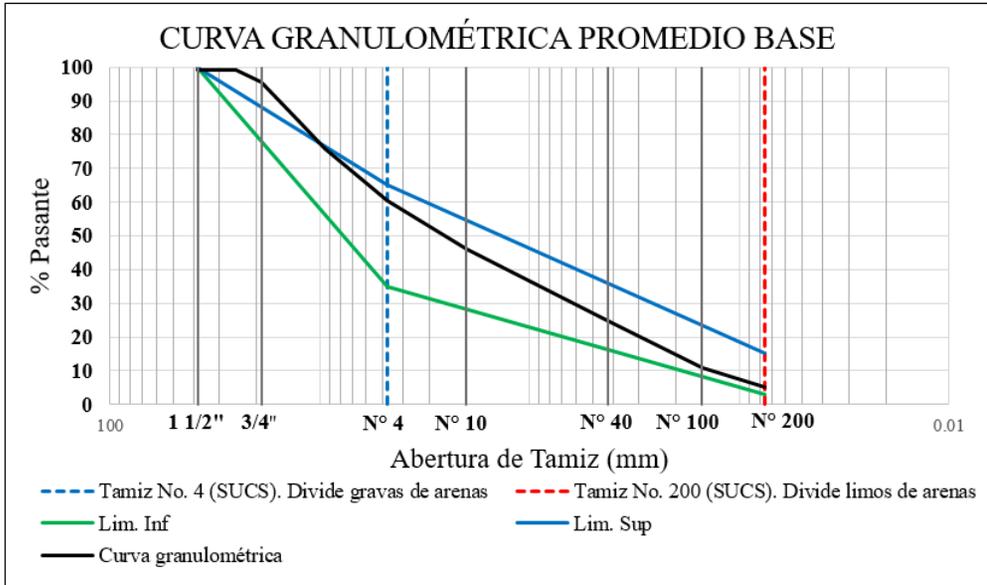


Figura 19. Granulometría promedio, base.

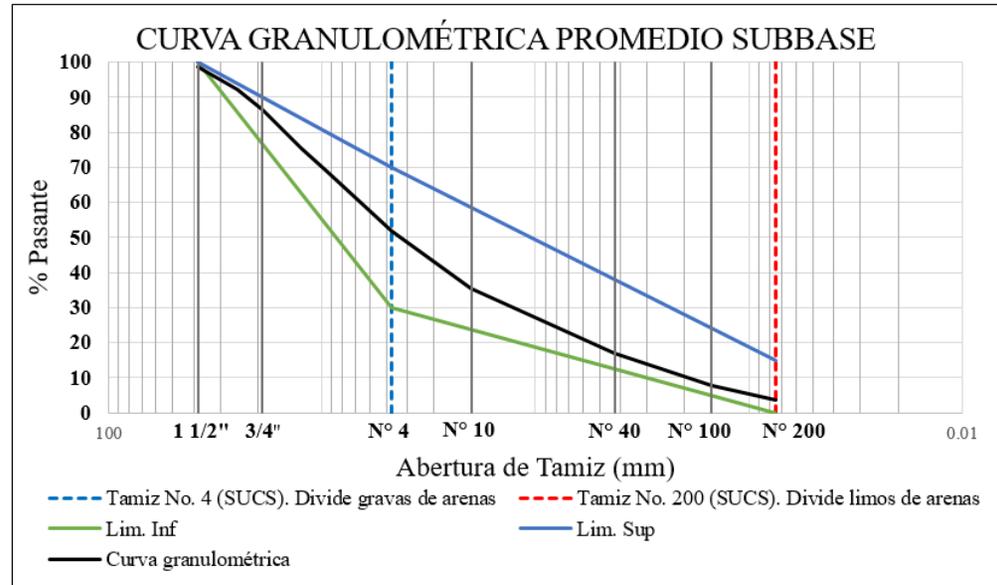


Figura 20. Granulometría promedio, subbase.

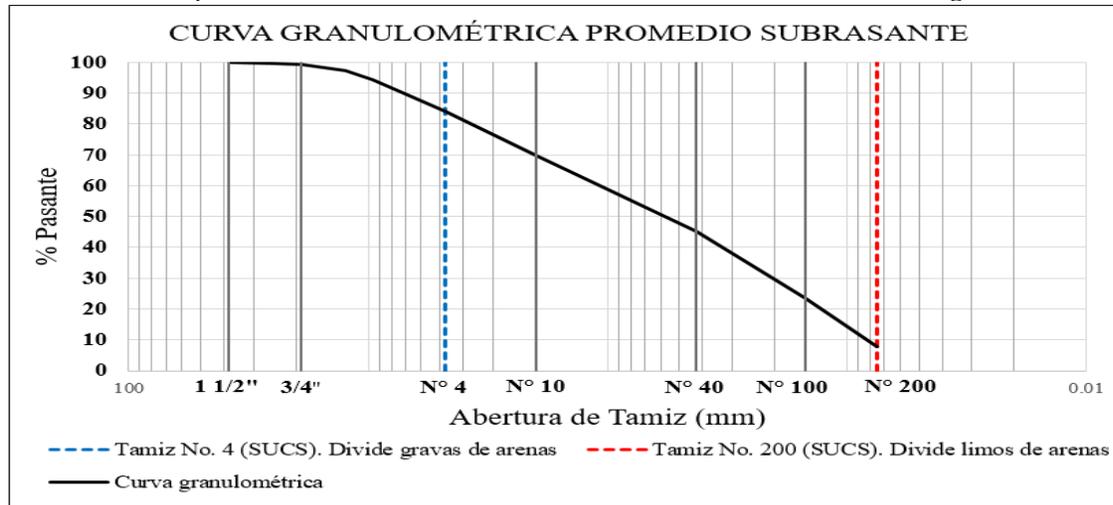


Figura 21. Granulometría promedio, subrasante.

En la **figura 16**, se presentan las curvas granulométricas de los puntos de control evaluados en la base. El MOP-001F-2002 presenta ciertos valores que se deben cumplir para determinar la clase a la que pertenece una determinada muestra. Los límites que fueron graficados corresponden a una clase 2, en los cuales todas las curvas se ajustan significativamente. Para ser un poco más específicos controlando en el tamiz N° 4, la normativa dictamina un límite inferior de 35% y un superior de 65%. Claramente se observa que todas las curvas en ese tamiz en específico están dentro del rango.

La **figura 17**, ilustra las curvas granulométricas de la subbase, de acuerdo al ajuste que tienen con los límites establecidos por la norma actual MOP las mismas entran en una categoría clase 1. Controlando en el tamiz N° 4, la mayoría están dentro del rango, pero existe cierta particularidad con la curva P2, que está ligeramente bajo el límite inferior esto se debe a que la muestra extraída en este punto en específico a simple vista se podía apreciar que contenía gran cantidad de grava y es justamente lo que se ve reflejado en la curva ya que presenta el mayor porcentaje de grava aproximadamente un 70%.

En la gráfica de la **figura 18**, se puede visualizar las curvas granulométricas de la subrasante, infiriendo así que, el suelo en el tramo evaluado está constituido principalmente por arenas y finos. La mayoría de las muestras alcanzaron un porcentaje de gravas inferior al 15%, la muestra evaluada en el punto de control 5, denominada como (Curva P5) se encontró la presencia de material un tanto más grueso y es lo que muestra la curva, obteniendo un valor aproximadamente de 30% de gravas.

Promediando todos los valores se tienen las curvas descritas en la **figura 19,20 y 21**.

#### 4.1.2.2.2 Granulometría, subbase.

**Tabla 8.** Granulometría promedio subbase.

Abertura del Tamiz		P1	P2	P3	P4	P5	PROMEDIO	Material Obtenido	Límite superior (%)	Límite inferior (%)	Arenas (%)	Gravas (%)	DESCRIPCIÓN DE LA MUESTRA
Tamiz (ASTM)	(mm)	Pasante %	Pasante %	Pasante %	Pasante %	Pasante %	Pasante %						
1 1/2"	38.1	100.00	100.00	100.00	100.00	93.97	98.79		100	100			<b>SUBBASE CLASE 1</b> Procedencia del material: Vía Riobamba - Macas, tramo San Luis- Flores Profundidad de la muestra: 50 cm Peso de la muestra: 2000 g Tamaño máximo nominal: 1 1/2 "
1"	25	99.00	80.29	95.54	94.00	92.62	92.29	Grava Gruesa					
3/4"	19	92.29	68.28	93.09	88.24	90.51	86.48						
1/2"	12.5	79.58	53.13	85.18	76.64	83.17	75.54						
3/8"	9.5	72.62	45.47	79.62	69.68	77.30	68.94	Grava Fina			48.32	48.20	
No. 4	4.75	58.96	27.66	61.09	51.28	60.02	51.80		70.00	30			
No. 10	2	46.00	14.71	43.47	33.87	39.83	35.57	Arena Gruesa					
No. 40	0.425	29.03	4.70	21.58	14.11	16.17	17.12						
No. 100	0.15	16.47	2.05	9.46	6.10	4.92	7.80						
No. 200	0.075	7.56	1.05	3.91	2.85	2.06	3.48	Arena Fina	15.00	0			
Fondo		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00						<b>Clasificación SUCS</b> Arena bien gradada con grava (SW)
Coeficiente Uniformidad Cu		55.21	15.66	28.66	26.49	19.77	<b>29.16</b>						
Coeficiente Curvatura Cc		0.47	1.86	0.84	1.33	0.97	<b>1.09</b>						

**Tabla 9.** Caras fracturadas - subbase.

<b>Caras fracturadas de la muestra de la subbase</b>		
Puntos de control	Caras fracturadas	Descripción gráfica
P1	Las muestras presentan más de dos caras fracturadas	
P2		
P3		
P4		
P5		

La **tabla 8** detalla los resultados de los porcentajes pasantes de los puntos de control analizando la subbase, del cual se promedió los mismos, el material está muy equilibrado tanto en grava y arena. Los finos representan un 3.48% que pasa el tamiz N° 200, conforme lo que determina el (SUCS), esta porción de muestra es omitida. En promedio la muestra de suelo corresponde a una arena bien gradada con grava (SW), se nombra como bien gradada de acuerdo a los valores del coeficiente de uniformidad ( $C_u=29.16$ ) y coeficiente de curvatura ( $C_c=1.09$ ).

De acuerdo al MOP, la subbase corresponde a una clase 1. En la **figura 17**, se muestran las curvas granulométricas de las muestras evaluadas en la subbase.

Si bien es cierto el MOP establece ciertos requerimientos de gradación para determinar la clase a la que pertenece el suelo, en adición también menciona que para una subbase clase 1, al menos un 30% de agregado preparado debe obtenerse por proceso de trituración. La **tabla 9** corrobora la presencia de material triturado, ratificando el cumplimiento de ambos criterios impuestos por la normativa.

#### 4.1.2.2.3 Granulometría, subrasante.

Tabla 10. Granulometría promedio subrasante.

Abertura del Tamiz	P1	P2	P3	P4	P5	PROMEDIO	Material Obtenido	Límite superior (%)	Límite inferior (%)	Arenas (%)	Gravas (%)	DESCRIPCIÓN DE LA MUESTRA	
Tamiz (ASTM)	(mm)	Pasante %											
1 1/2"	38.1	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00					<b>SUBRASANTE</b> Procedencia del material: Vía Riobamba - Macas, tramo San Luis- Flores Profundidad de la muestra: 65 cm Peso de la muestra: 2000 g Tamaño máximo nominal: 1 "	
1"	25	100.00	100.00	100.00	100.00	98.79	99.76	Grava Gruesa	<b>GRAVA</b>				
3/4"	19	100.00	100.00	99.30	98.84	97.84	99.20						
1/2"	12.5	98.05	98.75	97.84	97.84	93.92	97.28			76.23	16.00		
3/8"	9.5	95.94	97.14	95.63	95.58	86.69	94.20	Grava Fina					
No. 4	4.75	85.93	90.62	87.39	86.53	69.51	84.00						
No. 10	2	75.06	79.83	75.89	69.40	49.32	69.90	Arena Gruesa	<b>ARENA</b>				
No. 40	0.425	56.28	57.50	52.74	32.71	26.62	45.17						
No. 100	0.15	33.75	35.47	28.93	11.26	9.24	23.73	Arena Fina					
No. 200	0.075	9.26	9.13	7.68	6.13	6.63	7.77						
Fondo		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00						
<b>Clasificación SUCS</b>													
Coeficiente Uniformidad Cu		7.54	6.59	8.54	10.63	20.13	<b>10.69</b>					Arena pobremente gradada con limo y grava (SP-SM)	
Coeficiente Curvatura Cc		0.41	0.43	0.44	0.82	0.58	<b>0.54</b>						

La **tabla 10** detalla los resultados de los porcentajes pasantes de los puntos de control analizando la subrasante del cual se promedió los mismos, el material predominante es la arena. Conforme lo que determina el (SUCS), el material fino es considerado y corresponde a un limo en base a que no se tiene un índice de plasticidad excepto en el punto de control cuatro. En promedio la muestra de suelo corresponde a una arena pobremente gradada con limo y grava (SP-SM), se nombra como pobremente gradada de acuerdo a los valores del coeficiente de uniformidad ( $C_u=10.69$ ) y coeficiente de curvatura ( $C_c=0.54$ ). En la **figura 18** se visualiza las curvas granulométricas de la subrasante.

#### 4.1.2.3 Ensayo límite líquido y plástico.

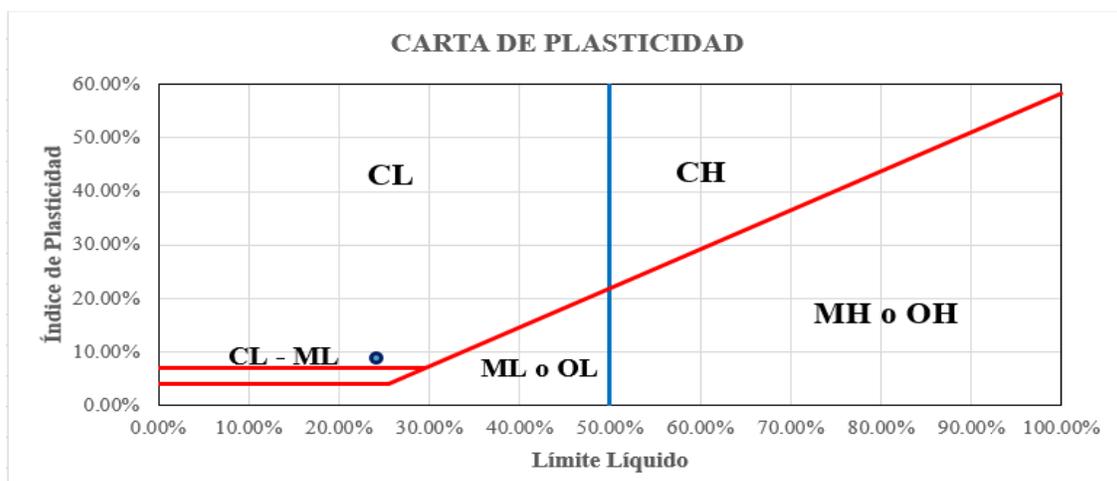
**Tabla 11.** Resultados de los límites de Atterberg, de la base

Capa	Puntos	Límite Líquido [LL]	Límite Plástico [PL]	Índice de Plasticidad [IP]	Consistencia
BASE	P1	19.01%	NP	0	No plástico
	P2	15.02%	NP	0	No plástico
	P3	14.84%	NP	0	No plástico
	P4	15.03%	NP	0	No plástico
	P5	19.13%	NP	0	No plástico
	<b>Promedio</b>	<b>16.61%</b>	<b>NP</b>	<b>0</b>	<b>No plástico</b>
SUBBASE	P1	15.89%	NP	0	No plástico
	P2	15.91%	NP	0	No plástico
	P3	17.90%	NP	0	No plástico
	P4	17.51%	NP	0	No plástico
	P5	19.63%	NP	0	No plástico
	<b>Promedio</b>	<b>17.37%</b>	<b>NP</b>	<b>0</b>	<b>No plástico</b>
SUBRASANTE	P1	28.36%	NP	0	No plástico
	P2	29.63%	NP	0	No plástico
	P3	23.84%	NP	0	No plástico
	P4	24.18%	15.38%	8.80%	plástico
	P5	24.09%	NP	0	No plástico
	<b>Promedio</b>	<b>26.02%</b>	-	-	-

La **tabla 11** exhibe los resultados de los límites de Atterberg. El único punto con un índice de plasticidad se presentó en la subrasante. De acuerdo al MOP-001F-2002, sección 814 para bases y subbases establece un índice de plasticidad menor que 6% y un límite líquido máximo de 25%, los resultados presentados están dentro de estos parámetros.

Es importante argumentar el criterio de la norma del porqué no permite suelos con un mayor índice de plasticidad, esto se debe a que este indicador está relacionado directamente con la cantidad de arcilla que tiene el suelo. Las bases y subbases arcillosas comprometen el funcionamiento de la estructura, existen varias razones; pero la más importante es la expansión y contracción. La arcilla tiene una alta capacidad para absorber agua, lo que le permite expandirse, y al perder agua, se contrae. Esta característica puede provocar movimientos significativos en el suelo bajo el pavimento. La expansión y contracción repetidas pueden causar deformaciones en el pavimento, como grietas, hundimientos o bultos comprometiendo su integridad estructural y funcionalidad.

En la **figura 22** se visualiza la carta de plasticidad de la subrasante del punto 4, la misma que fue empleada para la clasificación del suelo.



**Figura 22.** Carta de plasticidad subrasante, punto 4.

#### 4.1.2.4 Densidad y absorción del agregado (Grueso y fino).

**Tabla 12.** Densidad y absorción de agregados, capa granular base.

<b>DENSIDAD Y ABSORCIÓN DEL AGREGADO (BASE)</b>				
<b>Descripción</b>	<b>Variable</b>	<b>Grueso</b>	<b>Fino</b>	<b>Unidad</b>
<b>Densidades Relativas</b>				
Gravedad específica seca al horno	<b>SG<sub>SH</sub></b>	2.538	2.444	-
Gravedad específica saturada superficialmente seca	<b>SG<sub>SSS</sub></b>	2.606	2.491	-
Gravedad específica aparente	<b>SG<sub>A</sub></b>	2.723	2.565	-

<b>Densidad</b>				
Densidad seca al horno	<b>d<sub>SH</sub></b>	2532.047	2438.333	(kg/m <sup>3</sup> )
Densidad saturada superficialmente seca	<b>d<sub>SSS</sub></b>	2599.778	2485.052	(kg/m <sup>3</sup> )
Densidad aparente	<b>d<sub>A</sub></b>	2716.500	2558.147	(kg/m <sup>3</sup> )
<b>Absorción</b>				
Porcentaje de absorción del material	<b>Abs</b>	<b>2.675</b>	<b>0.692</b>	%

La **tabla 12**, presenta los valores de densidad y absorción de agregado fino y grueso. La densidad saturada superficialmente seca claramente es mayor a la seca en horno, debido a que las partículas absorben agua, por ende, tendrán mayor peso aumentando así su densidad. Se puede inferir que, en épocas de precipitación, del agua total infiltrada cierto porcentaje es absorbido por el material granular.

Según HOLCIM S.A, (2022). una base clase 2 absorbe 4.1% y tiene una densidad SSS de 2528 kg/m<sup>3</sup>. Los valores presentados están cerca de estos parámetros.

### 4.1.3 Resultados de los ensayos IN-SITU

#### 4.1.3.1 Ensayo cono de arena.

**Tabla 13.** Resultados grado de compactación.

ENSAYO CONO DE ARENA						
Capa	Puntos de control	Densidad húmeda [kg/m <sup>3</sup> ]	Densidad seca [kg/m <sup>3</sup> ]	Humedad In Situ	Densidad proctor [kg/m <sup>3</sup> ]	Grado de compactación [%]
BASE	P1	2030.91	1914.95	6.06%	2003.72	95.57%
	P2	2087.28	1941.26	7.52%	2019.12	96.14%
	P3	1980.32	1896.90	4.40%	1999.07	94.89%
	P4	2048.40	1907.98	7.36%	2051.93	92.98%
	P5	2112.78	1948.00	8.46%	2023.88	96.25%
	<b>Promedio</b>	<b>2051.94</b>	<b>1921.82</b>	<b>6.76%</b>	<b>2019.54</b>	<b>95.17%</b>
SUBBASE	P1	1944.14	1819.72	6.84%	2034.51	89.44%
	P2	2029.57	1870.30	8.52%	2056.90	90.93%
	P3	1882.87	1793.78	4.97%	2065.02	86.86%
	P4	1759.62	1627.19	8.14%	1967.51	82.70%
	P5	2038.83	1872.45	8.89%	2058.92	90.94%
	<b>Promedio</b>	<b>1931.01</b>	<b>1796.69</b>	<b>7.47%</b>	<b>2036.57</b>	<b>88.18%</b>
SUBRASANTE	P1	1244.29	995.17	25.03%	1716.83	57.97%

P2	1477.77	1134.14	30.30%	1687.65	67.20%
P3	1173.39	935.59	25.42%	1749.19	53.49%
P4	1340.65	1095.65	22.36%	1674.02	65.45%
P5	1428.38	1246.81	14.56%	1707.60	73.02%
<b>Promedio</b>	<b>1332.90</b>	<b>1081.47</b>	<b>23.53%</b>	<b>1707.06</b>	<b>63.42%</b>

En la **tabla 13** se presentan los resultados del ensayo de cono de arena. En base a los mismos se puede establecer que con el tiempo las capas bajo el pavimento tienden a compactarse más. Este proceso se debe a la presión continua ejercida sobre el pavimento por el tráfico vehicular, así como a factores como el viento, la lluvia y otros elementos ambientales. Realmente se desconoce la compactación cuando el proyecto estaba en construcción; pero evidentemente la base al ser la primera capa que tiene casi un contacto directo con el tráfico circulante, el efecto antes mencionado tiene mayor influencia y los datos lo corroboran ya que es la capa más compactada.

El grado de compactación de acuerdo a la normativa vigente debe estar en el rango de 95 a 100%. Los resultados de la subbase y subrasante, están desfasados de estos valores normativos que son impuestos para garantizar un buen funcionamiento de la estructura.

#### 4.1.3.2 Densímetro eléctrico (EDG).

**Tabla 14.** Grado de compactación. Método alternativo (EDG).

ENSAYO DE CAMPO CON EL EQUIPO-(DENSÍMETRO ELÉCTRICO)							
Capa	Puntos de control	Densidad húmeda [kg/m <sup>3</sup> ]	Densidad seca [kg/m <sup>3</sup> ]	Humedad In Situ (%)	Densidad máxima [kg/m <sup>3</sup> ]	Grado de compactación (%)	Factor ajuste teórico
BASE	P1	2078	1928	7.7	2019.54	95.5	0.632
	P2	2095	1952	7.3	2019.54	96.6	
	P3	2066	1922	7.5	2019.54	95.2	
	P4	2039	1897	7.5	2019.54	93.9	
	P5	2109	1962	7.5	2019.54	97.1	
	<b>Promedio</b>	<b>2077.4</b>	<b>1932.2</b>	<b>7.5</b>	<b>2019.54</b>	<b>95.66</b>	
SUBBASE	P1	1923	1794	7.2	2036.57	88.1	0.708
	P2	1953	1805	8.2	2036.57	88.6	
	P3	1865	1758	6.1	2036.57	86.3	
	P4	1708	1592	7.3	2036.57	78.2	
	P5	1944	1810	7.4	2036.57	88.9	
	<b>Promedio</b>	<b>1878.6</b>	<b>1751.7</b>	<b>7.24</b>	<b>2036.57</b>	<b>86.0</b>	
SUBRASANTE	P1	1203	1029	16.9	1707.06	60.3	0.811

P2	1397	1176	18.7	1707.06	68.9
P3	1151	962	19.6	1707.06	56.4
P4	1381	1141	19.3	1707.06	66.8
P5	1451	1228	18.2	1707.06	71.9
<b>Promedio</b>	<b>1316.6</b>	<b>1107.2</b>	<b>18.54</b>	<b>1707.06</b>	<b>64.86</b>

La **tabla 14** contiene los resultados del ensayo in situ del densímetro eléctrico, que viene siendo un método alternativo al cono de arena, la densidad máxima presentada en la tabla corresponde al promedio de la densidad del ensayo proctor modificado de los puntos evaluados, en cuanto al factor de ajuste teórico, es un valor calculado por el equipo que lo denomina como (FIT), en base al ajuste del suelo.

Haciendo un análisis de datos entre el cono de arena y densímetro eléctrico, si bien es cierto existe una ligera variación, pero esto depende netamente del ajuste que se logre alcanzar, mientras sea más cercano a 1 los valores resultaran más precisos. Adicionalmente hay que tener en cuenta que al ser equipos eléctricos existen parámetros que no se pueden controlar y siempre tendrán un porcentaje de error así sea mínimo.

#### 4.1.4 Comparación de densidades.

En vista de que se utilizó dos métodos para determinar la densidad in situ como son el cono de arena y el densímetro eléctrico es conveniente realizar una comparación de resultados con el fin de poder determinar las variaciones existentes en los mismos. Comparando la densidad del cono y arena con la del densímetro eléctrico, si bien es cierto existe una ligera variación, pero los resultados son bastante cercanos y confiables. Como se muestran en la **figura 23,24 y 25**.

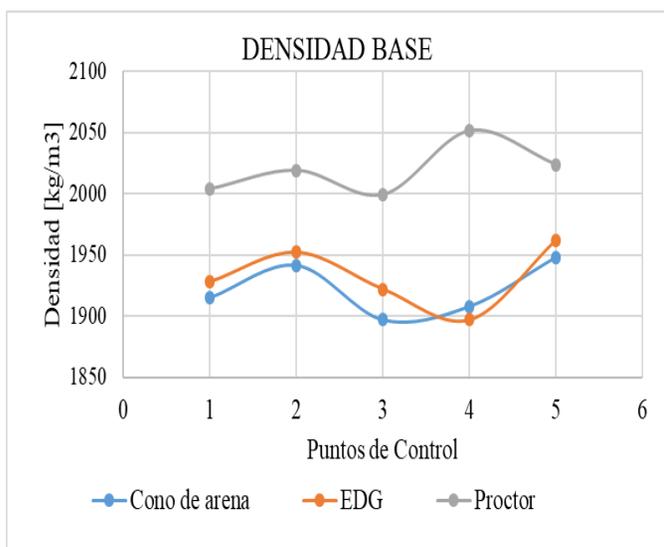


Figura 23. Densidades base

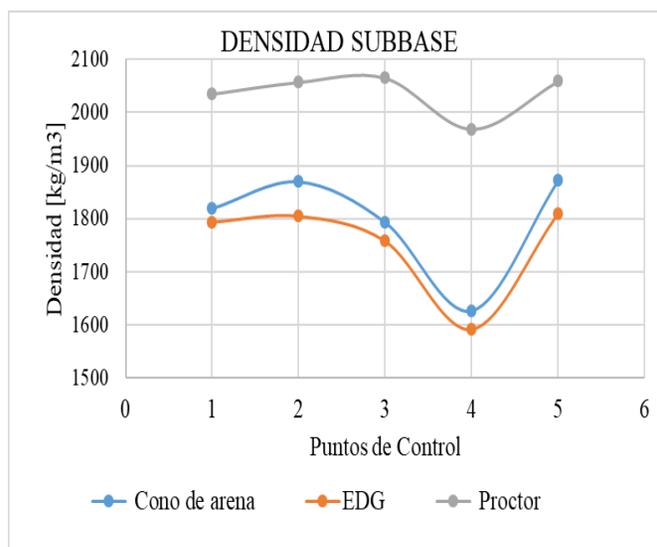


Figura 24. Densidades subbase

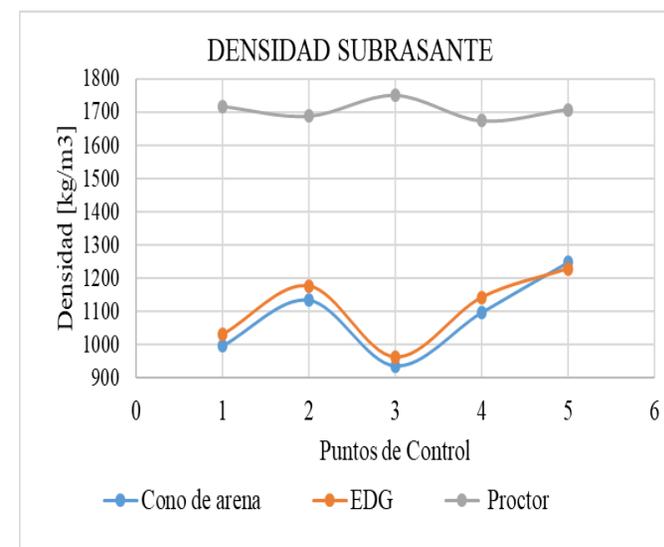


Figura 25. Densidades subrasante.

#### 4.1.5 Comparación grado de compactación.

Es conveniente comparar el grado de compactación de las capas granulares y subrasante del pavimento flexible, en vista de que se aplicó dos metodologías diferentes, la tradicional que es el cono y arena que se ha venido utilizando a lo largo de los años por su confiabilidad y facilidad de aplicación; y la nueva metodología que consiste en un equipo eléctrico llamado EDG, pese a que en otros países ya se ha utilizado con anterioridad. En Ecuador es un test relativamente nuevo, que sustituyó al densímetro nuclear. De acuerdo a las gráficas los valores son muy cercanos a los arrojados por el cono de arena. Como se exhibe en las **figuras 26,27 y 28**.

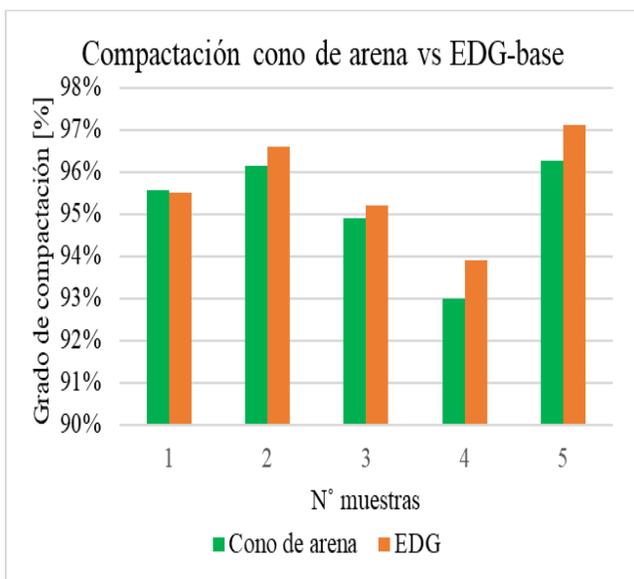


Figura 26. Grado de compactación, base.

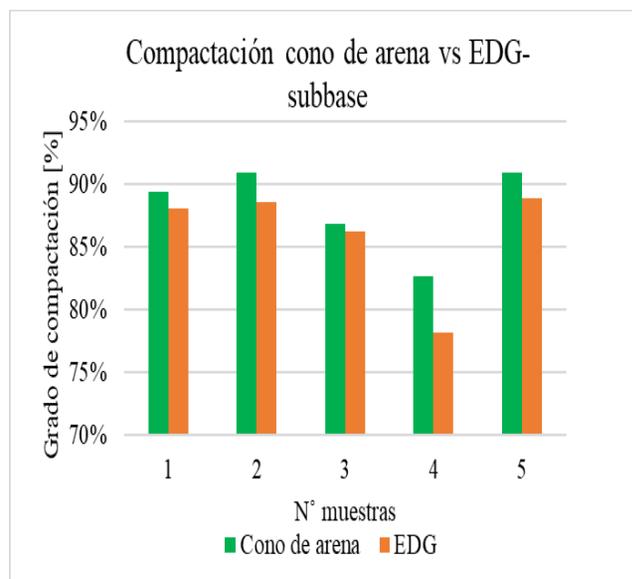


Figura 27. Grado de compactación, subbase.

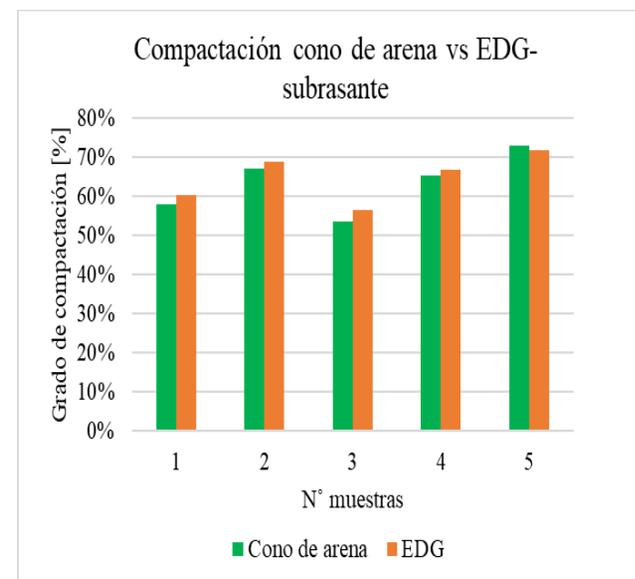


Figura 28. Grado de compactación, subrasante.

## 4.2 RESULTADOS DE LAS CARACTERÍSTICAS MECÁNICAS.

### 4.2.1 Ensayo in Situ.

#### 4.2.1.1 GeoGauge, base.

**Tabla 15.** Estimación del CBR, base.

<b>BASE DEL PAVIMENTO FLEXIBLE</b>							
<b>DATOS DE CAMPO DEL GEOGAUGE</b>					<b>CÁLCULOS</b>		
<b>Puntos de control</b>	<b>Módulo</b>			<b>Desviación Estándar [-]</b>	<b>%CBR Ecuación 1</b>	<b>%CBR Ecuación 2</b>	<b>%CBR Ecuación 3</b>
	<b>Rigidez [MN/m]</b>	<b>Young [MPa]</b>	<b>Elasticidad [PSI]</b>				
<b>P1</b>	27.2	201.69	29181.356	1.0417	69.359	61.269	44.945
<b>P2</b>	29.27	217.02	31399.365	1.0348	72.968	67.736	50.395
<b>P3</b>	25.13	186.34	26960.454	1.9932	65.459	54.972	39.716
<b>P4</b>	22.51	166.91	24149.24	2.0277	60.035	47.275	33.438
<b>P5</b>	30.7	227.32	32889.612	1.7819	75.252	72.178	54.182
<b>Promedio</b>	<b>26.962</b>	<b>199.856</b>	<b>28916.005</b>	<b>1.5759</b>	<b>68.615</b>	<b>60.686</b>	<b>44.535</b>

La **tabla 15** presenta los resultados del ensayo in situ Geogauge, si bien es cierto el equipo no arroja directamente el porcentaje de CBR, pero el mismo puede ser estimado en base a los demás datos. Cabe mencionar que se empleó tres ecuaciones diferentes, pero la que más se ajusta a nuestra realidad y con la que se obtuvieron los valores más altos es la presentada por López, (2019). De acuerdo a los resultados se puede apreciar que, pese a que se trata de un mismo material, este presenta diversos valores de CBR, existen varias razones, pero las que se mencionara en esta sección son: la compactación y humedad; esta variación se debe a que no en todos los puntos se tiene las mismas condiciones unos están más compactados que otros y esto genera que los valores vayan en función de dichas características.

La norma MOP-001F-2002, en la sección 404, establece ciertos rangos de California bearing ratio (CBR), que se deben alcanzar para bases, donde dictamina que la razón de soporte, debe ser igual o mayor a 80%, con el fin de garantizar calidad en las obras, en base a los resultados obtenidos no se alcanzó este porcentaje.

#### 4.2.1.2 GeoGauge, subbase.

Tabla 16. Estimación del CBR, subbase.

SUBBASE DEL PAVIMENTO FLEXIBLE							
DATOS DE CAMPO DEL GEOGAUGE					CÁLCULOS		
Puntos de control	Módulo			Desviación Estándar [-]	%CBR	%CBR	%CBR
	Rigidez [MN/m]	Young [MPa]	Elasticidad [PSI]		Ecuación 1	Ecuación 2	Ecuación 3
P1	17.19	127.42	18435.661	1.3766	46.736	32.661	21.930
P2	18.62	138.09	19979.441	1.1086	50.697	36.464	24.866
P3	17.04	127.02	18377.787	1.1252	46.581	32.520	21.823
P4	13.57	100.6	14555.23	1.3515	35.094	23.628	15.159
P5	21.9	162.34	23488.033	1.1324	58.667	45.511	32.018
<b>Promedio</b>	<b>17.664</b>	<b>131.094</b>	<b>18967.230</b>	<b>1.219</b>	<b>47.555</b>	<b>34.157</b>	<b>23.159</b>

La **tabla 16** describe los resultados del ensayo in situ Geogauge. Los valores igual presentan cierta variación, pero es por las mismas razones expuestas en la base, adicionalmente es conveniente mencionar que los puntos con la presencia de grietas son los que tienen un valor de CBR más bajo. Al no estar estos puntos bien compactados la capacidad de carga disminuye drásticamente, y de no existir la suficiente reacción a la fuerza ejercida por los vehículos, la capa de rodadura por sí sola no resiste estos esfuerzos y tiende a deformarse dando surgimiento a fisuras, grietas y hundimientos.

La norma MOP-001F-2002, en la sección 403, establece ciertos rangos de California bearing ratio (CBR), que se deben alcanzar para subbases, donde dictamina que la capacidad de soporte debe ser igual o mayor que 30%. En base a los resultados se cumple con el parámetro normativo.

#### 4.2.1.3 GeoGauge, subrasante.

Tabla 17. Estimación del CBR, subrasante.

SUBRASANTE DEL PAVIMENTO FLEXIBLE							
DATOS DE CAMPO DEL GEOGAUGE					CÁLCULOS		
Puntos de control	Módulo			Desviación Estándar [-]	%CBR	%CBR	%CBR
	Rigidez [MN/m]	Young [MPa]	Elasticidad [PSI]		Ecuación 2	Ecuación 4	Ecuación 5
P1	4.66	34.55	4998.8391	1.0745	5.465	3.333	3.354

<b>P2</b>	4.02	29.77	4307.2486	1.05646	4.457	2.871	2.890
<b>P3</b>	4.37	32.42	4690.6618	1.14637	5.009	3.127	3.148
<b>P4</b>	4.59	34.04	4925.0502	1.02933	5.355	3.283	3.305
<b>P5</b>	4.38	32.51	4703.6833	1.0713	5.028	3.136	3.156
<b>Promedio</b>	<b>4.404</b>	<b>32.658</b>	<b>4725.097</b>	<b>1.076</b>	<b>5.063</b>	<b>3.150</b>	<b>3.171</b>

La **tabla 17** muestra los resultados del ensayo in situ Geogauge. La subrasante presento los valores más bajos de CBR, y esto se debe principalmente a que está compuesta por suelos blandos como limos y arcillas; estos suelos tienen baja capacidad para soportar cargas sin deformarse, añadiéndole también la mala compactación que ha tenido y el alto grado de humedad por ser la capa más profunda. Estos factores disminuyen drásticamente la razón de soporte California.

La norma MOP-001F-2002, en la sección 402, establece ciertos criterios de mejoramiento de la subrasante cuando ésta presenta valores de capacidad de soporte CBR muy bajos, como son: mejoramiento con suelo seleccionado, estabilización con cal, con material pétreo, utilización de geotextil, etc...En los puntos evaluados no se encontró la presencia de material pétreo ni geotextiles.

### 4.3 RESULTADOS DE LAS CARACTERÍSTICAS HIDRÁULICAS.

#### 4.3.1 Ensayos In situ.

##### 4.3.1.1 Ensayo de infiltración con el instrumento de doble anillo.

**Tabla 18.** Datos de campo ensayo infiltración.

<b>DATOS DE CAMPO</b>			
<b>Fecha:</b>	Jueves, 25 de Enero de 2024		
<b>Ciudad:</b>	Punin - Chimborazo		
<b>Lugar:</b>	Punin, Via Riobamba - Macas		
<b>Clima:</b>	Despejado	<b>Estado de la vía:</b>	Malo
<b>Coordenada del punto:</b>		<b>ESTE</b>	760715
		<b>NORTE</b>	9803736
		<b>ALTITUD</b>	2846
<b>INTERVALO</b>		<b>TIEMPO (Hora)</b>	<b>h (cm)</b>
-	6:00 a. m.	0 Horas	10
6:00 a. m.	7:00 a. m.	1 Horas	11.8
7:00 a. m.	8:00 a. m.	1 Horas	13.4
8:00 a. m.	9:00 a. m.	1 Horas	14.8

9:00 a. m.	10:00 a. m.	1 Horas	16
10:00 a. m.	11:00 a. m.	1 Horas	17.3
11:00 a. m.	12:00 p. m.	1 Horas	18.1
12:00 p. m.	1:00 p. m.	1 Horas	18.4
1:00 p. m.	2:00 p. m.	1 Horas	18.7
2:00 p. m.	3:00 p. m.	1 Horas	19
3:00p.m.	4:00p.m.	1 Horas	19.3

**Observaciones:** Al realizar el ensayo en el punto de estudio se colocó el infiltrómetro a 1 m del borde de la vía donde presentaba agrietamientos de nivel de severidad baja.

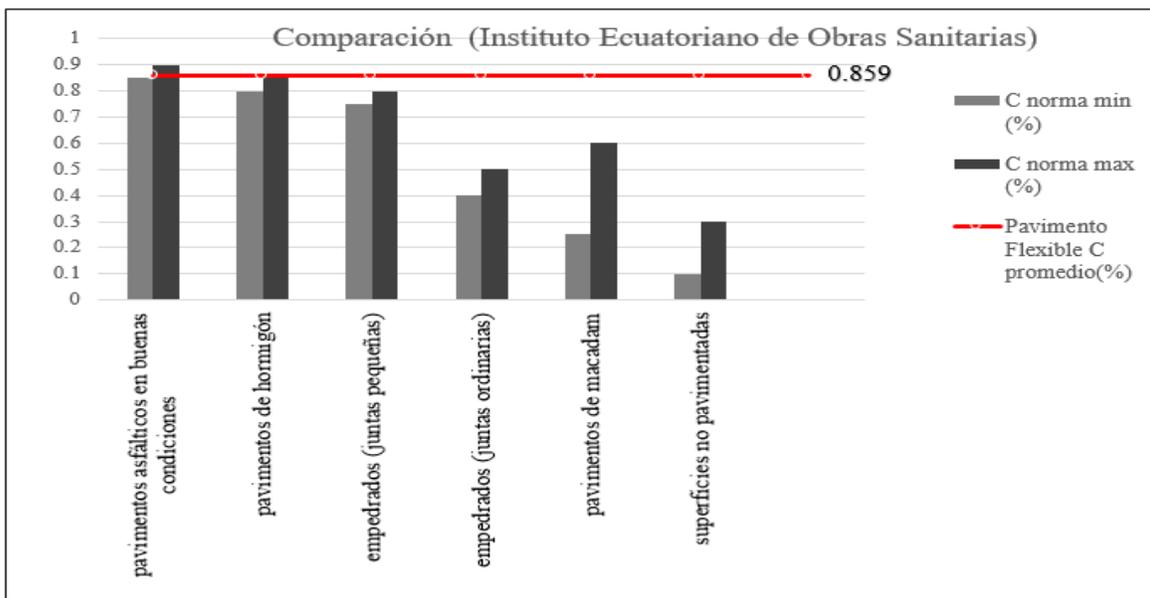
**Tabla 19.** Resultados de infiltración

<b>Puntos de control</b>	<b>Fracción de infiltración [%]</b>	<b>Coefficiente de escurrimiento C [%]</b>
Punto 1	13.2%	86.8%
Punto 2	12.2%	87.8%
Punto 3	18.6%	81.4%
Punto 4	18.8%	81.2%
Punto 5	7.6%	92.4%
<b>Promedio</b>	<b>14.1%</b>	<b>85.9%</b>
<b>Mínimo</b>	<b>7.6%</b>	<b>81.2%</b>
<b>Máximo</b>	<b>18.8%</b>	<b>92.4%</b>

La **tabla 18** exhibe los resultados de los cálculos realizados en base al ensayo de infiltración en los puntos de control, el punto que más escurre es el 5 con un valor de 92.4 %, cabe mencionar que la capa de rodadura en el mismo estaba en buen estado y el punto 4 es el que presentó el escurrimiento más bajo con un valor de 81.2%, recalando que la capa de rodadura presentaba cierto agrietamiento. La normativa presenta ciertos rangos de coeficientes de escurrimiento para distintos tipos de materiales, en este caso el que es de interés para la investigación corresponde al valor para un pavimento flexible en buenas condiciones que va desde el 85 a 90% de escurrimiento. En promedio se alcanzó un 85.9% valor que está dentro del rango impuesto por la normativa ecuatoriana (IEOS), pese a que ya no se encuentra en vigencia, se siguen empleando ciertos valores y en este caso se ha

utilizado como un documento comparativo. El punto cinco presenta una cierta particularidad el mismo esta con 2.4% por encima del valor máximo de la normativa.

La **figura 29**, muestra un gráfico comparativo del coeficiente de escurrimiento del pavimento flexible con la normativa. En donde se presentan los valores mínimos y máximos de los diferentes materiales que constituyen una vía, así como también el promedio de los puntos evaluados. Cabe recalcar que la normativa ya no se encuentra en vigencia.



**Figura 29.** Comparación entre coeficientes normativos y reales.

### 4.3.1.2 Curvas de infiltración.

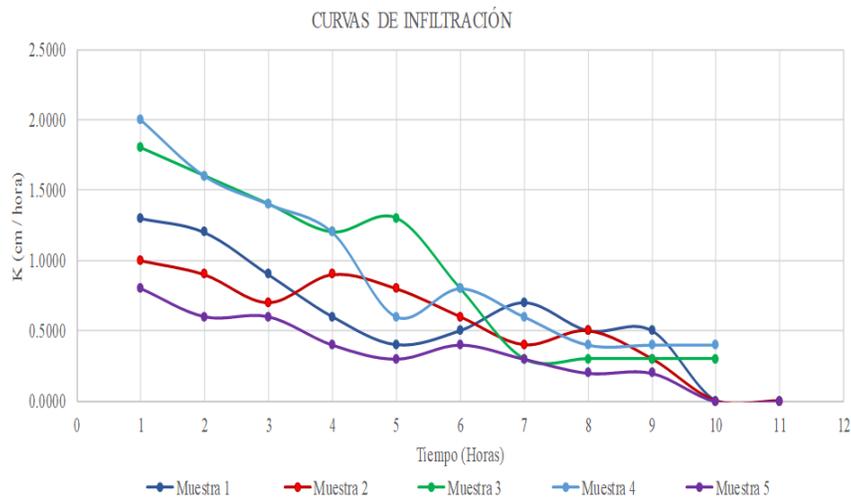


Figura 30. Curvas de infiltración del corredor vial Riobamba - Flores

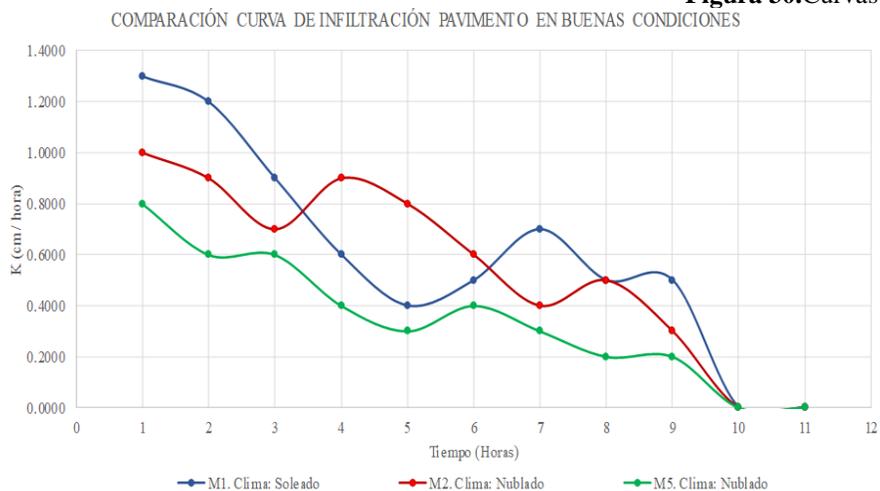


Figura 31. Curvas de infiltración muestras 1,2 y 5.

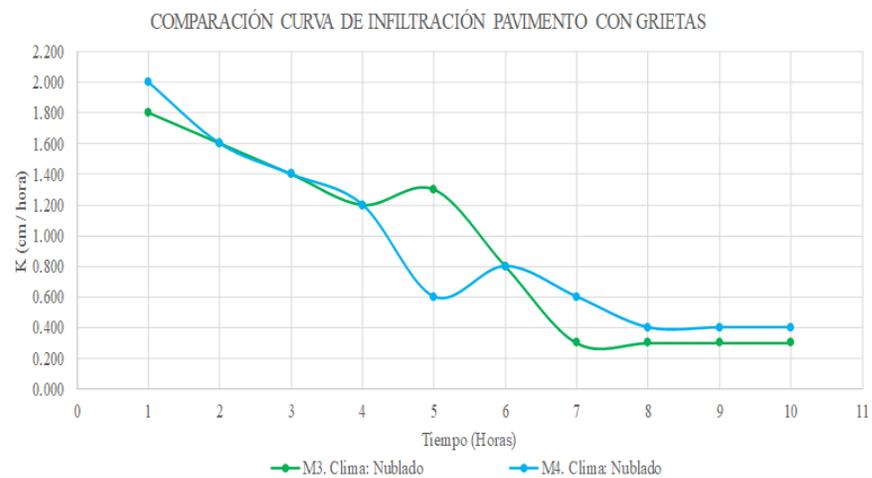


Figura 32. Curvas de infiltración muestras 3 y 4.

En la **figura 30** se observa las curvas de infiltración vs tiempo evaluadas en puntos estratégicos del corredor vial, el comportamiento de estas curvas tiene relación al estado del pavimento y el clima.

### **Comportamiento de la curva de infiltración muestras 1,2 y5**

Observamos en la **figura 31** las curvas de infiltración obtenidas a partir de datos tomados de un pavimento en buenas condiciones, las mismas que alcanzan una velocidad de infiltración de cero esto determina que la superficie del pavimento es completamente impermeable, también se observa una variación de velocidades de infiltración durante el ensayo, este fenómeno se da debido a las condiciones climáticas que se presentan antes y durante el ensayo, como se ve el comportamiento entre la curva M1, hay que tomar en cuenta que en este punto de estudio el ensayo se realizó en un día soleado y el día anterior no hubo presencia de lluvia lo que determina una velocidad mayor de infiltración, caso contrario con la curva M5 donde el clima fue nublado y la madrugada antes de realizar el ensayo se registró poca presencia de lluvia a lo que atribuye una velocidad menor de infiltración debido a la saturación previa al ensayo.

### **Comportamiento de la curva de infiltración curvas 3 y 4**

Hay una similitud en estas curvas de infiltración observadas en la **figura 32**, en la recopilación de los datos indican velocidades de infiltración constantes, esto se da debido a que la superficie en donde se colocó el infiltrómetro la capa de rodadura del pavimento presentaba grietas de severidad media en la muestra M3 y severidad media alta en la muestra M4, lo que determina que el pavimento es ligeramente permeable por el estado de deterioro en el que se encuentra, esto se ve reflejado en la **figura 30** donde las muestras M3 y M4 tienen velocidades de infiltración altas en relación con las muestras M1, M2 y M5, siendo así que el estado de la capa de rodadura y la condición climática inciden en las velocidades de infiltración.

## 4.4 RELACIÓN DE LAS PROPIEDADES FÍSICO-MECÁNICAS Y LAS PROPIEDADES HIDRÁULICAS DEL PAVIMENTO FLEXIBLE.

### 4.4.1 Relación infiltración vs grado de compactación.

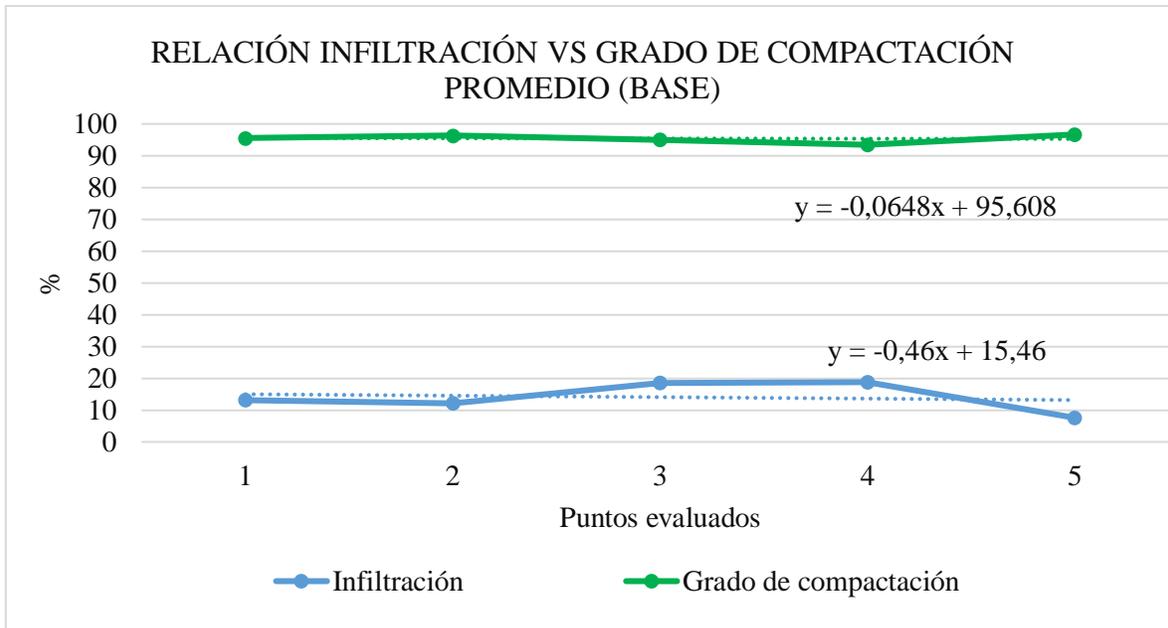


Figura 33. Relación grado de compactación vs infiltración.

La **figura 33** muestra los resultados del grado de compactación promedio basado en los datos obtenidos mediante el ensayo del cono de arena y con el método alternativo (EDG). Por otro lado, también se muestra la fracción de infiltración en cada uno de los puntos de control. Observando los valores en cada uno de los puntos de control se puede apreciar que hay cierta relación en el recorrido de las gráficas, los tramos descritos por las mismas no tienen similitud en patrones ascendentes y descendentes, concluyendo que existe una relación inversamente proporcional en cada uno de los puntos. Corroborando así que mientras la compactación sea más alta, el suelo será más impermeable. Esto se debe a que las partículas de un suelo denso ocupan casi todos los vacíos que existen dentro del mismo dificultando el paso del agua. Disminuyendo la infiltración y aumentando el porcentaje de escurrimiento.

#### 4.4.2 Relación grado de compactación vs Razón de Soporte California.

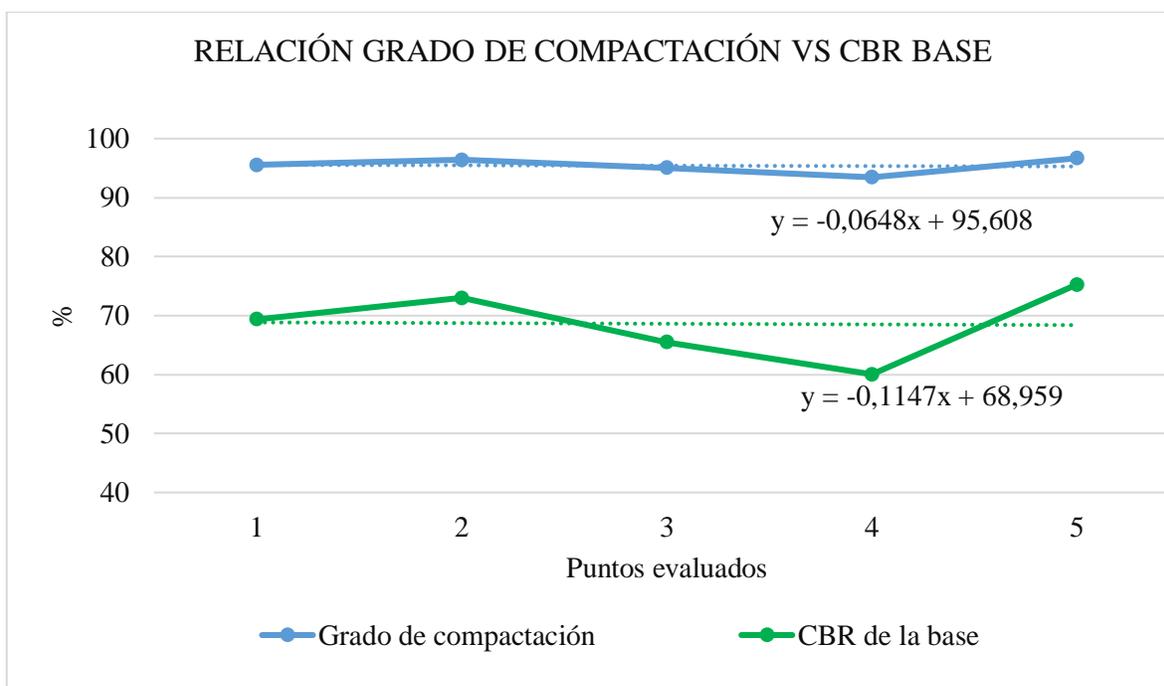


Figura 34. Relación Compactación vs soporte de California.

En la **figura 34** se muestran las gráficas de grado de compactación y CBR de la base granular del pavimento flexible, la dispersión de los puntos de los valores de soporte california es muy notable en comparación a los de la compactación que se ajustan más a la línea de tendencia central, pese a esto se puede visualizar cierto patrón similar, el tramo 1 y 4, presentan pendientes positivas, mientras que el 2 y 3 describen pendientes negativas. Concluyendo así que también existe una relación directamente proporcional.

Como ya es de conocimiento que el CBR depende de una variedad de factores relacionados con la composición, estructura y las condiciones de carga del suelo. Un alto grado de compactación incrementa la razón de soporte california indicando que el suelo tiene buena capacidad para resistir el esfuerzo vehicular.

#### 4.4.3 Relación infiltración vs Razón de Soporte California.

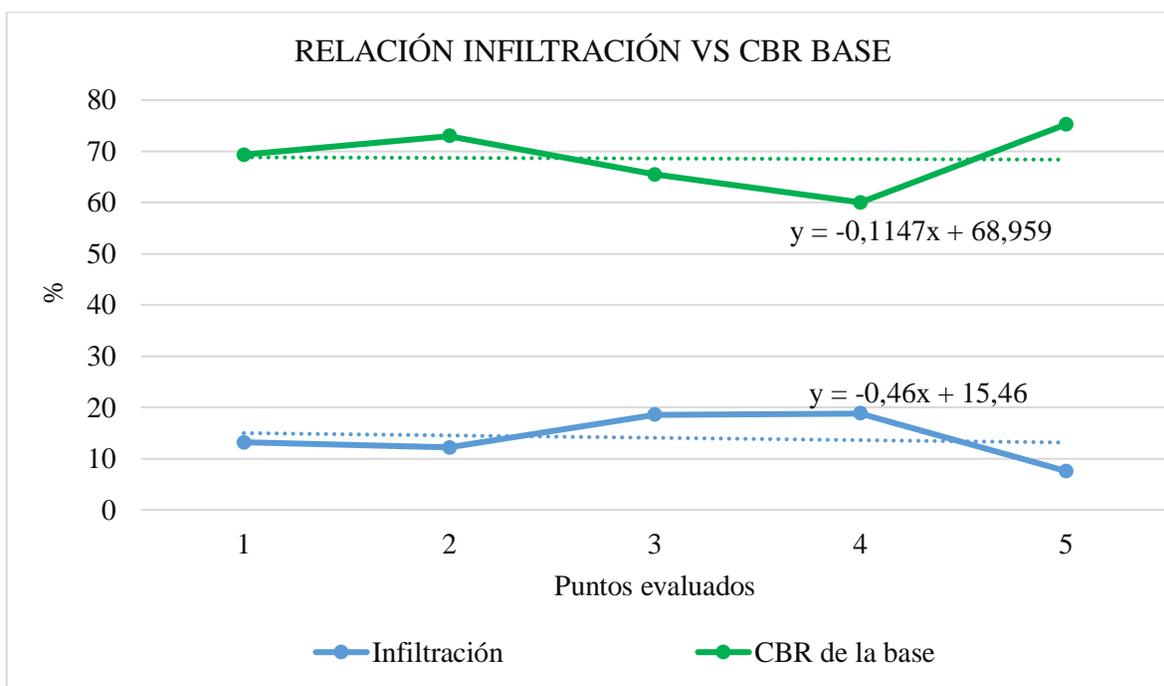


Figura 35. Relación infiltración vs CBR

La **figura 35** muestra los resultados de la razón del soporte California y el porcentaje que se infiltra en las capas inferiores. Pese a su diferencia en las líneas de ajuste, se puede observar que la pendiente de cada uno de los tramos es opuesta, describiendo patrones no parecidos, logrando así poder determinar una relación inversamente proporcional en todos los puntos de control.

A pesar de tratarse de un suelo granular que tiene alta capacidad de infiltración, los resultados demuestran lo contrario, esto es debido a que el CBR depende en gran parte de la compactación como ya se describió en la relación anterior. Es importante también mencionar que el suelo no está compuesto únicamente por arena y grava, sino que también tiene un porcentaje representativo de material fino como es el limo, este tipo de material en condiciones adecuadas tiene alto grado de impermeabilidad.

## CAPÍTULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 5.1 Conclusiones

- La máxima compactación que toleran las capas granulares base y subbase del tramo vial San Luis – Flores, ronda las 2.04 T/m<sup>3</sup>, con un contenido óptimo de agua inferior a 9%. La subrasante al estar constituida mayormente por material fino y pobremente gradado, por lo general no alcanza valores altos de peso volumétrico, el máximo valor permisible se limita a 1.7 T/m<sup>3</sup>, con una humedad inferior a 16%. El material empleado en la base de acuerdo a la clasificación SUCS corresponde a una arena pobremente gradada con grava (SP) clase 2, con un límite líquido inferior al exigido por la norma MOP. En cuanto a la subbase, está constituida por una arena bien gradada con grava (SW) clase 1. Y por último la subrasante es una arena pobremente gradada con limo y grava (SP-SM), cabe mencionar que, a pesar de estar constituida en su mayoría por material fino, la misma presenta una consistencia no plástica.
- Los resultados de los ensayos in situ como cono de arena y EDG, permiten conocer el grado de compactación en el que se encuentran las capas del pavimento flexible, en base a esto, se concluye que la actividad de compactación en la base se ha ejecutado de una manera correcta alcanzando en promedio un valor superior al 95%. La realidad de la subbase es un tanto distinta, se infiere que no ha existido un control riguroso de la misma, si bien es cierto se alcanza un valor cercano a 90%, pero evidentemente existe el no cumplimiento con la normativa, al igual que en la subrasante.
- Los resultados obtenidos en campo con el equipo electro-mecánico (Geogauge), permitieron estimar el valor del CBR. La base alcanzo un valor inferior al 70%, claramente existe el no cumplimiento con la normativa. La subbase obtuvo un valor promedio cercano al 50%, valor que está dentro de lo que exige la norma. Adicionalmente los valores más bajos se presentaron en la subrasante cuyo valor promedio es inferior a 5%.
- Pese a que el método empleado para conocer el coeficiente de escurrimiento, no está estandarizado, los resultados que se determinaron son bastante confiables. El Nivel

más alto de infiltración lo constituyen los puntos agrietados, evidentemente al existir grietas el agua penetra con mayor facilidad a las capas inferiores. En promedio el nivel de escurrimiento es cercano al 86%, básicamente se encuentra dentro del rango normativo; pero es importante mencionar una cierta particularidad que se presentó en el punto 5, el mismo superó por 2.4 % el límite superior.

- La relación existente entre el grado de compactación y la infiltración es inversamente proporcional, definiendo así que el suelo al estar mayormente compactado la porosidad del mismo tiende a disminuir dificultando el paso del agua a las capas inferiores reduciendo así la cantidad que se infiltra y aumentado la cantidad que escurre. La otra relación que se analizó fue entre la compactación y el CBR, en este apartado se evidenció una relación directamente proporcional concluyendo así que la compactación es un parámetro fundamental en la ejecución de un proyecto vial.

## **5.2 Recomendaciones**

- Se sugiere que se realicen los ensayos descritos en este proyecto investigativo en otro tipo de vías como por ejemplo asfalto rígido, adoquinados, lastrados, etc..; Logrando así contemplar esta investigación como un documento comparativo.
- Se recomienda realizar los ensayos, específicamente los ejecutados por los equipos eléctricos, en días no lluviosos, ya que en época de alta precipitación el suelo se encuentra completamente saturado y esto puede generar una variación significativa en los resultados. Adicionalmente si los equipos entran en contacto directo con el agua esto puede generar el fallo de los mismos.
- Se recomienda seguir una serie de procedimientos al extraer muestras de base, subbase y subrasante en vías con tráfico vehicular, con el fin de garantizar la representatividad de las mismas, así como el uso de equipos de protección personal y señalización adecuada para salvaguardar al personal involucrado. Es conveniente realizar una planificación y selección de los sitios de muestreo, considerando la diversidad de condiciones del pavimento. Cada muestra debe ser etiquetada claramente y documentada con su información relevante.

## BIBLIOGRAFÍA

- ASTMD-1557. (1978). *DETERMINAR LA RELACION HUMEDAD-DENSIDAD DE SUELOS Y MEZCLAS DE SUELO-AGREGADO USANDO UN MARTILLO DE 4.54 KG (10 LB) Y UNA CAIDA DE 457 MM (18 PULG)*. Obtenido de [https://www.academia.edu/9650084/ASTM\\_Designaci%C3%B3n\\_D1557\\_78\\_M%C3%A9todos\\_de\\_Ensayos\\_Est%C3%A1ndar\\_para\\_DETERMINAR\\_LA\\_RELACION\\_](https://www.academia.edu/9650084/ASTM_Designaci%C3%B3n_D1557_78_M%C3%A9todos_de_Ensayos_Est%C3%A1ndar_para_DETERMINAR_LA_RELACION_)
- Cepeda , M. E., & Rosero, R. (2024). *Características físicas e hidráulicas del pavimento rígido en la circunvalación ubicada en la ciudad de Riobamba.*
- 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/>
- COTECNO. (16 de julio de 2022). *Geogauge, calibrador de rigidez del suelo H-4140.* Obtenido de COTECNO: <https://www.cotecno.cl/geogauge-calibrador-de-rigidez-del-suelo-h-4140/>
- 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>
- Freire, M. I. (2005). *Evaluación En Campo Del Modulo De Young Equivalente y El Grado De Compactación Para Geomateriales.* Escuela Superior Politécnica del Litoral. Obtenido de <http://www.dspace.espol.edu.ec/xmlui/handle/123456789/45041>
- Garzón Rodríguez, J., & Baez Pastrana, F. (2015). *Efectos del flujo del agua superficial y subterránea en la estructura de los pavimentos flexibles..*
- Giordani , C., & Leone, D. (2015). *Pavimentos.* Universidad Tecnológica Nacional.

- IGM. (2022). *SUELOS DEL ECUADOR CLASIFICACIÓN USO Y MANEJO*. INSTITUTO GEOGRÁFICO MILITAR, Quito. Obtenido de <https://www.geoportaligm.gob.ec/portal/index.php/estudios-geograficos/>
- MAG. (2019). *Mapa Geopedológico del Ecuador continental*. Ministerio de Agricultura y Ganadería, Quito. Obtenido de <http://geoportal.agricultura.gob.ec/geonetwork/srv/spa/catalog.search#/metadata/0a26e971-5722-4a10-8a5e-d04298b0f017>
- Martínez, F. C., Betín, J. H., Sáenz, J. G., & Lizcano, F. (2009). *Pavimentos flexibles*.
- Mba Gonzales, E., & Tabares González, R. (2005). *Diagnóstico de vía existente y diseño del pavimento flexible de la vía nueva mediante parámetros obtenidos del estudio en fase I de la vía acceso al barrio Ciudadela del Café-vía La Badea*. UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA, Manizales. Obtenido de <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/2486>
- Montejo Fonseca, A. (2002). "Ingeniería de pavimentos para carreteras", 2da edición.
- MOP-001-F. (2002). *ESPECIFICACIONES GENERALES PARA LA CONSTRUCCION DE CAMINOS Y PUENTES*. Quito: REPUBLICA DEL ECUADOR.
- MTC/14. (2016). *Manual de Ensayo de Materiales*. Ministerio de Transportes y Comunicaciones.
- NEVI-12-MTOP. (2013). Especificaciones generales para la construcción de caminos y puentes VOLUMEN, (3).
- NTE INEN 691. (1982). Determinación del límite líquido método de casa grande.
- NTE INEN 692. (1982). Determinación del límite plástico.
- NTE INEN 856. (2010). Áridos. Determinación de la densidad, densidad relativa (gravedad específica) y absorción del árido fino.
- NTE INEN 857. (2010). Áridos. Determinación de la densidad, densidad relativa (gravedad específica) y absorción del árido grueso.

- Poulsen , A., & Stubstad, R. N. (1980). Fastlæggelse af E-moduler for Underbundsmaterialer ved Målinger i Marken. Interne Notater, 108.
- Quintana, H., & Lizcano, F. (2007). *Metodologías de diseño de pavimentos flexibles: Tendencias, alcances y limitaciones. Ciencia e Ingeniería Neogranadina, 17(2), 41-65.*
- 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 sub rasante 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-base-clase-2>
- S.A.C., G. R. (s.f.). *PERFILES BURLETES ALAMBRADOS*. . Obtenido de [https://globalrubbercorporation.com/fichas\\_tecnicas/perfiles-burletes.pdf](https://globalrubbercorporation.com/fichas_tecnicas/perfiles-burletes.pdf)
- Sanchez San Roman , & F. Javier . (2016). *Hidrología Superficial (III): Relacion Precipitacion - Escorrentia*. . España : s.n., 2016. 22.
- Urquiza López, P. G. (2019). *Comparación técnica entre los ensayos de laboratorio de módulo de Young y CBR para bases y subbases, caso de estudio: cantera San Joaquín (Provincia de Cotopaxi, sector Santa Rita)*”.
- Zambrano Mesa, I., Tejada Piusseaut, E., & Aaenlle, A. (2020). *Materiales granulares mejorados con emulsión asfáltica catiónica para subbases de pavimentos. Infraestructura Vial, 22(39), 29-42.*

## ANEXOS



**Anexo 1.** Ensayo cono y arena.



**Anexo 2.** Extracción de muestras de base, subbase y subrasante.



**Anexo 3.** Ensayo Proctor Modificado, enrazado y pesaje del espécimen.



**Anexo 4.** Análisis granulométrico por tamizado.



**Anexo 5.** Ensayo límite líquido (casa grande).



**Anexo 6.** Ensayo de plasticidad y toma de muestras para determinar humedad.



**Anexo 7.** Ensayo densidad y absorción del agregado fino.



**Anexo 8.** Ensayo GeoGauge.



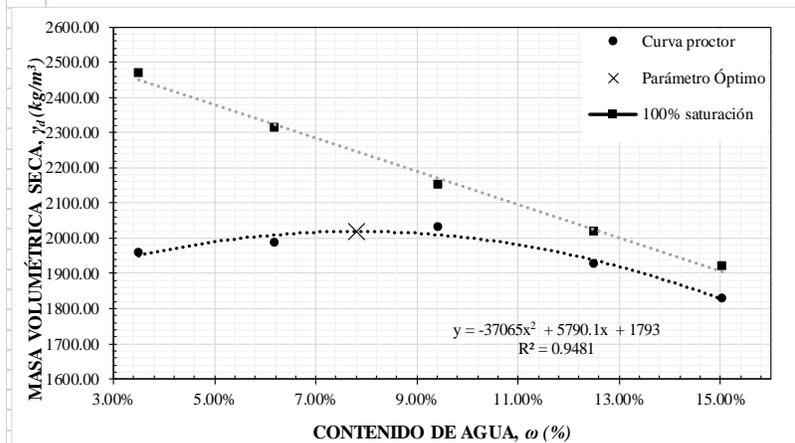
**Anexo 9.** Ensayo en campo densímetro eléctrico, Punto 1 y Punto 2.



**Anexo 10.** Ensayo de infiltracion, punto 3

DETERMINACIÓN DE LA MASA VOLUMÉTRICA SECA MÁXIMA MEDIANTE EL PROCEDIMIENTO DE COMPACTACIÓN PROCTOR MODIFICADO (ASTM D1557).									
OBRA:	TESIS				LUGAR DE MUESTREO:	CORREDOR VIAL RIOBAMBA - MACAS TRAMO (SAN LUIS - FLORES)			
PARA:	UNACH				LOCALIZACIÓN:	RIOBAMBA CHIMBORAZO			
UTILIZACIÓN:	PROYECTO TITULACION				CADENAMIENTO:	km 8+582.00			
FECHA DE PRUEBA:	16/11/2023				ID MUESTRA:	M2(BASE)			
REALIZÓ:	WILMER - RICARDO				FECHA DE MUESTREO:	7/11/2023			
CALCULÓ:	WILMER - RICARDO				FECHA DE REPORTE:	7/11/2023			
PESO DEL PISÓN:	44.54	N			DIÁMETRO DEL MOLDE:	15.27	cm		
ALTURA DE CAÍDA DEL PISÓN:	45.7	cm			ALTURA DEL MOLDE:	11.68	cm		
NÚMERO DE CAPAS :	5				VOLUMEN DEL MOLDE:	0.00214	m <sup>3</sup>		
GOLPES POR CAPA :	56				ENERGÍA DE COMPACTACIÓN:	2664.49	kN-m/m <sup>3</sup>		
					GRAVEDAD ESPECÍFICA G <sub>s</sub> :	2.7			

NÚMERO DE ENSAYO		1	2	3	4	5					
CONTENIDO DE AGUA	TARA NÚMERO:	1.1	1.2	2.1	2.2	3.1	3.2	4.1	4.2	5.1	5.2
	PESO DE TARA (g):	18.3	18.3	18.3	17.6	18.2	18.8	18.4	17.8	14.6	14.1
	PESO TARA+SUELO HÚMEDO (g):	59	45.5	44.9	47.7	41.8	44	45.9	48.8	48.6	53.5
	PESO TARA+SUELO SECO (g):	57.6	44.6	43.3	46	39.8	41.8	42.8	45.4	44.2	48.3
	PESO SUELO HÚMEDO, W <sub>m</sub> (g):	40.7	27.2	26.6	30.1	23.6	25.2	27.5	31	34	39.4
	PESO SUELO SECO, W <sub>s</sub> (g):	39.3	26.3	25	28.4	21.6	23	24.4	27.6	29.6	34.2
		3.56%	3.42%	6.40%	5.99%	9.26%	9.57%	12.70%	12.32%	14.86%	15.20%
	CONTENIDO DE AGUA, ω (%) :	3.49%		6.19%		9.41%		12.51%		15.03%	
MASA VOLUMÉTRICA	PESO DEL MOLDE (g)	6557		6557		6557		6557		6557	
	PESO DEL MOLDE+SUELO HÚMEDO (g)	10892		11070		11315		11194		11053	
	PESO DEL SUELO HÚMEDO (g):	4335		4513		4758		4637		4496	
	MASA VOLUMÉTRICA HÚMEDA, γ <sub>m</sub> (kg/m <sup>3</sup> )	2026.65		2109.86		2224.40		2167.84		2101.92	
	MASA VOLUMÉTRICA SECA, γ <sub>d</sub> (kg/m <sup>3</sup> )	1958.26		1986.82		2033.05		1926.76		1827.20	
LÍNEA DE 100% DE SATURACIÓN (CERO VACÍOS DE AIRE)	2467.35		2313.21		2152.89		2018.21		1920.42		



#### DETERMINACIÓN DE MÁXIMO

$x = -\frac{b}{2a}$	x=	0.08
a=	-37065	
b=	5790.1	
c=	1793	
$y = c - \frac{b^2}{4a}$	y=	2019.12

CONTENIDO DE AGUA ÓPTIMA, ω (%):	7.81%
MASA VOLUMÉTRICA SECA MÁXIMA, γ <sub>dmax</sub> (kg/m <sup>3</sup> ):	2019.12

Anexo 11. Curva de compactación, base punto 2.

MUESTRA 1 - PUNTO 1- BASE					
<b>Procedencia del material:</b>	Corredor Vial San Luis - Flores	<b>Peso Recipiente</b>	210	[g]	
<b>Tipo de material:</b>	Base de Pavimento Flexible	<b>Peso Recipiente + muestra Inicial</b>	2700	[g]	
<b>Proyecto:</b>	Trabajo de Titulación	<b>Peso Muestra Inicial</b>	2490.000	[g]	
<b>Beneficiario:</b>	UNACH	<b>Peso Muestra Final</b>	2489	[g]	
<b>Calculistas:</b>	Wilmer Jimenez - Ricardo Aucapiña	<b>% Error del Ensayo</b>	0.04		

Abertura del Tamiz		Peso Retenido [g]
Tamiz (ASTM)	(mm)	
1 1/2"	38.1	0.00
1"	25	0.00
3/4"	19	293.00
1/2"	12.5	499.00
3/8"	9.5	356.00
No. 4	4.75	580.00
No. 10	2	554.00
No. 40	0.425	767.00
No. 100	0.15	571.00
No. 200	0.075	393.00
<b>Fondo</b>		366.00

ENSAYO CORRECTO

CALCULOS					
Abertura del Tamiz		Peso Retenido [g]	Porcentaje Retenido %	Porcentaje Retenido Acumulado %	porcentaje Pasante %
Tamiz (ASTM)	(mm)				
1 1/2"	38.1	0	0	0	100
1"	25	0	0	0	100
3/4"	19	83	3.334672559	3.3346726	96.665327
1/2"	12.5	289	11.61108879	14.945761	85.054239
3/8"	9.5	146	5.865809562	20.811571	79.188429
No. 4	4.75	370	14.86540779	35.676979	64.323021
No. 10	2	344	13.82081157	49.49779	50.50221
No. 40	0.425	557	22.37846525	71.876256	28.123744
No. 100	0.15	361	14.50381679	86.380072	13.619928
No. 200	0.075	183	7.352350342	93.732423	6.2675773
<b>Fondo</b>		156	6.26757734	100	0
<b>Total</b>		2489	100		

GRAFICA	
D10=	0.107
D30=	0.484
D60=	3.624

**CURVA GRANULOMÉTRICA BASE CLASE 2**

% Pasante

Abertura de Tamiz (mm)

— Curva granulométrica      - - - Tamiz No. 4 (SUCS). Divide gravas de arenas  
- - - Tamiz No. 200 (SUCS). Divide limos de arenas      — Lim. Inf  
— Lim. Sup

Coeficientes	
Uniformidad Cu=	33.99
Curvatura Cc=	0.61

Clasificación SUCS	
% Finos pasa tamiz 200=	6.268
% Grava retenido tamiz 4=	35.677
% Arena=	58.055
<b>Arena</b>	<b>S</b>
Determinar Cu y Cc	
Utilizar carta de plasticidad	
<b>Arena pobremente gradada con limo y grava (SP-SM)</b>	

Anexo 12. Clasificación de suelos (SUCS), punto de control 1, base.

METODO DEL CONO DE ARENA (NORMA ASTM D 7263)						
MUESTRA 1 - PUNTO 1- BASE						
<b>Corredor Evaluado:</b>	Corredor Vial San Luis - Flores (Riobamba - Macas)					
<b>Tipo de material:</b>	Base de Pavimento Flexible					
<b>Proyecto:</b>	Trabajo de Titulación					
<b>Beneficiario:</b>	UNACH					
<b>Calculistas:</b>	Wilmer Jimenez - Ricardo Aucapiña					
<b>DESCRIPCION</b>	<b>VALOR</b>	<b>UNIDAD</b>				DATOS
<i>peso de la bandeja (suelo)</i>	497	[g]				CALCULOS
<i>peso de la bandeja (arenas)</i>	151	[g]				RESULTADOS
<i>peso de la bandeja + suelo</i>	5880	[g]				
<i>peso (arena sobrante en el frasco)</i>	155	[g]				
<i>peso (arena sobre la placa)</i>	1685.4	[g]				
<i>densidad de arena de tagua</i>	1.306	[g/cm3]				
<i>peso inicial de arena</i>	5000	[g]				
<b>PESO EXCEDENTE DENTRO DEL CONO</b>						
	Peso Excedente en el Cono 1	1542	[g]			
	Peso Excedente en el Cono 2	1545	[g]			
	Peso Excedente en el Cono 3	1531	[g]			
	Peso Excedente en el Cono 4	1528	[g]			
	Peso Excedente en el Cono 5	1526	[g]			
	Peso Excedente en el Cono Promedio	1534.4	[g]			
<b>CALCULO DE DENSIDAD HUMEDA</b>						
<b>DESCRIPCION</b>	<b>VALOR</b>	<b>UNIDAD</b>				
<i>peso del suelo</i>	5383	[gr]				
<i>masa de arena</i>	3461.6	[gr]				
<i>Volumen de arena</i>	2650.535988	[cm3]				
<i>densidad húmeda</i>	<b>2.03</b>	[g/cm3]				
<b>CALCULO DE CONTENIDO DE HUMEDAD (1)</b>						
<b>DESCRIPCION</b>	<b>VALOR</b>	<b>UNIDAD</b>				
<i>peso de tara</i>	14.5	g				
<i>peso de tara + suelo húmedo</i>	49.3	g				
<i>peso de la tara + suelo seco</i>	47.4	g				
<b>CALCULO DE CONTENIDO DE HUMEDAD (2)</b>						
<b>DESCRIPCION</b>	<b>VALOR</b>	<b>UNIDAD</b>				
<i>peso de tara</i>	14.9	g				
<i>peso de tara + suelo húmedo</i>	53.5	g				
<i>peso de la tara + suelo seco</i>	51.2	g				
<b>CALCULOS</b>						
<b>DESCRIPCION</b>	<b>VALOR</b>	<b>UNIDAD</b>				
<i>peso de suelo húmedo</i>	34.8	g				
<i>peso de suelo seco</i>	32.9	g				
<i>Humedad (w)</i>	5.78%					
<b>CALCULOS</b>						
<b>DESCRIPCION</b>	<b>VALOR</b>	<b>UNIDAD</b>				
<i>peso de suelo húmedo</i>	38.6	g				
<i>peso de suelo seco</i>	36.3	g				
<i>Humedad (w)</i>	6.34%					
<b>HUMEDAD PROMEDIO</b>						
<b>DESCRIPCION</b>	<b>VALOR</b>	<b>UNIDAD</b>				
Humedad muestra (w)	<b>6.06%</b>					
<b>CALCULO DE DENSIDAD SECA</b>						
<b>Densidad seca (ρ)</b>	<b>1.91</b>	g/cm3				
<b>Densidad seca (ρ)</b>	<b>1914.95</b>	[kg/m3]				

Anexo 13. Densidad base, punto de control 1.

LIMITES DE ATTERBERG (MUESTRA 1 - PUNTO 1- BASE)													
<b>Procedencia del material:</b>	Corredor Vial San Luis - Flores												
<b>Tipo de material:</b>	Base de Pavimento Flexible												
<b>Proyecto:</b>	Trabajo de Titulación												
<b>Beneficiario:</b>	UNACH												
<b>Calculistas:</b>	Wilmer Jimenez - Ricardo Aucapiña												
DATOS													
Limite Liquido													
Punto	Peso Tara	Peso tara + suelo Húmedo	Peso tara + suelo seco	# Golpes									
1	14.4	31.2	28.4	16									
2	14.5	31.1	28	5									
3	18.8	33.1	30.6	10									
Limite Plástico													
Numero Tara	Peso Tara	Peso tara + suelo Húmedo	Peso tara + suelo seco										
1													
2													
CALCULOS													
Limite Liquido (LL)			Limite Plástico (LP)										
Punto	Humedad %	# Golpes	Humedad %	1	2								
1	20.00%	16		#iDIV/0!	#iDIV/0!								
2	22.96%	5		#iDIV/0!									
3	21.19%	10	#iDIV/0!										
GRAFICA													
<div style="display: flex; align-items: center;"> <div style="flex: 1;"> <p style="text-align: center;"><b>Límite Líquido (LL)</b> <math>y = -0.025\ln(x) + 0.2706</math></p> </div> <div style="flex: 0.5;"> <table border="1"> <tr><td>a=</td><td>-0.025</td></tr> <tr><td>b=</td><td>0.2706</td></tr> <tr><td>x=</td><td>25</td></tr> <tr><td>y=</td><td>19.01%</td></tr> </table> </div> </div>						a=	-0.025	b=	0.2706	x=	25	y=	19.01%
a=	-0.025												
b=	0.2706												
x=	25												
y=	19.01%												
				LL=	19.01%								
				LP=	#iDIV/0!								
				IP=	#iDIV/0!								

**Anexo 14.** Limite líquido y plástico del punto de control 1, muestra base.

<b>CÁLCULOS</b>					
Diámetro interior del Infiltrómetro (cm) :					25
Área total interna (cm <sup>2</sup> ) :					490.87
Altura Total del infiltrómetro H (cm):					60.00
Altura del espejo de agua inicial (cm):					50.00
Volumen inicial de agua (cm <sup>3</sup> ) :					24543.67
<b>h</b>	<b>Delta h</b>	<b>Delta h acumulado</b>	<b>Tiempo</b>	<b>Tiempo acumulado</b>	<b>K</b>
<b>cm</b>	<b>cm</b>	<b>cm</b>	<b>hora</b>	<b>hora</b>	<b>(cm/hora)</b>
10	0	0	0	0	0
11.3	1.3	1.3	1	1	1.3000
12.5	1.2	2.5	1	2	1.2000
13.4	0.9	3.4	1	3	0.9000
14	0.6	4	1	4	0.6000
14.4	0.4	4.4	1	5	0.4000
14.9	0.5	4.9	1	6	0.5000
15.6	0.7	5.6	1	7	0.7000
16.1	0.5	6.1	1	8	0.5000
16.6	0.5	6.6	1	9	0.5000
16.6	0	6.6	1	10	0.0000
16.6	0	6.6	1	11	0.0000
<b>Sumatoria delta h (cm):</b>					6.6
<b>Volumen de Infiltración (cm<sup>3</sup>):</b>					3239.7647
<b>Fracción de infiltración ( %):</b>					13.2%
<b>Coefficiente de escurrimiento C ( %):</b>					<b>86.8%</b>

Anexo 15. Infiltración y escurrimiento punto de control 1.