



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

Características físicas, mecánicas e hidráulicas evaluadas en el pavimento
flexible de la vía San Andrés – Guano

Trabajo de Titulación para optar al título de Ingeniero Civil

Autor:

Mullo Cujilema, Samuel Efraín

Tutor:

Ing. Alfonso Patricio Arellano Barriga, Mgs.

Riobamba, Ecuador. 2025

DECLARATORIA DE AUTORÍA

Yo, **Samuel Efrain Mullo Cujilema**, con cédula de ciudadanía **0605461300**, autor del trabajo de investigación titulado: **CARACTERÍSTICAS FÍSICAS, MECÁNICAS E HIDRÁULICAS EVALUADAS EN EL PAVIMENTO FLEXIBLE DE LA VÍA SAN ANDRÉS – GUANO**, 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, 16 de julio del 2025.



Samuel Efrain Mullo Cujilema

C.I: 0605461300

DICTAMEN FAVORABLE DEL PROFESOR TUTOR

Quien suscribe, **Ing. Alfonso Patricio Arellano Barriga**, 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 DE LA VÍA ANDRÉS - GUANO**, bajo la autoría de **Samuel Efraín Mullo Cujilema**; 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 16 días del mes de julio de 2025.



Ing. Alfonso Patricio Arellano Barriga, Mgs.

C.I: 0601823313

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 DE LA VÍA ANDRÉS – GUANO”, presentado por **Samuel Efraín Mullo Cujilema**, con cédula de identidad número **0605461300**, bajo la tutoría del **Ing. Alfonso Patricio Arellano Barriga, 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 24 de julio del 2025.

Ing. Vladimir Pazmiño, Mgs.
PRESIDENTE DEL TRIBUNAL DE GRADO



Ing. Nelson Patiño, Mgs.
MIEMBRO DEL TRIBUNAL DE GRADO



Ing. Jessica Brito, Mgs.
MIEMBRO DEL TRIBUNAL DE GRADO





Dirección
Académica
VICERRECTORADO ACADÉMICO

en movimiento



UNACH-RGF-01-04-08.15
VERSIÓN 01: 06-09-2021

CERTIFICACIÓN

Que, **SAMUEL EFRAÍN MULLO CUJILEMA** con CC: **0605461300**, estudiante de la Carrera **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 DE LA VÍA SAN ANDRÉS – GUANO**", cumple con el 9 %, de acuerdo al reporte del sistema Anti plagio **COMPILATIO MAGISTER**, porcentaje aceptado de acuerdo a la reglamentación institucional, por consiguiente autorizo continuar con el proceso.

Riobamba, 14 de Julio del 2025.

Ing. Alfonso Patricio Arellano Barriga, Mgs.
TUTOR(A)

DEDICATORIA

A Dios, por haber sido mi guía, mi fortaleza y mi luz en cada paso de este camino. Su presencia ha sido el sostén espiritual que me ha dado esperanza, sabiduría y consuelo en los momentos de duda y dificultad. A Él sea toda la gloria por permitirme llegar hasta aquí. A mis padres, Marcelo Mullo y Manuela Cujilema, quienes han sido mi roca inquebrantable y mi fuente de amor, valores y apoyo desde el primer día. Su sacrificio, entrega y ejemplo han marcado profundamente mi vida y han sido el impulso constante que me motivó a seguir adelante.

A mis hermanos Elías, Anita, Elizabeth y Alexandra, por ser mis compañeros de vida. Gracias por su cariño, por las palabras de aliento, por estar presentes en los momentos importantes y por ser parte esencial de mi crecimiento.

Esta tesis está dedicada con profundo amor, gratitud y admiración a cada uno de ustedes, pilares fundamentales de mi vida.

AGRADECIMIENTO

Mi agradecimiento eterno y sincero a Dios, por brindarme la sabiduría, salud y fortaleza para culminar esta etapa. A mis padres, por su amor incondicional, esfuerzo constante y apoyo tanto moral como económico, pilares fundamentales en este proceso.

A mis hermanos, por sus consejos, motivación y respaldo incondicional en cada momento de este camino.

A mis seres queridos, quienes, con su aliento y compañía, han sido parte esencial de esta etapa.

A la Universidad Nacional de Chimborazo y a la Carrera de Ingeniería Civil, por ser el espacio que me permitió crecer académicamente y formarme como profesional. A los docentes, por compartir sus conocimientos, experiencias y valores que hoy llevan frutos.

A mis compañeros de clase y amigos, gracias por su compañía, colaboración y por compartir momentos que marcaron positivamente esta etapa académica.

En especial, a los tutores de tesis, por su orientación experta, paciencia y apoyo constante a lo largo de todo el proceso. Su guía ha sido clave para alcanzar este objetivo.

¡Gracias a todos!

ÍNDICE GENERAL

DECLARATORIA DE AUTORÍA

DICTAMEN FAVORABLE DEL PROFESOR TUTOR

CERTIFICADO DE LOS MIEMBROS DEL TRIBUNAL

CERTIFICADO ANTIPLAGIO

DEDICATORIA

AGRADECIMIENTO

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE TABLAS

ÍNDICE DE FIGURAS

RESUMEN

ABSTRACT

CAPÍTULO I. INTRODUCCION.....	15
1.1 Zona de estudio.....	15
1.2 Antecedente de la investigación.....	15
1.3 Planteamiento del problema	16
1.4 Justificación	17
1.5 Objetivos	17
1.5.1 General.....	17
1.5.2 Específicos	17
CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO.	18
2.1 Componentes de los Pavimentos Flexibles.....	18
2.1.1 Subrasante	18
2.1.2 Subbase	18
2.1.3 Base	18
2.1.4 Capa de rodadura o Superficie	18
2.2 Propiedades físicas del pavimento flexible.....	21
2.2.1 Granulometría.....	21
2.2.2 Clasificación del suelo	21

2.2.3	Grado de compactación.....	21
2.3	Propiedades mecánicas de pavimento flexible	21
2.3.1	Rigidez.....	21
2.3.2	Módulo de resiliencia	21
2.4	Propiedades hidráulicas de los pavimentos flexibles	21
2.4.1	Infiltración en las capas granulares.....	21
2.5	Coefficiente de escorrentía	22
CAPÍTULO III. METODOLOGÍA.		23
3.1	Tipo de Investigación.....	23
3.2	Diseño de Investigación	23
3.2.1	Diagrama de la metodología	23
3.2.2	Criterios para la selección de los puntos de control.....	23
3.3	Técnicas de recolección de datos.....	24
3.3.1	Ensayos en laboratorio.....	24
3.3.2	Ensayos In situ	25
3.3.3	Estimación del Módulo de Resiliencia (Mr) a partir del Módulo GeoGauge	26
3.3.4	Cálculo del Índice de soporte de California (CBR) a partir de módulo de resiliencia (Mr)	27
3.4	Definición de la muestra.....	28
3.4.1	Población.....	28
3.4.2	Muestra	28
3.4.3	Tipo de muestra	28
3.4.4	Tamaño de la muestra.....	28
3.4.5	Ubicación de la muestra.....	28
CAPÍTULO IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN		30
4.1	Propiedades físicas del pavimento flexible.....	30
4.1.1	Comparación de Características Geológicas	30
4.1.2	Granulometría.....	30
4.1.3	Límites de Atterberg	35

4.1.4	Densidad y absorción del agregado, Gruesos y finos	36
4.1.5	Compactación Proctor estándar	37
4.1.6	Densidad	39
4.1.7	Humedad	40
4.1.8	Grado de compactación.....	41
4.1.9	Desgaste de los agregados gruesos en la Base.	44
4.1.10	Dimensiones y pesos de los Núcleos	45
4.1.11	Porcentaje de vacíos y grado de compactación.	45
4.1.12	Macrotextura del pavimento flexible.....	46
4.2	Propiedades mecánicas del pavimento flexible	46
4.2.1	Rigidez, Módulo de Young, Módulo de resiliencia e índice de soporte de California (CBR) 46	
4.2.2	Estabilidad y fluencia por el método de Marshall	48
4.3	Propiedades hidráulicas del pavimento flexible.....	49
4.3.1	Permeabilidad del pavimento	49
4.3.2	Comportamiento de curvas de infiltración.....	50
4.3.3	Análisis del coeficiente de escorrentía.....	51
4.4	Correlación ente las propiedades físicas, mecánicas con el comportamiento hidráulico.	52
4.4.1	Correlación entre índice de soporte de california (CBR) base y coeficiente de escorrentía (C)	53
4.4.2	Correlación entre grado de compactación base y Coeficiente de escorrentía	53
4.4.3	Correlación entre profundidad de macrotextura vs Coeficiente de escorrentía.....	54
CAPÍTULO V. CONCLUSIONES y RECOMENDACIONES.....		54
5.1	Conclusiones.....	54
5.2	Recomendaciones	56
BIBLIOGRAFÍA		57
ANEXOS.....		61

ÍNDICE DE TABLAS.

Tabla 1: Valores de Poisson según el tipo de material, Adaptado de (Huang, 2004).....	27
Tabla 2: características del suelo natural.	30
Tabla 3: Granulometría de cada punto en la base.	30
Tabla 4: Caras fracturadas de las partículas que conforma la base.	32
Tabla 5: Granulometría de cada punto en la subrasante.....	32
Tabla 6: Limites de Atterberg del pavimento flexible.	35
Tabla 7: Densidad y absorción del pavimento flexible.....	36
Tabla 8: Gravedad específica y absorción. Fuente (Vinueza & Zurita, 2022).	36
Tabla 9: Resumen las humedades y densidades óptimas seca.	37
Tabla 10: Resumen, densidad del cono de arena y Proctor.....	39
Tabla 11: Resumen, humedad del cono de arena y Proctor.	41
Tabla 12: Resumen, Grado de compactación por el método de cono de arena.....	41
Tabla 13: Desgaste por abrasión de los agregados gruesos en la base.	44
Tabla 14: dimensiones y pesos calculados en el laboratorio de los núcleos extraídos.	45
Tabla 15: Resumen del cálculo de vacíos y compactación en núcleos.	45
Tabla 16: Resumen de la profundidad en (mm). Carpeta asfáltica.....	46
Tabla 17: Resumen de los datos obtenidos del GeoGauge y el cálculo del CBR.	46
Tabla 18: Resumen del cálculo de la estabilidad utilizando el equipo Marshall en los núcleos.....	48
Tabla 19: Resumen de los cálculos del Pavimento flexible.	49
Tabla 20: Resumen de las características del pavimento flexible.	52

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Ubicación de la vía, con los puntos de control. Fuente Propia	15
Figura 2: Mapa de tipos de suelos de la zona de estudio, adaptado de (MAG, 2015).	19
Figura 3: Mapa de formación geológica de la zona de estudio, adaptado de (MAG, 2015).	20
Figura 4: Diagrama de la metodología empleada, Fuente Propia.	23
Figura 5: Puntos de control para la extracción de la muestra, Fuente propia.	29
Figura 6: Curva granulométrica referente a la base.....	34
Figura 7: Curva Granulométrica referente a la subrasante.	34
Figura 8: Curva de compactación por cada punto de control de la base.	38
Figura 9: Curva de compactación por cada punto de control de la subrasante.	38
Figura 10: Densidades de las capas base y Subrasante.....	39
Figura 11: Humedades de las capas subbase y subrasante.....	40
Figura 12: Grado de compactación de la base.....	43
Figura 13: Grado de compactación de la subrasante.	43
Figura 14: Grado de compactación de las capas subbase y subrasante.	44
Figura 15: CBR mediante la ecuación de Powell, de las capas base y subrasante.....	47
Figura 16: Resultado del ensayo realizado con el equipo Marshall.	48
Figura 17: Curvas de infiltración por cada punto de control.....	50
Figura 18: Coeficiente de escurrimiento de cada punto de control.	51
Figura 19: Comparación del coeficiente de escorrentía, adaptado de (IEOS, 1992).	52
Figura 20: Diagrama de dispersión. Índice de soporte california (CBR) vs Coeficiente de escorrentía	53
Figura 21: Diagrama de dispersión. Grado de compactación base vs Coeficiente de escorrentía	53
Figura 22: Diagrama de dispersión de la profundidad de macrotextura vs Coeficiente de escorrentía.	54

RESUMEN

Las condiciones climáticas, especialmente las lluvias intensas, son factores que dañan la estabilidad y durabilidad del pavimento flexible. En zonas andinas como el Ecuador, la humedad es otro de los factores agravantes de la infraestructura vial. Por tanto, tener un conocimiento de las propiedades físicas, mecánicas e hidráulicas son claves para prevenir daños prematuros. Esta investigación se desarrolla en la vía San Andrés – Guano, mediante una metodología cuantitativa de tipo descriptivo. Se determinó que la capa base, clasificada como tipo Clase 4 de arena mal graduada, presenta un grado de compactación moderado, con un valor promedio de 85.08 % y un CBR bajo, en el orden del 45.56 %. También la subrasante compuesta de arena fina mal graduada, indica una baja capacidad de soporte, con un CBR promedio de 19.85 %. Ambos valores se encuentran por debajo de los mínimos establecidos por la normativa MOP (2002). La capa asfáltica mostró un grado de compactación media de 95.23 %, estos valores están por debajo de los rangos establecidos por la normativa antes mencionada. El coeficiente de escorrentía determinado está en un rango de 97 %, sin embargo, comparado con la normativa IEOS (1992), que propone entre 85 % y 90 %, notablemente es inferior al valor establecido. La correlación indicó que existe una relación débil entre las propiedades descritas en la investigación, lo que sugiere que podrían existir otros factores que involucran de manera directa con el coeficiente de escorrentía. Estos resultados evidencian la necesidad de mejorar el control de materiales y compactación durante la construcción, para garantizar un drenaje adecuado ante la precipitación.

Palabras claves: Absorción, Compactación, Correlación, Densidad, Escorrentía, GeoGauge.

Abstract

Climate conditions, particularly heavy rains, are factors that compromise the stability and durability of flexible pavements. In Andean areas like Ecuador, humidity is another factor that aggravates road infrastructure. Therefore, knowing the physical, mechanical, and hydraulic properties is key to preventing premature damage. This research is conducted on the *San Andrés–Guano* Road, employing a quantitative descriptive methodology. It was determined that the base layer, classified as Class 4 poorly graded sand, has a moderate degree of compaction, with an average value of 85.08% and a low CBR of 45.56%. The subgrade, composed of poorly graded fine sand, indicates a low bearing capacity, with an average CBR of 19.85%. Both values are below the minimums established by the MOP regulations (2002). The asphalt layer exhibited a medium degree of compaction, with a value of 95.23%; these values are below the ranges specified by the regulations. The determined runoff coefficient falls within a range of 97%; however, compared to the IEOS (1992) regulations, which propose a range of 85% to 90%, it is notably lower than the established value. The correlation indicated a weak relationship between the properties described in the research, suggesting that other factors may be directly involved in the runoff coefficient. These results underscore the importance of enhancing material control and compaction during construction to ensure adequate drainage during precipitation.

Keywords: Absorption, Compaction, Correlation, Density, Runoff, GeoGauge.



Reviewed by:
Jenny Alexandra Freire Rivera, M.Ed.
ENGLISH PROFESSOR
ID No.: 0604235036

CAPÍTULO I. INTRODUCCION.

1.1 Zona de estudio

La vía San Andrés – Guano es un ramal de segundo orden que conecta la cabecera parroquial San Andrés con la cabecera cantonal de Guano en la Provincia de Chimborazo. La entidad responsable es el Gobierno Provincial (Gobierno Autónomo Descentralizado Municipal del Cantón Guano, 2021).

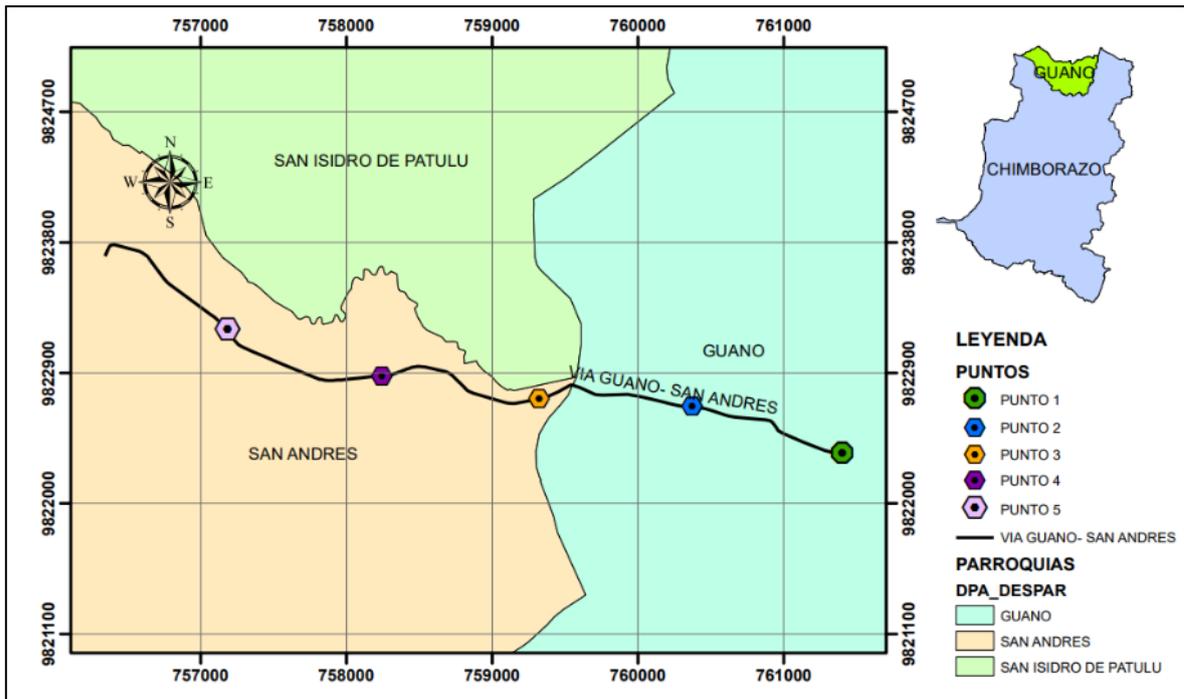


Figura 1: Ubicación de la vía, con los puntos de control. Fuente Propia

En el año 2015 se realizó un reasfaltado y en 2018 se rehabilitó un tramo de 45 metros lineales en el sector Balsayán. La vía tiene una longitud total de 6 kilómetros, con un ancho de calzada de 7 metros y cunetas laterales de 1 metro de ancho a cada lado (Gobierno Autónomo Descentralizado de la Provincia de Chimborazo, 2015). A lo largo de su recorrido se puede encontrar locales artesanales.

1.2 Antecedente de la investigación

El pavimento flexible enfrenta diversos problemas relacionados con el drenaje. Cuando existe lluvias intensas, el agua se acumula sobre la superficie, por tanto, deteriora la infraestructura. Según Casco & Salcán (2024) un drenaje inadecuado puede saturar las capas internas del pavimento, lo que reduce su resistencia y durabilidad.

Además, Ahmed et al. (2018) menciona que cuando llueve más fuerte, se infiltra más agua en la capa del pavimento. Eso aumenta la presión del agua en los poros, lo que

desestabiliza la base; con más humedad, las capas pierden rigidez y provocan un colapso en la estructura del pavimento.

Las fluctuaciones en la precipitación influyen significativamente en el drenaje de los pavimentos. Mendoza & Palomares (2018) menciona, que cuando existe lluvias intensas, los materiales que están por debajo de la calzada se saturan lo que disminuye la capacidad de soporte del pavimento. Además, si el sistema de drenaje no es adecuado el agua se acumula, lo que produce el deterioro prematuro en la infraestructura del pavimento.

En el diseño de pavimentos flexibles es importante considerar las variaciones climáticas, especialmente en cuanto a la infiltración del agua. Yurt (2020) resalta, que la resistencia de los pavimentos a la infiltración, puede ser un factor determinante, tanto en el diseño como en la rehabilitación de carreteras.

Para Hemed et al. (2020), cuando incrementa la temperatura, los materiales se expanden, lo que produce fisuras o grietas en la capa de rodadura. Esta expansión y contracción térmica acelera el envejecimiento del material bituminoso, haciendo que los pavimentos sean más vulnerables a deformaciones debido al tráfico.

La humedad es otro de los factores claves en el comportamiento estructural del pavimento, en zonas andinas del Ecuador. Las montañas tienen un gran impacto en el clima local, incidiendo de manera directa, en la durabilidad del pavimento. Según, Insel et al. (2009), las montañas andinas tienen características particulares, llevan la humedad hacia las vías. Eso combinado con las lluvias intensas, puede generar un estrés adicional en los pavimentos de las rutas que cruzan montañas.

1.3 Planteamiento del problema

La vía San Andrés–Guano está constituida por un pavimento flexible. Su superficie presenta dificultades en la evacuación adecuada del agua, un aspecto fundamental, ya que la eficiencia del sistema de drenaje incide directamente en la durabilidad del pavimento (Cayambe, 2014).

El principal problema es el debilitamiento de las capas estructurales y la consecuente disminución de la resistencia estructural del pavimento flexible, según Qiao et al. (2020). Estas afectaciones están relacionadas con las propiedades físicas y mecánicas del pavimento. Para Leiva Villacorta et al. (2016), la infiltración de agua en las diferentes capas también es una de las causas del deterioro. Aunque la capa asfáltica posee cierto grado de impermeabilidad, con el tiempo se forman fisuras que compromete su durabilidad.

Con el paso del tiempo, el agua que infiltra hacia las capas internas genera deformaciones, hundimientos y una pérdida de la capacidad estructural de la vía. Por ello, es importante conocer tanto la impermeabilidad como la escorrentía, recopilando datos propios del sitio Casco & Salcán (2024).

En este caso, surge la siguiente pregunta de investigación: ¿Cómo influyen las características físico-mecánicas del pavimento flexible en el comportamiento hidráulico de la vía San Andrés – Guano?

1.4 Justificación

Determinar las propiedades físicas, mecánicas e hidráulicas del pavimento flexible en la vía San Andrés – Guano es importante para mantener su estructura y asegurar un buen drenaje. Según Casco & Salcán (2024), las propiedades del pavimento resultan fundamentales para comprender su comportamiento frente a factores como la textura, porosidad y la capacidad de drenaje. Estos aspectos contribuyen a reducir los daños ocasionados por la infiltración del agua e incrementar la durabilidad del pavimento.

Esta es una de las vías estudiadas para el Proyecto “Influencia de los materiales andinos en la construcción de pavimentos permeables sostenibles”, cuyo objetivo principal es diseñar un pavimento poroso que permita que una parte de la escorrentía se infiltre dentro de la estructura del pavimento sin afectarlo, para disminuir el empozamiento de agua y favorecer las recargas de los acuíferos. La información recopilada de esta vía junto con la de otras incluidas en el estudio, permitirá comprender el comportamiento estructural e hidráulico con el fin de diseñar prototipos que mejoren las condiciones de seguridad para los conductores y para que disminuya el riesgo de aluviones e incremente la infiltración en el subsuelo.

1.5 Objetivos

1.5.1 General

- Determinar las características físicas, mecánicas e hidráulicas de la vía San Andrés- Guano.

1.5.2 Específicos

- Obtener en laboratorio la característica física del pavimento flexible.
- Identificar IN SITU las características mecánicas e hidráulicas del pavimento flexible.
- Analizar la correlación entre las propiedades físico-mecánicas de los pavimentos flexibles y su desempeño hidráulica.

CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO.

2.1 Componentes de los Pavimentos Flexibles

2.1.1 Subrasante

Superficie de terreno que ha sido preparada para servir como base de apoyo de las capas superiores de la infraestructura, como el pavimento (Ministerio de obras públicas y comunicaciones [MOP], 2002).

2.1.2 Subbase

Capa de un grosor diseñado específicamente de materiales que cumple con ciertas normas, colocada sobre una superficie adecuada con el propósito de soportar capas superiores que se coloca posteriormente (MOP, 2002).

2.1.3 Base

Capa de material controlado, hecha de materiales con ciertas características según normativas, colocada sobre la subbase y la subrasante, que brinda soporte a la capa de rodadura (MOP, 2002).

2.1.4 Capa de rodadura o Superficie

Capa superior del pavimento, de materiales específicos que proporcionen comodidad al tránsito y que tenga propiedades antideslizantes, impermeables y resistentes tanto a la abrasión como a los efectos perjudiciales del clima (MOP, 2002).

Según el Ministerio de Agricultura y Ganadería [MAG] (2015), el terreno presenta una composición predominantemente arenosa y franco-arenosa como se muestra en la figura 2. Esta característica edafológica influye directamente en el comportamiento estructural del pavimento.

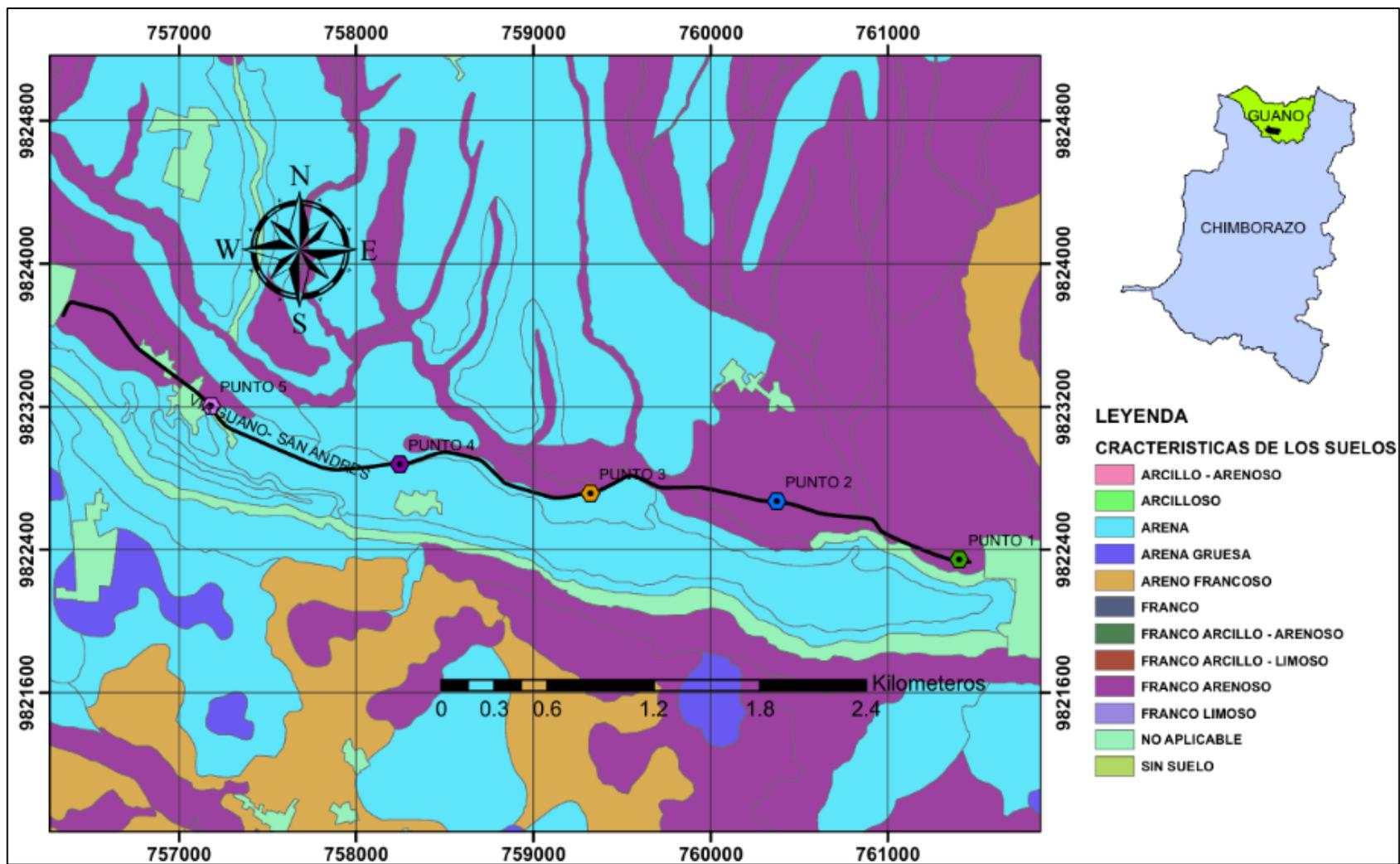


Figura 2: Mapa de tipos de suelos de la zona de estudio, adaptado de (MAG, 2015).

Según MAG (2015), existe dos tipos de conformación geológicas: volcánico Chimborazo y volcánico Igualata donde están ubicados los puntos de control, lo que brinda una idea de cómo está compuesto el suelo.

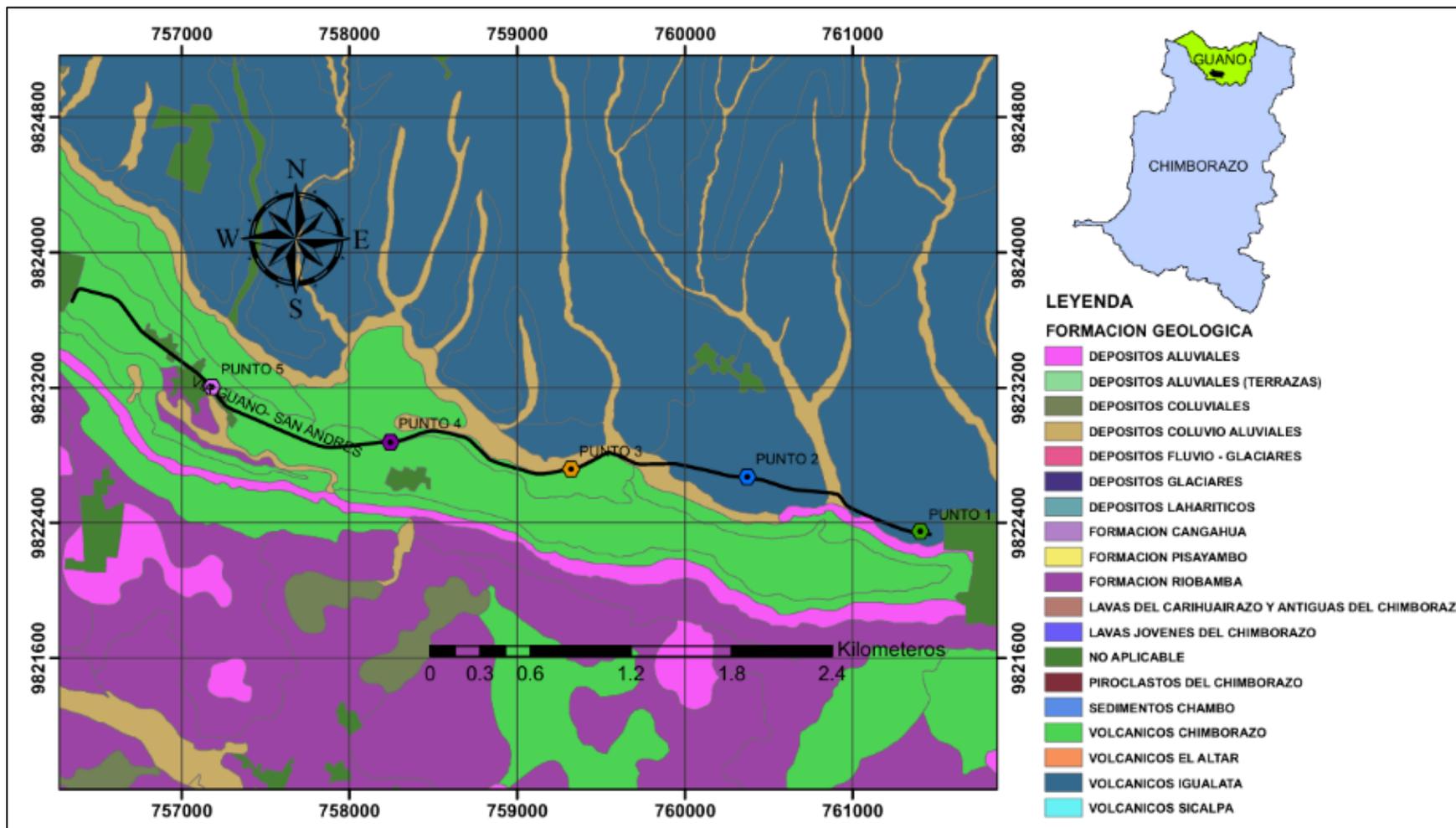


Figura 3: Mapa de formación geológica de la zona de estudio, adaptado de (MAG, 2015).

2.2 Propiedades físicas del pavimento flexible

2.2.1 Granulometría

Es el proceso mediante el cual se determina como están distribuidos los tamaños de las partículas que componen los áridos (NTE INEN 696, 2011).

2.2.2 Clasificación del suelo

Es la agrupación de los materiales según las características físicas y mecánicas. Se divide en suelos gruesos, como las arenas y gravas; suelos finos, como limos y arcillas. Generalmente, se utilizan sistemas estandarizados como el SUCS (Sistema Unificado de Clasificación de Suelos) o el AASHTO, los cuales se basándose en el análisis granulométrico y los límites de plasticidad, para realizar esta clasificación (Narsilio & Santamarina, 2015).

2.2.3 Grado de compactación

Es la relación entre la densidad seca obtenida en campo y la densidad seca máxima determinada en laboratorio utilizando el ensayo Proctor. El grado de compactación mínimo para las capas del pavimento flexible (subrasante, subbase y base) es del 95 % respecto a la densidad seca máxima Proctor, garantizando así una estructura estable y duradera (MOP, 2002).

2.3 Propiedades mecánicas de pavimento flexible

2.3.1 Rigidez

Es la capacidad del suelo o material granular para soportar esfuerzos, sin experimentar deformaciones permanentes (Mohammad et al., 2008).

2.3.2 Módulo de resiliencia

El módulo de resiliencia muestra que tan rígido y elástico es un suelo o material granular, cuando está sometido a cargas repetidas. Indica la capacidad del suelo para recuperar su forma original, sin quedar deformado, siendo una variable importante para el diseño del pavimento flexible (Vidal & Osorio, 2006).

2.4 Propiedades hidráulicas de los pavimentos flexibles

2.4.1 Infiltración en las capas granulares

Es el proceso mediante el cual el agua entra a través de la superficie del pavimento. Este fenómeno es importante porque afecta la durabilidad y estabilidad del pavimento. En pavimentos flexibles convencionales, el agua tiende a filtrarse entre la capa de rodadura y la base, lo que genera acumulación de agua y daños estructurales (Lizcano et al., 2011)

2.5 Coeficiente de escorrentía

Es la proporción de agua lluvia que no se infiltra en la superficie y se convierte en escorrentía superficial. Este coeficiente indica qué parte del agua lluvia fluye sobre la superficie, afectando la infiltración y el drenaje, factores claves para la durabilidad y desempeño del pavimento flexible. Un coeficiente alto implica mayor escorrentía, por tanto, mayor acumulación de agua (Paredes, 2006).

CAPÍTULO III. METODOLOGÍA.

3.1 Tipo de Investigación.

Esta investigación tiene un enfoque cuantitativo. A través de este método, se llevan a cabo ensayos tanto en laboratorio como in situ, centrandose en el análisis de las capas del pavimento flexible.

3.2 Diseño de Investigación

Esta investigación es de carácter descriptivo y se enfoca en la caracterización de las propiedades físicas, mecánicas e hidráulicas. Se detallan los procesos de recolección de datos, tabulación y análisis, utilizando los gráficos obtenidos para interpretar los resultados.

3.2.1 Diagrama de la metodología

Para realizar la investigación de manera ordenada, se elaboró un diagrama, mostrado en la figura 4. En él se identifican todos los pasos que se deben seguir para cumplir con los objetivos.

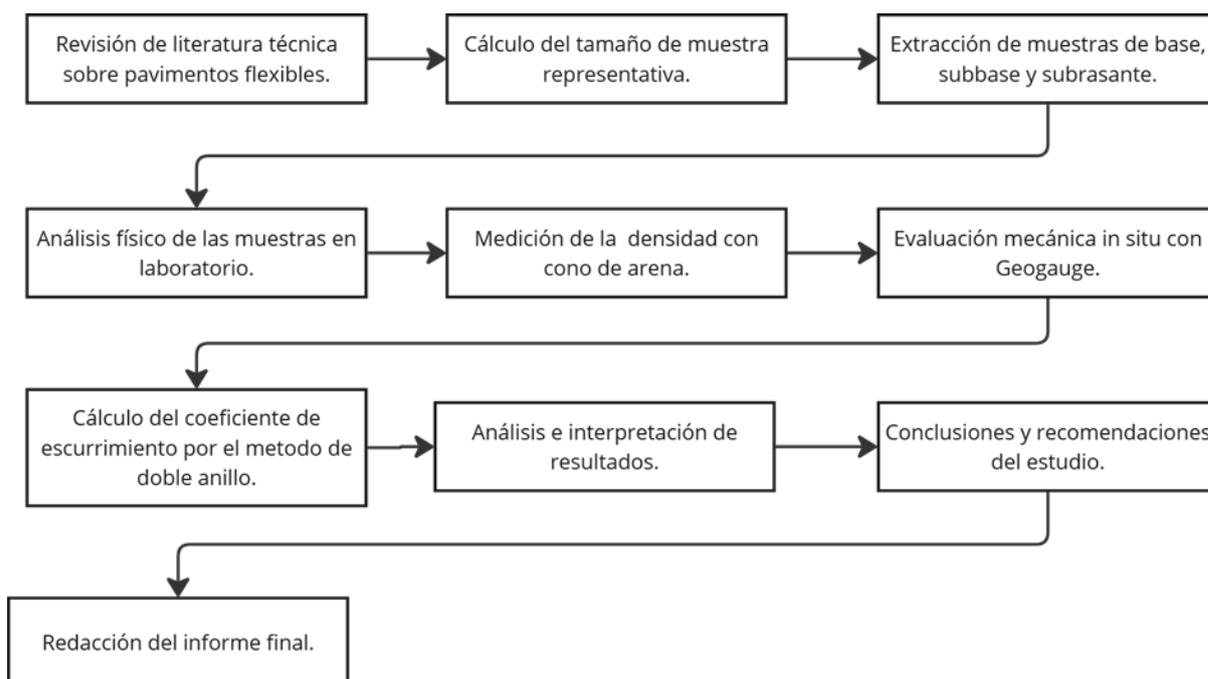


Figura 4: Diagrama de la metodología empleada, Fuente Propia.

3.2.2 Criterios para la selección de los puntos de control.

Para facilitar la caracterización, se consideraron algunos puntos de control, en donde existen fallas con grietas y fisuras, además de los deterioros presentes en las cunetas. También se analizó el estado de la vía en zonas con vegetación, ya que esta es la condición más común en el tramo estudiado (ver Anexo 1).

3.3 Técnicas de recolección de datos.

Mediante la aplicación de las normas técnicas ASTM, NTE INEN, se logró determinar diversos aspectos relacionados con las propiedades físicas, mecánicas e hidráulicas (Casco & Salcán, 2024).

3.3.1 Ensayos en laboratorio

3.3.1.1 Ensayo de granulometría de los áridos.

Consiste en secar y pesar la muestra, para luego tamizarla utilizando aberturas decrecientes. Se pesa el material retenido en cada tamiz se calcula el porcentaje de cada tamaño, tanto retenido como pasante (NTE INEN 696, 2011).

3.3.1.2 Ensayo de Límites de Atterberg

Limite plástico

El límite plástico es el contenido de agua en el cual el suelo cambia de plástico a semisólido, se moldea un rollo de 3 mm y se rueda hasta que se quiebre. El contenido de humedad al romperse corresponde al límite plástico (NTE INEN 692, 1982).

Limite Liquido

El límite líquido es el contenido de agua en el cual el suelo pasa de plástico a líquido. Se determina con la copa de Casagrande, midiendo la fluencia del suelo con un número fijo de golpes. Para ello, se utiliza la fracción que pasa por el tamiz No. 40 (NTE INEN 691, 1982).

3.3.1.3 Ensayo de densidad relativa y absorción

Las normas NTE INEN 856 (2010) y NTE INEN 857 (2010) proponen procesos para determinar la densidad relativa y absorción, tanto en materiales finos como en gruesos respectivamente. Estos ensayos muestran la masa por volumen del árido, sin incluir vacíos; además, miden la cantidad de agua atrapada en los poros.

3.3.1.4 Ensayo Proctor

Este ensayo determina la relación entre la humedad y densidad de los suelos. Se realiza compactando muestras en moldes cilíndricos con un martillo de 4.54 kg que cae desde 457 mm. Existen cuatro métodos según el tamaño del molde y la granulometría del material. Este ensayo permite determinar la máxima densidad seca y el contenido óptimo de humedad para la compactación del suelo (ASTM D-1557, 1978).

3.3.1.5 Ensayo de la degradación mediante el uso de la máquina de los ángeles

El ensayo mide la degradación del árido grueso menor a 37.5 mm. Consiste en colocar el material dentro de un tambor giratorio con esferas de acero, sometiéndole a un

número determinado de revoluciones. Luego, se tamiza el material para determinar el porcentaje de pérdida por desgaste (NTE INEN 860, 2011).

3.3.1.6 Extracción de Núcleos

Se utiliza un taladro equipado con una broca circular para perforar hasta el fondo de la capa asfáltica, Antes de la perforación, se aplica enfriamiento con agua para evitar el sobrecalentamiento en la broca. Las muestras extraídas deben conservar una forma cilíndrica intacta, sin daños en sus bordes. Es fundamental evitar el uso de palancas que puedan causar fracturas o deformaciones. Durante el transporte, las muestras se manipulan con cuidado, colocándolas sobre superficies adecuadas que preserven su forma y propiedades físicas (ASTM D-5361, 2006).

3.3.1.7 Ensayo de la profundidad de macro textura

Este ensayo se realiza en una zona seca, homogénea y libre de grietas. Se vierte una cantidad conocida de material seco sobre la superficie y se forma un círculo. Se mide el círculo en cuatro puntos distintos para determinar un promedio del diámetro. Se realiza por lo menos cuatro mediciones y se calculan promedios para obtener la profundidad (ASTM E965, 2015).

3.3.1.8 Medición de la estabilidad y fluencia mediante el método Marshall

Este ensayo se realiza con el uso del equipo Marshall. Consiste en cargar una muestra cilíndrica de mezcla asfáltica hasta su falla para medir dos parámetros: la estabilidad, que es la carga máxima que soporta la muestra, y el flujo, que es la deformación que experimenta durante la prueba (ASTM D6927, 2022).

3.3.2 Ensayos In situ

3.3.2.1 Densidad- Método del cono de arena

Este ensayo mide la densidad del suelo in situ. Se hace una pequeña excavación cilíndrica y se pesa el suelo extraído. Luego, se llena el hueco con arena calibrada utilizando un cono especial, por último, se mide el volumen de arena para calcular la densidad (ATSM D1556, 2000).

3.3.2.2 Medición de la Rigidez y Módulo Aparente con el equipo GoGauge

El GeoGauge es un equipo electromecánico que mide la rigidez in situ de los suelos, aplicando una fuerza pequeña sobre la superficie y registrando los valores necesarios. Este método facilita el control de calidad en obra. La rigidez que se obtiene es una estimación que puede variar según las condiciones del terreno y el espesor de las capas (ASTM D-6758, 2008).

3.3.2.3 Infiltración y escurrimiento- Método del infiltrómetro de doble anillo

Según Rosero & Cepeda. (2024), los cilindros (anillos) tienen dimensiones específicas: el anillo interior presenta un diámetro de 25 cm y el exterior de 45 cm, ambos con una altura de 60 cm. Se utilizan burletes de caucho con alma metálica para sellar el contorno inferior y evitar filtraciones por los bordes, como se muestra en el Anexo 14.

El infiltrómetro se coloca sobre una superficie limpia y seca, con los burletes adheridos. Se aplica un adhesivo sellador tanto en la parte interna como externa del cilindro. Luego con la ayuda de un peso de aproximadamente 15 kilogramos, se fija en los marcos del cilindro. A continuación, se llena parcialmente con agua y se verifica que no existan fugas. Se toman los datos midiendo desde el espejo de agua, durante un tiempo determinado. Este ensayo permite analizar la permeabilidad y determina la escurrimiento propia del lugar.

3.3.3 Estimación del Módulo de Resiliencia (M_r) a partir del Módulo GeoGauge

Según Mohammad et al. (2008), se presenta dos modelos para estimar un módulo de resiliencia y con ello calcular el índice de soporte de California (CBR).

- Modelo Directo: Sin propiedades detalladas del material.

$$M_r = 36.68 * LOG(E_{geo}) - 7.21 \quad (1)$$

- Modelo con Propiedades del Material: Si conoces la granulometría.

$$M_r = 35.38 * LOG(E_{geo}) - 0.06 * p_4 - 0.39 * p_{200} \quad (2)$$

Donde:

M_r : Módulo de Resiliencia (en ksi)

E_{geo} : Módulo medido con GeoGauge (en ksi)

LOG: Logaritmo en base 10.

p_4 : Porcentaje que pasa el tamiz No. 4 (4.75 mm)

p_{200} : Porcentaje que pasa el tamiz No. 200 (0.075 mm)

3.3.3.1 Cálculo Módulo de GeoGauge (en ksi)

Según Mohammad et al. (2008), muestra la ecuación relacionada con la teoría de elasticidad, que incorpora el coeficiente de Poisson del material y la geometría del dispositivo utilizado.

$$E_{geo} = \frac{k * (1 - \nu^2)}{w(n) * r} \quad (3)$$

Donde:

Egeo = módulo de elasticidad del ensayo GeoGauge TM (MPa)

K = rigidez del material medida por el GeoGauge TM (MN/m)

v = coeficiente de Poisson

$\omega(n) = 0.565$ para la geometría del GeoGauge TM

r = radio del anillo del GeoGauge TM (0.05715 m)

3.3.3.2 Coeficiente del poisson

Propiedad mecánica de los materiales que describe la relación entre la deformación lateral y la deformación axial cuando un material es sometido a una carga (Huang, 2004).

Tabla 1: Valores de Poisson según el tipo de material, Adaptado de (Huang, 2004).

Material	Valor típico de Poisson (v)	Rango típico
Mezcla asfáltica (HMA)	0.35	0.30 – 0.40
Concreto Portland	0.15	0.15 – 0.20
Material granular no tratado	0.35	0.30 – 0.40
Material granular tratado con cemento	0.15	0.10 – 0.20
Suelos finos tratados con cemento	0.25	0.15 – 0.35
Material estabilizado con cal	0.2	0.10 – 0.25
Mezclas de cal y ceniza volante	0.15	0.10 – 0.15
Arena suelta o arena limosa	0.3	0.20 – 0.40
Arena densa	0.35	0.30 – 0.45
Suelos finos	0.4	0.30 – 0.50
Arcillas blandas saturadas	0.45	0.40 – 0.50

3.3.4 Cálculo del Índice de soporte de California (CBR) a partir de módulo de resiliencia (Mr)

Mohammad et al. (2008) recomienda la siguiente ecuación para del CBR.

$$Mr = 17.58 * (CBR)^{0.64} \quad (4)$$

Donde:

Mr: Módulo de Resiliencia (en MPa)

CBR: Índice de soporte de california (en %)

3.4 Definición de la muestra

3.4.1 Población

El estudio se realiza en las capas que conforma la estructura del pavimento flexible, ubicadas en un ramal de la vía que conecta las localidades de San Andrés y Guano, en la provincia de Chimborazo.

3.4.2 Muestra

Representa el material que se encuentra en las siguientes capas: Asfáltica, base, subbase y subrasante. Mismo que se extrajo de los diferentes puntos de control, ubicados en la vía como se evidencia en el Anexo 1.

3.4.3 Tipo de muestra

Se aplica el muestreo estratificado, que consiste en dividir las distintas capas de un pavimento, cada capa pertenece a un estrato diferente, con el cual se toma las muestras para analizar con la metodología correspondiente (Aucapiña & Jiménez, 2024).

3.4.4 Tamaño de la muestra

La vía San Andrés-Guano tiene una longitud aproximada de 6 kilómetros. Se realizaron perforaciones para tomar muestras cada 1.13 kilómetros. En total, se hicieron cinco perforaciones a lo largo del tramo. En cada punto de control, se extrajo muestras de 15 kilogramos por cada una de las capas que componen el pavimento.

3.4.5 Ubicación de la muestra.

En la figura 5 se identifica la ubicación de los puntos de control, de donde se extrajo las muestras.

Puntos de control	Coordenadas UTM (Este)	Coordenadas UTM (Norte)	Elevación (m)	Ilustración
P1	761402.30	9822348.65	2745.2	
P2	760372.75	9822671.92	2784.74	
P3	759322.88	9822718.75	2802.8	
P4	758246.09	9822880.12	2897.86	
P5	757183.26	9823205.47	2956.36	

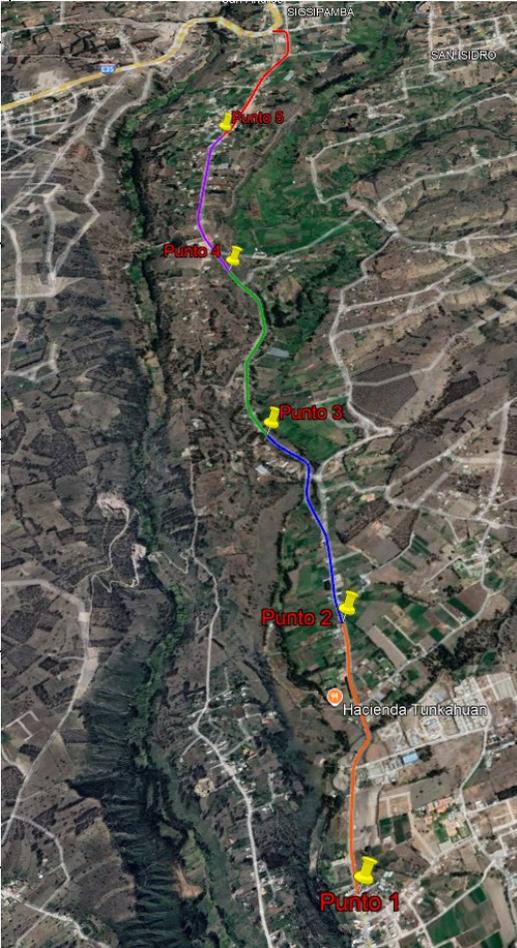


Figura 5: Puntos de control para la extracción de la muestra, Fuente propia.

CAPÍTULO IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Propiedades físicas del pavimento flexible

4.1.1 Comparación de Características Geológicas

En la Tabla 2 se presentan las características y formaciones geológicas del área de estudio, en comparación con la clasificación de la subrasante o suelo natural. Todos los puntos de control corresponden, según el sistema unificado de clasificación de suelo (SUCS), a una arena mal graduada, arena gravosa, con poco contenido de fino (SP). Con base en estos criterios se evidencia que existen materiales granulares con poco contenido de finos (Figura 2 y 3).

Tabla 2: características del suelo natural.

Puntos de control	Clasificación de los suelos (SUCS)	características de los suelos (MAG, 2015)	Formación geológica (MAG, 2015)
P1	SP	Franco arenoso	Volcánico Igualata
P2	SP	Franco arenoso	Volcánico Igualata
P3	SP	Arena	Volcánico Chimborazo
P4	SP	Arena	Volcánicos Chimborazo
P5	SP	Franco arenoso	Volcánicos Chimborazo

4.1.2 Granulometría

4.1.2.1 Granulometría de la base

El análisis granulométrico de las capas base y subbase, como se muestra en el Anexo 1 y 2. Para la evaluación, se emplearon los rangos de gradación establecidos por el Ministerio de Obras Públicas y Comunicaciones (MOP, 2002), En función de estos criterios, se determinó que el material colocado debajo de la capa asfáltica corresponde a una base, con un espesor aproximado entre 30 a 40 cm.

Tabla 3: Granulometría de cada punto en la base.

Abertura del Tamiz		Base					Material Obtenido
		P1	P2	P3	P4	P5	
Tamiz (ASTM)	Abertura (mm)	Pasante [%]					

1 1/2"	38.100	89.61	91.61	100.00	95.78	100.00	Grava Gruesa
1"	25.000	81.29	84.82	92.30	87.80	95.02	
3/4"	19.000	76.83	81.95	82.41	85.11	88.39	
1/2"	12.500	71.47	73.23	73.71	80.75	81.09	Grava
3/8"	9.500	67.18	68.23	67.94	77.63	75.33	Fina
No. 4	4.750	58.36	57.54	57.21	69.08	63.71	Arena
No. 10	2.000	46.97	45.12	45.02	57.21	50.44	Gruesa
No. 40	0.425	20.94	17.35	25.36	32.15	27.87	Arena
No. 100	0.150	5.46	3.70	6.06	10.51	9.29	Fina
No. 200	0.075	0.80	0.33	0.53	1.53	1.66	Finos
Fondo	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
Coefficiente Uniformidad Cu		24.43	21.09	29.03	18.15	24.80	
Coefficiente Curvatura Cc		0.73	0.81	0.51	0.41	0.51	
Base (MOP)		Clase 4					
Simbología SUCS		SP	SP	SP	SP	SP	

Se analizaron cinco muestras de diferentes puntos de control, como se muestra en la Tabla 3 y la Figura 6, según la normativa MOP (2002), todas corresponden a una base clase 4, con materiales que provienen de trituración. Esta característica se evidencia en el número de caras fracturadas de las partículas, tal como se detalla en la Tabla 4.

La clasificación SUCS, muestra que el material predominante en los cinco puntos de control es SP, ya que más del 50% pasa el tamiz No 4, el coeficiente de uniformidad (Cu) varía entre 18.15 y 29.03. lo cual cumple con el criterio de ser mayor a 4, el coeficiente de curvatura (Cc) se encuentra entre 0.41 y 0.8. Este valor está fuera del rango ideal, que es entre 1 y 3.

Esto indica la presencia de arena mal graduada, en todos los puntos de control. Esto significa que las partículas no son variadas y no encajan entre sí, lo que afecta a la densidad, provocando que la base se asiente o se mueva con el tiempo, por lo que afecta en la durabilidad y resistencia de la capa de rodadura.

Tabla 4: Caras fracturadas de las partículas que conforma la base.

Caras fracturadas de la muestra base		
Puntos de control	Caras fracturadas	Descripción de Partícula
P1 P2 P3 P4 P5	Las partículas en todos los puntos de control presentan más de dos caras fracturadas.	

4.1.2.2 Granulometría de la Subrasante

Tabla 5: Granulometría de cada punto en la subrasante.

Abertura del Tamiz		Subrasante					Material Obtenido
		P1	P2	P3	P4	P5	
Tamiz (ASTM)	Abertura (mm)	Pasante [%]					
1 1/2"	38.100	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	Grava Gruesa
1"	25.000	98.92	100.00	100.00	100.00	100.00	
3/4"	19.000	97.83	100.00	100.00	100.00	100.00	
1/2"	12.500	97.00	99.15	100.00	99.41	99.55	Grava
3/8"	9.500	94.40	98.52	99.50	98.84	99.14	Fina
No. 4	4.750	93.86	97.29	94.49	97.95	95.27	Arena
No. 10	2.000	90.10	94.48	83.96	96.73	89.42	Gruesa
No. 40	0.425	64.81	55.71	58.65	58.20	63.24	Arena
No. 100	0.150	15.50	26.06	19.55	18.16	19.29	Fina
No. 200	0.075	1.95	4.63	2.01	3.37	4.10	Finos
Fondo	0.000	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
Coefficiente Uniformidad							
Cu		3.33	6.39	4.66	4.59	3.89	
Coefficiente Curvatura							
Cc		1.12	0.62	0.90	0.99	1.12	
Simbología SUCS		SP	SP	SP	SP	SP	

En la Tabla 5 se detallan los resultados de la granulometría. El porcentaje que pasa el tamiz No. 40 varía entre 55.71 % y 64.81 %. Además, los coeficientes Cu y Cc no

cumplen plenamente con los criterios, por lo tanto según SUCS, el material corresponde a una arena mal graduada (SP), con una predominancia de arena fina, en todos los puntos de control.

Esto significa que la muestra tiene partículas pequeñas con tamaños similares y poca variedad, en este caso, el material no puede compactarse de manera eficiente, por lo tanto, es más inestable, mayor propensión a la erosión y el agua infiltra con facilidad.

A continuación, se muestra las curvas granulométricas de cada capa.

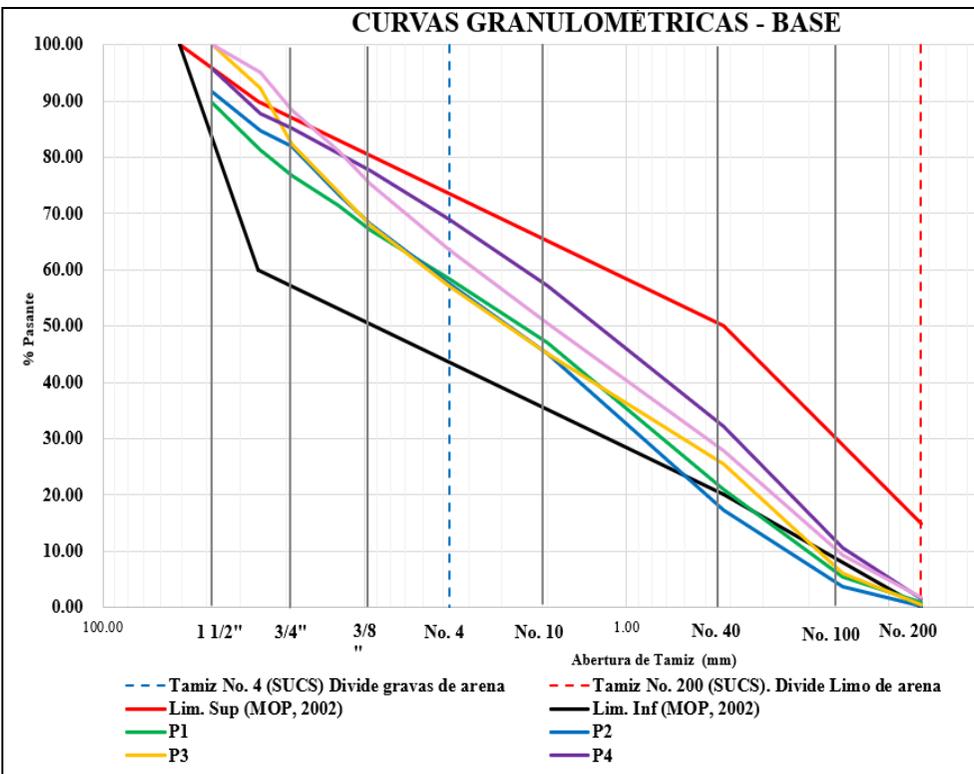


Figura 6: Curva granulométrica referente a la base.

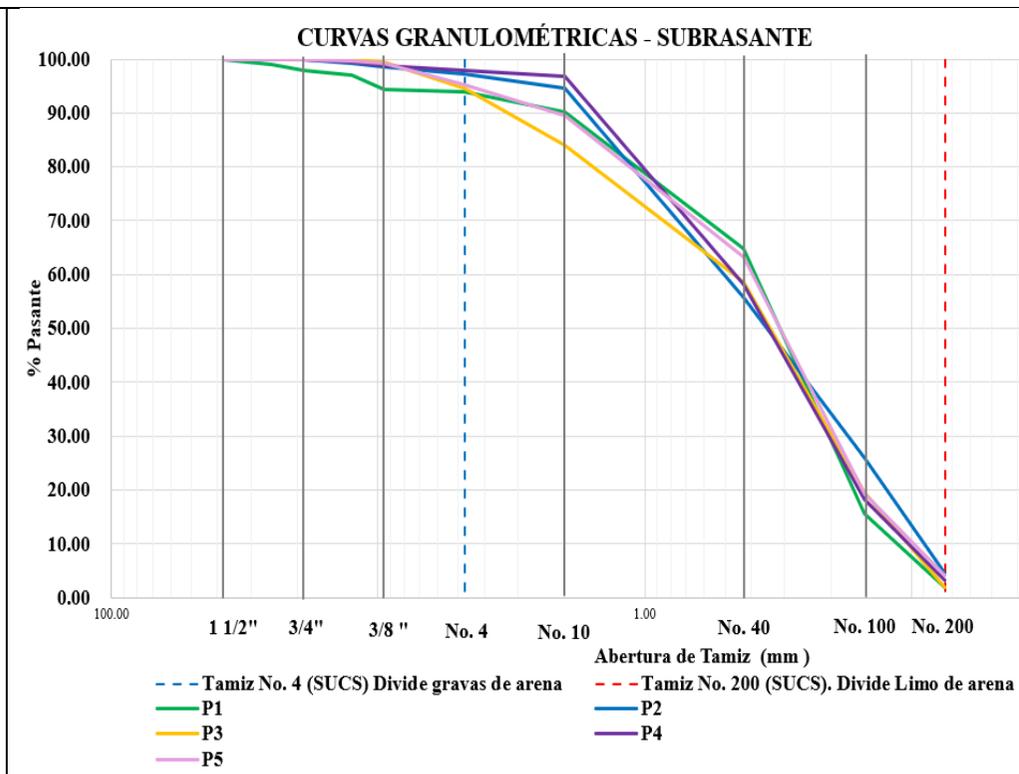


Figura 7: Curva Granulométrica referente a la subrasante.

4.1.3 Límites de Atterberg

Tabla 6: Límites de Atterberg del pavimento flexible.

Límites de Atterberg del pavimento flexible					
Capas	Puntos de control	Límite Líquido [%]	Límite Plástico [%]	Índice de Plasticidad [%]	Presencia de Plasticidad
Base	P1	21.78	N/A	0.00	NO
	P2	15.64	N/A	0.00	NO
	P3	20.01	N/A	0.00	NO
	P4	16.84	N/A	0.00	NO
	P5	20.48	N/A	0.00	NO
	Promedio	18.95	N/A	0.00	NO
Subrasante	P1	20.39	N/A	0.00	NO
	P2	21.10	N/A	0.00	NO
	P3	22.13	N/A	0.00	NO
	P4	24.34	N/A	0.00	NO
	P5	18.78	N/A	0.00	NO
	Promedio	21.35	N/A	0.00	NO

La Tabla 6 resume los límites de Atterberg para las capas de base y subrasante. No presenta límites plásticos (LP) en las dos capas, por lo tanto, no existe un índice de plasticidad (IP). Tienen límites líquidos (LL) máximos de 21.78% y 24.34% en la base y subrasante respectivamente.

Según la normativa MOP (2002), se consideran materiales adecuados, cuando el IP es menor o igual a 6% y el LL menor o igual al 25 %. Los valores determinados están debajo de lo establecido por la normativa, no obstante, cuando el material no tiene LP y IP, significa que no tiene capacidad para deformarse bajo cargas sin romperse, por otro lado, un LL con los valores por debajo de límite, se asemeja a los materiales con un comportamiento granular y no cohesivo.

Por lo tanto, estas muestras están compuestas de, materiales como arenas con gravas y arenas finas, los cuales no retienen agua ni presentan deformaciones plásticas.

4.1.4 Densidad y absorción del agregado, Gruesos y finos

Tabla 7: Densidad y absorción del pavimento flexible.

Descripción	Variable	Base		Unidad
Densidades Relativas		Gruesos	Finos	
Gravedad específica seca al horno	SGSH	2.44	2.30	
Gravedad específica saturada superficialmente seca	SGSSS	2.53	2.42	
Gravedad específica aparente	SGA	2.67	2.62	
Densidad				
Densidad seca al horno	dSH	2438.14	2291.07	kg/m ³
Densidad saturada superficialmente seca	dSSS	2521.67	2417.19	kg/m ³
Densidad aparente	dA	2660.98	2609.32	kg/m ³
Absorción				
Porcentaje de absorción del material	Abs	3.43	5.31	%

La tabla 7 presenta los valores promedio obtenidos de todos los puntos de control correspondientes a la capa base. En ella se reporta una gravedad específica aparente de 2.76 para el material grueso y de 2.62 para el material fino. Así mismo, la capacidad de absorción es de 3.43 % para el material grueso y 5.31 % para el fino.

Esto significa que el material es compacto y tiene cierta capacidad de absorción. A pesar de tener partículas apretadas, todavía existe poros o microespacios, que permiten algo de absorción, por tanto, entre más absorba el material mayor será la influencia de la humedad, esto puede afectar en el comportamiento de material con el tiempo.

Según Vinueza & Zurita (2022), se muestran los distintos valores obtenidos en diferentes minas. En la tabla 8 se puede visualizar los valores mínimos y máximos registrados. Los resultados alcanzados en este estudio están dentro de los límites establecidos por los autores, siendo aceptables para su aplicación en la capa base.

Tabla 8: Gravedad específica y absorción. Fuente (Vinueza & Zurita, 2022).

Propiedad	Tipo de Agregado	Valor Máximo	Valor Mínimo
Gravedad específica	Gruesos	2.70	2.12
Gravedad específica	Finos	2.76	1.95
Porcentaje de absorción (%)	Gruesos	5.20	0.90
Porcentaje de absorción (%)	Finos	5.93	1.94

4.1.5 Compactación Proctor estándar

Se utilizó el ensayo Proctor estándar debido a que el material contiene mayormente partículas pequeñas. Esta elección es adecuada para este tipo de material, ya que aplica una energía de compactación moderada.

Tabla 9: Resumen las humedades y densidades óptimas seca.

Capas	Puntos de control	Humedad óptima [%]	Densidad óptima Seca [gr/cm ³]
Base	P1	9.00	1.98
	P2	7.76	2.02
	P3	8.69	2.00
	P4	7.93	2.02
	P5	9.31	1.91
Subrasante	P1	14.00	1.64
	P2	14.29	1.64
	P3	12.14	1.73
	P4	14.59	1.63
	P5	12.91	1.65

La tabla 9, muestra los valores de humedad y densidad óptima. En el caso de la capa base, la humedad varía entre 7.76 % y 9.31 %, con una densidad seca óptima que oscila entre 1.91 t/m³ y 2.02 t/m³. Por su parte, la subrasante alcanza un valor máximo de humedad del 14.59 % y una densidad seca óptima de 1.73 t/m³.

Esto significa que la base, puede alcanzar mayor densidad con menor humedad, lo cual indica que es más eficiente compactar en condiciones secas, por otro lado, la subrasante tiene un comportamiento opuesto, al ser una arena no posee cohesión, por lo que requiere de humedad extra, para llenar los espacios y alcanzar una compactación. Estos resultados coinciden con los reportados en otras investigaciones, como la de Aucapiña & Jiménez (2024), donde se registran valores máximos de 9.01 % de humedad y 2.051 t/m³ de densidad seca en capas caracterizadas por una buena permeabilidad.

A continuación, se muestra las curvas de compactación de cada capa.

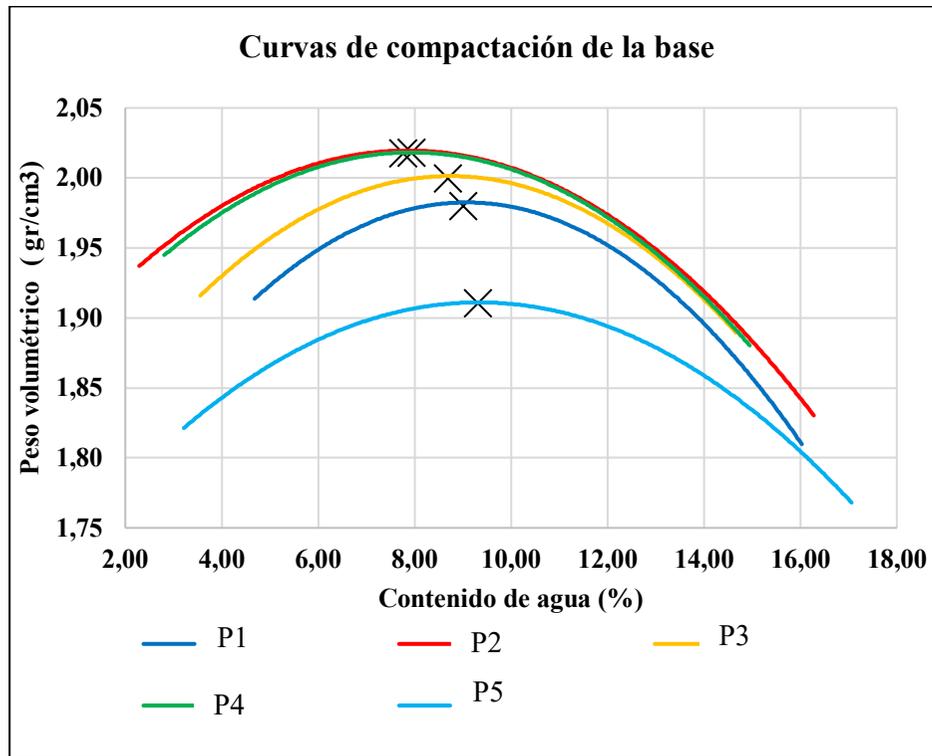


Figura 8: Curva de compactación por cada punto de control de la base.

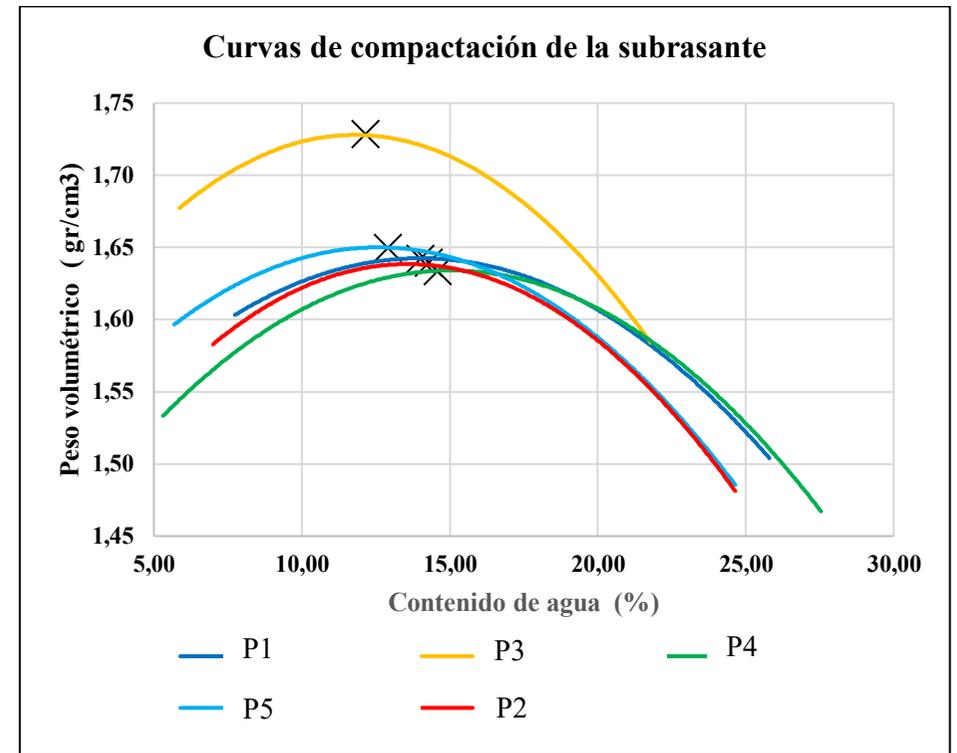


Figura 9: Curva de compactación por cada punto de control de la subrasante.

4.1.6 Densidad

A continuación, se muestra los valores de densidad determinados mediante ensayos In situ y en laboratorio.

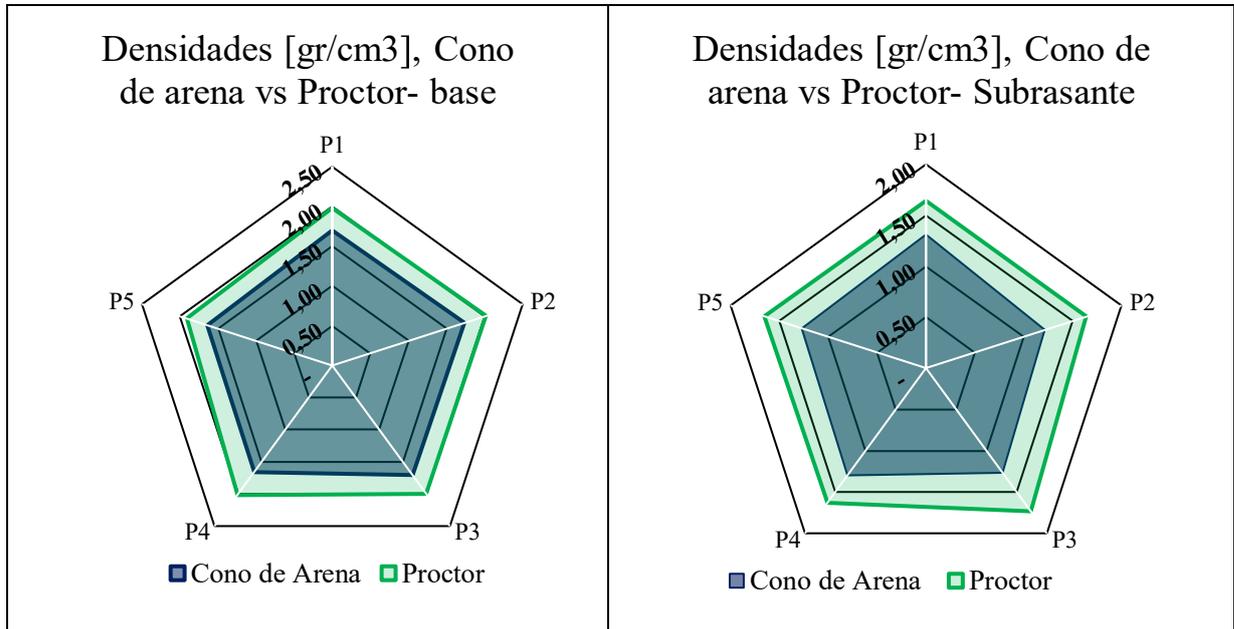


Figura 10: Densidades de las capas base y Subrasante.

La figura 10 muestra la diferencia entre los dos ensayos. El ensayo Proctor realizado en laboratorio muestra una densidad máxima superior, resultado de las condiciones controladas de humedad y compactación durante su ejecución. En contraste, el ensayo de cono de arena permite medir directamente la densidad en campo, generalmente bajo condiciones menos favorables que las de laboratorio. Esta diferencia entre ensayos significa que la compactación realizada en la vía no es la óptima, por lo que podría generar problemas como asentamientos, deformaciones o la formación de baches en la superficie.

Tabla 10: Resumen, densidad del cono de arena y Proctor.

Densidades [gr/cm ³]			
Capas	Puntos de control	Cono de Arena	Proctor
Base	P1	1.70	1.98
	P2	1.73	2.02
	P3	1.71	2.00
	P4	1.66	2.02
	P5	1.64	1.91
Subrasante	P1	1.31	1.64
	P2	1.22	1.64
	P3	1.27	1.73
	P4	1.30	1.63
	P5	1.27	1.65

La tabla 10 muestra los valores de la densidad para los dos estratos. En la capa base se puede evidenciar una variación entre los valores, a pesar de ser el mismo tipo de material, existe variación en la uniformidad en toda la extensión de la vía. La proporción de partículas grandes y pequeñas varían en todos los puntos como se muestra en la granulometría (Tabla 3), esto podría explicar por qué los resultados presentan diferencias entre ellas, ya que se utilizó el mismo método para la obtención de los valores.

La capa subrasante no presenta mayor diferencia entre los valores de densidad, lo que indica, que el material es casi uniforme en todos los tramos y no presenta diferencias significativas.

4.1.7 Humedad

La figura 11 se muestra la comparación de los valores de humedad óptima, determinados mediante el ensayo in situ y laboratorio.

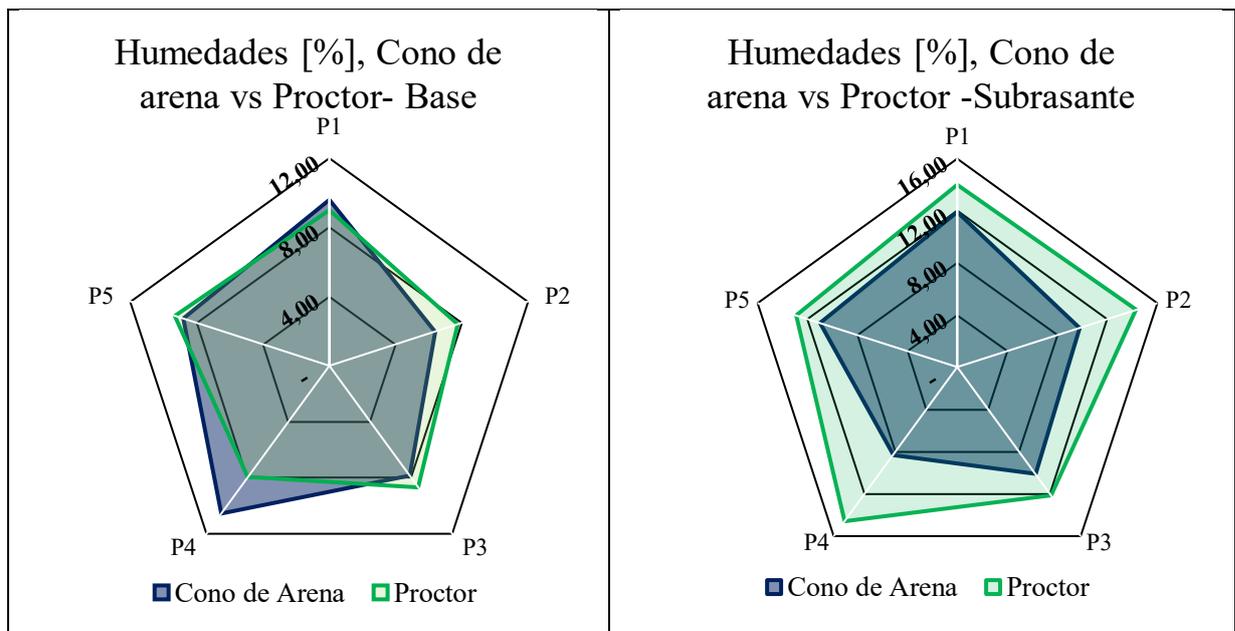


Figura 11: Humedades de las capas subbase y subrasante.

La tabla 11 muestra los valores de la humedad tanto, in situ como en el laboratorio, existe valores donde la metodología del cono de arena es mayor que del Proctor y viceversa, esto significa que, la humedad medida en campo es variable y puede influir en el espacio entre partículas, ya sea aumentando o reduciendo su volumen. Por otro lado, la humedad determinada en el laboratorio es más controlado, lo que tiende a reducir los espacios entre las partículas.

Tabla 11: Resumen, humedad del cono de arena y Proctor.

Humedades [%]			
Capas	Puntos de control	Cono de Arena	Proctor
Base	P1	9.60	9.00
	P2	6.40	7.76
	P3	7.85	8.69
	P4	10.55	7.93
	P5	8.80	9.31
Subrasante	P1	11.91	14.00
	P2	9.78	14.29
	P3	10.10	12.14
	P4	8.32	14.59
	P5	11.00	12.91

4.1.8 Grado de compactación

Se obtuvo el grado de compactación utilizando el método de cono de arena, estos valores corresponden a la capa base y subrasante.

Tabla 12: Resumen, Grado de compactación por el método de cono de arena.

Grado de compactación, método cono de arena		
Capas	Puntos de control	[%] compactación
Base	P1	85.79
	P2	85.98
	P3	85.30
	P4	82.39
	P5	85.95
Subrasante	P1	79.85
	P2	74.11
	P3	73.27
	P4	79.77
	P5	76.87

En la tabla 12, se observa los valores del grado de compactación, tanto de la base como de la subrasante, que están en un rango de 85.08 % y 76.77 % respectivamente como se muestra en la figura 12 y 13. Esto significa que el material de la capa base tiene una buena compactación, pero no la adecuada. También la capa subrasante tiene un caso similar.

A pesar de estos valores, el grado de compactación mínimo que se debe alcanzar para considerar adecuado es el 95 % según MOP (2002), por lo tanto, las capas analizadas no están compactadas adecuadamente, eso podría causar deformaciones o hundimientos, en la capa de rodadura y en general en la estructura del pavimento.

Dado que la característica del material en la capa base, es arena mal graduada en todos los puntos de control, es decir que, al tener una distribución de partículas muy uniforme, las partículas no encajan de una manera óptima, por lo que existen espacios entre ellas, dificultando una buena compactación y la densidad óptima. Esta particularidad de la densidad se puede evidencia en la tabla 10.

Se observa las características de los suelos en la subrasante (tabla 2). Los puntos de control P1, P2 y P5, pertenecen a un suelo franco arenoso. Por otro lado, el punto P2 y P3 es arena, lo que corrobora que, la capa en todos los puntos sea arena fina mal graduada, por lo que, al tener partículas muy uniformes, hay menos variedad de tamaños que llenen los espacios entre ellos.

Esto significa que, cuando las partículas son muy parecidas en tamaño, el material tiende a compactarse deficientemente, ya que no se acomodan fácilmente en un arreglo denso y estable. Como resultado dificulta alcanzar altos grados de compactación, como lo requerido por la normativa.

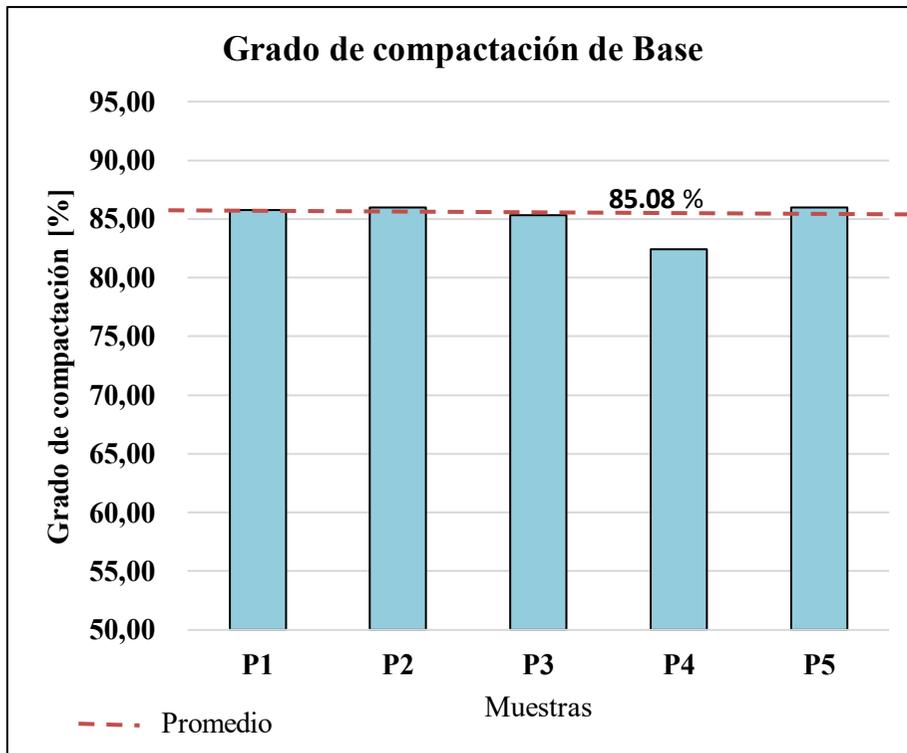


Figura 12: Grado de compactación de la base.

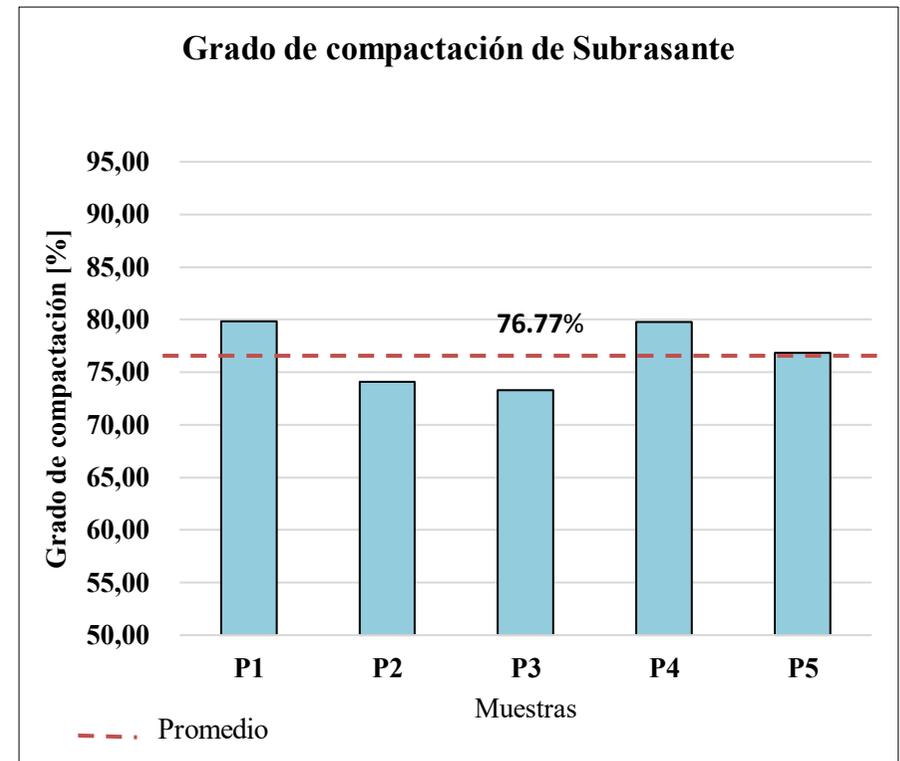


Figura 13: Grado de compactación de la subrasante.

En la figura 12 y 13 se muestran los promedios del grado de compactación, en esta se puede evidenciar de mejor manera, que están por debajo de 95 % de compactación establecido por la normativa.

A continuación, se muestra la diferencia del grado de compactación en las capas.

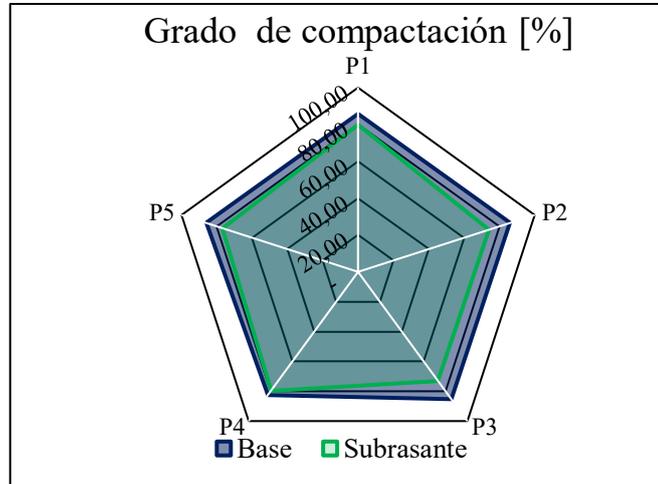


Figura 14: Grado de compactación de las capas subbase y subrasante.

4.1.9 Desgaste de los agregados gruesos en la Base.

Se realizó el ensayo de desgaste en las muestras de los cinco puntos de control, con el uso de la máquina de los ángeles.

Tabla 13: Desgaste por abrasión de los agregados gruesos en la base.

Capa	Punto	Degradación [%]
base	P1	38.41
	P2	38.25
	P3	38.61
	P4	38.89
	P5	38.43

Los valores del coeficiente de desgaste (degradación), se encuentre entre 38.25 % y 38.89 % como se indica en la tabla 13. Según la normativa MOP (2002), este valor debe estar por debajo del 40 % para un material establecido como capa base.

Por otro lado, Vinueza & Zurita (2022), obtuvo valores del coeficiente de desgaste entre 11.47 % y 38.1%, para capa base en diferentes minas, por tanto, el material es adecuado y cumple con lo establecido en la normativa.

4.1.10 Dimensiones y pesos de los Núcleos

Se extrajeron los núcleos en los diferentes puntos de control, como se muestra en la tabla 4. El punto de control P1 corresponde a un tramo de vía en mal estado. Por otro lado, a partir del punto P2 en adelante, todos los puntos ubicados, están en un tramo de vía en buen estado, como se evidencia en la figura 5. Esto se explica la extracción de solo 3 núcleos: el primer núcleo corresponde a un tramo de vía en mal estado, mientras que el P2 y P4 corresponde a un tramo de vía en buen estado.

Tabla 14: dimensiones y pesos calculados en el laboratorio de los núcleos extraídos.

Capa	Punto de control	Diámetro [cm]	Espesor [cm]	Peso seco [gr]	Pesos sumergidos [gr]	Peso SSS [gr]	Absorción [%]
Carpeta asfáltica	P1	9.54	4.63	711.00	394.70	714.00	0.42
	P2	9.57	5.51	888.00	505.30	890.00	0.23
	P4	9.54	5.27	913.00	515.10	915.00	0.22

La tabla 14 muestra los valores de absorción entre 0.22% y 0.42%. Eso significa que la capa asfáltica tiene mayor permeabilidad. Por otro lado, Huang (2004) menciona que es aceptable que la absorción esté por debajo del 1%. A pesar de tener un porcentaje de absorción bajo, lo cual es favorable para la estructura, también puede ocasionar que el agua se acumule en la capa asfáltica y comprometer la integridad de la estructura del pavimento.

4.1.11 Porcentaje de vacíos y grado de compactación.

La tabla 15 muestra el porcentaje de vacíos y el grado de compactación de la capa asfáltica. Según Huang (2004), un porcentaje de vacíos alrededor del 4 %, se considera óptima. Un grado de compactación, según la norma MOP (2002), debe estar como mínimo el 97 %. Sin embargo, existe valores cercanos a lo recomendado, pero no cumple con el mínimo requerido; esto podría suceder debido a la inadecuada temperatura en el proceso de compactación.

Tabla 15: Resumen del cálculo de vacíos y compactación en núcleos.

Capa	Punto de control	vacíos [%]	compactación [%]
Carpeta asfáltica	P1	5.54	94.76
	P2	4.82	95.40
	P4	4.68	95.53

4.1.12 Macrotextura del pavimento flexible

Tabla 16: Resumen de la profundidad en (mm). Carpeta asfáltica.

Capa	Puntos de control	Profundidad de la Macrotextura [mm]
Carpeta asfáltica	P1	0.60
	P2	0.48
	P3	0.52
	P4	0.41
	P5	0.41

La tabla 16 muestra los valores de la profundidad de macrotextura que varían entre, 0.41mm y 0.6 mm. Según Cossale et al. (2013), para considerarse adecuados, este valor debe ser superior a 0.5 mm. Por lo tanto, algunos puntos, como P2, P4 y P5, presentan valores por debajo del rango recomendado.

Estos problemas pueden deberse a diversos factores, como el uso de agregados inadecuados en la mezcla o que existe un desgaste prematuro producto del tráfico. Estas condiciones afectan negativamente la capacidad de drenaje y la adherencia de los neumáticos, lo que incrementa el riesgo de hidroplaneo.

4.2 Propiedades mecánicas del pavimento flexible

4.2.1 Rigidez, Módulo de Young, Módulo de resiliencia e índice de soporte de California (CBR)

Con el equipo de GeoGauge se determinó la Rigidez y el módulo de Young. También se calculó el módulo de resiliencia (Mr) y el índice de soporte de California (CBR), con las ecuaciones propuestas según Mohammad et al. (2008), mismas que estas descritas en las técnicas de recolección de datos.

Tabla 17: Resumen de los datos obtenidos del GeoGauge y el cálculo del CBR.

Capas	Puntos de control	Modulo		Mr 1 [MPa]	Mr 2 [MPa]	CBR 1 [%]	CBR 2 [%]
		Rigidez [MN/m]	Young [MN/m ²]				
Base	P1	7.09	52.54	183.92	200.92	39.19	44.99
	P2	8.22	60.97	200.03	218.18	44.68	51.17
	P3	8.38	62.16	202.13	219.82	45.42	51.78
	P4	5.18	38.38	149.73	161.27	28.42	31.91
	P5	8.01	59.41	197.21	209.32	43.70	47.96

	P1	4.21	31.23	127.14	127.92	22.01	22.22
	P2	3.44	25.49	105.14	97.89	16.36	14.63
subrasante	P3	3.77	27.97	115.12	115.82	18.85	19.02
	P4	4.38	32.50	131.46	126.61	23.19	21.87
	P5	4.36	32.30	130.96	125.27	23.05	21.51

La tabla 17 muestra los valores del Índice de soporte de California (CBR) correspondientes a la capa base y subrasante, determinados mediante la ecuación de Powell. Los valores que más se asemejan son los de la segunda ecuación, los cuales varían entre 31.91% y 51.17% para la base, y entre 14.63% y 22.22% para la subrasante. Según la normativa MOP (2002), el CBR debe ser igual o mayor al 80% para una capa base; por lo tanto, estos valores no están dentro del límite establecidos por la normativa.

Además, el material que está compuesto tanto en la base como la subrasante tiene partículas uniformes, dificultando una buena compactación. Cuando existe poca variedad de partículas en tamaño, dejan espacio entre ellas, disminuyendo la densidad del material (figura 10). Como el CBR mide la resistencia del suelo, si el material no se compacta adecuadamente, su resistencia será menor, Eso explicaría por qué la base y la subrasante tiene valores bajos de CBR.

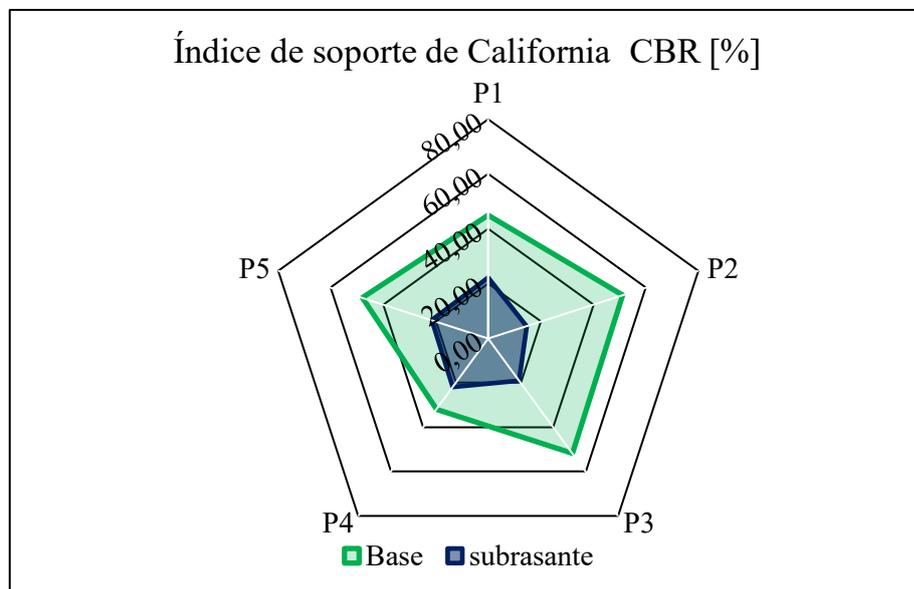


Figura 15: CBR mediante la ecuación de Powell, de las capas base y subrasante.

4.2.2 Estabilidad y fluencia por el método de Marshall

Tabla 18: Resumen del cálculo de la estabilidad utilizando el equipo Marshall en los núcleos.

Capa	Puntos de control	Estabilidad [lb]	Flujo [in]
asfáltica	P1	1687.00	0.13
	P2	1920.00	0.38
	P4	1193.00	0.32

La Tabla 18 muestra los valores correspondientes a la estabilidad y fluencia (flujo). Según la MOP (2002), se establece que la estabilidad mínima en tráfico medio y pesado debe estar entre 1200 lb y 1800 lb, mientras que el flujo entre 0.08 in y 0.16 in, respectivamente.

Esto indica que el P1 corresponde a un tráfico medio, con una estabilidad y flujo de 1687.00 lb y 0.13 in. Por otro lado, el punto P2 a, pesar de tener una estabilidad relativamente buena, presenta un flujo bastante elevado.

Por lo tanto, la capa asfáltica es más susceptible al flujo en algunos puntos, porque la mezcla puede tener un tipo de agregado que no resista, al movimiento bajo la carga repetida.

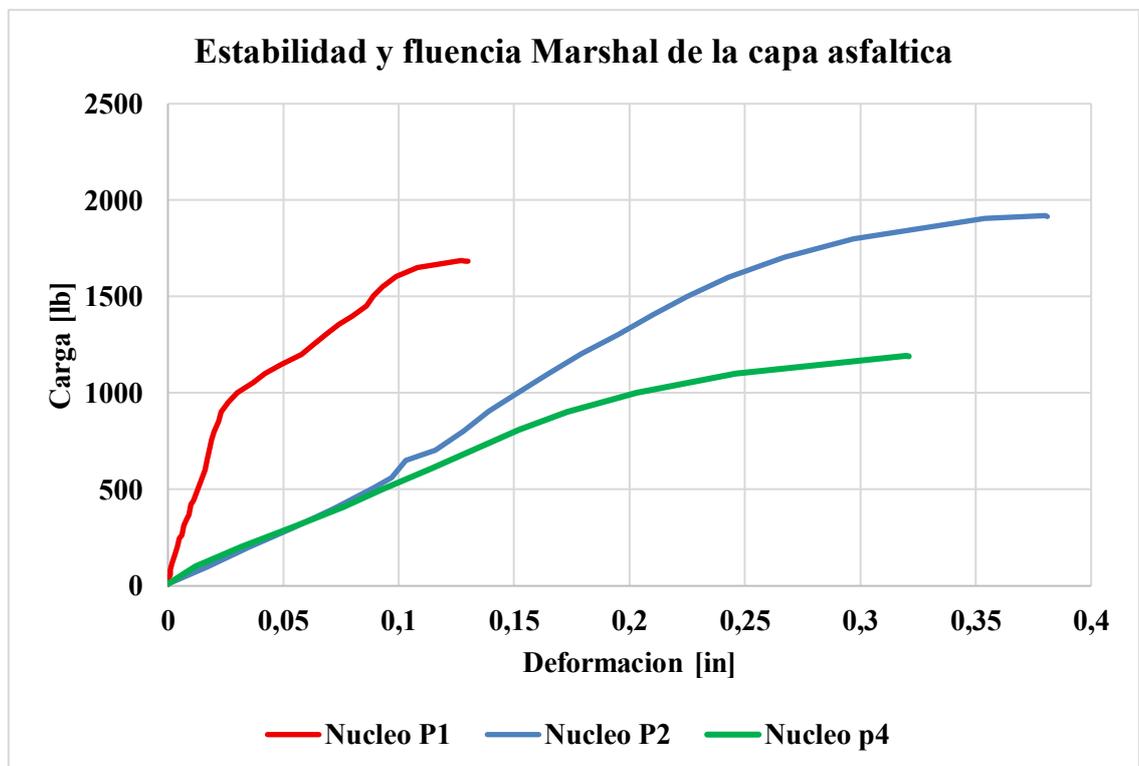


Figura 16: Resultado del ensayo realizado con el equipo Marshall.

4.3 Propiedades hidráulicas del pavimento flexible

4.3.1 Permeabilidad del pavimento

Con el uso del equipo de doble anillo y la metodología descrita anteriormente, se determinó los valores correspondientes a la velocidad de infiltración y escurrimiento, como se muestra en la tabla 19.

Tabla 19: Resumen de los cálculos del Pavimento flexible.

Velocidad de infiltración vs Tiempo					
Tiempo acumulado (h)	Velocidades de infiltración K (cm/h)				
	P1	P2	P3	P4	P5
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
0.5	1.0	0.8	0.9	0.6	1.4
1.0	0.4	0.4	0.3	0.4	1.2
1.5	0.4	0.3	0.4	0.3	0.8
2.0	0.2	0.1	0.2	0.1	0.2
2.5	0.4	0.3	0.2	0.2	0.6
3.0	0.4	0.1	0.3	0.4	0.4
3.5	0.2	0.1	0.2	0.1	0.6
4.0	0.2	0.1	0.2	0.0	0.5
4.5	0.3	-	0.1	0.0	0.1
5.0	0.2	-	0.1	-	0.1
5.5	0.2	-	0.1	-	0.2
6.0	0.2	-	-	-	0.3
C (%)	96.61	98.17	97.50	98.26	94.68
Clima	Nublado	Llovizna	Nublado	Nublado	Nublado
Estado del pavimento	Malo	Bueno	Bueno	Bueno	Bueno

observación: Se colocó el infiltrómetro a una distancia desde la cune entre 0.45 m a 0.9 m, Presento lluvias leves previo al ensayo. En la mayoría de los puntos presenta una ligera inclinación de la vía.

4.3.2 Comportamiento de curvas de infiltración

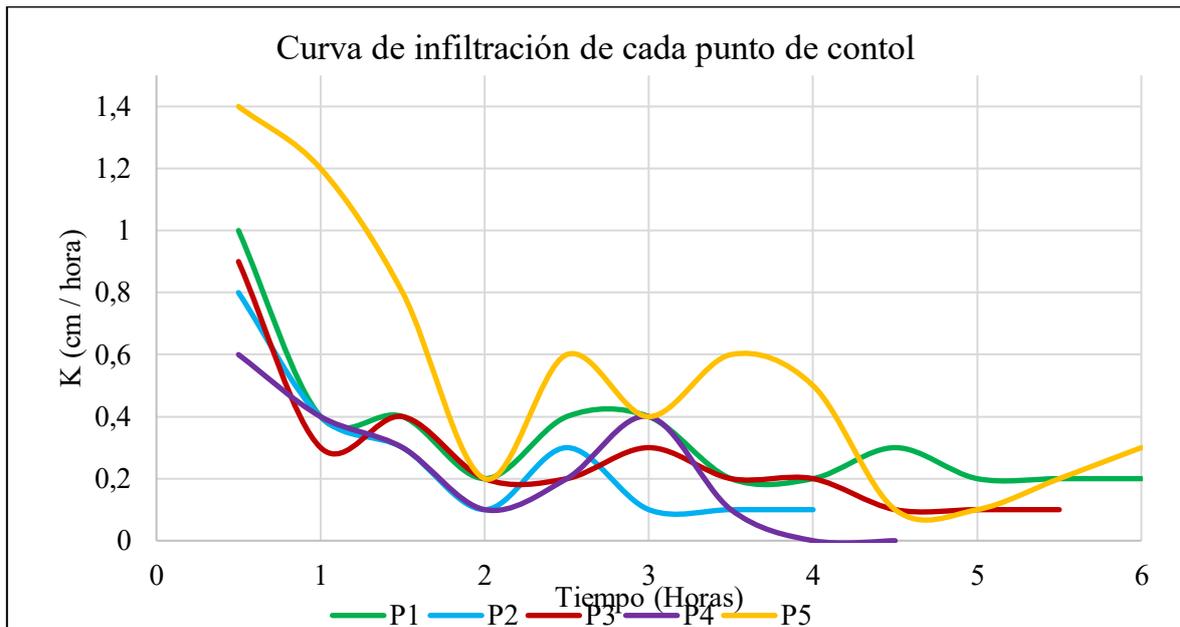


Figura 17: Curvas de infiltración por cada punto de control.

La figura 17 muestra todas las curvas de infiltración determinadas mediante el método de doble anillo. El punto de control P1, inicialmente la velocidad de infiltración es alta, por lo que el porcentaje de vacíos es alto (Tabla 15) y una capa asfáltica en mal estado (Figura 5), lo que facilita una infiltración inicial más rápida. No obstante, al llegar a la capa base de arena mal graduada, la velocidad baja notablemente, dado que la distribución de partículas uniformes está saturada, limitando la infiltración. Esto se da debido a las lluvias presentes antes del ensayo (Tabla 19). Después de dos horas, la curva se vuelve asíntota, lo que indica que la capacidad de infiltración del pavimento ha alcanzado un punto de equilibrio. Este comportamiento indica que las capas están saturadas y que la infiltración ocurre en una tasa mínima y constante.

Por otro lado, los puntos de control P2, P3 y P4 pertenecen a un pavimento en buenas condiciones (figura 5). La velocidad de infiltración inicial es más baja que el punto P1 (figura 17), debido a que el porcentaje de vacíos es menor (tabla 15), lo que hace que el pavimento flexible sea menos permeable. Sin embargo, existe una mínima infiltración hacia la capa base, lo que provoca que las partículas de tamaños similares, descritos anteriormente, se saturen y dificulten la infiltración debido a las lluvias presentes previo al ensayo, haciendo que la curva de infiltración se vuelva asíntota o que la velocidad de infiltración sea cero, como en el punto P4.

El punto P5 presenta mayor velocidad de infiltración inicial (figura 17), pese a que corresponde a un tramo de vía en buenas condiciones (figura 5). Debido a que no se extrajo

el núcleo en el punto 5, no se puede determinar con claridad del por qué la infiltración alta, pero podría contribuir a la condición climática previo al ensayo, ya que no presento lluvia, lo que hace que el pavimento tenga mayor capacidad de infiltración.

En la gráfica de la curva de infiltración se puede evidenciar la existencia de dos capas a través de las cuales infiltra el agua. La primera corresponde a la capa asfáltica, cuya influencia se observa aproximadamente desde las 0 hasta la 1 hora. Después, la infiltración pasa a la capa base; en la cual la tasa de infiltración tiende a estabilizarse, mostrando un comportamiento asintótico.

4.3.3 Análisis del coeficiente de escurrentía

A continuación, se muestra el resumen de los valores del coeficiente de escurrentía C [%] determinados en la vía San Andrés - Guano.

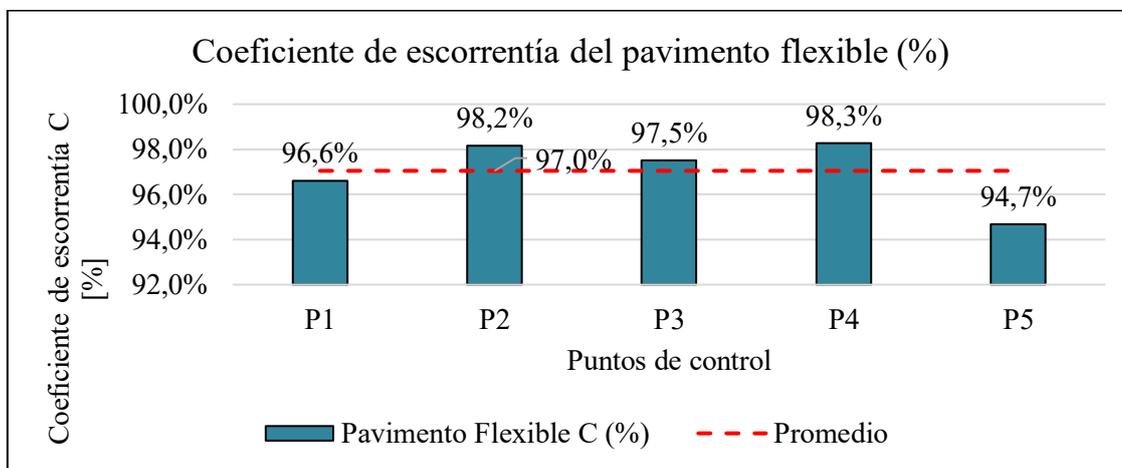


Figura 18: Coeficiente de escurrimiento de cada punto de control.

La figura 18 muestra los valores del coeficiente de escurrentía (C). El promedio de estos valores es del 97 %. En cuanto al Instituto Ecuatoriano de Obras Sanitarias [IEOS] (1992), no existe un valor del coeficiente de escurrentía para pavimentos flexibles. Sin embargo, se menciona que el coeficiente de escurrentía para pavimentos asfálticos en buenas condiciones, varía entre 85 % y 90 % (figura 19), esta particularidad de la normativa se podría comparar con los valores obtenidos, aunque no se conoce que metodología utilizaron para determinar el coeficiente o a qué tipo de material corresponde.

Realizando una comparación entre los valores de la normativa y los valores determinados en la vía San Andrés-Guano, existe una diferencia del coeficiente de escurrentía de 7 % (figura 19). Esto significa que la mayor parte del agua escurre sobre el pavimento flexible y una mínima parte se infiltra; por lo tanto, reduce la humedad en las capas inferiores. Sin embargo, el sistema de drenaje no es adecuado, el agua podría

acumularse en la capa de rodadura, generando riesgos como el hidropelaje, aluviones y daños en la estructura del pavimento.

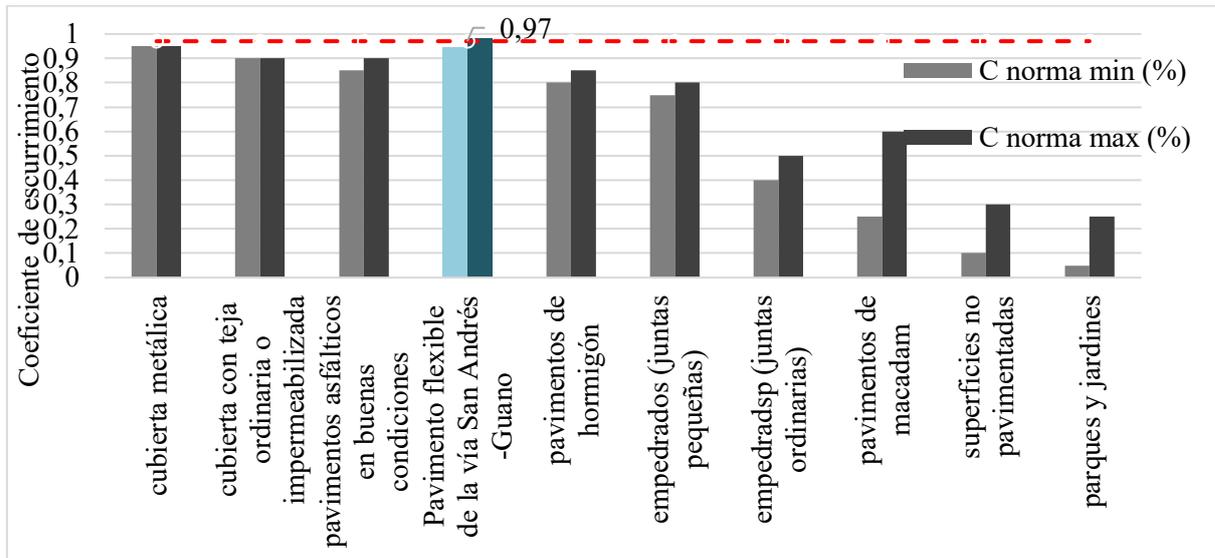


Figura 19: Comparación del coeficiente de escurrimiento, adaptado de (IEOS, 1992).

4.4 Correlación ente las propiedades físicas, mecánicas con el comportamiento hidráulico.

La tabla 20 muestra el resumen de algunas propiedades importantes, para establecer la correlación correspondiente. Debido a las condiciones de los tramos descritos anteriormente y inconvenientes con el equipo extractor de núcleos, no se pudo determinar todos los datos en la capa asfáltica; por lo tanto, no fue posible realizar la correlación con las propiedades de dicha capa en el pavimento flexible.

Tabla 20: Resumen de las características del pavimento flexible.

Resumen de las características del pavimento Flexible							
Puntos de control	Característica					Profundidad de macro textura [mm]	Compactación Capa asfáltica [%]
	Infiltración [%]	Escurrimiento [%]	Compactación base [%]	CBR, Capa base [%]			
P1	3.39	96.612	85.79	39.19	0.60	94.76	
P2	1.83	98.173	85.98	44.68	0.48	95.40	
P3	2.50	97.502	85.30	45.42	0.52	-	
P4	1.74	98.264	82.39	28.42	0.41	95.53	
P5	5.32	94.684	85.95	43.70	0.41	-	

4.4.1 Correlación entre índice de soporte de california (CBR) base y coeficiente de escorrentía (C)

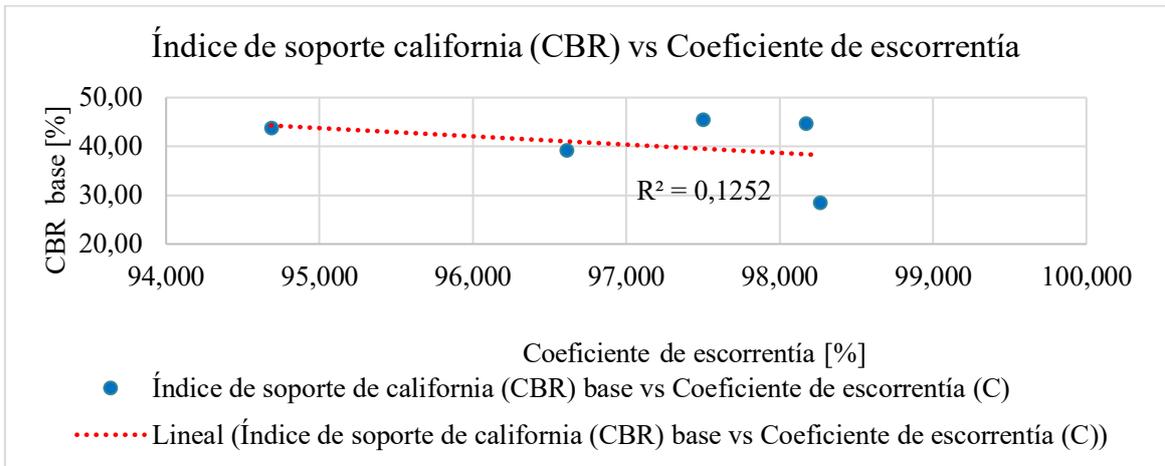


Figura 20: Diagrama de dispersión. Índice de soporte californiano (CBR) vs Coeficiente de escorrentía

En el diagrama de dispersión, la figura 20 muestra que existen valores dispersos con respecto a la línea de tendencia; como resultado, el coeficiente de determinación R^2 es igual a 0.12, lo que indica una correlación débil y negativa. Esto quiere decir que los valores de escorrentía no están relacionados con la capacidad de carga de la base en los puntos estudiados lo cual nos lleva a suponer que la variación de la infiltración (Figura 17) estaría relacionada a otras capas de la estructura del pavimento de la vía investigada. Por lo tanto, es importante analizar otros factores que puedan influir en el comportamiento de la escorrentía.

4.4.2 Correlación entre grado de compactación base y Coeficiente de escorrentía

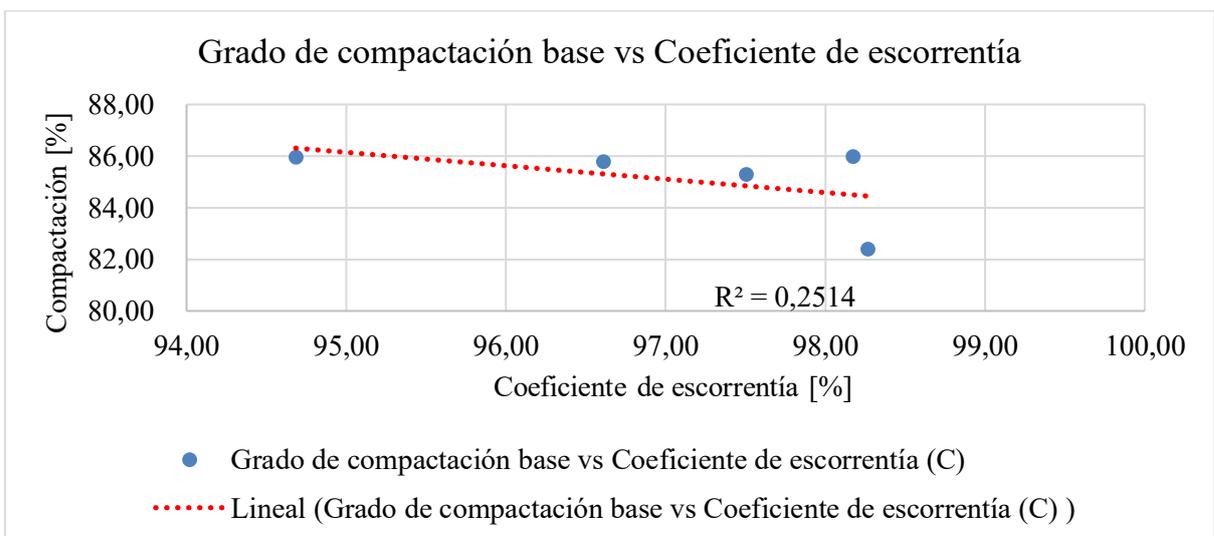


Figura 21: Diagrama de dispersión. Grado de compactación base vs Coeficiente de escorrentía

El diagrama de dispersión figura 21, muestra la dispersión de los puntos alrededor de la línea de tendencia, reflejada en un coeficiente de determinación R^2 de 0.25. Esto indica que la correlación es negativa y débil. Lo que sugiere que los valores de la escorrentía no están relacionados de forma directa con el grado de compactación de la capa base. Por lo tanto, se puede deducir que la variabilidad en la infiltración (Figura 17) podría estar asociado a la compactación de la capa asfáltica.

4.4.3 Correlación entre profundidad de macrotextura vs Coeficiente de escorrentía

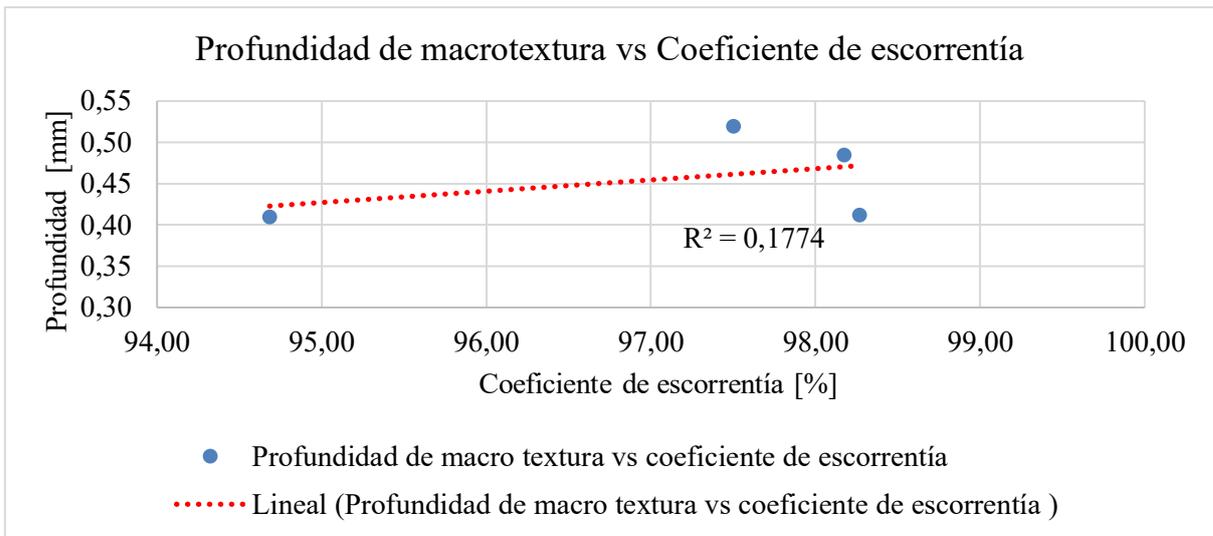


Figura 22: Diagrama de dispersión de la profundidad de macrotextura vs Coeficiente de escorrentía.

El diagrama de dispersión se realizó únicamente con los datos determinados en tramos de vía en buenas condiciones; estos puntos son P2, P3, P4 y P5 (Tabla 16). La figura 22 muestra que existe una correlación positiva entre la Profundidad de la macrotextura y el coeficiente de escorrentía. Sin embargo, debido a un coeficiente de determinación de 0.177, la relación es bastante débil. Esto significa que los valores de la profundidad de la macrotextura están relacionados con el coeficiente de escorrentía, pero debido a la insuficiencia de datos, no se puede determinar de manera clara la correlación, sugiriendo que se realice la correlación con más datos.

CAPÍTULO V. CONCLUSIONES y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones

Las muestras de diferentes puntos de control revelan que la estructura del pavimento se compone de una capa asfáltica, una capa base que da un soporte y la una capa subrasante que constituye el terreno de fundación o apoyo.

La base se clasifica como clase 4 y está compuesta por materiales provenientes de trituración, con partículas de dos o más caras fracturadas y arena mal graduada. Tiene un límite líquido por debajo del valor normativo, alta absorción en materiales tanto en finos como en gruesos, menor densidad In situ comparado en el laboratorio, de igual modo, la humedad es menor, y un grado de compactación que ronda el 85.08 %, lo que está por debajo de la normativa MOP (2002). Esto indica que el material no alcanza los estándares requeridos, lo que significa que no puede funcionar como capa base.

La subrasante, al estar compuesta mayormente de arena fina, mal graduada tiende a tener una densidad baja cuando hay mayor humedad. Esta condición influye en el grado de compactación, que alcanza un valor aproximado del 76.78 %. Esto significa que se podría hundir o asentarse de forma desigual, provocando grietas y deformaciones en la estructura superior del pavimento,

La capa asfáltica, con una absorción que ronda el 0.3 % y un porcentaje de vacíos de media de 5.01 %, junto con el grado de compactación aproximado del 95.23 %, no cumple con los requisitos de la normativa MOP (2002), para ser considerado adecuado.

El índice de soporte de california tanto de la base como de la subrasante se encuentra en torno al 45.56% y 19.85 %, respectivamente. Estos valores están por debajo de los valores normativos MOP (2002), por tanto, no cumple con los valores establecidos. No obstante, existen estudios que utilizan métodos similares y determinan valores comparables. Si bien los valores no cumplen con lo esperado, hay una tendencia en otras investigaciones que respalda la validez de estos resultados.

La estabilidad y fluencia registran valores aproximados de 1600 lb y 0.28 in respectivamente. La estabilidad se encuentra en los valores establecidos para tráfico medio y liviano MOP (2002). En contrastes, el flujo excede los límites normativos; por tanto, podría existir deformaciones excesivas y reducir la vida útil del pavimento flexible.

El coeficiente de escorrentía ronda el 97 %. Comparado con la normativa del IEOS (1992), este valor es mayor al establecido, lo que indica que hay poca infiltración de agua hacia las capas inferiores y un mayor escurrimiento en la capa de rodadura.

La correlación entre el índice de soporte de california (CBR base) y el coeficiente de escorrentía es negativa y débil. Esto podría deberse a que la capa asfáltica actúa como una barrera y limita la correlación directa entre estas propiedades. Por otro lado, la correlación entre el grado de compactación base y coeficiente de escorrentía también es negativo y débil. Esto podría ser debido al grado de compactación en la capa asfáltica, ya que, a mayor compactación, menor es la infiltración del agua hacia las capas inferiores. La

correlación entre la profundidad de macro textura y el coeficiente de escorrentía es positiva pero débil. Esto significa que existe una relación entre estas propiedades. Sin embargo, se requiere de más datos para correlacionarlas de manera clara las propiedades.

5.2 Recomendaciones

Se recomienda realizar el ensayo de infiltración cuando el suelo ya esté saturado o haya tenido precipitaciones previas. Esto puede favorecer la toma de datos y proporcionar una perspectiva clara de cómo se comporta el escurrimiento en las diferentes zonas.

Para el análisis de los núcleos, se recomienda realizar un estudio profundo, ya que la estabilidad se mantiene dentro de los parámetros normativos, pero el flujo excede lo recomendado. Esto podría deberse a los agregados utilizados en la mezcla asfáltica.

En los cálculos del CBR, existen diferentes ecuaciones; por tanto, se recomienda utilizar el método que tenga en cuenta las propiedades de los materiales o los porcentajes que pasan por ciertos tamices. Esto ayudará a reducir la incertidumbre en la obtención de datos mediante el equipo GeoGauge.

BIBLIOGRAFÍA

- Ahmed, lamia A., Al- Alkadhimi, A. M. H., & Najim, W. A. (2018). Rainfall intensity effects on flexible pavement layers. *Journal of Engineering and Sustainable Development*, 2018(04), 179–191. <https://doi.org/10.31272/JEASD.2018.4.13>
- ASTM D1557. (1978). *Métodos de ensayos estándar para determinar la relación humedad-densidad de suelos y mezclas de suelo-agregado usando un martillo de 4.54 kg (10 lb) y una caída de 457 mm (18 pulg).*
- ASTM D-5361. (2006). *Muestreo de mezclas bituminosas compactadas para pruebas de laboratorio.*
- ASTM D-6758. (2008). *Standard Test Method for Measuring Stiffness and Apparent Modulus of Soil and Soil-Aggregate In-Place by Electro-Mechanical Method 1.* <https://doi.org/10.1520/D6758-08>
- ASTM D6927. (2022). *Test Method for Marshall Stability and Flow of Asphalt Mixtures.* ASTM International. <https://doi.org/10.1520/D6927-22>
- ASTM E965. (2015). *Método de prueba estándar para medir la profundidad de macro textura del pavimento usando una técnica volumétrica.* https://kupdf.net/download/div-class2qs3tf-truncatedtext-modulewrapperfg1km9p-classtruncatedtext-modulelineclamped85ulhh-style-max-lines5e965-15-profundidad-de-macro-textura-del-pavimento-metodo-volumetrico-p-div_673376ddb6d692685d8b50f5_pdf
- ATSM D1556. (2000). *Método de Ensayo Estándar para Determinar la Densidad y Peso Unitario del Suelo en el Sitio por el Método del Cono de Arena.*
- Aucapiña Rodríguez, R. J., & Jiménez Guayanay, W. F. (2024). *Características físicas mecánicas e hidráulicas evaluadas en el pavimento flexible del corredor vial Riobamba-Flores* [Tesis de Pregrado, Universidad Nacional de Chimborazo]. <http://dspace.unach.edu.ec/handle/51000/12905>
- Casco Guevara, J. M., & Salcán León, V. A. (2024). *Características físicas, mecánicas e hidráulicas evaluadas en el pavimento flexible del corredor vial Flores - Cebadas.* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Chimborazo]. <http://dspace.unach.edu.ec/handle/51000/12872>

- Cayambe Guilcapi, C. F. (2014). *Evaluación del diseño geométrico de la vía san Andrés batzación del cantón guano* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Chimborazo]. <http://dspace.unach.edu.ec/handle/51000/539>
- Cossale, G., Elliott, R., & Widyatmoko, I. (2013). The Importance of Road Surface Texture in Active Road Safety Design and Assessment. *Jornada Internacional de Seguridad Vial y Simulación*.
https://www.researchgate.net/publication/288822174_The_importance_of_Road_Surface_Texture_in_Active_Safety_Design_and_Assessment
- Gobierno Autónomo Descentralizado de la Provincia de Chimborazo. (2015, enero 19). *Vía Guano-san Andrés tendrá nuevo asfaltado con inversión del gobierno provincial*.
https://www.ivoox.com/via-guano-san-andres-tendra-nuevo-asfaltado-con-inversion-audios-mp3_rf_3970482_1.html
- Gobierno Autónomo Descentralizado Municipal del Cantón Guano. (2021). *Actualización del plan de desarrollo y ordenamiento territorial del Cantón Guano*.
- Hemed, A., Ouadif, L., Bahi, L., & Lahmili, A. (2020). Impact of climate change on pavements. *E3S Web of Conferences*, 01008. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20>
- Huang, Y. H. (2004). Pavement analysis and design, 2nd Edition. *Upper Saddle River, N.J: Pearson Prentice Hall*, 785. <https://archive.org/details/pavementanalysis0000huan>
- Insel, N., Christopher, A. E., Poulsen, J., Todd, A. E., & Ehlers, A. (2009). Influence of the Andes Mountains on South American moisture transport, convection, and precipitation. *Clim Dyn*, 35(7–8). <https://doi.org/10.1007/s00382-009-0637-1>
- Instituto Ecuatoriano de Obras Sanitarias. (1992). *Normas para estudio y diseño de sistemas de agua potable y disposición de aguas residuales para poblaciones mayores a 1000 habitantes*. <https://inmobiliariadja.wordpress.com/wp-content/uploads/2016/09/001-normas-ieos.pdf>
- Leiva Villacorta, F., Camacho Garita, E., & Aguiar Moya, J. P. (2016). Simulación de variables climáticas en ensayos de daño acelerado de pavimentos a escala natural. *Infraestructura Vial*, 18(32), 10. <https://doi.org/10.15517/IV.V18I32.29774>
- Lizcano, F. R., León, F., Martínez, C., Mario, J., Betín, H., Ruiz López, A., & Rojas, L. M. (2011). *Comportamiento hidráulico, beneficios y limitaciones de la aplicación de un SDGA a una estructura de pavimento flexible*.
- Mendoza, J., & Palomares, O. (2018). *El efecto del cambio climático en los pavimentos carreteros*.

- https://www.researchgate.net/publication/344891476_EL_EFECTO_DEL_CAMBIO_CLIMATICO_EN_LOS_PAVIMENTOS_CARRETEROS
- Ministerio de Agricultura y Ganadería. (2015). *Catálogo de Datos - Metadatos - Ministerio de Agricultura y Ganadería*.
<http://geoportal.agricultura.gob.ec/geonetwork/srv/spa/catalog.search#/metadata/0a26e971-5722-4a10-8a5e-d04298b0f017>
- Ministerio de obras públicas y comunicaciones. (2002). *Especificaciones generales para la construcción de caminos y puentes*. https://www.obraspublicas.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2021/01/MPR_Chimborazo_Cumanda_Especificaciones-Tecnicas-MOP-001-F-2002.pdf
- Mohammad, L. N., Herath, A., Gudishala, R., Munir, ;, Nazzal, D. ;, Murad, Y., Abu-Farsakh, P. E. ;, & Alshibli, K. (2008). *Development of models to estimate the subgrade and subbase layers' resilient modulus from in situ devices test results for construction control*. <https://doi.org/10.21949/1503647>
- Narsilio, G. A., & Santamarina, J. C. (2015). *Clasificación de suelos: fundamento físico, prácticas actuales y recomendaciones*.
https://www.researchgate.net/publication/267203656_CLASIFICACION_DE_SUELOS_FUNDAMENTO_FISICO_PRACTICAS_ACTUALES_Y_RECOMENDACIONES#fullTextFileContent
- NTE INEN 691. (1982). *Mecánica de suelos determinación del límite líquido. Método de casa grande*.
- NTE INEN 692. (1982). *Mecánica de suelos determinación del límite plástico*.
- NTE INEN 696. (2011). *Áridos. Análisis granulométrico en los áridos, fino y grueso*.
- 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*.
- NTE INEN 860. (2011). *Áridos. Determinación de valores de la degradación del árido de partículas menores a 37.5 mm mediante el uso de la máquina de los ángeles*.
- Paredes, A. M. de A. (2006). *Particularización al método de los coeficientes de escorrentía*. www.oasification.com
- Qiao, Y., Dawson, A. R., Parry, T., Flintsch, G., & Wang, W. (2020). Flexible Pavements and Climate Change: A Comprehensive Review and Implications. *Sustainability* 2020, Vol. 12, Page 1057, 12(3), 1057. <https://doi.org/10.3390/SU12031057>

- Rosero Esparza, R. S., & Cepeda De la Cruz, M. E. (2024). *Evaluación de las características hidráulicas y físicas del pavimento rígido en la Avenida 9 de octubre ubicada en la ciudad de Riobamba*. <http://dspace.unach.edu.ec/handle/51000/12448>
- Vidal Valencia, J., & Osorio Mora, R. I. (2006). Módulo Resiliente de Suelos Fino granulares. *Revista Universidad EAFIT*, 42, 92–110.
https://www.researchgate.net/publication/26496640_Modulo_Resiliente_de_Suelos_Finogranulares
- Vinueza Gallegos, B. F., & Zurita Durán, M. A. (2022). *Diseño del pavimento flexible, empleando las propiedades mecánicas de bases y subbases de catorce diferentes minas de materiales pétreos del Ecuador*. PUCE - Quito.
<https://repositorio.puce.edu.ec/handle/123456789/25777>
- Yurt, M. (2020). Flexible Pavement Design. En *ResearchGate*.
<https://doi.org/10.13140/RG.2.2.22277.17125>

ANEXOS.

		UNIVERSIDAD NACIONAL DEL CHIMBORAZO	
		FACULTAD DE INGENIERIA	
		CARRERA DE INGENIERIA CIVIL	
ANEXO FOTOGRAFICO			
Autor:	Samuel Efraín Mullo Cujilema	TUTOR	Ing. Alfonso Patricio Arellano Barriga.
		UBICACIÓN	Vía San Andrés - Guano
			
Anexo 1: Extracción de las muestras.		Anexo 2: Ensayo de Granulometría.	
			
Anexo 3: Ensayo de Limites de Atterberg.		Anexo 4: Ensayo de densidad y Absorción de finos	



Anexo 5: Ensayo de densidad y Absorción de gruesos.



Anexo 6: Ensayo de Proctor Estándar.



Anexo 7: Ensayo de cono de arena.



Anexo 8: Ensayo de abrasión, Máquina de los ángeles.



Anexo 9: Ensayo con el equipo GeoGauge.



Anexo 10: Extracción de núcleo.



Anexo 11: Ensayo de estabilidad y Fluencia, Marshall.



Anexo 12: Ensayo de Porcentaje de vacíos.



Anexo 13, Ensayo de la Macrotextura.



Anexo 14, Ensayo con el infiltrómetro de doble anillo.

VARIABLES	CONDICIONES DEL PAVIMENTO			Malas Condiciones	Buenas Condiciones	Buenas Condiciones	Buenas Condiciones	Buenas Condiciones	PROMEDIO
	DESCRIPCIÓN	UNIDADES	CAPAS DEL PAVIMENTO	M1	M2	M3	M4	M5	
		[-]							
	Granulometría								
	Gravas gruesas	[%]	Base	23.17	18.05	17.59	14.89	11.61	17.06
		[%]	Subrasante	2.17	-	-	-	-	0.43
	Grava Finas	[%]	Base	9.65	13.72	14.46	7.48	13.06	11.67
		[%]	Subrasante	3.43	1.48	0.50	1.16	0.86	1.49
	Arena Gruesa	[%]	Base	20.21	23.11	22.93	20.41	24.89	22.31
		[%]	Subrasante	4.30	4.04	15.54	2.11	9.72	7.14
	Arena fina	[%]	Base	41.51	41.43	38.95	46.71	41.15	41.95
		[%]	Subrasante	74.60	68.42	64.41	78.57	70.13	71.23
	Material Fino	[%]	Base	4.66	3.36	5.53	8.98	7.63	6.03
		[%]	Subrasante	13.55	21.42	17.54	14.79	15.20	16.50
Cu	Coefficiente Uniformidad	[-]	Base	24.43	21.09	29.03	18.15	24.80	23.50
			Subrasante	3.33	6.39	4.66	4.59	3.89	4.57

CC.	Coefficiente Curvatura	[-]	Base	0.73	0.81	0.51	0.41	0.51	0.59
			Subrasante	1.12	0.62	0.90	0.99	1.12	0.95
	Limite								
LP	Limite plástico		Base	NA	NA	NA	NA	NA	
			Subrasante	NA	NA	NA	NA	NA	
LL	Limite Liquido		Base	21.78	15.64	20.01	16.84	20.48	18.95
			Subrasante	20.39	21.10	22.13	24.34	18.78	21.35
IP	Índice de Plasticidad		Base	NA	NA	NA	NA	NA	
			Subrasante	NA	NA	NA	NA	NA	
		Densidad y Absorción							
dSH	Densidad seca al horno	kg/m ³	Base	2352.31	2338.97	2256.25	2262.27	2245.56	2291.07
			Subrasante	2390.05	2426.08	2450.71	2413.95	2401.94	2416.55
dSSS	Densidad saturada superficialmente seca	kg/m ³	Base	2481.34	2456.90	2375.00	2386.36	2386.36	2417.19
			Subrasante	2469.06	2506.28	2531.73	2493.75	2481.34	2496.43
dA	Densidad aparente	kg/m ³	Base	2701.80	2652.57	2561.15	2583.69	2547.38	2609.32
			Subrasante	2595.65	2638.20	2667.35	2623.86	2609.68	2626.94
Abs	Porcentaje de absorción del material	%	Base	5.49	5.04	5.26	5.49	5.26	5.31
			Subrasante	3.31	3.31	3.31	3.31	3.31	3.31
Proctor									
	Densidad Óptima	[g/ cm ³]	Base	1.98	2.02	2.00	2.02	1.91	1.99

			Subrasante	1.64	1.64	1.73	1.63	1.65	1.66
	Humedad Óptima	[%]	Base	9.00	7.76	8.69	7.93	9.31	8.54
			Subrasante	14.00	14.29	12.14	14.59	12.91	13.59
	Cono de Arena								
	Densidad Natural Cono de Arena	[Kg/m ³]	Base	1.86	1.85	1.84	1.84	1.79	1.83
			Subrasante	1.47	1.33	1.40	1.41	1.41	1.40
	Densidad seca in situ	[Kg/m ³]	Base	1.70	1.73	1.71	1.66	1.64	1.69
			Subrasante	1.31	1.22	1.27	1.30	1.27	1.27
	Grado de Compactación Promedio	[%]	Base	85.79	85.98	85.30	82.39	85.95	85.08
			Subrasante	79.85	74.11	73.27	79.77	76.87	76.77

	Abrasión %	[%]	Base	38.41	38.25	38.61	38.89	38.43	38.52
	Ensayos								
	Vacios	[%]	Capa Asfáltica	5.09	4.82	-	4.68	-	4.86
	Compactación	[%]	Capa Asfáltica	94.76	95.40	-	95.53	-	95.23
	Macro textura								
	Profundidad	[mm]	Capa Asfáltica	0.60	0.48	0.52	0.41	0.41	0.48
	Estabilidad y fluencia Marshall								
	Estabilidad	[Lb]	Capa Asfáltica	1687.00	1920.00	-	1193.00	-	1600.00

	Flujo	[in]		0.13	0.38	-	0.32	-	0.28
	Rigidez	[MN/m2]	Subbase	7.09	8.22	8.38	5.18	8.01	7.38
			Subrasante	4.21	3.44	3.77	4.38	4.36	4.03
	Módulo de Young	[Mapa]	Base	52.54	60.97	62.16	38.38	59.41	54.69
			Subrasante	31.23	25.49	27.97	32.50	32.30	29.90
	CBR Ec1		Base	39.19	44.68	45.42	28.42	43.7	40.28
			Subrasante	22.01	16.36	18.85	23.19	23.05	20.69
	CBR Ec2	[%]	Base	44.99	51.17	51.78	31.91	47.96	45.56
			Subrasante	22.22	14.63	19.02	21.87	21.51	19.85
	Infiltración	[%]							
	Coefficiente escurrentía	[%]		0.97	0.98	0.98	0.98	0.95	0.97

Anexo 15: Resumen de los valores determinador, mediante el uso de las hojas de Excel.