

UNIVERSIDAD NACIONAL MICAELA BASTIDAS DE APURÍMAC
FACULTAD DE INGENIERÍA

ESCUELA ACADÉMICO PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL



Tesis

Influencia de los suelos calizos erosionables en la subsidencia del pavimento flexible en el sector Parcca del distrito Lambrama provincia Abancay -Apurímac 2025.

Presentado por:

Aristófañes Hiparco Callalli Merino

Para optar el título de Ingeniero Civil

Abancay, Perú

2025



UNIVERSIDAD NACIONAL MICAELA BASTIDAS DE APURÍMAC

FACULTAD DE INGENIERÍA

ESCUELA ACADÉMICO PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL



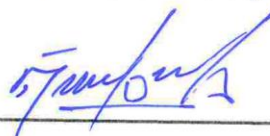
TESIS

Influencia de los suelos calizos erosionables en la subsidencia del pavimento flexible en el sector Parcca del distrito Lambrama provincia Abancay -Apurímac 2025.

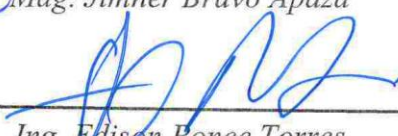
Presentado por **Aristofanes Hiparco Callalli Merino**, para optar el título de Ingeniero Civil

Sustentado y aprobado el 07 de noviembre del 2025 ante el jurado evaluador:

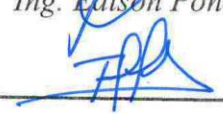
Presidente:


Mag. Jimner Bravo Apaza

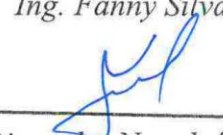
Primer miembro:


Ing. Edison Ponce Torres

Segundo miembro:


Ing. Fanny Silva Noriega

Asesor:


Mag. Diomedes Napoleón Ferrel Sarmiento





"Año de la recuperación y consolidación de la economía peruana"

CONSTANCIA DE ORIGINALIDAD N° 222-2025

La Universidad Nacional Micaela Bastidas de Apurímac, a través de la Unidad de Investigación de la Facultad de Ingeniería declara que, la Tesis intitulada: **INFLUENCIA DE LOS SUELOS CALIZOS EROSIONABLES EN LA SUBSIDENCIA DEL PAVIMENTO FLEXIBLE EN EL SECTOR PARCCA DEL DISTRITO LAMBRAMA PROVINCIA ABANCAY - APURÍMAC 2025**, presentado por el Bachr: **ARISTÓFANES HIPARCO CALLALLI MERINO**, Para optar el Título de **Ingeniero Civil**; ha sido sometido a un mecanismo de evaluación y verificación de similitud, a través del Software Turnitin, siendo el índice de similitud **ACEPTABLE de (10%)** por lo que, cumple con los criterios de originalidad establecidos por la Universidad.

Abancay, 02 de septiembre del 2025

Atentamente,


Dra. Hsmeralinda Flores Enriquez
DIRECTORA DE LA UNIDAD DE INVESTIGACIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA

C. c.
Archivo
REG. N° 733

Agradecimientos

Agradezco profundamente a la universidad por brindarme las herramientas y el espacio necesario para desarrollar esta tesis. Mi agradecimiento especial a los docentes y al personal académico por su apoyo constante. A mis padres, por su amor incondicional y por siempre creer en mí, incluso en los momentos más difíciles. A mis hermanos, por su compañía, paciencia y por ser un constante apoyo emocional.

Aristófanés.



Dedicatoria

Dedico este trabajo a mis padres, por su amor y sacrificio, y a mis hermanos, por su apoyo y aliento constante. A la universidad, que me ha brindado la oportunidad de crecer profesionalmente y personalmente.

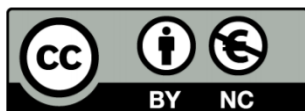
Aristóphanes.



Influencia de los suelos calizos erosionables en la subsidencia del pavimento flexible en el sector Parcca del distrito Lambrama provincia Abancay -Apurímac 2025

Línea de investigación: Ingeniería de materiales.

Esta publicación está bajo una Licencia Creative Commons.



ÍNDICE

	Pág.
INTRODUCCIÓN	1
RESUMEN	2
ABSTRACT	3
CAPÍTULO I	4
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	4
1.1 Descripción del problema	4
1.2 Enunciado del problema	5
1.2.1 Problema general	5
1.2.2 Problemas específicos	6
1.3 Justificación de la investigación	6
CAPÍTULO II	9
OBJETIVOS E HIPÓTESIS	9
2.1 Objetivos de la investigación	9
2.1.1 Objetivo general	9
2.1.2 Objetivos específicos	9
2.2 Hipótesis de la investigación	9
2.2.1 Hipótesis general	9
2.2.2 Hipótesis específicas	9
2.4 Operacionalización de variables	11
CAPÍTULO III	12
MARCO TEÓRICO REFERENCIAL	12
3.1 Antecedentes	12
3.1.1 Antecedentes internaciones	12
3.1.2 Antecedentes nacionales	18



3.2	Marco teórico	22
3.2.1	Subsidencia en pavimentos flexibles	22
3.2.2	Tipos de subsidencia	23
3.2.3	Pavimentos flexibles	27
3.2.3.1	Comportamiento de los pavimentos flexibles	27
3.2.3.2	Estructura de los pavimentos	28
3.2.3.3	Funciones de la capa asfáltica	30
3.2.3.4	Diseño de pavimentos flexibles	31
3.2.3.5	Pavimento bicapa	32
3.2.3.6	Comportamiento de pavimentos a largo plazo	33
3.2.4	Suelos	33
3.2.4.1	Clasificación de los suelos	34
3.2.5	Erosión de los suelos	35
3.2.5.1	Causas de la erosión de los suelos	35
3.2.5.2	Impacto de la erosión en el diseño de pavimentos	36
3.2.6	Asentamiento	37
3.2.6.1	Causas del asentamiento de carreteras	37
3.2.7	Mecánica de suelos en pavimentos	38
3.2.8	Ensayos de mecánica de suelos	38
3.2.8.1	Análisis granulométrico	38
3.2.8.2	Contenido de humedad	39
3.2.8.3	Límite líquido	39
3.2.8.4	Límite plástico	39
3.2.8.5	Proctor modificado	40
3.2.8.6	Ensayo de pérdida de masa por erosión (PME)	40
3.2.8.7	CBR (California Bearing Ratio)	40
3.3	Marco conceptual	41
CAPÍTULO IV		43



METODOLOGÍA	43
4.1 Tipo y nivel de investigación	43
4.2 Diseño de la investigación	43
4.3 Descripción ética de la investigación	44
4.4 Población y muestra	46
4.4.1 Población	46
4.4.2 Muestra	47
4.5 Procedimiento	48
4.6 Técnica e instrumentos	49
4.7 Estadístico de investigación	49
CAPÍTULO V	53
RESULTADOS Y DISCUSIONES	53
5.1 Análisis y resultados	53
5.1.1 Análisis de los resultados de variable independiente: Erosión en los suelos calizos	55
5.1.1.1 Análisis de las propiedades geotécnicas del suelo	55
5.1.1.2 Análisis de pérdida de masa por erosión (PME)	62
5.1.2 Análisis de los resultados de variable dependiente: subsidencia en la estructura del pavimento	69
5.1.2.1 Análisis factor de erosividad (R)	72
5.1.2.2 Análisis factor de erodabilidad (K)	76
5.1.3 Análisis estadístico descriptivo	81
5.1.3.1 Variable independiente (Erosión en los suelos)	81
5.1.3.2 Variable dependiente (subsidencia en la estructura del pavimento)	83
5.1.1 Prueba de normalidad para cada variable	84
5.2 Contrastación de hipótesis	86
5.2.1 Contrastación de hipótesis general	86
5.2.2 Contrastación de hipótesis específica	87
5.3 Discusión	89



CAPÍTULO VI	92
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	92
6.1 Conclusiones	92
6.2 Recomendaciones	93
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	96
ANEXOS	99

ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1 — Operacionalización de variables	11
Tabla 2 — Tipos de subsidencia	24
Tabla 3 — Diseño de la investigación	44
Tabla 4 — Normativas	45
Tabla 5 — Población	46
Tabla 6 — Muestra grupo de control	47
Tabla 7 — Procedimiento	48
Tabla 8 — Cuadro resumen de la vía estudiada	53
Tabla 9 — Cuadro de la ubicación de las calicatas	53
Tabla 10 — Datos de calicatas	55
Tabla 11 — Contenido de humedad en calicatas	56
Tabla 12 — Límites de Atterberg	57
Tabla 13 — Análisis granulométrico	59
Tabla 14 — Clasificación de los suelos	61
Tabla 15 — Pérdida de masa por erosión del suelo	63
Tabla 16 — Análisis granulométrico y erodabilidad	66
Tabla 17 — Análisis diferencia en porcentaje de material	67
Tabla 18 — DSM y COH, calicatas	70
Tabla 19 — CBR 0.1'' (100%-95%)	71
Tabla 20 — Precipitación mensual y factor de erosividad (R)	74
Tabla 21 — Rango de factor K y susceptibilidad a la erosión	78
Tabla 22 — Parámetros para calcular el factor K de calicatas	79
Tabla 23 — Resultados del factor K por calicata	79
Tabla 24 — Estadística pérdida de masa por erosión (PME)	81
Tabla 25 — Estadística propiedades geotecnicas del suelo	82
Tabla 26 — Estadística factor de erosividad (R)	83
Tabla 27 — Estadística factor de erodabilidad (K)	83
Tabla 28 — Prueba de normalidad erosión en los suelos	85
Tabla 29 — Prueba de normalidad subsidencia en la estructura del pavimento	86
Tabla 30 — Contrastación de hipótesis general	87
Tabla 31 — Contrastación de hipótesis especifica 1	88
Tabla 32 — Contrastación de hipótesis especifica 2	89
Tabla 33 — Matriz de consistencia	100

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1 — Subsistencia de pavimento	23
Figura 2 — Subsistencia por vibraciones	25
Figura 3 — Subsistencia por carga	26
Figura 4 — Subsistencia por hidrocompactación	26
Figura 5 — Representación de las cargas en pavimentos	28
Figura 6 — Corte transversal pavimento flexible	30
Figura 7 — Diseño de la estructura de pavimento	32
Figura 8 — Fases del suelo	35
Figura 9 — Correlación de Pearson	50
Figura 10 — Ubicación de las calicatas	54
Figura 11 — Contenido de humedad	57
Figura 12 — Resultados de los límites de Atterberg	59
Figura 13 — Distribución granulométrica	60
Figura 14 — Distribución granulométrica	64
Figura 15 — Diferencias entre el análisis granulométrico y erodabilidad	69
Figura 16 — Temperatura y precipitación en Abancay	73
Figura 17 — Temperatura, precipitación, y condiciones meteorológicas en Abancay (2024)	74
Figura 18 — Factor de erosividad (R) mensual	75
Figura 19 — Clasificación textural de suelos	77
Figura 20 — Nomograma de Wischmeier y Smith para el cálculo del factor K	77
Figura 21 — Fórmula del Factor K (USLE)	78
Figura 22 — Factor de erodabilidad (K)	81
Figura 23 — Exploración de campo C1	102
Figura 24 — Exploración de campo C2	102
Figura 25 — Exploración de campo C3	103
Figura 26 — Exploración de campo C4	103
Figura 27 — Cuarteo de muestras	104
Figura 28 — Estudio de la erodabilidad 1	104
Figura 29 — Estudio de la erodabilidad 2	105
Figura 30 — Estudio de la erodabilidad 3	105
Figura 31 — Estudio de la erodabilidad 4	106
Figura 32 — Estudio de la erodabilidad tamiz NRO. 200	106
Figura 33 — Análisis granulométrico	107
Figura 34 — Contenido de humedad C1	108
Figura 35 — Contenido de humedad C2	109
Figura 36 — Contenido de humedad C3	110
Figura 37 — Contenido de humedad C4	111
Figura 38 — LL y LP – C1	112
Figura 39 — LL y LP – C2	113
Figura 40 — LL y LP – C3	114
Figura 41 — LL y LP – C4	115
Figura 42 — Análisis granulométrico – C1	116
Figura 43 — Variación granulométrico – C1	117

Figura 44 — Análisis granulométrico – C2	118
Figura 45 — Variación granulométrico – C2	119
Figura 46 — Análisis granulométrico – C3	120
Figura 47 — Variación granulométrico – C3	121
Figura 48 — Análisis granulométrico – C4	122
Figura 49 — Variación granulométrico – C4	123
Figura 50 — Proctor modificado – C1	124
Figura 51 — Proctor modificado – C2	125
Figura 52 — Proctor modificado – C3	126
Figura 53 — Proctor modificado – C4	127
Figura 54 — CBR carga - C1	128
Figura 55 — CBR gráfico - C1	129
Figura 56 — CBR vs DSM - C1	130
Figura 57 — CBR carga – C2	131
Figura 58 — CBR gráfico – C2	132
Figura 59 — CBR vs DSM – C2	133
Figura 60 — CBR carga – C3	134
Figura 61 — CBR gráfico – C3	135
Figura 62 — CBR vs DSM – C3	136
Figura 63 — CBR carga – C4	137
Figura 64 — CBR gráfico – C4	138
Figura 65 — CBR vs DSM – C4	139
Figura 66 — Erodabilidad – C1	140
Figura 67 — Erodabilidad – C2	141
Figura 68 — Erodabilidad – C3	142
Figura 69 — Erodabilidad – C4	143

INTRODUCCIÓN

La influencia de los suelos calizos erosionables en la subsidencia del pavimento flexible constituyó un fenómeno de gran relevancia en la ingeniería vial, ya que afectó la estabilidad, durabilidad y seguridad de las carreteras. En el sector Parcca, distrito Lambrama, provincia Abancay – Apurímac, se presentaron condiciones geológicas particulares, donde la presencia de suelos calizos con alta susceptibilidad a la erosión favoreció deformaciones diferidas en los pavimentos, generando hundimientos, fisuras y fallas estructurales prematuras.

La estructura de la tesis se organiza en los siguientes capítulos:

- Capítulo I: Planteamiento del problema
Presenta el problema central, los objetivos y la justificación de la investigación, contextualizando geográficamente la zona de estudio.
- Capítulo II: Objetivos e hipótesis
Define el objetivo general y los específicos, las hipótesis y las variables clave que guiarán la investigación.
- Capítulo III: Marco teórico referencial
Revisa los antecedentes y la teoría relacionada con la subsidencia en pavimentos sobre suelos calizos y presenta los modelos aplicados en investigaciones previas.
- Capítulo IV: Metodología
Detalla el diseño del estudio, los métodos de recolección de datos y las herramientas estadísticas utilizadas.
- Capítulo V: Resultados y discusiones
Presenta los resultados obtenidos y las discusiones de estos en comparación con estudios previos, analizando su relación con la subsidencia.
- Capítulo VI: Conclusiones y recomendaciones
Resume las conclusiones clave y ofrece recomendaciones prácticas para mitigar la subsidencia y mejorar la durabilidad de los pavimentos.

Este enfoque estructurado permitió una comprensión integral del problema y proporcionó soluciones prácticas para la mejora de la infraestructura vial en áreas vulnerables a la subsidencia.



RESUMEN

La presente investigación se centró en analizar la influencia de los suelos calizos erosionables en la subsidencia del pavimento flexible en el sector Parcca, distrito de Lambrama, provincia de Abancay – Apurímac (2025). El estudio tuvo como propósito principal evaluar los factores del suelo que inciden en la pérdida de soporte estructural del pavimento, considerando la pérdida de masa por erosión (PME) y la variación granulométrica como variables críticas en el comportamiento de los suelos calizos.

Los resultados obtenidos evidenciaron que la interacción entre la erodabilidad del suelo (K) y la variación granulométrica tiene un efecto significativo en la subsidencia del pavimento flexible. La prueba de normalidad Shapiro-Wilk arrojó un valor de $p = 0.02623$, permitiendo rechazar la hipótesis nula y confirmar que los datos de erodabilidad presentan distribución normal. Asimismo, la correlación de Spearman entre la PME y la subsidencia alcanzó un coeficiente de $\rho = 0.86$ con $p = 0.04$, lo que indicó una relación positiva y alta: a mayor erosión de los suelos calizos, mayor es el grado de subsidencia del pavimento.

En cuanto a la variación granulométrica, se observó una correlación significativa con el factor de erodabilidad ($\rho = 0.76$; $p = 0.00013$), demostrando que los cambios en la distribución de partículas inciden directamente en la capacidad del suelo para resistir la erosión y, en consecuencia, en la estabilidad del pavimento flexible.

En síntesis, los resultados confirman que tanto la erosión como la variación granulométrica son factores determinantes en la subsidencia de pavimentos flexibles construidos sobre suelos calizos erosionables. Estos hallazgos resaltaron la necesidad de incorporar parámetros de erosión, granulometría y erodabilidad (K) dentro de los procesos de diseño, control y mantenimiento de pavimentos, especialmente en regiones vulnerables como el sector Parcca, donde las condiciones geológicas favorecen la degradación progresiva del terreno.

Palabras clave: erodabilidad, erosión, granulometría, suelos calizos erosionables, subsidencia.



ABSTRACT

This research focused on analyzing the influence of erodible calcareous soils on the subsidence of flexible pavement in the Parcca sector, Lambrama district, Abancay province – Apurímac (2025). The main objective was to evaluate the soil factors that affect the structural support of the pavement, specifically assessing the mass loss due to erosion (PME) and the granulometric variation of calcareous soils, and their relationship with the pavement's capacity to withstand loads.

The results revealed that the interaction between soil erodibility (K) and granulometric variation has a significant effect on the subsidence of flexible pavement. The Shapiro–Wilk normality test yielded a value of $p = 0.02623$, allowing the rejection of the null hypothesis and confirming that the erodibility data follow a normal distribution. Additionally, the Spearman correlation between PME and subsidence reached a coefficient of $\rho = 0.86$ with $p = 0.04$, indicating a strong positive relationship: greater erosion in calcareous soils leads to greater pavement subsidence.

Regarding granulometric variation, a significant correlation was found with the erodibility factor ($\rho = 0.76$; $p = 0.00013$), demonstrating that changes in particle-size distribution directly affect the soil's resistance to erosion and, consequently, the structural stability of the flexible pavement.

In summary, the findings confirm that both erosion and granulometric variation are determining factors in the subsidence of flexible pavements constructed on erodible calcareous soils. These results highlight the need to incorporate erosion parameters, granulometric analysis, and erodibility (K) into pavement design, control, and maintenance processes, particularly in vulnerable areas such as the Parcca sector, where geological conditions favor progressive ground degradation.

Keywords: *erodibility, erosion, grain size, calcareous soils, subsidence.*



CAPÍTULO I

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1 Descripción del problema

A nivel internacional, la subsidencia de pavimentos flexibles en suelos erosionables fue uno de los problemas más relevantes en la ingeniería vial, debido a sus impactos en la seguridad, los costos de mantenimiento y la vida útil de la infraestructura. En países con fuerte presencia de suelos calizos, como España, México y Colombia, se documentaron numerosos casos donde la erosión del suelo redujo drásticamente su capacidad portante, generando hundimientos, grietas y fallas estructurales. Juárez y Rico (2005) destacaron que los suelos calizos, por su composición mineralógica, presentaron una alta susceptibilidad a procesos de erosión interna y superficial, especialmente cuando fueron sometidos a lluvias intensas y cargas dinámicas propias del tránsito. Asimismo, Duque y Escobar (2002) señalaron que el mal manejo agrícola y la deforestación aceleraron la erosión en suelos calizos, debilitando su estructura y favoreciendo fenómenos de subsidencia. De igual modo, estudios en Europa. Montejó (1998) revelaron que la subsidencia en pavimentos sobre suelos calizos estuvo asociada a la pérdida progresiva de masa y a la modificación granulométrica del terreno, lo que generó cavidades subterráneas que colapsaron con el tiempo.

En el contexto nacional, la problemática cobró gran importancia en regiones andinas y amazónicas donde predominaron formaciones calizas y suelos erosionables. El Ministerio de Transportes y Comunicaciones – MTC (2022) reportó que más del 40 % de las carreteras departamentales presentaron daños vinculados a procesos de erosión, subsidencia y fallas de la subrasante. Estos problemas se intensificaron en la sierra sur del Perú, donde las lluvias estacionales, la pendiente del terreno y el uso inadecuado del suelo agrícola incrementaron la vulnerabilidad de las vías. Montejó (1998) subrayó que la subsidencia fue una consecuencia directa de la pérdida de resistencia en suelos erosionados, que redujo la capacidad de carga del terreno y aceleró la deformación del pavimento. Por su parte, Castillo (2005) enfatizó que las consecuencias no fueron únicamente técnicas, sino también sociales y económicas, ya que los hundimientos y



bachos aumentaron el riesgo de accidentes de tránsito, elevaron los costos de mantenimiento y restringieron el comercio y la conectividad regional.

En el ámbito local, el sector Parcca, distrito Lambrama, Abancay – Apurímac, constituyó un caso representativo de los efectos de los suelos calizos erosionables sobre la subsidencia del pavimento flexible. En esta zona, las condiciones geológicas y climáticas favorecieron la erosión del suelo calizo, caracterizado por su alta porosidad y fragilidad estructural. La exposición a lluvias intensas, la falta de medidas de conservación del suelo y las prácticas agropecuarias aceleraron la pérdida de masa por erosión (PME) y la variación granulométrica, debilitando la subrasante que sustenta el pavimento flexible. Como consecuencia, se observaron hundimientos, fisuras y deformaciones en la carpeta asfáltica, lo que comprometió la seguridad de los usuarios y la funcionalidad de la vía.

Este fenómeno tuvo implicancias directas en la seguridad vial, al incrementar la probabilidad de accidentes, y en la economía regional, ya que afectó el transporte de productos agrícolas, el comercio local y el turismo. Castillo (2005) señaló que la degradación de las carreteras por subsidencia afectó la productividad y el desarrollo de las comunidades al limitar la movilidad y encarecer los costos logísticos. A pesar de la importancia del problema, en Parcca no existieron estudios exhaustivos que cuantificaran la relación entre la erosión de suelos calizos y la subsidencia del pavimento, lo que limitó la toma de decisiones técnicas adecuadas.

De allí surgió la necesidad de investigar la influencia de los suelos calizos erosionables en la subsidencia del pavimento flexible, enfocándose en variables críticas como la PME y la variación granulométrica, con el fin de establecer relaciones técnicas que permitieran diseñar estrategias de mitigación, conservación y mantenimiento que garantizaran la sostenibilidad y seguridad de la infraestructura vial en esta zona vulnerable de Apurímac.

1.2 Enunciado del problema

1.2.1 Problema general

¿De qué manera los suelos calizos erosionables influyen en la subsidencia del pavimento flexible en el sector Parcca del distrito Lambrama, provincia Abancay – Apurímac, 2025?



1.2.2 Problemas específicos

- ¿Cómo afecta la pérdida de masa por erosión (PME) de los suelos calizos erosionables a la subsidencia del pavimento flexible en el sector Parcca del distrito Lambrama, provincia Abancay – Apurímac, 2025?
- ¿Cómo influye la variación granulométrica de los suelos calizos erosionables en el factor de erodabilidad (K) y en la subsidencia del pavimento flexible en el sector Parcca del distrito Lambrama, provincia Abancay – Apurímac, 2025?

1.3 Justificación de la investigación

La presente investigación, titulada *“Influencia de los suelos calizos erosionables en la subsidencia del pavimento flexible en el sector Parcca del distrito Lambrama, provincia Abancay – Apurímac, 2025”*, adquiere relevancia por el impacto que la **subsidencia vial** tiene sobre la durabilidad de la infraestructura, la seguridad de los usuarios y el desarrollo socioeconómico regional.

En la región de **Apurímac**, la conectividad vial constituye un factor determinante para la integración de comunidades, el comercio local y el acceso a servicios básicos. Sin embargo, los **suelos calizos erosionables**, caracterizados por su alta susceptibilidad a procesos de erosión y variación granulométrica, han generado deterioros prematuros en los pavimentos, manifestados en hundimientos, fisuras y pérdida de capacidad estructural. Esta problemática pone en riesgo la seguridad vial y reduce la vida útil de las obras, incrementando los costos de mantenimiento y rehabilitación.

- **Justificación teórica**

Este estudio aporta al conocimiento científico y académico al analizar la relación entre la pérdida de masa por erosión (PME), la variación granulométrica y la subsidencia del pavimento flexible. La identificación de estos factores permitirá comprender los mecanismos geotécnicos que explican la inestabilidad del suelo calizo erosionable, generando una base teórica que podrá aplicarse en futuras investigaciones y proyectos de infraestructura vial en contextos similares.

- **Justificación metodológica**

La investigación aplica un enfoque cuantitativo y experimental, sustentado en la caracterización geotécnica de los suelos calizos y en la aplicación de pruebas estadísticas como Shapiro-Wilk y correlación de Spearman, que garantizan rigor científico y validez de resultados. Este enfoque metodológico servirá como referencia para futuras investigaciones sobre subsidencia en pavimentos y permitirá replicar los procedimientos en otras zonas vulnerables del país.

- **Justificación práctica**

Los resultados de esta investigación serán útiles para ingenieros, proyectistas y autoridades viales, ya que permitirán fundamentar mejoras en el diseño y mantenimiento de carreteras construidas sobre suelos calizos. Asimismo, posibilitarán la formulación de estrategias de mitigación, como técnicas de estabilización de suelos y ajustes en el diseño estructural del pavimento, orientadas a reducir la subsidencia y prolongar la vida útil de las vías.

- **Justificación social**

El estado de las carreteras impacta directamente en la seguridad de los conductores y peatones. La presencia de baches, hundimientos y deformaciones incrementa el riesgo de accidentes de tránsito, especialmente en temporadas de lluvias. Por ello, esta investigación no solo responde a una necesidad técnica, sino también a un interés social, al contribuir a la reducción de riesgos y a la mejora de las condiciones de transporte en la región de Abancay.

- **Justificación económica**

La subsidencia de pavimentos genera elevados costos de mantenimiento y afecta la productividad de las comunidades al obstaculizar el comercio agrícola, el transporte de bienes y el turismo. Con base en la evidencia obtenida, las autoridades podrán tomar decisiones más informadas que reduzcan costos a largo plazo y favorezcan un desarrollo regional sostenible.

En conclusión, la investigación busca no solo explicar un problema técnico, sino también generar beneficios sociales, económicos y ambientales, aportando

conocimiento científico aplicable en Apurímac y en otras regiones con condiciones geológicas similares. Sus resultados contribuirán a mejorar la seguridad vial, reducir costos de conservación y fortalecer la gestión de la infraestructura vial en el país.



CAPÍTULO II

OBJETIVOS E HIPÓTESIS

2.1 Objetivos de la investigación

2.1.1 Objetivo general

Evaluar la influencia de los suelos calizos erosionables en la subsidencia del pavimento flexible en el sector Parcca del distrito Lambra, provincia Abancay – Apurímac, 2025.

2.1.2 Objetivos específicos

- Determinar cómo la pérdida de masa por erosión (PME) de los suelos calizos erosionables afecta la subsidencia del pavimento flexible en el sector Parcca del distrito Lambra, provincia Abancay – Apurímac, 2025.
- Analizar cómo la variación granulométrica de los suelos calizos erosionables influye en el factor de erodabilidad (K) y en la subsidencia del pavimento flexible en el sector Parcca del distrito Lambra, provincia Abancay – Apurímac, 2025.

2.2 Hipótesis de la investigación

2.2.1 Hipótesis general

Los suelos calizos erosionables influyen significativamente en la subsidencia del pavimento flexible en el sector Parcca del distrito Lambra, provincia Abancay – Apurímac, 2025.

2.2.2 Hipótesis específicas

- La pérdida de masa por erosión (PME) de los suelos calizos erosionables afecta directamente la subsidencia del pavimento flexible, de manera que a mayor erosión, mayor es el nivel de subsidencia en el sector Parcca.



- La variación granulométrica de los suelos calizos erosionables influye de forma significativa en el factor de erodabilidad (K) y en la subsidencia del pavimento flexible, disminuyendo la estabilidad estructural del pavimento en el sector Parcca.



2.4 Operacionalización de variables

Tabla 1 — Operacionalización de variables

VARIABLES	DEFINICIÓN CONCEPTUAL	DEFINICIÓN OPERACIONAL	DIMENSIÓN	INDICADORES	UNIDAD DE MEDIDA
VAR. INDEPENDIENTE: X: Erosión en los suelos calizos	La erosión en los suelos calizos se refiere al proceso gradual de desgaste y pérdida de material del suelo calizo debido a la acción del agua, el viento u otros agentes naturales. Los suelos calizos están compuestos principalmente de carbonato de calcio y son especialmente susceptibles a la erosión debido a su naturaleza porosa y soluble en agua. (BOWLES, 1981)	La erosión en los suelos calizos implica la aplicación de diversas técnicas para cuantificar la pérdida de material debido a la acción de agentes erosivos como la lluvia o el viento. Estas técnicas incluyen pruebas de erodabilidad del suelo para evaluar su resistencia , la medición de la pérdida de masa por erosión (PME) , el análisis de la variación granulométrica en el sedimento.	- Propiedades geotecnicas del suelo - Pérdida de masa por erosión (PME)	- Contenido de humedad - Límites de Atemberg - Análisis granulométrico - Tasa de erosión	% - Adimensional % %
VAR. DEPENDIENTE: Y: subsistencia en la estructura del pavimento	La subsidencia en pavimentos flexibles se refiere al hundimiento o asentamiento gradual de la superficie de un pavimento construido sobre terreno inestable o suelos que experimentan deformaciones bajo cargas aplicadas. En términos conceptuales, la subsidencia ocurre cuando el suelo subyacente cede o se comprime, lo que resulta en una disminución de la elevación o nivel del pavimento. (GALEANA et al., 2022)	La definición operacional de la subsidencia en pavimentos flexibles implica un hundimiento gradual de la superficie del pavimento, evidenciado por una variación en su nivel a lo largo del tiempo. Este fenómeno se manifiesta como asentamiento y deformación, incluyendo alteraciones en la superficie, así como una mayor densidad de fisuras por unidad de área.	- Factor de erosividad (R) - Factor de erodabilidad (K)	- Mide la capacidad erosiva de las lluvia - Mide la susceptibilidad del suelo a la erosión	- MJ mm ha⁻¹ h⁻¹ año⁻¹ (Megajulios por milímetro por hectárea por hora por año). (Número adimensional entre 0 y 1).

CAPÍTULO III

MARCO TEÓRICO REFERENCIAL

3.1 Antecedentes

3.1.1 Antecedentes internacionales

- a) Frid et al. (2025) , en su artículo científico “Estudio integrado de la subsidencia de pavimentos de carreteras mediante métodos geofísicos terrestres y satelitales”, publicado en la revista Applied Sciences, analizaron la subsidencia en pavimentos flexibles mediante un enfoque integral que combinó técnicas de detección satelital con estudios geofísicos de campo. Para ello, aplicaron la interferometría de radar de apertura sintética (InSAR) con imágenes satelitales, el radar de penetración terrestre (GPR) y la tomografía de resistividad eléctrica (ERT), a fin de identificar deformaciones superficiales y anomalías internas del suelo relacionadas con procesos de subsidencia.

La población de estudio estuvo constituida por tramos de carreteras nacionales en Israel con registros de hundimientos y deformaciones. La mostró seleccionada correspondió a un segmento de autopista que presentaba fallas visibles en el pavimento, donde se aplicaron las pruebas integradas.

En cuanto a la metodología, se utilizó el InSAR para detectar movimientos verticales del terreno a escala milimétrica, mientras que el GPR permitió identificar discontinuidades y cavidades bajo el pavimento, y el ERT caracterizó los cambios de resistividad asociados a la pérdida de soporte en el subsuelo. Los resultados fueron validados con observaciones de campo.

Entre las conclusiones más relevantes, se determinó que:

- La subsidencia del pavimento se asoció directamente con la pérdida de resistencia del suelo y la presencia de cavidades subterráneas generadas por procesos erosivos.



- La combinación de InSAR, GPR y ERT constituyó una herramienta eficaz para el monitoreo temprano y preventivo de la infraestructura vial.
- El método integral propuesto pudo aplicarse en otros países con presencia de suelos erosionables, como los calizos, debido a su alta susceptibilidad a la erosión y a la subsidencia.

Este antecedente resultó significativo para la presente investigación, ya que aportó evidencia científica internacional sobre la influencia de la erosión del suelo en la subsidencia de pavimentos flexibles, y propuso metodologías que pudieron adaptarse a la realidad geotécnica del sector Parcca, distrito Lambrama, Abancay – Apurímac.

- b) Lee et al. (2025) en su estudio experimental titulado “*Comportamiento de la subsidencia del terreno y formación de cavidades bajo condiciones de subsuelo*” publicado en la revista *Applied Sciences*, analizaron los mecanismos de formación de cavidades subterráneas y el comportamiento de la subsidencia superficial del suelo bajo diferentes condiciones geotécnicas. El trabajo se llevó a cabo mediante modelos a escala en laboratorio utilizando una caja de suelo transparente, en la cual se simulaban escenarios con arena estándar coreana y arcilla marina, variando parámetros como la densidad relativa, la profundidad del nivel freático y el contenido de finos, con el objetivo de observar la generación y evolución de cavidades en condiciones similares a las que ocurrieron en infraestructuras viales y urbanas. Los resultados mostraron que cuando los suelos se encontraban en estado de baja densidad relativa, el proceso de subsidencia se aceleraba de manera significativa provocando hundimientos rápidos y localizados, mientras que a mayor densidad relativa las cavidades tendían a ser más amplias y voluminosas debido al incremento de la resistencia friccional del material que retrasaba el colapso, pero generaba deformaciones de mayor magnitud. Del mismo modo se evidenció que el aumento del contenido de finos ejercía un efecto estabilizador sobre el suelo, actuando como un freno al desplazamiento de partículas y reduciendo la velocidad de formación de cavidades, lo cual sugirió que la cohesión aportada por materiales de naturaleza arcillosa pudo mitigar los efectos de la erosión y la pérdida de masa en el

subsuelo. Esta investigación fue de gran relevancia para el presente trabajo porque demostró la relación directa entre las características físicas y geotécnicas de los suelos y la ocurrencia de subsidencia, ofreciendo evidencia experimental que pudo extrapolarse al análisis de suelos calizos erosionables como los del sector Parcca en el distrito Lambrama, provincia Abancay, región Apurímac, donde la subsidencia del pavimento flexible estuvo estrechamente asociada a procesos de erosión y variación granulométrica que disminuyeron la capacidad de soporte de la infraestructura vial.

- c) Mahmoudi et al. (2024), en su artículo “Efectos de la cal hidratada y la zeolita en el comportamiento mecánico de arenas calcáreas sometidas a ciclos húmedo-seco”, publicado en *Journal of Materials in Civil Engineering*, realizaron un estudio experimental para evaluar el impacto de diversos tratamientos de estabilización (con cal hidratada y reemplazos parciales de zeolita) sobre arenas calcáreas, enfocándose en su comportamiento mecánico frente a ciclos de humedecimiento y secado.

Población y muestra: Se trabajó con muestras de arena calcárea tratadas con 4 % de cal hidratada y proporciones variables de zeolita (0 % a 75 %) durante ensayos de resistencias a compresión no confinada (UCS) y velocidad ultrasónica (UPV), además de cuatro y ocho ciclos húmedo-seco.

Metodología: Se compararon las propiedades mecánicas bajo diferentes proporciones de cal y zeolita. Se utilizó microscopía electrónica de barrido (SEM) y difracción de rayos X (XRD) para analizar los cambios microestructurales.

Conclusiones principales fueron: La resistencia (UCS) y el módulo restringido (D) de las muestras alcanzaron valores máximos con un reemplazo óptimo del 60 % de zeolita, tras varios ciclos húmedo-seco, el porcentaje óptimo disminuyó (45 % tras cuatro ciclos y 30 % tras ocho).

El análisis microestructural (SEM y XRD) permitió comprender cómo los tratamientos mejoraron la cohesión y densificación del material.



Este estudio fue significativo para la investigación, ya que ofreció criterios técnicos sobre cómo la estabilización de suelos calcáreos pudo mejorar sus propiedades mecánicas frente a condiciones erosivas y de humedad, lo que podría contribuir a controlar la subsidencia del pavimento flexible en zonas con suelos calizos erosionables como Parcca.

- d) Castillo y Hidalgo (2024) en su trabajo de investigación “Caracterización física - hidráulica del pavimento flexible en el tramo Colta -Guamote del corredor vial E-35 Riobamba - Cuenca”, analizaron las propiedades físicas e hidráulicas del pavimento flexible en un tramo específico del corredor E-35, entre las localidades de Colta y Guamote, en la provincia de Chimborazo, Ecuador. Para este estudio, la población y mostró se basaron en el examen de las capas granulares del pavimento en dicho tramo. Se utilizaron métodos destructivos y de saturación para la recolección de datos, con el objetivo de determinar características como la macrotextura, abrasión y densidad de las capas de base, subbase y subrasantes.

El propósito principal de la investigación fue identificar las propiedades físicas e hidráulicas de un pavimento flexible en el mencionado tramo, mientras que los objetivos específicos incluyeron: (a) analizar las características físico-mecánicas de las capas granulares del pavimento flexible, y (b) evaluar las propiedades hidráulicas del pavimento. Entre las conclusiones más destacadas, se identificó que las subrasantes estuvieron vinculadas a varias formaciones geológicas, como Alausí, Volcánicos Sicalpa y Depósitos Coluvio-Aluviales, predominantemente del período Cretácico superior y Cuaternario, con profundidades que variaron entre 100 y 300 metros. El análisis edafológico reveló que la textura superficial fue predominantemente franco-arenosa, coincidiendo con las clasificaciones obtenidas en los ensayos, que indicaron que la base y subbase cumplieron con los parámetros de las normativas SUCS y AASHTO. Además, el coeficiente de escurrimiento medido en el sitio fue superior al indicado en la normativa, mientras que las características físico-mecánicas de las capas granulares cumplieron con los estándares establecidos por el Ministerio de Transporte y Obras Públicas (MTOP). Este análisis fue significativo para mi investigación sobre la subsidencia en pavimentos flexibles, ya que proporcionó información



sobre las propiedades hidráulicas y físico-mecánicas que pudieron influir en el comportamiento y durabilidad de pavimentos en la región de Abancay, Apurímac.

- e) Galeana et al. (2022) “Medición de asentamientos en pavimentos dañados por subsidencia usando ortomosaicos y MDE mediante GPS y VANT”, fue una investigación aplicada y el tipo de investigación utilizada fue cuantitativa con un enfoque descriptivo. La población estuvo compuesta por pavimentos afectados por subsidencia en diversas regiones, y la mostró se seleccionó de una zona experimental. Se utilizaron técnicas de fotogrametría mediante VANT y GPS, y se emplearon Puntos de Control Terrestres (GCP) como instrumento de recolección de datos.

El objetivo general de la investigación fue medir los asentamientos y agrietamientos en pavimentos afectados por subsidencia utilizando tecnologías avanzadas como los VANT y GPS. Los objetivos específicos fueron: (a) Aplicar tecnologías de fotogrametría y GPS para obtener ortomosaicos y Modelos Digitales de Elevación (MDE) de áreas afectadas, (b) Medir los asentamientos y la magnitud de las grietas en los pavimentos, (c) Determinar la velocidad de subsidencia y su impacto en la infraestructura urbana.

Entre las conclusiones más relevantes del estudio se destacó que la metodología utilizada con VANT y GPS permitió reducir considerablemente el tiempo para la identificación de daños en pavimentos. Se registraron asentamientos de hasta 5.7 cm en la zona afectada por subsidencia. Además, los MDE proporcionaron una visualización detallada de las fallas estructurales en las capas del pavimento. Los autores también concluyeron que la región continuaría experimentando grietas debido a su ubicación cerca de una falla geológica activa, lo que generó un desgaste continuo en los pavimentos, tanto en la superficie como en las capas inferiores.

- f) Andrade, Erazo y Tejada (2024) "Espesores de mejoramiento para incrementar la resistencia de subrasantes en pavimentos flexibles de carreteras", la investigación fue realizada en la Universidad Técnica de Ambato, Ecuador, con



el objetivo de establecer una metodología teórica para determinar los espesores mínimos de material de mejoramiento necesarios en las subrasantes para pavimentos flexibles. Este estudio utilizó el software ALIZE para modelar las estructuras de suelo y empleó el procedimiento ICAFIR, adaptado a la norma AASTHO 93, para obtener los valores de los módulos de elasticidad y la deflexión superficial bajo una carga estándar de 80 kN.

El objetivo general de la investigación fue determinar los espesores mínimos de material de mejoramiento para garantizar la resistencia exigida en el cimiento de pavimentos flexibles. Para lograr este objetivo, se realizaron ajustes en el método ICAFIR para adaptarlo a las normativas locales, y se modelaron los diferentes tipos de tráfico y la calidad del suelo natural. Además, se determinaron los espesores mínimos requeridos en función de los módulos de superficie deseados y la categoría de la subrasante (baja, media o alta), considerando tanto los suelos locales como el tipo de tráfico proyectado en las carreteras.

Las conclusiones del estudio destacaron la viabilidad del método adaptado del procedimiento ICAFIR para determinar los espesores de material de mejoramiento en pavimentos flexibles en Ecuador. Los resultados indicaron que la calidad del suelo natural influyó directamente en el espesor necesario de mejoramiento; a mayor calidad del suelo, menor espesor de material fue requerido. Además, el estudio reveló que, dependiendo del tráfico proyectado, se debieron aplicar espesores distintos para garantizar los módulos de superficie requeridos. Se presentó un ejemplo práctico para calcular estos espesores y demostrar cómo el método fue aplicable a proyectos reales de pavimentación en Ecuador.

Esta investigación se relacionó con mi trabajo de investigación en el ámbito del diseño de pavimentos flexibles, ya que ambos estudios se enfocaron en la optimización de las características del suelo de subrasante para garantizar la durabilidad y resistencia de los pavimentos. Los métodos y enfoques utilizados en este estudio, especialmente en lo referente al cálculo de los espesores de mejoramiento en función de las condiciones del suelo y el tipo de tráfico, resultaron útiles para adaptar el diseño de pavimentos en Abancay, Apurímac.



Esta metodología me permitió evaluar los parámetros locales y mejorar la calidad y resistencia de los pavimentos en la región.

3.1.2 Antecedentes nacionales

- a) Bustamante (2024), en su trabajo “Determinación del comportamiento estructural del pavimento flexible de la carretera Cajamarca-San Marcos; tramo Iscocongá (Plaza Pecuaria)- Llacanora”, fue una tesis de investigación desarrollada en la Universidad de Cajamarca, Perú. La investigación tuvo un enfoque de tipo cuantitativo y se utilizó un diseño no experimental con enfoque transversal.

El objetivo general de la tesis fue determinar el comportamiento estructural del pavimento flexible del tramo Iscocongá (Plaza Pecuaria)- Llacanora, mediante el análisis deflectométrico. Los objetivos específicos de la investigación fueron: (a) Describir las características físicas y geográficas del tramo de la carretera, (b) Calcular el Índice Medio Diario Anual (IMDA) en el tramo de estudio, (c) Medir y analizar las deflexiones del pavimento, y (d) Describir las estrategias de mantenimiento preventivo y correctivo del pavimento flexible en el tramo Iscocongá (Plaza Pecuaria)- Llacanora.

Las conclusiones principales indicaron que el pavimento flexible en el tramo estudiado presentó un comportamiento estructural de calidad regular. Se identificaron cinco tramos críticos que requirieron intervención inmediata, entre los puntos Km 0+225 m a Km 0+350 m, Km 0+950 m a Km 1+075 m, Km 1+725 m a Km 1+775 m, Km 2+275 m a Km 2+375 m, y de Km 3+475 m a Km 3+600 m. El análisis reveló que la deflexión promedio en el tramo fue de 65.68×10^{-2} mm, lo que superó la deflexión admisible de 60.34×10^{-2} mm, señalando la deficiencia de la subrasante. Asimismo, se identificaron medidas correctivas y preventivas para asegurar la integridad del pavimento, tales como reparación de baches, fresado, recapeo y monitoreo regular.

- b) Mendoza y Quispe (2022), en su trabajo “Análisis del comportamiento en la subrasante de un pavimento flexible convencional, red vial San Juan del Oro – Quispicanchis, Puno”, fue una tesis de investigación aplicada, con un diseño



preexperimental. La población estuvo constituida por el tramo San Juan del Oro a Quispicanchis, y la muestra se centró en dicho tramo de la vía. Se utilizaron técnicas e instrumentos de recolección de datos como ensayos de laboratorio para determinar las propiedades físicas y mecánicas del suelo, incluyendo el índice plástico y la capacidad de soporte, así como el CBR, (California Bearing Ratio).

El objetivo general de la investigación fue analizar el comportamiento de la subrasante del pavimento flexible convencional en el tramo San Juan del Oro – Quispicanchis. Los objetivos específicos fueron: (a) Determinar las características geotécnicas de la subrasante, (b) Evaluar las propiedades físicas y mecánicas del suelo, (c) Analizar los factores externos que afectan al pavimento y encontrar las causas del deterioro del pavimento en el tramo de estudio.

Las principales conclusiones de la investigación fueron las siguientes: La subrasante cumplió con los requisitos normativos de capacidad de soporte, pero la humedad excesiva y el tráfico continuo generaron fallas en el pavimento flexible. Se encontró que el índice de plasticidad fue de 9.5%, lo que clasificó el suelo como arcilloso de mediana plasticidad, y el CBR promedio fue de 20%. A pesar de que los resultados fueron adecuados en laboratorio, el CBR in situ fue inferior debido a la alta humedad en algunas zonas. Se recomendó estabilizar la subrasante con cal y cemento en puntos críticos y se propuso un diseño de pavimento con espesores adecuados utilizando el método AASHTO 93.

Los resultados obtenidos en cuanto a los valores del CBR y las recomendaciones para estabilización del suelo me fueron útiles para mi trabajo, ya que proporcionaron una base para entender cómo las propiedades de la subrasante influyeron en la durabilidad de los pavimentos. Además, la propuesta del método AASHTO 93 para el diseño de pavimentos me sirvió como referencia para mi propio diseño de pavimentos en áreas con condiciones similares de humedad y tráfico.



- c) Leiva (2022), en su trabajo “Determinación del método más frecuente para el diseño de pavimentos flexibles según los diferentes parámetros de diseño a partir de estudios realizados en Perú-Cajamarca 2022”, fue una investigación no experimental de corte transversal. Se analizaron 30 investigaciones de universidades peruanas sobre los métodos de diseño más utilizados para pavimentación flexible. Para la recolección de datos, se emplearon fichas resumen en las cuales se registraron los datos generales de cada investigación, lo que permitió un análisis comparativo de los métodos de diseño utilizados.

El objetivo general de la investigación fue determinar el método más frecuente para el diseño de pavimentos flexibles según los diferentes parámetros de diseño en base a estudios realizados en Perú. Los objetivos específicos fueron: (a) Analizar los métodos de diseño más utilizados para pavimentos flexibles, (b) Comparar los diferentes parámetros de diseño, antigüedad y espesor de las secciones estructurales, (c) Describir los métodos más comunes y presentar un manual con el método más utilizado.

Las principales conclusiones fueron que el método AASHTO-93 fue el más utilizado para el diseño de pavimentos flexibles, seguido por el método del Instituto del Asfalto, el método racional, el método español MOPU y el método del Instituto de la Ingeniería de la UNAM. Se destacó la relevancia de los parámetros de diseño como el espesor de la sección estructural y la antigüedad en las metodologías. Además, se subrayó la necesidad de ampliar el periodo de estudio para obtener una visión más completa sobre las tendencias en el diseño de pavimentos flexibles en Perú.

Esta investigación se relacionó con mi trabajo sobre el diseño de pavimentos flexibles, ya que ambos abordaron los métodos más frecuentes para el diseño de pavimentos en base a parámetros específicos. La metodología AASHTO-93, que fue la más prevalente en este estudio, se ajustó a mi investigación, ya que también se enfocó en el uso de este método en el diseño de pavimentos. Además, los resultados obtenidos sobre el espesor de la sección estructural y las características de la subrasante fueron útiles para el análisis comparativo en mi

investigación, permitiendo una mejor comprensión de las variables que afectaron el diseño de pavimentos en la región.

- d) Carhuapoma y Tito (2021), en su trabajo “Propuesta de mejora del comportamiento mecánico de Pavimentos Flexibles mediante la aplicación de polvo de fibra de vidrio reciclado sobre subrasante arcillosa de baja plasticidad aplicada al tramo I de la carretera Rodríguez de Mendoza, Amazonas – Perú”, presentaron una investigación aplicada con un enfoque experimental. La población estuvo constituida por el suelo arcilloso de baja plasticidad de la subrasante del tramo I de la carretera Rodríguez de Mendoza, y la muestra consiste en las muestras de suelo estabilizadas con polvo de fibra de vidrio reciclado. Las técnicas de recolección de datos empleadas fueron los ensayos de laboratorio como el Proctor modificado y el ensayo CBR, complementados con un análisis mecánico utilizando el software 3D Move para simular el comportamiento de las capas del pavimento.

El objetivo general de la investigación fue desarrollar una mejora del comportamiento mecánico del pavimento flexible mediante la estabilización de la subrasante con polvo de fibra de vidrio reciclado. Los objetivos específicos fueron: (a) Establecer el tipo de suelo de la subrasante del tramo I de la carretera Rodríguez de Mendoza, Amazonas. (b) Determinar el comportamiento mecánico del suelo estabilizado con polvo de fibra de vidrio reciclado en comparación con el suelo no estabilizado.

Entre las principales conclusiones obtenidas, destacaron que la adición de polvo de fibra de vidrio reciclado mejora significativamente las propiedades mecánicas del suelo arcilloso de baja plasticidad, aumentando su capacidad portante (CBR) y densidad. Los diseños de pavimento flexible con la subrasante estabilizada mostraron una reducción en los espesores de las capas en comparación con el diseño tradicional. Además, el análisis mecánico realizado con el software 3D Move confirmó que el pavimento con subrasante estabilizada con polvo de fibra de vidrio fue capaz de resistir las cargas aplicadas sin fallas por fatiga o ahuellamiento.



3.2 Marco teórico

3.2.1 Subsistencia en pavimentos flexibles

La subsidencia es el fenómeno geotécnico que ocurre cuando una porción del terreno o estructura se hunde de forma vertical debido a la pérdida de soporte en las capas de suelo subyacentes. En pavimentos flexibles, este fenómeno se refiere a la deformación o hundimiento de la superficie del pavimento causado por el debilitamiento, compactación insuficiente, o alteración de las propiedades mecánicas de la subrasante o de las capas de base y subbase, afectando así la estabilidad del pavimento, Galeana et al. (2022).

La subsidencia en pavimentos flexibles es el desplazamiento vertical de las capas del pavimento hacia abajo debido a la incapacidad de las capas de soporte (como la subrasante) para resistir las cargas aplicadas. Este fenómeno puede ser causado por la erosión, la humedad excesiva, la compactación inadecuada del suelo o la interacción con las cargas del tráfico, lo que provoca que el pavimento pierda su nivel y funcionalidad, ocasionando deformaciones y daños visibles como baches y grietas, Jaime et al. (2022).

La subsidencia es un fenómeno geológico que, aunque generalmente no causa víctimas mortales, puede generar daños materiales significativos. Este proceso de hundimiento o deformación del terreno tiene una gran relevancia en áreas urbanas, donde los efectos pueden ser extensos, afectando negativamente estructuras como edificaciones, infraestructuras, canales, conducciones y vías de comunicación. En estos contextos, la subsidencia presenta un riesgo considerable para las construcciones que se encuentran asentadas sobre terrenos propensos a este tipo de deformaciones, Tomás et al. (2025, p. 2).





NOTA

La imagen mostró un caso severo de subsidencia localizada en un pavimento flexible, evidenciada por el colapso estructural de la superficie asfáltica y la formación de una cavidad subterránea. Este tipo de falla ocurre cuando el suelo de subrasante pierde soporte, generalmente por erosión interna, disolución de materiales calizos, infiltración de agua o lavado de finos, lo que genera vacíos que progresivamente comprometen la estabilidad del pavimento.

FUENTE: López, 2021

Figura 1 — Subsidencia de pavimento

3.2.2 Tipos de subsidencia

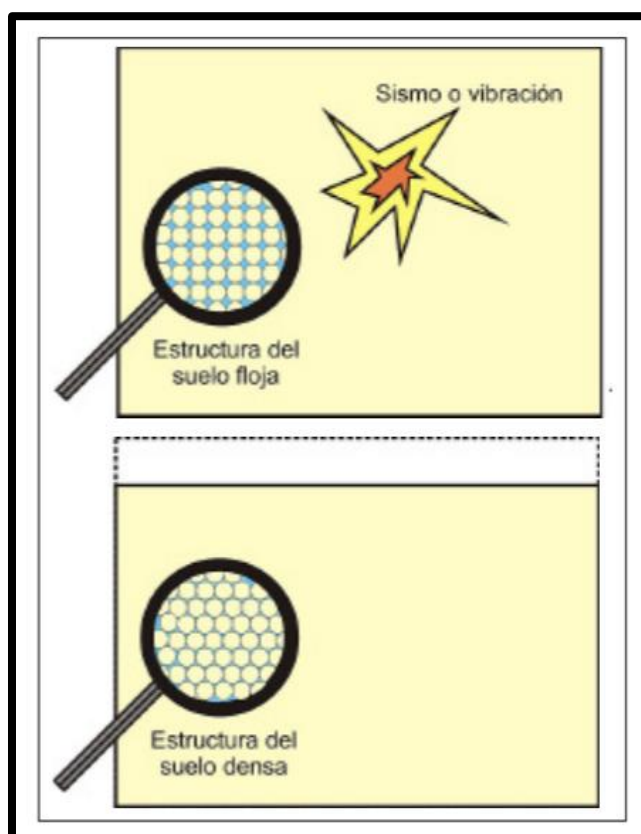
- Subsidencia natural: Se produce como resultado de procesos geológicos naturales. Esta subsidencia es común en áreas donde el terreno está compuesto por suelos blandos o materiales orgánicos que se comprimen con el tiempo, o en regiones donde existen cavernas subterráneas que colapsan. En estos casos, la subsidencia es un proceso gradual y generalmente más predecible, Tomás et.al. (2025).
- Subsidencia antropogénica: Es causada por actividades humanas, como la extracción de recursos minerales o acuíferos, la construcción de grandes infraestructuras o el uso de terrenos para actividades agrícolas intensivas. Este tipo de subsidencia es más abrupto y puede provocar alteraciones significativas

en la superficie terrestre, afectando tanto a las edificaciones como a las infraestructuras existentes, Tomás et.al. (2025).

- Subsistencia por comportamiento del suelo: Este tipo ocurre debido a la alteración de las propiedades del suelo, como el colapso de suelos arcillosos o la compactación de suelos arenosos. Los cambios en la humedad, la carga o las condiciones climáticas pueden inducir este tipo de subsistencia, que puede ser más local o estacional, Tomás et.al. (2025).

Tabla 2 — Tipos de subsistencia

Por disolución subterránea	En sal
	En yeso
	En rocas carbonáticas
Por construcción de obras subterráneas o galerías mineras	
Por erosión subterránea (tubificación o <i>piping</i>)	
Por flujo lateral	Rocas salinas
	Arcillas
Por compactación	Por carga
	Por drenaje
	Por vibración
	Por extracción de fluidos
	Por hidrocompactación
Tectónica	
NOTA La tabla resume los principales tipos de subsistencia según su origen: disolución de materiales solubles (sal, yeso y rocas carbonáticas), erosión interna o <i>piping</i>, excavaciones subterráneas, flujo lateral de suelos débiles y procesos de compactación inducidos. Estos mecanismos explican cómo la pérdida de soporte en el suelo puede generar hundimientos en infraestructuras como pavimentos, especialmente en zonas con suelos calizos erosionables. FUENTE: Tomás et al., 2025, p. 3	

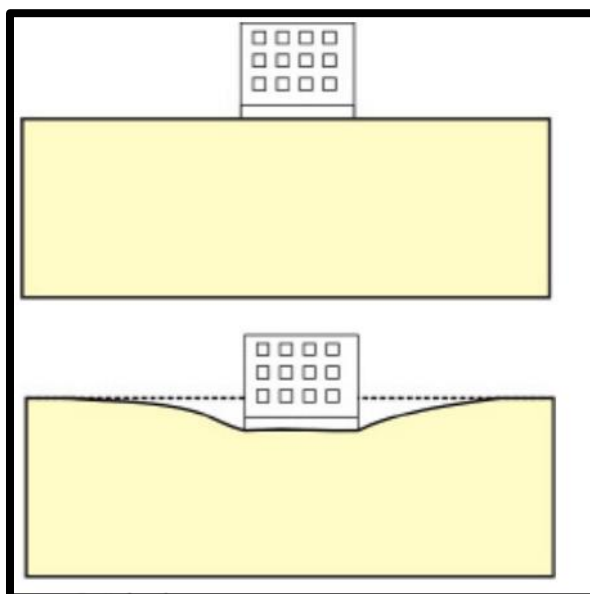


NOTA

La figura ilustra cómo la estructura del suelo influye en su comportamiento frente a sismos o vibraciones. Los suelos con estructura floja son más susceptibles a procesos de compactación súbita, asentamientos o subsidencia, mientras que los suelos con estructura densa presentan mayor estabilidad y menor deformación ante cargas dinámicas.

FUENTE: Tomás et al., 2025, p. 4

Figura 2 — Subsidencia por vibraciones

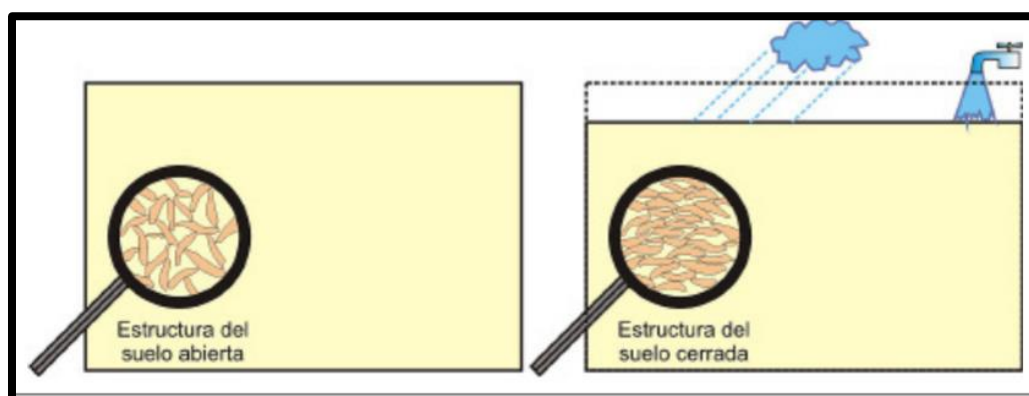


NOTA

La figura mostró el proceso de subsidencia por carga, donde el peso de una estructura genera la deformación progresiva del suelo subyacente. Cuando el terreno posee baja capacidad portante o presenta un estado de consolidación incompleto, la carga aplicada produce asentamientos diferenciales que afectan la estabilidad superficial.

FUENTE: Tomás et al., 2025, p. 4

Figura 3 — Subsidencia por carga



NOTA

La figura ilustra la subsidencia por hidrocompactación, donde la infiltración de agua provoca el colapso de una estructura de suelo inicialmente abierta, generando una configuración más densa y ocasionando asentamientos.

FUENTE: Tomás et al., 2025, p. 5

Figura 4 — Subsidencia por hidrocompactación

3.2.3 Pavimentos flexibles

Un pavimento flexible es un tipo de pavimentación que consiste en una estructura de capas de materiales que se distribuyen sobre el terreno natural o subrasante. Estas capas están diseñadas para deformarse de manera elástica bajo el tráfico, lo que permite que las cargas se transmitan gradualmente hacia capas inferiores sin causar daños permanentes. Los pavimentos flexibles generalmente están compuestos por una capa superior de asfalto o mezcla bituminosa, una base granular y una subbase que actúa como soporte estructural adicional, (MTC, 2008).

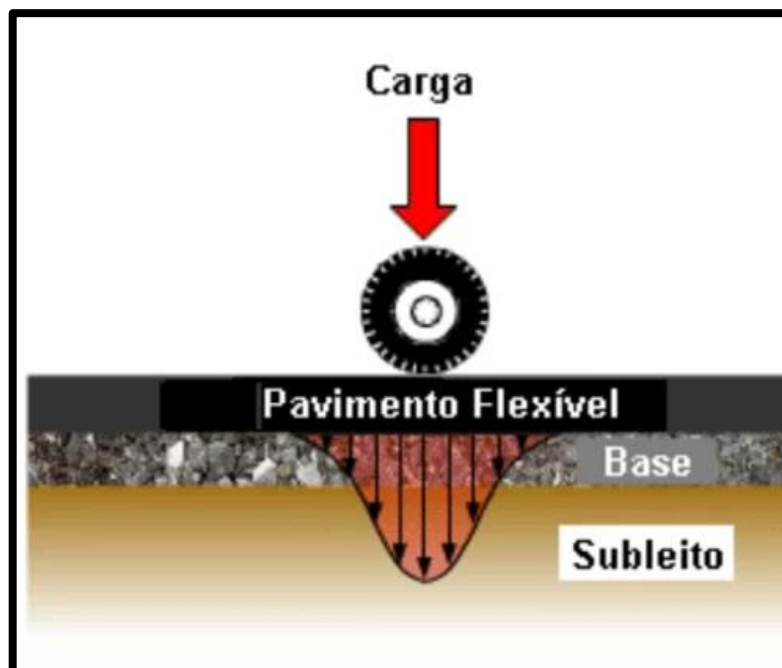
El pavimento flexible es un sistema de pavimentación utilizado principalmente en la construcción de carreteras y caminos, que se caracteriza por su capacidad para adaptarse a las cargas dinámicas del tráfico. Esta adaptación se logra a través de la deformación de sus capas, las cuales están compuestas principalmente por mezclas asfálticas o bituminosas. La flexibilidad del pavimento permite que se distribuya uniformemente el peso de los vehículos a lo largo de la estructura, minimizando los efectos de fatiga y desgaste en su superficie, lo que reduce la necesidad de reparaciones frecuentes, (Fonseca, 1998).

Los pavimentos flexibles son aquellos cuya estructura es capaz de distribuir las cargas aplicadas a través de las capas que los componen, y que se adaptan a las deformaciones del terreno subyacente sin sufrir daños permanentes. El comportamiento de los pavimentos flexibles depende de varios factores relacionados con el diseño, el material utilizado y las condiciones del terreno, (Rico, Téllez y Garnica, 1998).

3.2.3.1 Comportamiento de los pavimentos flexibles

El comportamiento de los pavimentos flexibles está determinado por su capacidad para distribuir las cargas vehiculares a través de sus diferentes capas, principalmente la capa de rodadura, base y subbase, lo que ayuda a minimizar las tensiones sobre la subrasante. Estos pavimentos son elásticos, permitiendo que las capas superiores se deformen bajo el paso del tráfico y luego se recuperen, asegurando durabilidad.





NOTA

La figura mostró cómo las cargas aplicadas por el tránsito se distribuyen gradualmente a través del pavimento flexible, transmitiéndose hacia la base. La amplitud de la zona de influencia aumenta con la profundidad, destacando la importancia del soporte proporcionado por las capas inferiores.

FUENTE: Araújo, 2016

Figura 5 — Representación de las cargas en pavimentos

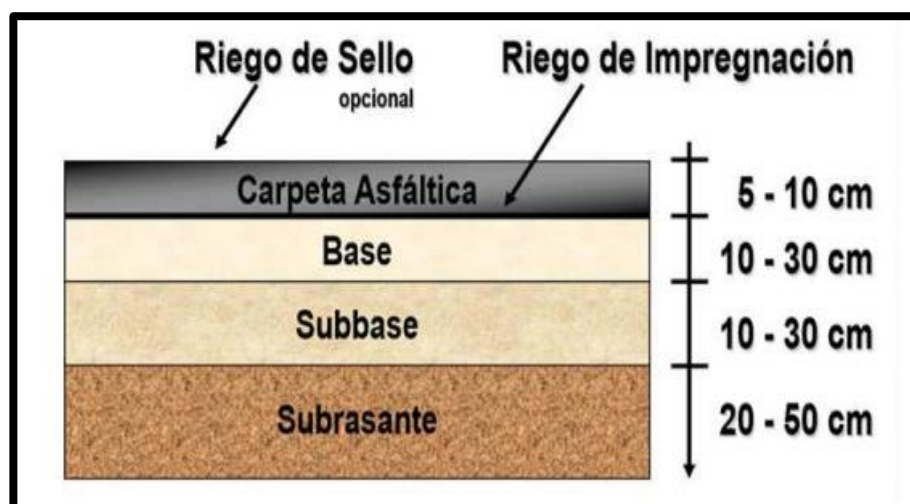
La calidad de la subrasante es fundamental, ya que un suelo mal compactado puede comprometer el rendimiento del pavimento. Además, factores como la humedad, temperatura y el tráfico constante influyen en el comportamiento a largo plazo, pudiendo causar deformaciones o grietas si no se realiza un mantenimiento adecuado, (Rico, Téllez y Garnica, 1998).

3.2.3.2 Estructura de los pavimentos

- **Capa de rodadura:** Es la capa superior del pavimento, encargada de proporcionar una superficie de rodadura que resista el desgaste y las tensiones provocadas por el tráfico vehicular. Esta capa está diseñada para ser duradera, ofreciendo una superficie antideslizante y resistente a las condiciones climáticas adversas, como la humedad, las heladas y el calor intenso. Generalmente está hecha de mezcla asfáltica, que proporciona la flexibilidad y adherencia necesarias, (Capufe, 2024).

- **Capa base:** Situada justo debajo de la capa de rodadura, la capa base juega un papel fundamental en la distribución de las cargas que se generan durante el paso de los vehículos. Está formada por materiales granulares como grava, arena o una mezcla de estos, los cuales ofrecen una buena capacidad de soporte y resistencia estructural. Esta capa también debe ser compactada adecuadamente para evitar asentamientos y deformaciones que afecten la estabilidad del pavimento, (Rico, Téllez y Garnica, 1998).
- **Capa subbase:** A continuación de la capa base, la subbase actúa como una capa intermedia que ayuda a distribuir las cargas a la subrasante. Su función principal es mejorar la estabilidad general del pavimento, especialmente en suelos inestables o con baja capacidad de carga. Los materiales utilizados para la subbase suelen ser granulados, pero en algunas ocasiones se pueden usar materiales reciclados. Esta capa también contribuye a prevenir la aparición de grietas o deformaciones en las capas superiores debido a los movimientos del terreno, (Rico, Téllez y Garnica, 1998).
- **Subrasante:** La subrasante es el suelo natural sobre el que se construye el pavimento. Su calidad y propiedades son cruciales para el rendimiento general de la estructura, ya que una subrasante débil puede provocar hundimientos, deformaciones o agrietamientos en el pavimento. La capacidad de carga de la subrasante se determina a través de pruebas geotécnicas que permiten evaluar su comportamiento frente a las cargas aplicadas. Si la subrasante presenta características no óptimas, es posible estabilizarla mediante el uso de aditivos como cal, cemento, o materiales reciclados, (Rico, Téllez y Garnica, 1998).





NOTA

El esquema presenta el corte transversal de un pavimento flexible, mostrando la secuencia y espesor típico de sus capas: carpeta asfáltica, base, subbase y subrasante. Cada estrato cumple una función estructural específica en la distribución de cargas y en la durabilidad del pavimento.

FUENTE: Giordani y Leone, 2023, p. 3

Figura 6 — Corte transversal pavimento flexible

3.2.3.3 Funciones de la capa asfáltica

- **Función estructural:** La capa asfáltica debe ser diseñada y construida para resistir los efectos de la fatiga y la acumulación de deformaciones permanentes que resultan de las cargas cíclicas de los vehículos que transitan sobre ella. Además, debe tener la capacidad de soportar las variaciones climáticas, manteniendo su integridad y estabilidad durante el tiempo.
- **Función funcional:** Esta capa es la que recibe directamente las cargas generadas por el tránsito vehicular. Por lo tanto, su diseño debe garantizar que los vehículos puedan circular de manera cómoda y segura, proporcionando una superficie de rodadura adecuada que facilite el desplazamiento durante toda la vida útil del pavimento (serviciabilidad).
- **Función de impermeabilización:** La capa asfáltica también actúa como una barrera contra la penetración del agua hacia las capas inferiores del pavimento. Al evitar que el agua llegue a las capas

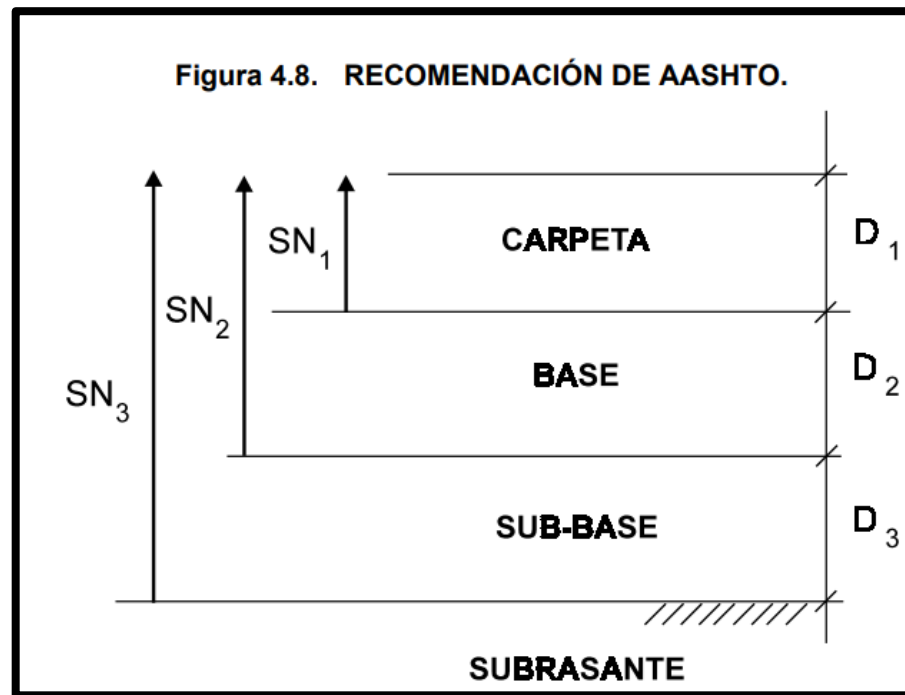
subyacentes, contribuye a mantener la resistencia al corte, evitando la pérdida de capacidad estructural y previniendo daños por la saturación o erosión de los materiales.

3.2.3.4 Diseño de pavimentos flexibles

El diseño de pavimentos flexibles es un proceso técnico que busca determinar las características y espesor adecuado de las diferentes capas que conforman el pavimento, con el fin de asegurar su estabilidad, funcionalidad y durabilidad a lo largo del tiempo, considerando las condiciones del suelo subyacente y las cargas vehiculares a las que estará expuesto. Este tipo de pavimento, que se caracteriza por su capacidad para distribuir las cargas de manera flexible a través de sus capas, es utilizado comúnmente en carreteras, calles urbanas y otras infraestructuras viales, (Rico, Téllez y Garnica, 1998).

Para llevar a cabo el diseño, se deben considerar diversos factores, entre los cuales destacan el comportamiento mecánico de los materiales de las capas, las condiciones climáticas del área, el tipo de tráfico vehicular, y las propiedades del suelo sobre el cual se construirá el pavimento. Las normas técnicas y métodos de diseño, como el Método de la AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials), proporcionan guías para calcular el espesor y la composición de cada capa. Estas normas se basan en la capacidad de carga del suelo, el tráfico esperado (expresado generalmente en Ejes Carga Equivalente o ECA) y las condiciones de durabilidad de los materiales.





NOTA

La figura representa la estructura del pavimento flexible según las recomendaciones de AASHTO, mostrando los espesores estructurales (D_1 , D_2 , D_3) y los números estructurales parciales (SN_1 , SN_2 , SN_3) que contribuyen al número estructural total del diseño. Cada capa aporta una capacidad específica en la distribución de cargas hacia la subrasante.

FUENTE: Rico, Téllez y Garnica, 1998

Figura 7 — Diseño de la estructura de pavimento

3.2.3.5 Pavimento bicapa

Es un tipo de pavimento flexible que consta de dos capas asfálticas superpuestas:

Una capa de rodadura (carpeta asfáltica superior), que está en contacto directo con los vehículos y resiste la fricción, el desgaste y la intemperie.

Una capa intermedia (binder o base asfáltica), que tiene mayor espesor y está diseñada para resistir y distribuir las cargas de tránsito hacia la base granular, (Guzman, 2012).

El pavimento flexible bicapa es una solución estructural dentro de los sistemas de pavimentación flexible, caracterizada por la presencia de dos

capas asfálticas superpuestas, colocadas sobre una base granular o subbase. Este diseño se utiliza ampliamente en carreteras de tránsito medio y alto, debido a que proporciona un mejor comportamiento mecánico frente a las cargas repetitivas del tránsito, prolongando la vida útil del pavimento en comparación con un pavimento monocapa, (Martinez, 2020).

3.2.3.6 Comportamiento de pavimentos a largo plazo

El comportamiento de los pavimentos a largo plazo está íntimamente relacionado con las características y el comportamiento de los suelos subyacentes. Las fallas en los suelos son una de las principales causas de deterioro en pavimentos flexibles, ya que las alteraciones en las propiedades del suelo pueden provocar deformaciones y fallas estructurales en el pavimento. Estos problemas a largo plazo pueden tener un impacto significativo en la estabilidad y la funcionalidad de la infraestructura vial, (Rico, Téllez y Garnica, 1998, p. 111).

Las deformaciones permanentes o asentamientos en los suelos son una causa común de fallas en pavimentos flexibles. Si el suelo subyacente no tiene la capacidad adecuada para soportar las cargas vehiculares a lo largo del tiempo, se produce una subsidence o hundimiento progresivo del pavimento. Este fenómeno es especialmente crítico en suelos no cohesionados, como los suelos arcillosos o suelos calizos erosionables, que son susceptibles a cambios en su volumen debido a factores como la humedad, las cargas repetitivas y las variaciones térmicas, (Vergara, 2010).

3.2.4 Suelos

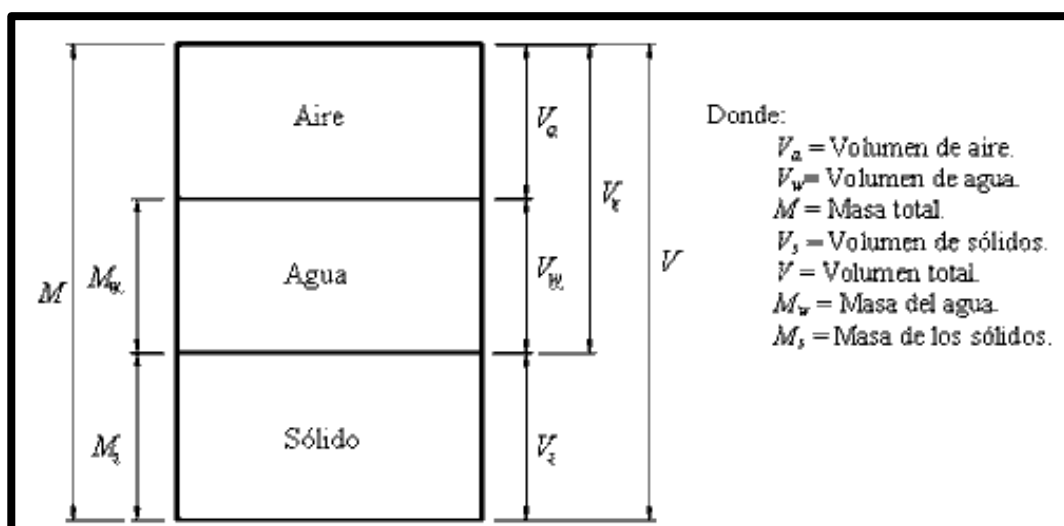
La mecánica de suelos es una rama de la ingeniería geotécnica que se enfoca en el estudio del comportamiento de los suelos bajo diversas condiciones de carga y otros factores externos. El comportamiento de los suelos es esencial para entender cómo interactúan con las estructuras construidas sobre ellos, como pavimentos, cimentaciones, y otras infraestructuras. Los suelos son el medio sobre el cual descansan estos elementos y su capacidad para soportar cargas y resistir deformaciones es fundamental para la estabilidad de cualquier construcción, (Villalobos, 2016).



3.2.4.1 Clasificación de los suelos

En la mecánica de suelos, se clasifica a los suelos según su comportamiento físico y mecánico, lo que permite predecir su respuesta a diferentes tipos de cargas. Esta clasificación es clave para los diseños de pavimentos y estructuras que dependen del tipo de suelo presente en el sitio, (Villalobos, 2016).

- **Suelos granulares:** Son suelos que contienen partículas gruesas, como arena y grava. Tienen alta permeabilidad, lo que les permite drenar el agua fácilmente, lo que los hace más estables para la construcción de pavimentos. Los suelos granulares tienen una buena capacidad de carga y son menos susceptibles a la expansión y contracción debido a la humedad, lo que los hace ideales para el diseño de pavimentos flexibles, (Lambe y Whitman, 2004).
- **Suelos cohesivos:** Están formados principalmente por partículas finas como arcilla y limo. Estos suelos tienen una mayor susceptibilidad a la compresión y pueden experimentar un comportamiento expansivo cuando se mojan y se secan. La mecánica de suelos estudia cómo la cohesión entre las partículas de estos suelos influye en su resistencia y comportamiento bajo carga. Los suelos cohesivos son más susceptibles a la subsidencia y los asentamientos a largo plazo, lo que puede afectar la integridad de los pavimentos, (Villalobos, 2016).
- **Suelos mixtos:** Contienen una mezcla de partículas gruesas y finas. Su comportamiento depende de la proporción de los diferentes tipos de partículas. Pueden presentar características intermedias entre los suelos granulares y cohesivos, lo que hace que su comportamiento bajo carga sea más complejo y variable. En la mecánica de suelos, es fundamental evaluar cómo la combinación de partículas afecta la estabilidad y la capacidad de carga del suelo, (Villalobos, 2016).



NOTA

La figura representa el modelo de fases del suelo, conformado por aire, agua y sólidos. Se ilustran los volúmenes y masas asociados a cada fase, fundamentales para definir propiedades índices como humedad, porosidad y grado de saturación.

FUENTE: Villalobos, 2016

Figura 8 — Fases del suelo

3.2.5 Erosión de los suelos

Bowles (1981), La erosión del suelo es el proceso de desgaste y desplazamiento de las partículas del suelo debido a la acción de factores naturales como el agua, el viento y las actividades humanas. Este fenómeno afecta principalmente a los suelos no protegidos, donde la capa superficial rica en nutrientes y compuesta por partículas finas es removida, reduciendo la capacidad del suelo para soportar estructuras y vegetación. En la ingeniería civil, la erosión de suelos es un aspecto crítico a considerar, especialmente cuando se diseñan pavimentos y otras infraestructuras que dependen de la estabilidad y capacidad de carga del suelo subyacente.

3.2.5.1 Causas de la erosión de los suelos

- a) **Acción del agua:** La lluvia intensa y el escurrimiento superficial son las principales causas de la erosión hídrica, que se produce cuando el agua remueve las partículas del suelo. Este proceso es particularmente grave en áreas con pendientes pronunciadas, donde el agua de lluvia fluye rápidamente, llevando consigo el suelo suelto y exponiendo las capas más profundas. En pavimentos flexibles, la erosión puede afectar la base y subbase, debilitando la estructura del pavimento, (Norma E 0.50, 2020).

- b) **Viento:** En regiones áridas o semiáridas, el viento puede ser una causa importante de erosión, especialmente cuando el suelo está desprotegido por vegetación. La erosión eólica puede remover grandes cantidades de partículas finas, alterando la estabilidad de los suelos. En el diseño de pavimentos, la erosión del suelo debido al viento puede comprometer la integridad de la fundación del pavimento, especialmente en suelos arenosos o granulares, (Norma E 0.50, 2020).
- c) **Actividades humanas:** La deforestación, la urbanización y la agricultura mal manejada son actividades humanas que exacerban la erosión del suelo. La construcción de infraestructuras como pavimentos sin un adecuado control de escurrimientos o sin medidas de protección del suelo puede aumentar la susceptibilidad al desgaste y pérdida de la capa superficial del suelo, (Norma E 0.50, 2020).

3.2.5.2 Impacto de la erosión en el diseño de pavimentos

La erosión del suelo puede tener efectos significativos en la durabilidad y desempeño de los pavimentos. En suelos erosionados, las capas de soporte, como la subbase y la base del pavimento, pueden perder su estabilidad, lo que lleva a la deformación del pavimento, agrietamiento y, en casos extremos, al hundimiento o desplazamiento de las estructuras. La pérdida de material en la zona de contacto entre el suelo y el pavimento genera un cambio en las propiedades del suelo, lo que puede causar subsidencia y afectaciones a largo plazo, (MTC, 2014).

Además, la erosión puede modificar la capacidad de carga del suelo, lo que afecta la distribución de cargas y puede generar una mayor presión sobre las capas de pavimento, contribuyendo a su fallo prematuro. Es crucial considerar este factor durante el diseño, mediante el uso de técnicas de estabilización del suelo, protección contra el escurrimiento superficial y mejoramiento de las características del suelo para evitar que la erosión cause daños a la estructura del pavimento, (AASHTO, 1997).



3.2.6 Asentamiento

El asentamiento de carreteras es el proceso por el cual la superficie de la carretera se desplaza verticalmente hacia abajo debido a la deformación o compresión de las capas de suelo y materiales subyacentes. Este fenómeno es común en áreas donde el terreno no ha sido adecuadamente compactado o estabilizado, o cuando las cargas vehiculares superan la capacidad de carga del suelo subyacente. Los asentamientos pueden ocurrir de manera uniforme o desigual, lo que puede llevar a la formación de baches, grietas y otras deformaciones que afectan la calidad de la carretera y la seguridad vial, (Das, 2013).

3.2.6.1 Causas del asentamiento de carreteras

- a) **Compresión de suelos blandos o arcillosos:** Los suelos con alta plasticidad o suelos arcillosos son susceptibles a sufrir asentamientos debido a su alta compresibilidad cuando se aplican cargas repetidas. Estos suelos tienden a cambiar de volumen cuando absorben agua, lo que puede provocar el hundimiento de las capas superiores del pavimento.
- b) **Efectos de cargas cíclicas:** El paso constante de vehículos, especialmente los pesados, puede inducir un asentamiento progresivo en las capas inferiores de la carretera. La carga dinámica producida por los vehículos genera deformaciones acumulativas a lo largo del tiempo.
- c) **Presión de agua en el suelo:** La infiltración de agua en el suelo bajo la carretera puede reducir la resistencia y cohesión de las capas subyacentes, contribuyendo al asentamiento. En suelos con baja permeabilidad, el agua se acumula, creando condiciones ideales para el asentamiento.
- d) **Deficiencias en el diseño y construcción:** La falta de un adecuado análisis geotécnico, la elección incorrecta de materiales para las capas subyacentes, o la insuficiente compactación de los suelos durante la construcción pueden ser causas importantes de los asentamientos. El

diseño inadecuado de la infraestructura también puede contribuir a la distribución desigual de las cargas y al asentamiento no uniforme.

- e) **Cambios en la temperatura y humedad:** Las variaciones de temperatura y humedad afectan las propiedades de los suelos, especialmente en suelos arcillosos, provocando expansiones y contracciones que pueden contribuir al asentamiento, (Rondón y Reyes, 2022).

3.2.7 Mecánica de suelos en pavimentos

Villalobos (2016) en su trabajo de la mecánica de suelos en pavimentos fue una disciplina fundamental en la ingeniería civil que se ocupó de estudiar las propiedades físicas y mecánicas de los suelos para diseñar y construir pavimentos que fueron funcionales, duraderos y seguros. Los pavimentos deben soportar diversas cargas dinámicas y estáticas provenientes del tráfico vehicular, así como las condiciones climáticas y geotécnicas del lugar donde se construyen. Para garantizar el comportamiento adecuado de un pavimento, es necesario entender cómo interactúan los suelos con las capas del pavimento y cómo los diferentes tipos de suelo afectan su rendimiento.

3.2.8 Ensayos de mecánica de suelos

3.2.8.1 Análisis granulométrico

El análisis granulométrico es una técnica utilizada para determinar la distribución de tamaños de partículas en una muestra de suelo. Este ensayo permite clasificar el suelo según su tamaño, separando las partículas en diferentes franjas de grano (arena, limo, arcilla, etc.). La distribución de partículas influye directamente en la capacidad de carga del suelo, la compacidad y la permeabilidad, elementos fundamentales en el diseño de pavimentos. Los resultados de este análisis se utilizan para definir la idoneidad del suelo para su uso como base o subbase en pavimentos, así como para la clasificación de suelos en función de su granulometría, (MTC - Manual de ensayos de materiales, 2016).



3.2.8.2 Contenido de humedad

El contenido de humedad en un suelo se refiere a la cantidad de agua presente en una muestra de suelo, expresada como un porcentaje del peso del suelo seco. Este valor es crucial en los estudios de mecánica de suelos porque afecta la densidad y la compacidad del suelo, factores clave para la estabilidad de los pavimentos. Un contenido de humedad muy alto o muy bajo puede comprometer la resistencia y durabilidad de la estructura del pavimento, por lo que es necesario determinarlo adecuadamente para ajustar el proceso de construcción, (MTC - Manual de ensayos de materiales, 2016).

3.2.8.3 Límite líquido

El límite líquido es el contenido de agua en un suelo en el cual este cambia de un estado plástico a un estado líquido. Se determina mediante un ensayo en el que se observa la fluidez del suelo bajo condiciones controladas. Este límite es importante porque indica la plasticidad del suelo, es decir, su capacidad para deformarse sin romperse. Suelos con un límite líquido elevado suelen tener una alta plasticidad, lo que puede dificultar su comportamiento como material para pavimentos debido a su propensión a la deformación bajo cargas repetidas, (MTC - Manual de ensayos de materiales, 2016).

3.2.8.4 Límite plástico

El límite plástico es el contenido de agua en el que el suelo pasa de un estado semisólido a un estado plástico, donde aún puede ser moldeado sin que se rompa. Este parámetro es importante porque junto con el límite líquido se utiliza para calcular el índice de plasticidad, que indica la variabilidad del comportamiento del suelo bajo diferentes contenidos de agua. Un alto índice de plasticidad puede afectar negativamente la estabilidad del pavimento, especialmente en suelos arcillosos, que tienden a presentar problemas de expansión y contracción con los cambios de humedad, (MTC - Manual de ensayos de materiales, 2016).

3.2.8.5 Proctor modificado

El ensayo de Proctor modificado es utilizado para determinar la relación entre la humedad y la densidad del suelo durante el proceso de compactación. En este ensayo, el suelo es compactado bajo condiciones más severas que en el ensayo Proctor estándar, utilizando un mayor peso de caída y un mayor número de golpes. Este ensayo es particularmente útil para suelos que se utilizarán en la construcción de pavimentos, ya que permite determinar la densidad máxima que puede alcanzar un suelo bajo las condiciones de compactación específicas, lo cual influye directamente en la resistencia y durabilidad del pavimento, (MTC - Manual de ensayos de materiales, 2016).

3.2.8.6 Ensayo de pérdida de masa por erosión (PME)

Es un método utilizado para evaluar la susceptibilidad de los suelos, especialmente los suelos calizos y erosionables, a la pérdida de material debido a procesos de erosión, ya sea por acción del agua, viento u otras formas de intemperismo. Este ensayo es relevante en el estudio de **subsistencia en pavimentos flexibles** sobre suelos calizos, ya que la erosión puede generar una pérdida significativa de material en las capas superficiales del suelo, afectando directamente la estabilidad y resistencia del pavimento, (MTC - Manual de ensayos de materiales, 2016).

3.2.8.7 CBR (California Bearing Ratio)

El ensayo de CBR mide la resistencia de un suelo a la penetración de un pistón estándar, lo que permite evaluar su capacidad de carga y su idoneidad para servir como material para la subrasante o base de pavimentos. Este ensayo es crucial para el diseño de pavimentos, ya que proporciona datos sobre la capacidad del suelo para resistir las cargas repetidas del tráfico vehicular. Un CBR bajo indica que el suelo no es adecuado como base, mientras que un CBR alto indica una buena capacidad de carga, (MTC, 2014).



3.3 Marco conceptual

a) Suelos calizos

Son aquellos suelos constituidos principalmente por carbonato de calcio (CaCO_3), producto de la descomposición de rocas calcáreas. Se caracterizan por ser altamente solubles en presencia de agua, lo que los hace susceptibles a procesos de disolución y erosión interna. En zonas viales, los suelos calizos pueden generar problemas de estabilidad debido a la formación de cavidades subterráneas y hundimientos diferenciales, (Juárez y Rico, 1997).

b) Erosión de suelos calizos

Es el proceso mediante el cual las partículas del suelo calizo son disgregadas, transportadas o disueltas por la acción del agua, el viento o agentes químicos. En el caso de los pavimentos, la erosión hídrica es la más relevante, pues provoca la pérdida de masa del suelo y reduce su capacidad portante, (Ataraxiainc, 2006).

c) Pérdida de masa por erosión (PME)

Se refiere a la disminución cuantitativa de volumen o peso de los suelos calizos como consecuencia del arrastre de partículas finas o la disolución de carbonatos. La PME constituye un indicador directo del grado de vulnerabilidad del suelo frente a procesos erosivos y su impacto en la estabilidad de estructuras viales, (Berry y Reid, 2003).

d) Variación granulométrica

Es el cambio en la distribución de tamaños de las partículas del suelo ocasionado por procesos de erosión, infiltración de agua o disolución de componentes. Una variación granulométrica desfavorable incrementa la porosidad y reduce la cohesión interna del suelo, facilitando la subsidencia de los pavimentos, (Villalaz, 2004).

e) Factor de erodabilidad (K)

Es un parámetro que mide la susceptibilidad de un suelo a la erosión. Depende de características intrínsecas como la textura, estructura, permeabilidad y contenido de materia fina. En suelos calizos, un incremento en el factor K implica mayor propensión a procesos erosivos y, por tanto, un mayor riesgo de subsidencia en pavimentos contruidos sobre ellos, (Nota técnica 02 Senamhi, 2017).



f) Subsistencia

Es el hundimiento progresivo y generalmente irreversible del terreno debido a la pérdida de volumen del subsuelo. En pavimentos flexibles, la subsidencia se manifiesta como deformaciones diferenciales, fisuras y hundimientos localizados, que comprometen la capacidad estructural y reducen la vida útil de la infraestructura vial, (Wang et al., 2014).

g) Pavimento flexible

Es una estructura de capas sucesivas de materiales granulares y mezclas asfálticas cuya función es distribuir las cargas del tránsito hacia la subrasante. Se denomina “flexible” porque se deforma en forma elástica bajo la acción del tránsito, transmitiendo progresivamente los esfuerzos a las capas inferiores, (AASHTO, 1997).

h) Pavimento flexible bicapa

Es un tipo de pavimento flexible conformado por dos capas de mezcla asfáltica superpuestas: la capa de rodadura, que proporciona resistencia al desgaste y seguridad de tránsito, y la capa intermedia o base asfáltica (binder), que distribuye los esfuerzos hacia la base granular. Su diseño permite mejorar la durabilidad de la vía y soportar mayores volúmenes de tránsito, (Coronado, 2002).

i) Base granular

Es la capa constituida por material pétreo triturado o natural compactado, ubicada debajo de la carpeta asfáltica. Su función es aportar soporte estructural, uniformidad y estabilidad al pavimento. En zonas con suelos calizos erosionables, la calidad de la base granular es determinante para reducir los efectos de la subsidencia, (Holiz y Kovacs, 1981).

j) Subrasante

Es el estrato natural de suelo o el material mejorado sobre el cual se construyen las capas de un pavimento. Su comportamiento geotécnico (resistencia, plasticidad, capacidad de soporte) condiciona el desempeño estructural del pavimento. En el caso de suelos calizos erosionables, la subrasante es el factor más crítico, pues su erosión y variación granulométrica conducen a la subsidencia de la vía, (Holiz y Kovacs, 1981).



CAPÍTULO IV

METODOLOGÍA

4.1 Tipo y nivel de investigación

La investigación fue de tipo aplicada, ya que buscó aportar soluciones prácticas a un problema real relacionado con la subsidencia de pavimentos flexibles sobre suelos calizos erosionables. Este estudio está orientado a identificar factores críticos que permitieron proponer mejoras en la construcción y mantenimiento de pavimentos en el sector Parcca, Lambrama.

Según Hernández, Fernández y Baptista, (2014), las investigaciones aplicadas buscan "resolver problemas concretos utilizando conocimientos científicos y tecnológicos previamente desarrollados". En este caso, los resultados se aplicaron directamente en el diseño y gestión de pavimentos en áreas con suelos erosionables.

El nivel de la investigación es correlacional-explicativa, ya que:

- Correlacional: Buscó identificar y analizar las relaciones entre los factores de pérdida de masa por erosión, variación granulométrica y capacidad de soporte del suelo.
- Explicativa: Pretendió determinar cómo estas variables contribuyeron a la subsidencia de pavimentos flexibles en el sector de estudio.

Según Monje (2011), los estudios correlacionales "permiten analizar el grado de asociación entre variables", mientras que los explicativos "identifican las causas de los fenómenos investigados". Este enfoque fue esencial para comprender el impacto de las características geotécnicas del suelo calizo en la estabilidad de los pavimentos.

4.2 Diseño de la investigación

El diseño de la investigación fue experimental.

- Experimental: Se manipularon las condiciones del suelo y se evaluaron cómo estas afectaron la subsidencia de pavimentos flexibles en un entorno controlado. Según



Arias (2012), el diseño experimental "consistió en aplicar tratamientos a un grupo experimental y medir sus efectos sobre las variables dependientes".

En este caso, se realizaron pruebas controladas en laboratorio y campo para evaluar la influencia de la erosión y variación granulométrica en la capacidad de soporte y la subsidencia.

Tabla 3 — Diseño de la investigación

Aspecto	Descripción
Grupo experimental	Suelos calizos erosionables sometidos a pruebas específicas de pérdida de masa por erosión y evaluación de su capacidad de soporte bajo diferentes condiciones de carga.
Grupo control	Suelos similares en el mismo sector que no serán intervenidos, utilizados para comparar los resultados.
Variable independiente	Pérdida de masa por erosión (PME) y variación granulométrica del suelo.
Variable dependiente	Subsidencia y capacidad de soporte del suelo.
Variables controladas	Propiedades iniciales del suelo (densidad, cohesión, granulometría) y condiciones ambientales (humedad y temperatura).
Manipulación	Inducción de condiciones de erosión mediante simulaciones de lluvia y flujo de agua para medir el impacto en la capacidad de soporte y subsidencia.
NOTA La tabla sintetiza el diseño metodológico del estudio, especificando los grupos de comparación, las variables consideradas y el procedimiento de manipulación para evaluar los efectos de la erosión y la variación granulométrica en la subsidencia del suelo calizo.	

4.3 Descripción ética de la investigación

La presente investigación se llevó a cabo respetando los principios éticos fundamentales que garantizaron la calidad científica, el respeto a los derechos de las personas y la sostenibilidad ambiental.



- La investigación cumplió con las normativas nacionales e internacionales aplicables, como las especificaciones de ASTM y las leyes ambientales de Perú (Ley N° 28611).
- La investigación siguió estrictamente normativas técnicas nacionales e internacionales que garantizaron la calidad, precisión y reproducibilidad de los ensayos geotécnicos realizados.

Tabla 4 — Normativas

Ensayo	Normativa Aplicada	Descripción
Granulometría (Análisis del tamaño de partículas)	ASTM D6913/D422	Define los procedimientos para determinar la distribución de tamaños de partículas en suelos.
Límites de Atterberg (Límite líquido, plástico e índice de plasticidad)	ASTM D4318	Establece las metodologías para determinar la plasticidad de los suelos.
Compactación (Procter estándar y modificado)	ASTM D698/ASTM D1557	Especifica el procedimiento para determinar la relación entre humedad y densidad del suelo.
Ensayo de corte directo	ASTM D3080	Detalla cómo medir la resistencia al corte de suelos bajo condiciones controladas.
Permeabilidad del suelo	ASTM D2434	Proporciona los métodos para determinar el coeficiente de permeabilidad en suelos granulares.
Resistencia a la compresión simple	ASTM D2166	Describe el procedimiento para evaluar la resistencia de suelos cohesivos bajo compresión simple.
Pérdida de masa por erosión	Adaptado de directrices específicas internacionales relacionadas con la erosión hídrica (por ejemplo, ISO 11277).	Evaluación experimental de la susceptibilidad del suelo a la erosión por flujo de agua.
NOTA La tabla resume las principales normativas técnicas empleadas en los ensayos del estudio, indicando el estándar aplicado y su finalidad dentro de la caracterización y evaluación del comportamiento de los suelos calizos erosionables.		

4.4 Población y muestra

4.4.1 Población

La población objeto de estudio comprendió los **suelos calizos erosionables** ubicados en el sector Parcca, Lambrama, Abancay, Apurímac. Este tipo de suelo fue reconocido por su susceptibilidad a la erosión y sus implicaciones directas en la estabilidad de pavimentos flexibles.

- **Criterios de inclusión**

La población del estudio estuvo conformada por los sectores del tramo vial en Parcca que presentaron suelos calizos erosionables, los cuales mostraron evidencia de subsidencia, asentamientos o deterioro asociado al fenómeno de erosión interna. Se incluyeron únicamente aquellas áreas donde fue posible realizar muestreos de suelo y registro de datos sin restricciones técnicas, y que además se encuentran expuestas a condiciones reales de carga vehicular y factores ambientales que favorecieron la erosión y la pérdida de soporte del pavimento.

- **Criterios de exclusión**

Se excluyeron los sectores que no poseen suelos calizos, o cuya litología difiere del fenómeno investigado, así como aquellas zonas del pavimento que no presentaron signos de erosión o subsidencia. También fueron excluidos los tramos que habían sido previamente intervenidos o estabilizados mediante cal, cemento u otros métodos, debido a que alteraron el comportamiento natural del suelo. Finalmente, se descartaron las áreas sin accesibilidad para muestreo o cuyos datos resultaron incompletos, inconsistentes o no verificables.

Tabla 5 — Población

Características	Descripción
Localización geográfica	Suelos presentes en un área delimitada dentro del sector Parcca, Lambrama.
Propiedades geotécnicas	Calizas erosionables con alta vulnerabilidad a la degradación por acción del agua, susceptibles a variaciones granulométricas.

Condiciones ambientales	Influencia directa de factores climáticos, como la precipitación estacional, que intensifican los procesos de erosión.
Relevancia para el estudio	Estos suelos impactan directamente la estabilidad y funcionalidad de los pavimentos flexibles establecidos en la zona.
NOTA La tabla describe las características principales de la población del estudio, conformada por suelos calizos erosionables localizados en el sector Parcca (Lambrama), cuyas propiedades geotécnicas y condiciones ambientales influyen directamente en los procesos de erosión y subsidencia que afectan al pavimento flexible de la zona.	

4.4.2 Mostró

La selección de cuatro puntos de exploración se realizó siguiendo la recomendación de normas como ASTM D420 y el MTC (2014), que indicaron que el número de calicatas debe ajustarse a la variabilidad del terreno. En el sector Parcca se identificaron diferencias geotécnicas y zonas con evidencias de erosión y subsidencia, por lo que se utilizaron 4 puntos para asegurar una caracterización representativa y suficiente del suelo calizo erosionable.

Tabla 6 — Muestra grupo de control

GC	Calicatas	CBR	Variación granulométrica	Erodabilidad del Suelo
GC1	C01	CP 12	VG 1	E.S1
		CP 25		
		CP 56		
GC2	C02	CP 12	VG 2	E.S2
		CP 25		
		CP 56		
GC3	C03	CP 12	VG 3	E.S3
		CP 25		
		CP 56		
GC4	C04	CP 12	VG 4	E.S4
		CP 25		

		CP 56		
NOTA La tabla presenta las muestras del grupo de control, obtenidas en cuatro calicatas seleccionadas estratégicamente en el sector Parcca. Cada punto incluye resultados de CBR, variación granulométrica y erodabilidad, parámetros esenciales para caracterizar el comportamiento del suelo calizo sin intervención y compararlo con el grupo experimental.				

4.5 Procedimiento

Tabla 7 — Procedimiento

Fase	Descripción detallada
1. Planeación	- Definir objetivos específicos y criterios de muestreo. - Seleccionar puntos estratégicos en el sector Parcca, Lambrama - Preparar materiales y equipos.
2. Muestreo	- Identificar y georreferenciar puntos de muestreo. - Apertura de calicatas (1.5-2.0 m) siguiendo ASTM D1452. - Recolectar muestras disturbadas y no disturbadas.
3. Ensayos de campo	- Realizar pruebas de infiltración y permeabilidad. - Medir parámetros iniciales de densidad y humedad. - Simular erosión mediante flujo de agua o simulación de lluvia.
4. Ensayos de laboratorio	- Determinar granulometría antes y después de la erosión. - Evaluar pérdida de masa por erosión (PME). - Determinar granulometría y subsidencia en suelos intervenidos.
5. Análisis de datos	- Procesar resultados con herramientas estadísticas (SPSS, Excel, MATLAB). - Evaluar correlaciones entre erosión, subsidencia y capacidad de soporte. - Validar hipótesis.
6. Interpretación	- Comparar resultados del grupo experimental con el grupo control. - Identificar factores críticos que influyen en la subsidencia. - Proponer recomendaciones para mitigación.
7. Informe final	- Elaborar y presentar informe técnico. - Publicar hallazgos en plataformas científicas o técnicas.

NOTA

La tabla detalla el procedimiento metodológico aplicado en el estudio, desde la planificación y muestreo hasta los ensayos, análisis de datos e interpretación, asegurando la evaluación sistemática de la erosión, la variación granulométrica y su influencia en la subsidencia del pavimento flexible.

4.6 Técnica e instrumentos

a) Técnica de muestreo geotécnico

Fue el método utilizado para extraer muestras de suelo representativas, siguiendo estándares como ASTM D1452, para análisis físico-mecánico en laboratorio y caracterización del terreno.

b) Técnica de ensayos físicos

Consistió en un conjunto de procedimientos para evaluar propiedades básicas del suelo, como granulometría, límites de Atterberg y humedad natural, que influyeron en su comportamiento.

c) Técnica de ensayos mecánicos

Se aplicaron pruebas específicas, como CBR y subsidencia bajo carga, que determinaron la resistencia y estabilidad del suelo ante fuerzas aplicadas.

d) Técnica de análisis estadístico

Fue el método para procesar y analizar datos mediante herramientas como correlación, regresión y ANOVA, para identificar relaciones y patrones en los resultados.

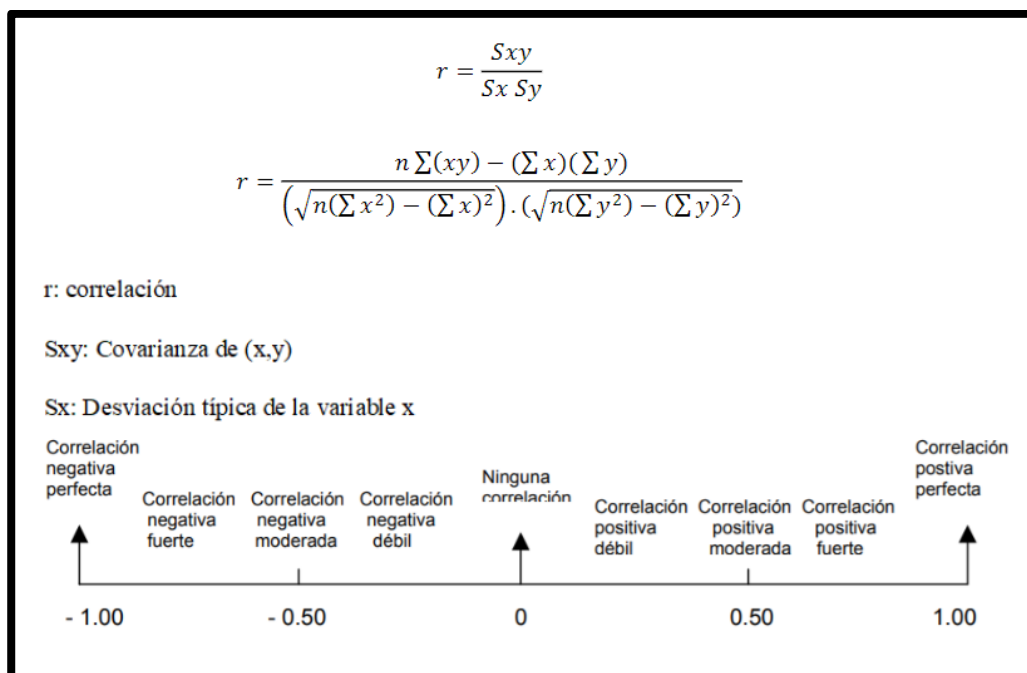
e) Computadora con software estadístico (SPSS, Excel, MATLAB)

Se utilizó equipo y programas como SPSS, Excel o MATLAB, utilizados para organizar, procesar y modelar datos obtenidos de los ensayos, generando análisis detallados y gráficos.

4.7 Estadístico de investigación

El análisis estadístico en esta investigación fue clave para validar los resultados obtenidos y determinar las relaciones entre las variables independientes (pérdida de masa por erosión,

variación granulométrica) y las variables dependientes (subsistencia, capacidad de soporte del suelo).



NOTA

La figura presenta la fórmula del coeficiente de correlación de Pearson y su escala interpretativa, la cual permite evaluar la intensidad y dirección de la relación entre dos variables, clasificándola desde correlación negativa perfecta hasta correlación positiva perfecta.

FUENTE: Graneles, 2000

Figura 9 — Correlación de Pearson

El análisis de correlación tuvo como finalidad identificar y cuantificar la relación entre dos o más variables relevantes en el estudio. En este caso, buscó determinar cómo la pérdida de masa por erosión (PME) influyó en la subsidencia de pavimentos flexibles.

Este análisis permitió evaluar si existe una relación significativa entre estas variables y, en caso afirmativo, determinó la dirección y magnitud de dicha relación.

4.8 Método: Coeficiente de correlación de Pearson ®

4.8.1 Descripción del método

- El coeficiente de correlación de Pearson es una medida estadística que evalúa la relación lineal entre dos variables continuas.

b) Toma valores entre **-1 y +1**, donde:

- **+1**: Relación positiva perfecta (a mayor PME, mayor subsidencia).
- **0**: No existe relación lineal entre las variables.
- **-1**: Relación negativa perfecta (a mayor PME, menor subsidencia).

4.8.2 Cálculo:

a) La fórmula general para el cálculo de r es:

$$r = \frac{\sum (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum (x_i - \bar{x})^2 \cdot \sum (y_i - \bar{y})^2}}$$

Donde:

- x_i : Valores individuales de la pérdida de masa por erosión (PME).
- y_i : Valores individuales de la subsidencia.
- $\bar{x}$: Promedio de los valores de PME.
- $\bar{y}$: Promedio de los valores de subsidencia.

NOTA

La fórmula presentada corresponde al coeficiente de correlación de Pearson, utilizado para medir la relación lineal entre la pérdida de masa por erosión (PME) y la subsidencia del pavimento, permitiendo cuantificar la intensidad y dirección de dicha asociación.

4.8.3 Interpretación de r :

- Relación positiva fuerte: $0.7 \leq r \leq 1.00$
- Relación positiva moderada: $0.3 \leq r < 0.7$
- Relación débil o nula: $-0.3 < r < 0.3$
- Relación negativa moderada: $-0.7 < r \leq -0.3$

- Relación negativa fuerte: $-1.0 \leq r \leq -0.7$.

4.8.4 Pasos del análisis:

- Recolección de datos: Valores de PME y subsidencia obtenidos en los ensayos.
- Comprobación de normalidad: Las variables siguieron una distribución normal, validando mediante pruebas como Shapiro-Wilk.
- Cálculo de r utilizando herramientas estadísticas (SPSS, Excel o MATLAB).
- Interpretación del coeficiente y validación mediante pruebas de significancia.

4.8.5 Prueba de significancia:

- Se realizó un **test t** para evaluar si r es significativamente diferente de 0:
Donde n es el tamaño de la mostró.

$$t = r \sqrt{\frac{n-2}{1-r^2}}$$

- Si el valor p asociado al t es menor al nivel de significancia ($\alpha=0.05$), se concluyó que r es estadísticamente significativo.

CAPÍTULO V

RESULTADOS Y DISCUSIONES

5.1 Análisis y resultados

En el presente estudio se realizaron cuatro **calicatas** en el sector Parcca, Lambrama, Abancay, Apurímac, con el fin de obtener una mostró representativa de los suelos calizos y evaluar las condiciones que podrían influir en la subsidencia de pavimentos flexibles. Las calicatas fueron ubicadas estratégicamente en diferentes puntos del sector para cubrir una amplia gama de características geotécnicas del área.

Tabla 8 — Cuadro resumen de la vía estudiada

Vía	Sector	Distrito	Exploración de campo	Tipo de vía
Abancay - Lambrama	Parcca,	Lambrama	4 calicatas	Pavimentada
NOTA La exploración de campo se realizó mediante 4 calicatas, las cuales fueron ubicadas en puntos estratégicos a lo largo de la progresiva indicada.				

Tabla 9 — Cuadro de la ubicación de las calicatas

Calicata	Este	Sur
C-01	725428.20 m E	8482763.46 m S
C-02	725407.05 m E	8482698.21 m S
C-03	725346.00 m E	8482553.00 m S
C-04	725338.24 m E	8482534.63 m S

NOTA

La exploración de campo se realizó mediante 4 calicatas, las cuales fueron ubicadas en puntos estratégicos a lo largo de la progresiva indicada.



NOTA

La imagen mostró un tramo de la ruta en el sector Parcca, donde se han identificado cuatro puntos críticos de posible subsidencia de pavimentos flexibles sobre suelos calizos erosionables. Los puntos etiquetados como C-01, C-02, C-03 y C-04 representan áreas relevantes para el análisis geotécnico, donde se podría realizar un monitoreo intensivo de la erosión y la variación granulométrica del suelo. Estos sitios son claves para evaluar el impacto de la pérdida de masa por erosión (PME) y la capacidad de soporte de carga del suelo, factores que afectan directamente la estabilidad del pavimento en la región.

Figura 10 — Ubicación de las calicatas

Los suelos calizos en esta área fueron particularmente susceptibles a la erosión, especialmente cuando estaban expuestos a condiciones climáticas extremas o actividades humanas. La subsidencia de pavimentos flexibles, en particular, puede ocurrir en estos suelos debido a la erosión y las variaciones en la carga que soportan, lo que representó un desafío significativo para la estabilidad de las infraestructuras viales. La información obtenida de las calicatas fue esencial para evaluar el comportamiento de estos suelos bajo

condiciones de carga y para determinar las medidas adecuadas para mejorar la durabilidad de los pavimentos.

5.1.1 Análisis de los resultados de variable independiente: Erosión en los suelos calizos

En este análisis, se examinó el impacto de la erosión en los suelos calizos del sector Parcca, Lambrama, Abancay, Apurímac, como una variable independiente en el contexto de la subsidencia de pavimentos flexibles. A continuación, se presenta un resumen de los resultados obtenidos a partir de las calicatas realizadas en el área de estudio.

5.1.1.1 Análisis de las propiedades geotécnicas del suelo

El objetivo de este análisis fue caracterizar las propiedades geotécnicas del suelo en el sector Parcca, Lambrama, mediante la ejecución de 4 calicatas, con el fin de obtener datos representativos sobre la composición y comportamiento del suelo en la zona afectada por la erosión y subsidencia.

Se realizaron 4 calicatas distribuidas estratégicamente en la zona de estudio para obtener muestras representativas del perfil del suelo. Las calicatas fueron ubicadas en puntos cercanos a áreas afectadas por la subsidencia de pavimentos, asegurando la relevancia de las muestras obtenidas.

Tabla 10 — Datos de calicatas

Calicata	Este	Norte	Profundidad	Tipo de exploración
C-01	725428.20	8482763.46	1,50	Calicatas
C-02	725407.05	8482698.21	1,50	Calicatas
C-03	725346.00	8482553.00	1,50	Calicatas
C-04	725338.24	8482534.63	1,50	Calicatas
NOTA Las calicatas fueron ejecutadas a una profundidad de 1,50 metros en el sector Parcca, Lambrama, con el propósito de obtener muestras				

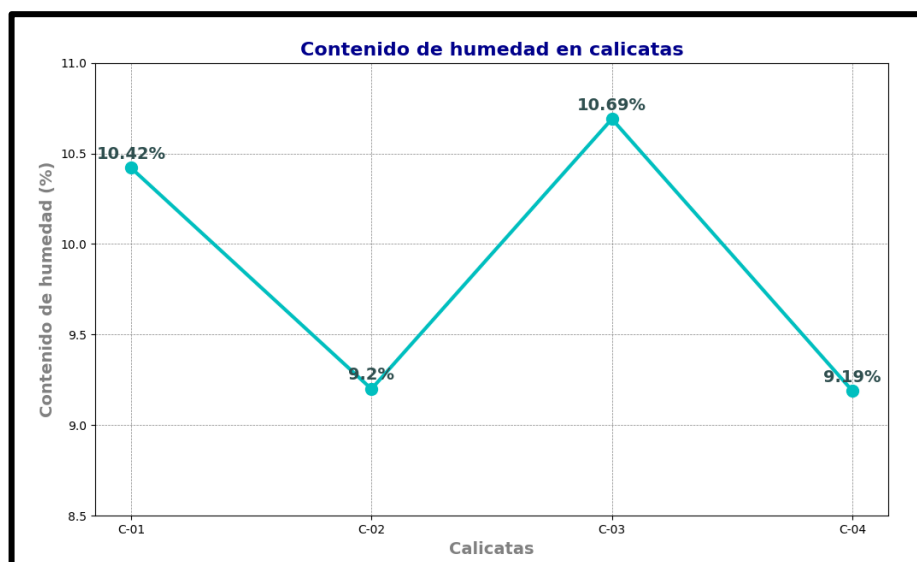
representativas de las condiciones geotécnicas del suelo. El tipo de exploración corresponde a calicatas realizadas con el fin de caracterizar las propiedades físicas y mecánicas del suelo en la zona afectada por la erosión y subsidencia de pavimentos.

a) Contenido de humedad

El contenido de humedad se determinó para evaluar su influencia en la estabilidad de los suelos calizos en el sector Parcca, Lambrama. La humedad afectó directamente la capacidad de soporte del suelo y su resistencia a la erosión, factores cruciales en la subsidencia de los pavimentos flexibles. Al conocer el contenido de humedad, se puede entender cómo la saturación del suelo, especialmente durante las lluvias intensas, contribuye a la degradación de la infraestructura vial.

Tabla 11 — Contenido de humedad en calicatas

Calicatas	Profundidad alcanzada	Nivel freático	Contenido de humedad (%)
C-01	1.50 m	NO	10.42
C-02	1.50 m	NO	9.20
C-03	1.50 m	NO	10.69
C-04	1.50 m	NO	9.19
NOTA La tabla mostró el contenido de humedad de las muestras obtenidas a 1.50 m de profundidad en las calicatas realizadas. Los valores de contenido de humedad varían entre 9.19% y 10.69%, indicando que el suelo en la zona presenta una humedad moderada.			



NOTA

El gráfico presentado mostró el contenido de humedad en las calicatas realizadas en el sector de estudio, con una profundidad alcanzada de 1.50 m. Este análisis es fundamental para nuestra tesis, ya que permite observar la variabilidad del contenido de humedad en distintas calicatas, lo cual puede influir en la evaluación de la estabilidad del terreno y la determinación de su capacidad portante.

Figura 11 — Contenido de humedad

b) Límites de Atterberg

Se llevó a cabo un análisis detallado de las propiedades plásticas de los suelos mediante el ensayo de límites de Atterberg, el cual es esencial para determinar el comportamiento de los suelos finos, especialmente aquellos con alta proporción de arcilla. Este ensayo fue crucial para comprender cómo los suelos reaccionan a la humedad y cómo estos comportamientos afectaron su capacidad de soporte, especialmente en condiciones de carga y humedad variable.

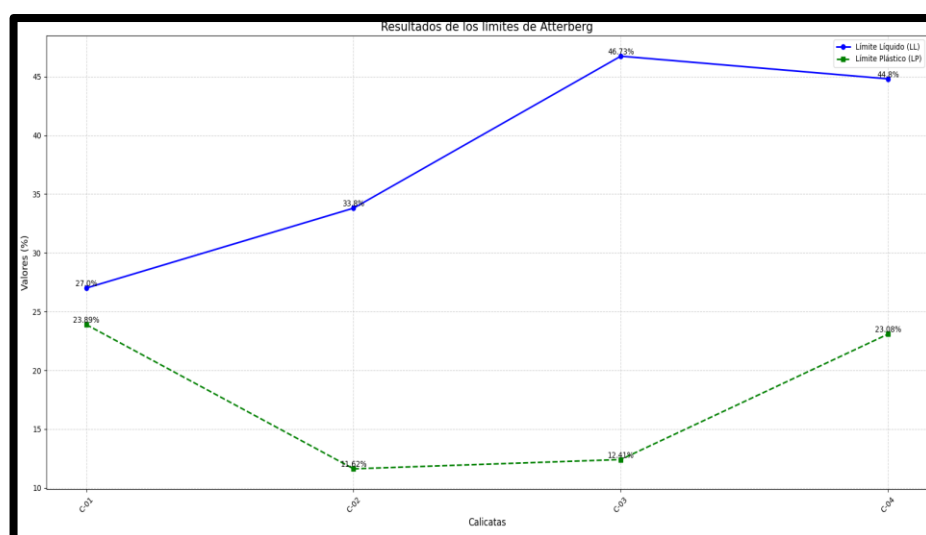
Tabla 12 — Límites de Atterberg

Identificación			Límites de Atterberg			Humedad
Calicata	Estrato	Prof.	LL	LP	IP	
N°	N°	m	%	%	%	%
C-01	E-01	1,5	27.00	23.89	3.11	10.42

C-02	E-01	1,5	33.80	11.62	22.18	9.20
C-03	E-01	1,5	46.73	12.41	34.31	10.69
C-04	E-01	1,5	44.80	23.08	21.72	9.19

NOTA

La tabla mostró los límites de Atterberg de diferentes calicatas. El suelo de la calicata C-01 tiene una baja plasticidad ($IP = 3.11\%$), lo que indica que es menos susceptible a deformarse bajo carga. En cambio, la calicata C-02 presenta una plasticidad moderada ($IP = 22.18\%$), lo que la hace más susceptible a deformaciones. La calicata C-03 tiene un IP alto (34.31%), lo que implica que es altamente plástico y puede sufrir deformaciones significativas. Finalmente, C-04 también tiene un IP moderado (21.72%) y un alto límite líquido (44.80%), lo que indica que, aunque tiene una plasticidad moderada, su alta retención de agua podría comprometer su capacidad de carga en condiciones húmedas.



NOTA

El gráfico mostró la variación de los límites de Atterberg y el contenido de humedad para las diferentes calicatas ubicadas en el sector Parcca, Lambrama.

Límite líquido (LL): Representa la humedad crítica en la que un suelo cambia de un estado fluido a uno plástico. El suelo de la calicata C-03 tiene el valor más alto (46.73%), lo que indica una alta retención de agua y una mayor plasticidad, lo que puede generar una mayor susceptibilidad a la deformación bajo carga.

Límite plástico (LP): Mide la humedad en la cual el suelo cambia de un estado plástico a semisólido. El suelo de la calicata C-02 tiene un LP de 11.62%, y la C-03 tiene un LP de 12.41%, lo que indica que estos suelos tienen mayor capacidad de deformación frente a condiciones de humedad.

Figura 12 — Resultados de los límites de Atterberg

c) Análisis granulométrico

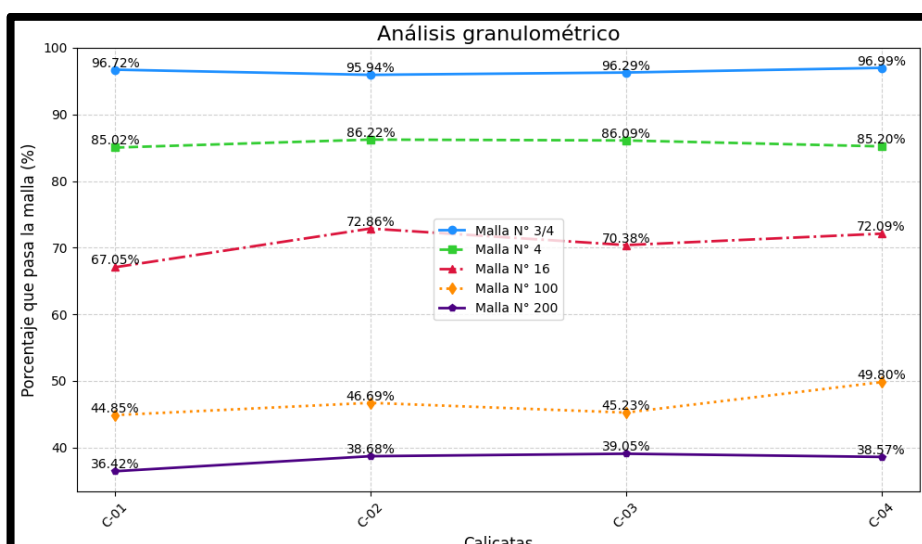
El análisis granulométrico mostró que los suelos calizos en el sector Parcca, Lambrama, tuvo mayor proporción de partículas finas (arcillas y limos), tuvo mayor plasticidad, lo que incrementó la susceptibilidad a la subsidencia y redujo la capacidad de soporte de los pavimentos. Por otro lado, los suelos con más partículas gruesas (arenas y gravas) tuvieron mejor capacidad de drenaje y estabilidad estructural, lo que mejoró la durabilidad de los pavimentos. Además, la erosión acelera la pérdida de masa en estos suelos finos, aumentando el riesgo de deformaciones en los pavimentos.

Tabla 13 — Análisis granulométrico

Identificación			Análisis granulométrico				
Calicata	Estrato	Prof.	% Que pasa la malla N°				
N°	N°	m	N° 3/4	N°4	N°16	N°100	N°200
C-01	E-01	1,5	96,72	85,02	67,05	44,85	36,42
C-02	E-01	1,5	95,94	86,22	72,86	46,69	38,68
C-03	E-01	1,5	96,29	86,09	70,38	45,23	39,05
C-04	E-01	1,5	96,99	85,20	72,09	49,80	38,57

NOTA

El porcentaje que pasa por la malla N° 200 en las calicatas mostró que, aunque la mayor parte del suelo es grueso, hay una cantidad significativa de material fino. Los valores para C-01 (36,42%), C-02 (38,68%), C-03 (39,05%) y C-04 (38,57%) indican que una proporción considerable del material está formado por partículas finas (arcillas y limos). Esto sugiere que el suelo tiene plasticidad y susceptibilidad a la deformación, lo que puede afectar negativamente la capacidad de drenaje y la estabilidad de los pavimentos. Los suelos con mayor contenido de finos tienen mayor tendencia a la erosión y pueden presentar problemas estructurales bajo condiciones de carga.



NOTA

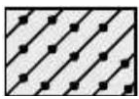
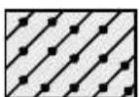
El gráfico mostró la distribución granulométrica de las calicatas, destacando la alta cantidad de material fino en cada calicata. La proporción alta de partículas finas (especialmente en las mallas N° 100 y N° 200) es considerable, con valores de hasta el 44,85% en algunas calicatas. El contenido significativo de partículas finas sugiere que el suelo puede ser más susceptible a la deformación y a problemas de erosión, especialmente bajo condiciones de humedad o carga.

Figura 13 — Distribución granulométrica

d) Clasificación de los suelos

La clasificación de suelos en mi tesis sobre la subsidencia de pavimentos fue clave para evaluar la capacidad de soporte y el comportamiento de los suelos calizos en el sector Parcca, Lambrama. Permitted identificar suelos propensos a la erosión, con alta plasticidad o material fino, que podrían deformarse bajo carga. Esta información fue esencial para diseñar soluciones de estabilización y drenaje, además de mejorar el diseño de pavimentos y prevenir subsidencia en las infraestructuras viales.

Tabla 14 — Clasificación de los suelos

Calicata	Estrato	Clasificación		
N°	N°	SUCS	Descripción	SUCS
C-01	E-01	SM	Arenas limosas, mezclas de grava, arena y arcilla.	
C-02	E-01	SC	Arenas arcillosas, mezclas de grava, arena y arcilla.	
C-03	E-01	SC	Arenas arcillosas, mezclas de grava, arena y arcilla.	
C-04	E-01	SC	Arenas arcillosas, mezclas de grava, arena y arcilla.	

NOTA

La tabla presenta la clasificación SUCS (Sistema Unificado de Clasificación de Suelos) de las calicatas en el sector Parcca, Lambrama, de acuerdo con el tipo de estrato y la descripción del suelo:

C-01: Clasificada como SM (Arenas limosas, mezclas de grava, arena y arcilla). Este tipo de suelo tiene una combinación de arena y arcilla con una mayor proporción de partículas finas (limos).

C-02, C-03 y C-04: Clasificados como SC (Arenas arcillosas, mezclas de grava, arena y arcilla). Estos suelos contienen una mezcla equilibrada de arena, grava y arcilla, lo que indica una mayor plasticidad debido a la presencia de arcillas. Los suelos clasificados como SC son típicamente más susceptibles a la deformación bajo carga.

5.1.1.2 Análisis de pérdida de masa por erosión (PME)

Los suelos calizos presentes en el sector de Parcca fueron típicamente solubles y, por lo tanto, altamente susceptibles a procesos erosivos. La erosión de estos suelos se aceleró con la acción de factores como la variabilidad climática (precipitaciones intensas y cambios bruscos de temperatura), el tránsito vehicular constante, y las actividades humanas cercanas.

a) Método de prueba de inmersión, secado y re-inmersión (PISR)

En este análisis, se ha utilizado un método de prueba directa para evaluar la erodabilidad de los suelos del sector Parcca, Lambrama, consistente en sumergir las muestras de suelo en agua durante 48 horas, seguidas de 24 horas de secado y posteriormente 24 horas adicionales en agua. Este método simuló las condiciones de exposición prolongada al agua y su reacción tras el secado, lo que permitió evaluar la susceptibilidad del suelo a la erosión tanto en condiciones de saturación como tras un proceso de desecación y re-humedecimiento.

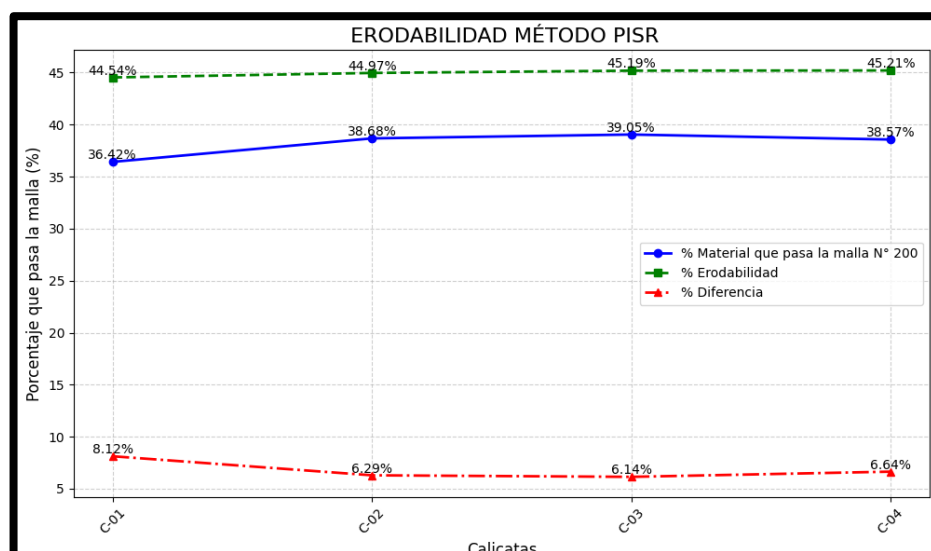
Procedimiento:

- Preparación de las muestras: Se seleccionaron muestras representativas de las calicatas C-01, C-02, C-03, y C-04.
- Inmersión inicial en agua (48 horas): Las muestras de suelo fueron completamente sumergidas en agua durante 48 horas para simular la saturación.

- Secado (24 horas): Después de la inmersión, las muestras se secaron durante 24 horas para simular las condiciones de evaporación o pérdida de agua natural.
- Re-inmersión en agua (24 horas): Tras el secado, las muestras se re-inmersionaron durante otras 24 horas para evaluar cómo el suelo responde a una segunda saturación después de un ciclo de secado.
- Observación y medición: Durante el proceso, se observó el desprendimiento de partículas finas y al final se pesaron las muestras para determinar la cantidad de material fino erosionado.

Tabla 15 — Pérdida de masa por erosión del suelo

Identificación			Análisis granulométrico	erodabilidad método PISR	
Calicata	Estrato	Prof.	% Que pasa la malla	%	Diferencia (%)
N°	N°	m	N°200	N°200	N°200
C-01	E-01	1,5	36,42	44,54	8,12
C-02	E-01	1,5	38,68	44,97	6,29
C-03	E-01	1,5	39,05	45,19	6,14
C-04	E-01	1,5	38,57	45,21	6,64
NOTA La tabla mostró los resultados del análisis granulométrico y de erodabilidad de las calicatas en el sector Parcca, Lambrama, con un enfoque en el porcentaje que pasa por la malla N° 200 (material fino), seguido de los resultados de erodabilidad del suelo según el método PISR.					



NOTA

El gráfico mostró la comparación entre el porcentaje de material que pasa por la malla N° 200, el porcentaje de erodabilidad y la diferencia entre ambos para las calicatas del sector Parcca, Lambrama.

Diferencia (%): Representa la pérdida de material fino durante el proceso de inmersión y secado. La diferencia entre los porcentajes de erodabilidad y el material que pasa por la malla N° 200 varía entre 5.86% y 8.12%, indicando un alto grado de erosión en suelos con mayor contenido de finos.

Figura 14 — Distribución granulométrica

b) Análisis granulométrico:

El porcentaje de material que pasó por la malla N° 200 indicó la cantidad de partículas finas (limos y arcillas) presentes en el suelo. Los valores varían entre 36,42% (C-01) y 39,05% (C-03), lo que sugirió que estos suelos tuvieron una proporción significativa de finos, lo que generalmente los hace más susceptibles a la erosión.

c) Erodabilidad (Método PISR):

El porcentaje de diferencia refleja la pérdida de material fino después de los ciclos de inmersión y secado. Los suelos de las calicatas tuvieron una diferencia de erodabilidad que varía entre 6,14% (C-03) y 8,12% (C-01).

Estos valores indicaron que el material fino se erosionó durante el proceso de saturación y secado, y la diferencia más alta en C-01 sugirió que tuvo una mayor susceptibilidad a la erosión en comparación con los otros suelos.

Los suelos con un alto porcentaje de material fino (como C-02 y C-04) fueron más susceptibles a la erosión y la subsidencia bajo condiciones de saturación, especialmente en zonas con alta humedad. Los suelos con una diferencia alta en erodabilidad (como C-01) indicaron una alta erodabilidad, lo que puede comprometer la durabilidad de los pavimentos y la estabilidad de la infraestructura.

d) Análisis:

- La inmersión inicial en agua simuló la saturación del suelo, lo que permitió observar cómo el agua libera las partículas finas (limo y arcilla). Los suelos con mayor contenido de finos (como C-02, C-03, y C-04) tienden a desprender más material fino bajo estas condiciones.
- El secado simuló las condiciones en las que el suelo pierde agua, lo que puede compactar el material y afectar su plasticidad. Sin embargo, los suelos con alta plasticidad (como los arcillosos) tienden a volverse más susceptibles a la erosión cuando se re-humedecen, ya que las partículas finas se aflojan nuevamente.
- La re-inmersión puso a prueba la resistencia del suelo después de un ciclo de seco a mojado, lo que reflejó las condiciones a las que el pavimento puede estar expuesto durante cambios climáticos o ciclos de precipitación. Los suelos con un alto contenido de finos (como C-02, C-03, y C-04) experimentan más erosión durante esta fase.

Tabla 16 — Análisis granulométrico y erodabilidad

Identificación	MTC E 107, ASTM D422			Erodabilidad		
Calicata	Análisis granulométrico %			Análisis granulométrico %		
N°	Ret N°4	Pas N°4- Ret N°200	Pas N°200	Ret N°4	Pas N°4- Ret N°200	Pas N°200
C-01	14,98	48,60	36,42	11,23	44,23	44,55
C-02	13,78	47,54	38,68	11,43	43,59	44,97
C-03	13,91	47,04	39,05	12,36	42,45	45,19
C-04	14,80	46,63	38,57	14,28	40,50	45,22
NOTA La tabla presenta los resultados de los análisis granulométricos para las calicatas C-01, C-02, C-03 y C-04, utilizando los métodos MTC E 107 y ASTM D422, y su erodabilidad correspondiente.						

e) Análisis granulométrico (MTC E 107, ASTM D422)

- Ret N° 4: El porcentaje de material retenido en la malla N° 4 (material grueso) es relativamente bajo en todas las calicatas, lo que indicó que una buena proporción del suelo es de partículas gruesas.
- Pas N° 4 - Ret N° 200: Representa el material de tamaño medio entre las mallas N° 4 y N° 200. El porcentaje varía entre 44.23% (C-01) y 43.59% (C-02), lo que sugirió que el contenido de partículas medianas es importante en todos los suelos.

- Pas N° 200: El porcentaje de material que pasó la malla N° 200 (partículas finas) varía entre 36.42% (C-01) y 39.05% (C-03), lo que reflejó que los suelos en general tuvieron un contenido significativo de partículas finas, lo que pudo afectar su plasticidad y comportamiento bajo saturación.

f) Erodabilidad

- El análisis de erodabilidad mostró que el material fino (pasando por la malla N° 200) es el más susceptible a la erosión. En las calicatas C-01 y C-02, el material fino tuvo un porcentaje mayor, indicando que estos suelos son más erosionables.
- Las diferencias en los porcentajes de material que pasa la malla N° 200 y su erodabilidad reflejan la susceptibilidad a la deformación del suelo, siendo los suelos con mayor contenido de finos más propensos a la erosión.

Conclusión: Los suelos con mayor contenido de finos (como C-01, C-02, y C-03) tuvieron una mayor erodabilidad y plasticidad, lo que pudo afectar la estabilidad estructural de los pavimentos. Los resultados sugirieron la necesidad de tratamientos de estabilización en áreas con suelos finos para reducir la erosión y garantizaron la durabilidad de las infraestructuras.

Tabla 17 — Análisis diferencia en porcentaje de material

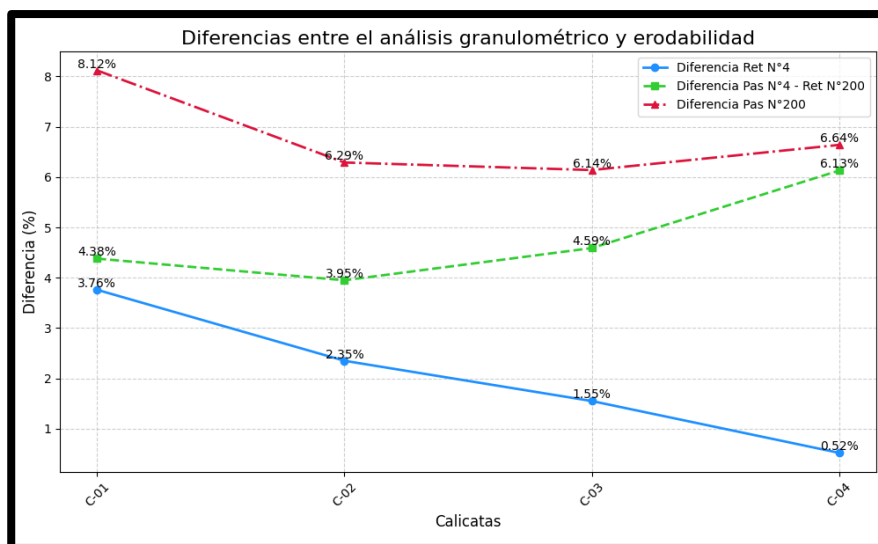
Identificación	Diferencia %		
Calicata	Análisis granulométrico		
N°	Ret N°4	Pas N°4-Ret N°200	Pas N°200
C-01	3,76	4,38	8,12
C-02	2,35	3,95	6,29
C-03	1,55	4,59	6,14

C-04	0,52	6,13	6,64
NOTA La tabla mostró las diferencias entre los resultados del análisis granulométrico y la erodabilidad en las calicatas C-01, C-02, C-03 y C-04. Las diferencias reflejan cómo los ciclos de saturación y secado afectan la distribución de partículas y la pérdida de material fino del suelo.			

- Diferencia Ret N°4: Los valores positivos indicaron que el material grueso (retenido en la malla N° 4) ha aumentado ligeramente en todas las calicatas, lo que sugirieron que el material grueso se ha conservado o incluso incrementado después del proceso de inmersión y secado. Este aumento varió entre 0,52% (C-04) y 3,76% (C-01).
- Diferencia Pas N°4-Ret N°200: Los valores positivos en esta columna indicaron que el material intermedio (pasando por malla N° 4 y retenido en malla N° 200) ha aumentado en todas las calicatas, lo que puede reflejar una redistribución del material durante el proceso de saturación y secado. Este aumento varió entre 3,95% (C-02) y 6,13% (C-04).
- Diferencia Pas N°200: Los valores positivos en esta columna indicaron que el material fino (pasando por malla N° 200) ha aumentado en todas las calicatas, con un aumento de 6,29% (C-02) a 8,12% (C-01), lo que sugirió que una gran cantidad de material fino haya sido liberado o redistribuido durante el proceso de saturación y secado.

Conclusión: Las diferencias en las calicatas indicaron que el proceso de saturación y secado ha causado una remoción de material fino y grueso, lo que pudo incrementar la erodabilidad y afectar la estabilidad estructural del suelo. Los suelos con mayor

contenido de material fino presentaron una mayor pérdida de partículas finas, lo que pudo resultar en suelos más plásticos y susceptibles a la deformación y la erosión.



NOTA

El gráfico mostró las diferencias entre el análisis granulométrico y la erodabilidad de las calicatas C-01, C-02, C-03 y C-04. Los valores reflejan la variación en el material grueso, intermedio y fino después de los ciclos de inmersión y secado. Las diferencias positivas indican un aumento de material grueso e intermedio, mientras que las diferencias negativas en material fino sugieren que una cantidad significativa de material fino ha sido eliminada durante el proceso, lo que puede afectar la estabilidad y la capacidad de soporte del suelo.

Figura 15 — Diferencias entre el análisis granulométrico y erodabilidad

5.1.2 Análisis de los resultados de variable dependiente: subsidencia en la estructura del pavimento

En este análisis, se abordó la subsidencia como variable dependiente en el contexto de los pavimentos flexibles expuestos a diferentes tipos de suelos, en particular los suelos calizos susceptibles a la erosión en el sector Parcca, Lambrama. La subsidencia se refirió al hundimiento o deformación vertical de un pavimento debido

a la interacción de éste con el suelo subyacente, afectando la estabilidad estructural y la durabilidad de la infraestructura vial.

Tabla 18 — DSM y COH, calicatas

Identificación		Propiedades			DSM	COH
Calicata	Prof.	Clasificación	IP	Humedad		
N°	m	SUCS	%	%	g/cm ³	%
C-01	1,5	SM	3.11	10.42	1,787	11,70
C-02	1,5	SC	22.18	9.20	1,785	10,80
C-03	1,5	SC	34.31	10.69	1,776	10,70
C-04	1,5	SC	21.72	9.19	1,788	10,00
NOTA La tabla presenta las propiedades del suelo en las calicatas C-01, C-02, C-03 y C-04, incluyendo la densidad seca máxima (DSM) y el contenido óptimo de humedad (COH), que son factores esenciales para determinar la capacidad de soporte del suelo y su comportamiento bajo carga.						

- **DSM (Densidad Seca máxima):**

Los valores de la densidad seca máxima (DSM) varían entre 1,776 g/cm³ en C-03 y 1,788 g/cm³ en C-04. La DSM es una medida de la compacidad del suelo, y un valor más alto como el de C-04 indica que este suelo puede ser más resistente a la deformación y tener una mejor capacidad de soporte en comparación con los demás suelos.

- **COH (Cohesión):**

El contenido óptimo de humedad varía entre 10,00% en C-04 y 11,70% en C-01. Este parámetro indica la humedad ideal para alcanzar la máxima densidad de compactación en el suelo. Los suelos con un contenido óptimo de humedad más

bajo, como C-04, generalmente requieren menos humedad para alcanzar la máxima compactación.

Conclusión: La densidad seca máxima (DSM) y el contenido óptimo de humedad (COH) fueron parámetros clave para entender cómo el suelo responde a la compresión y las cargas externas. Los suelos con mayor DSM y COH (como C-01) tuvieron una mayor capacidad de soporte y fueron menos susceptibles a la deformación. Los suelos con valores más bajos de DSM y COH (como C-04) pueden necesitar ajustes en la humedad para mejorar su comportamiento bajo carga y evitar problemas de DUBI en pavimentos flexibles.

El análisis CBR reforzó la idea de que los suelos con mayor contenido de finos son menos resistentes a la deformación bajo carga, lo que aumenta la subsidencia en los pavimentos flexibles. Los suelos con bajo contenido de finos y una alta capacidad de soporte fueron más adecuados para infraestructuras viales duraderas.

Para suelos con valores CBR bajos, se recomienda implementar tratamientos de estabilización y mejoras en la compactación para aumentar su capacidad de soporte.

Tabla 19 — CBR 0.1'' (100%-95%)

Identificación			CBR 0.1''	
Calicata	Estrato	Prof.	100 %	95 %
N°	N°	m		
C-01	E-01	1,5	6.09	5.60
C-02	E-01	1,5	7.62	6.32
C-03	E-01	1,5	6.32	4.87
C-04	E-01	1,5	6.99	5.85
NOTA La tabla presenta los valores del California Bearing Ratio (CBR) a una penetración de 0.1'' para las calicatas C-01, C-02, C-03 y C-04 a dos				

niveles de compactación: 100% y 95% de la densidad máxima. El CBR es una medida clave para evaluar la capacidad de soporte de un suelo bajo cargas repetidas, especialmente en el contexto de pavimentos flexibles.

Los valores de CBR, tanto en 100% como en 95%, son bajos, lo que indica que los suelos son susceptibles a la **subsistencia** y presentan una baja capacidad de soporte. Esto puede comprometer la estabilidad y durabilidad de los pavimentos.

5.1.2.1 Análisis factor de erosividad (R)

El factor de erosividad (R) es un indicador que mide la capacidad de un determinado clima (específicamente las lluvias) para generar erosión en un suelo. (Nota técnica N° 002 SENAMHI-DHI-2017)

Este factor tiene una gran relevancia en el análisis de la subsistencia y la erosión de pavimentos, ya que las precipitaciones intensas pueden afectar considerablemente la estabilidad de los suelos que soportan estos pavimentos.

En mi tesis, el objetivo del análisis del factor de erosividad (R) fue evaluar cómo las intensas lluvias en la región pueden influir en la erosión de suelos calizos, especialmente aquellos con un alto contenido de finos, que podrían contribuir a un aumento de subsistencia en los pavimentos flexibles.

Método RUSLE (Ecuación Universal de Pérdida de Suelo)

$$R = \sum_{i=1}^{12} 1.735 \times 10^{(1.5 \log_{10}(P_i^2/p) - 0.08188)}$$

Donde

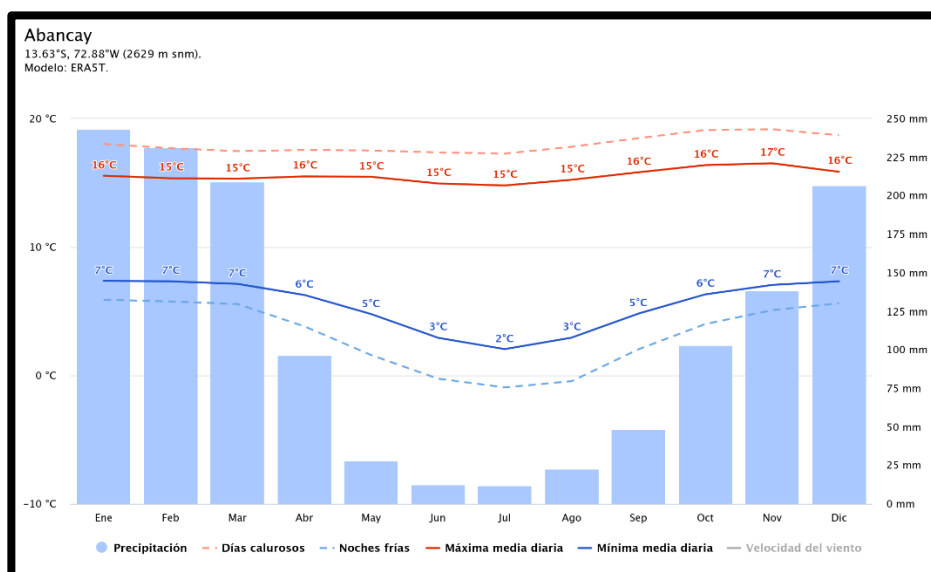
R: factor de erosividad MJ mm ha⁻¹ h⁻¹ año⁻¹ (Megajulios por milímetro por hectárea por hora por año).

Pi: Precipitación para cada mes en mm.

p : Precipitación anual en mm.



a) Precipitación

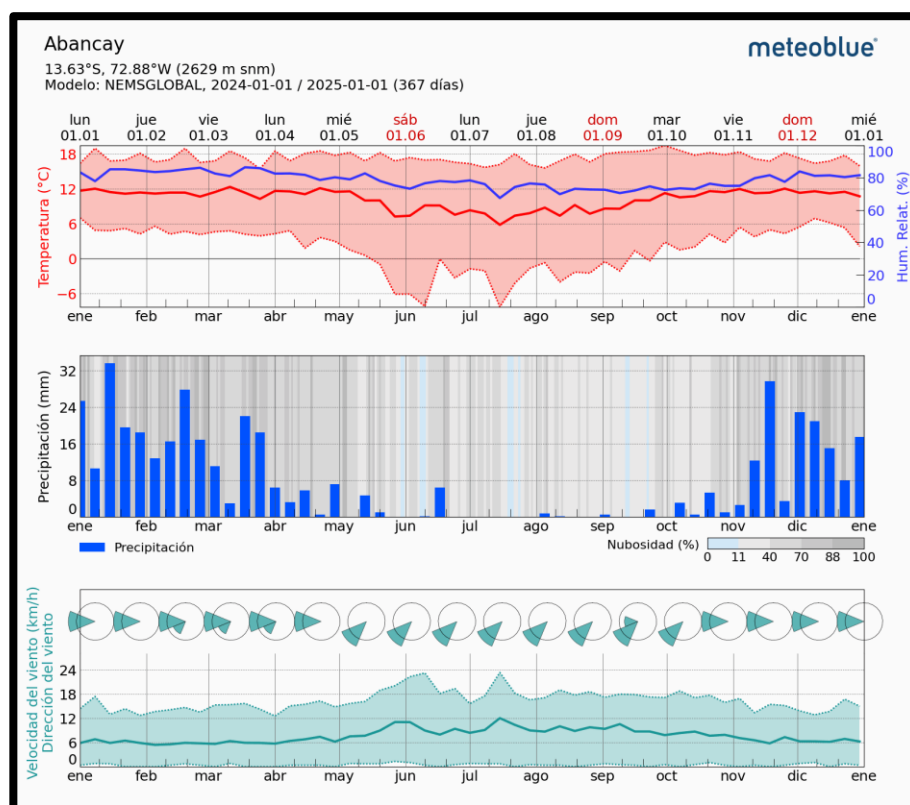


NOTA

Este gráfico mostró la variación mensual de la temperatura máxima y mínima, junto con las precipitaciones. Abancay tiene una alta precipitación en los primeros meses del año (enero a marzo), con temperaturas promedio que fluctúan entre 6°C y 16°C. La precipitación más alta ocurre en diciembre.

FUENTE: Meteoblue y SENAMHI, 2024

Figura 16 — Temperatura y precipitación en Abancay



NOTA

Este gráfico presenta la temperatura mensual, la humedad relativa, la precipitación y la velocidad del viento en Abancay durante 2024. La temperatura varía entre 12°C y 18°C, con una notable caída en la humedad durante los meses de mayo a julio, mientras que la precipitación alcanza sus picos más altos en los primeros meses del año.

FUENTE: Meteoblue y SENAMHI, 2024

Figura 17 — Temperatura, precipitación, y condiciones meteorológicas en Abancay (2024)

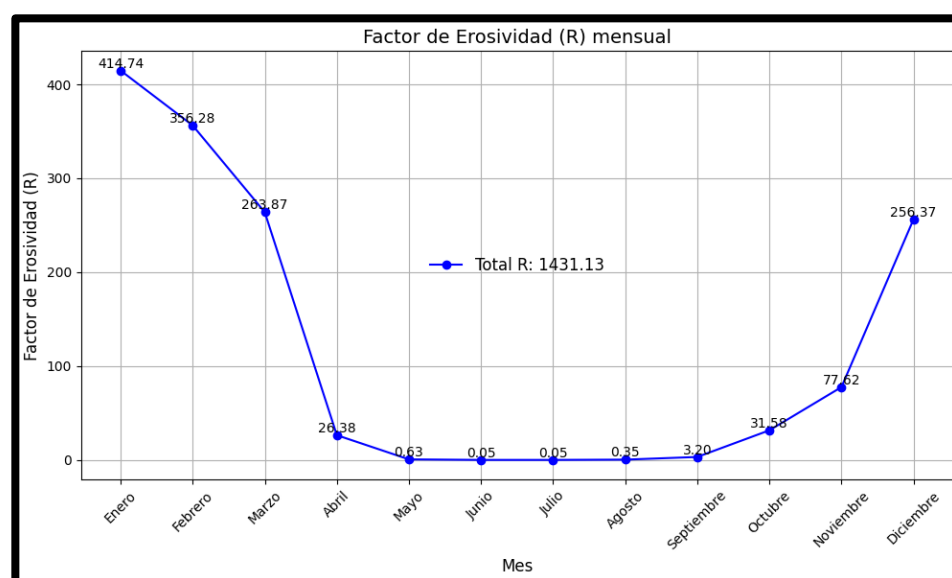
Tabla 20 — Precipitación mensual y factor de erosividad (R)

Mes	Precipitación mm	Erosividad (R) (Megajulios por milímetro de precipitación)
Enero	243	414,7375
Febrero	231	356,2791
Marzo	209	263,872
Abril	97	26,37969
Mayo	28	0,634495
Junio	12	0,049946

Julio	12	0,049946
Agosto	23	0,351672
Septiembre	48	3,196525
Octubre	103	31,58393
Noviembre	139	77,6245
Diciembre	207	256,369
Total	1352	1431.128

NOTA

La tabla presenta la precipitación mensual en milímetros y el cálculo de la erosividad (R), que refleja la capacidad de la lluvia para erosionar el suelo. Se observa que enero, febrero y marzo tienen los valores más altos de precipitación y erosividad, mientras que los meses de menor precipitación como junio, julio y agosto tienen valores bajos.



NOTA

Este gráfico ilustra el factor de erosividad (R) para cada mes en Abancay, con los picos más altos en enero y diciembre, que coinciden con los meses de mayor precipitación. Los valores de erosividad son bajos en los meses secos (junio a agosto), con un total anual de 1431.13 Mega julios por milímetro de precipitación.

Figura 18 — Factor de erosividad (R) mensual

El valor **1431.13** Mega julios por milímetro de precipitación q representa la capacidad erosiva de las lluvias en el área de Abancay, acumulada durante todo el año.

Erosividad (R): Este valor mide el potencial de la lluvia para generar erosión en el suelo. La erosividad depende de la cantidad y la intensidad de las lluvias. Cuanto mayor es el valor de R, mayor será la capacidad de las lluvias para desgastar o erosionar el suelo.

Mega julios: Es una unidad de energía (1 Mega julio = 1,000,000 de julios), que en este caso se usa para cuantificar la energía total que las precipitaciones tienen para erosionar el suelo.

Por milímetro de precipitación: Significa que el valor de 1431.13 Mega julios se calcula en función de cada milímetro de lluvia que cae sobre el área. Es decir, cuanta más lluvia haya, mayor será la erosión que puede generar.

5.1.2.2 Análisis factor de erodabilidad (K)

El factor de erodabilidad (K) mide la susceptibilidad de un suelo a la erosión bajo la acción de las lluvias y corrientes de agua.

Este factor fue esencial para identificar los tipos de suelos que son más propensos a la erosión y, por lo tanto, a la subsidencia de pavimentos flexibles. Los suelos con un alto valor de K fueron más susceptibles a la pérdida de material bajo condiciones de humedad, (Nota técnica 02 SENAMHI, 2017).

Donde 0 indica suelos con menor susceptibilidad a la erosión y al mismo tiempo, 1 indica suelos que son altamente susceptibles a la erosión por el agua.

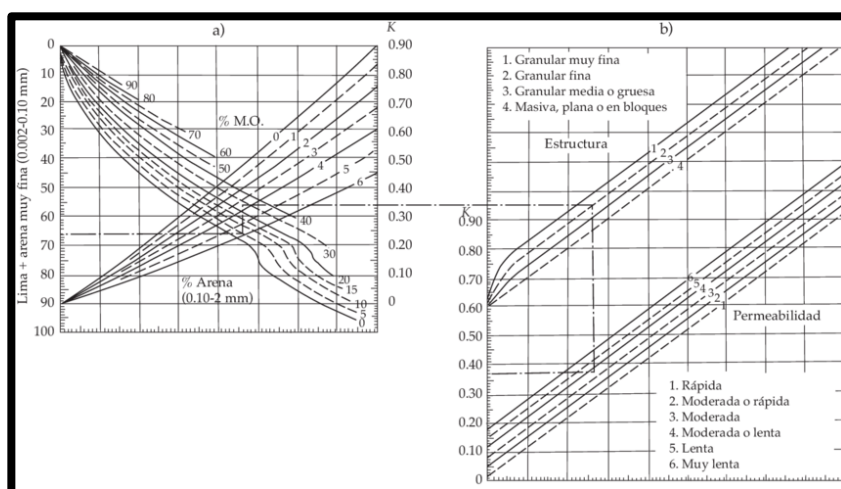
Nombres de los suelos (textura general)	Arena (%)	Limo (%)	Arcilla (%)	Clase textural	N°	Textura
Suelos francos (textura moderadamente fina)	0-45	0-40	40-100	Arcilloso	1	Fina
	0-20	40-60	40-60	Arcilloso limoso	2	
	45-65	0-20	35-55	Arcilloso arenoso	4	
Suelos arcillosos (textura fina)	0-20	40-73	27-40	Franco limoso arcilloso	3	
	45-80	0-28	20-35	Franco arenoso arcilloso	5	
	20-45	15-52	27-40	Franco arcilloso	6	
Suelos francos (textura mediana)	0-20	88-100	0-12	Limoso	7	Media
	20-50	74-88	0-27	Franco limoso	8	
	23-52	28-50	7-27	Franco	9	
Suelos arenosos (textura gruesa)	86-100	0-14	0-10	Arenoso	10	Gruesa
	50-70	0-50	0-20	Franco arenoso	11	
Suelos francos (textura moderadamente gruesa)	70-86	0-30	0-15	arenoso Franco	12	

NOTA

Esta figura clasifica los suelos según su textura general (gruesa, media o fina) en función de los porcentajes de arena, limo y arcilla. Se proporciona un análisis detallado de las calicatas y las clases texturales correspondientes para evaluar las propiedades de cada tipo de suelo.

FUENTE: SENAMHI, 2024

Figura 19 — Clasificación textural de suelos



NOTA

Este nomograma es utilizado para calcular el factor K de erodabilidad de suelos, un parámetro clave en la evaluación de la susceptibilidad de los suelos a la erosión hídrica. Los gráficos mostraron cómo se deben utilizar los valores de la textura del suelo y otros parámetros como la estructura y la permeabilidad.

FUENTE: Renard, 1997

Figura 20 — Nomograma de Wischmeier y Smith para el cálculo del factor K

$$100 \cdot K = [10^{-4} \cdot 2,71 \cdot T^{1,14} \cdot (12 - MO)] + 4,2 \cdot (E-2) + 3,2 \cdot (P-3)$$

T: parámetro de textura de los 15 cm superficiales
 $T = [(100 - Ac) \cdot (L + Armf)]$
L + Armf: limo más arena muy fina [0,1 - 0,002 mm]
Ac: arcilla [$< 0,002$ mm]
MO: contenido en materia orgánica (%)
E: parámetro de estructura
P: parámetro de permeabilidad

K expresado en $t \cdot m^2 \cdot h \cdot ha^{-1} \cdot hJ^{-1} \cdot cm^{-1}$

NOTA

Se presenta la fórmula utilizada para calcular el factor K en suelos, un indicador de su capacidad de erodabilidad. La fórmula considera parámetros como la textura del suelo, contenido de materia orgánica, estructura y permeabilidad, fundamentales en el cálculo de la erosión hídrica.

FUENTE: USLE, 2025

Figura 21 — Fórmula del Factor K (USLE)

Tabla 21 — Rango de factor K y susceptibilidad a la erosión

Rango de K	Susceptibilidad	Descripción
0.00 - 0.25	Baja susceptibilidad	Suelo muy resistente a la erosión
0.26 - 0.50	Moderada susceptibilidad	Suelo con algo de erosión
0.51 - 0.75	Alta susceptibilidad	Suelo susceptible a la erosión significativa
0.76 - 1.00	Muy alta susceptibilidad	Suelo extremadamente susceptible a la erosión
NOTA Esta tabla mostró cómo se clasifica la susceptibilidad a la erosión según el valor del factor K. Se indican los rangos de baja, moderada, alta y		

muy alta susceptibilidad a la erosión, facilitando la interpretación de los resultados para la planificación y mitigación de riesgos.

Tabla 22 — Parámetros para calcular el factor K de calicatas

Identificación		Parámetros para calcular			
Calicata		Factor K			
N°	Limo + arena muy fina	Arcilla	Material orgánico	Estructura	Permeabilidad
C-01	75,48	36,416	0,12	3	4
C-02	80,88	38,675	0,08	3	4
C-03	77,07	39,052	2,69	3	4
C-04	77,91	38,573	1,74	3	4
NOTA Esta tabla proporciona los datos específicos de las calicatas utilizadas para calcular el factor K, incluyendo la composición de cada mostró de suelo, como el porcentaje de limo, arena, arcilla, material orgánico, estructura y permeabilidad. Los valores obtenidos son clave para determinar la erodabilidad del suelo.					

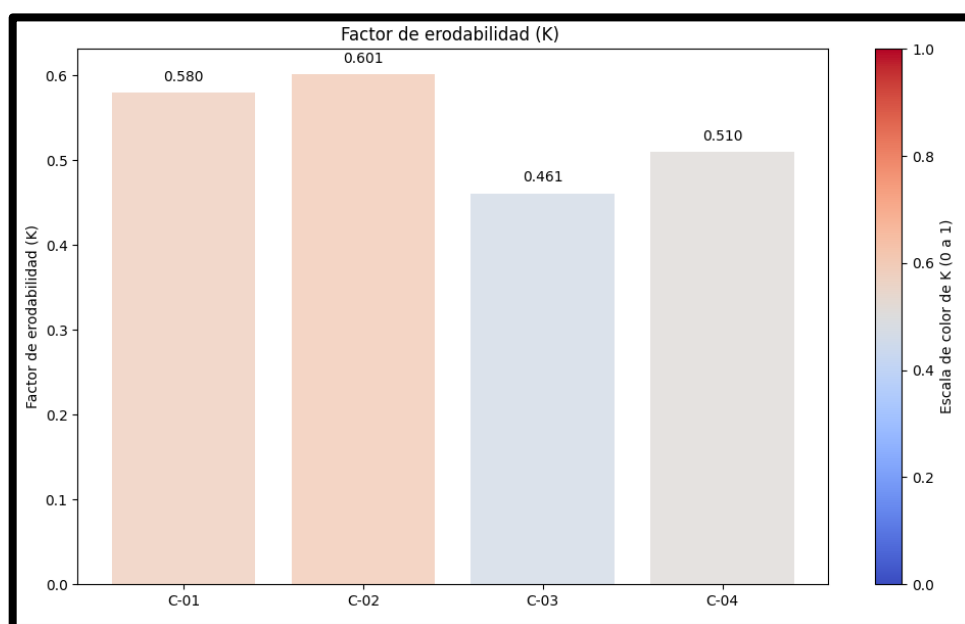
Tabla 23 — Resultados del factor K por calicata

Calicata	Valor	Factor erodabilidad	Nivel
N°	T	K	Descripción
C-01	4799.32	0.580	ALTA
C-02	4959.97	0.601	ALTA
C-03	4697.26	0.461	MODERADA

C-04	4785.78	0.510	ALTA
------	---------	-------	------

NOTA

Se presentan los valores del factor K calculados para cada calicata, junto con su correspondiente descripción de susceptibilidad a la erosión. Estos resultados permiten clasificar los suelos según su grado de erodabilidad y su impacto en la gestión del riesgo de erosión.



NOTA

El gráfico mostró la distribución del factor de erodabilidad K para las diferentes calicatas, con una representación visual del nivel de susceptibilidad a la erosión. Los colores del gráfico indican las categorías de riesgo, facilitando la interpretación de los resultados de manera clara y accesible.

Los resultados del cálculo del factor K para las calicatas mostraron que las calicatas C-01, C-02 y C-04 tienen valores de factor K de 0.580, 0.601 y 0.510 respectivamente, lo que indica una alta susceptibilidad a la erosión hídrica. En cambio, la calicata C-03, con un valor de 0.461, se clasifica con una susceptibilidad moderada. El gráfico asociado ilustra claramente estos valores, destacando las calicatas con mayor susceptibilidad a la erosión,

especialmente C-01 y C-02, que presentan los factores K más altos, mientras que C-03 está por debajo en términos de erodabilidad.

Figura 22 — Factor de erodabilidad (K)

5.1.3 Análisis estadístico descriptivo

5.1.3.1 Variable independiente (Erosión en los suelos)

a) Dimensión: Pérdida de masa por erosión (PME)

Tabla 24 — Estadística pérdida de masa por erosión (PME)

Descriptivos				
			Estadístico	Desv. error
Pérdida de masa por erosión (PME)	Media		6.7975	0.4531
	95% de intervalo de confianza para la media	Límite inferior	5.3555	
		Límite superior	8.2395	
	Media recortada al 5%		6.7975	
	Mediana		6.4650	
	Varianza		0.6159	
	Desv. Estándar		0.7848	
	Mínimo		6.1400	
	Máximo		8.1200	
	Rango		1.9800	
	Rango intercuartílico		0.7575	
	Asimetría		0.9797	
	Curtosis		-0.8168	

NOTA

La pérdida de masa por erosión presentó una media de 6.7975 g, con un rango de 1.9800 g y una desviación estándar de 6.1400 g, indicando alta dispersión. La asimetría positiva (0.9797) sugiere una distribución sesgada hacia valores mayores, mientras que la curtosis negativa (-0.8168) revela una distribución aplanada. Estos valores reflejan variabilidad significativa en la resistencia al desprendimiento superficial del suelo.

b) **Dimensión: Propiedades geotecnicas del suelo**

Tabla 25 — Estadística propiedades geotecnicas del suelo

Descriptivos			Estadístico		
			Ret N°4	Pas N°4- Ret N°200	Pas N°200
Variación granulométrica	Media		2.0450	4.7625	6.7975
	95% de intervalo de confianza para la media	Límite inferior	-0.1300	3.2512	5.3555
		Límite superior	4.2200	6.2738	8.2395
	Media recortada al 5%		2.0450	4.7625	6.7975
	Mediana		1.9500	4.4850	6.4650
	Varianza		1.4012	0.6766	0.6159
	Desv. estándar		1.1837	0.8225	0.7848
	Mínimo		0.5200	3.9500	6.1400
	Máximo		3.7600	6.1300	8.1200
	Rango		3.2400	2.1800	1.9800
	Rango intercuartílico		1.4100	0.7025	0.7575
	Asimetría		0.2117	0.8804	0.9797
	Curtosis		-1.2011	-0.8398	- 0.8168
	Desv. error		0.6834	0.4749	0.4531
NOTA					
Los porcentajes retenidos en los tamices N°4 y N°200 y la fracción fina (Pas N°200) mostrón medias de 2.0450 %, 4.7625 % y 6.7975 % respectivamente. El componente más variable fue el Ret N°4 ($\sigma = 1.1837\%$), mientras que la Pas N°200 mostró menor dispersión ($\sigma = 0.7848\%$). La asimetría y curtosis evidencian una distribución más dispersa y plana en Ret N°4, lo cual puede influir en la permeabilidad y compactación del suelo.					

5.1.3.2 Variable dependiente (subsistencia en la estructura del pavimento)

a) Dimensión: Factor de erosividad (R)

Tabla 26 — Estadística factor de erosividad (R)

Descriptivos				
			Estadístico	Desv. error
Factor de erosividad (R)	Media		119.2607	45.3395
	95% de intervalo de confianza para la media	Límite inferior	19.4692	
		Límite superior	219.0521	
	Media recortada al 5%		119.2607	
	Mediana		28.9818	
	Varianza		22612.3234	
	Desv. estándar		150.3739	
	Mínimo		0.0499	
	Máximo		414.7375	
	Rango		414.6876	
	Rango intercuartílico		257.6810	
	Asimetría		0.8544	
	Curtosis		-0.9320	

NOTA

La erosividad media fue de 119.2607 MJ·mm/ha·h·año, con gran dispersión ($\sigma = 150.3739$) y un rango elevado de 414.6876. La distribución es asimétrica positivamente (0.8544), con curtosis negativa (-0.9320), lo cual revela eventos extremos en la precipitación que podrían incrementar la susceptibilidad a la erosión hídrica.

b) Dimensión: Factor de erodabilidad (K)

Tabla 27 — Estadística factor de erodabilidad (K)

Descriptivos				
			Estadístico	Desv. error
Factor de erodabilidad (K)	Media		0.5380	0.0322
	95% de intervalo	Límite inferior	0.4355	

	de confianza para la media	Límite superior	0.6405	
	Media recortada al 5%		0.5380	
	Mediana		0.5450	
	Varianza		0.0031	
	Desv. estándar		0.0558	
	Mínimo		0.4610	
	Máximo		0.6010	
	Rango		0.1400	
	Rango intercuartílico		0.0875	
	Asimetría		-0.2223	
	Curtosis		-1.5892	
NOTA				
El factor K presentó una media de 0.5380 con desviación estándar baja (0.0558), lo que refleja consistencia en las propiedades del suelo frente a la acción erosiva del agua. La asimetría (-0.2223) y curtosis (-1.5892) mostrón una distribución simétrica y achatada, indicando una respuesta estable del suelo frente a la erosión, con predominancia de valores cercanos a la media.				

5.1.1 Prueba de normalidad para cada variable

a) Erosión en los suelos

- Hipótesis
 - H0: Los datos tienen distribución normal.
 - Ha: Los datos no tienen distribución normal.
- Decisión
 - Si el valor de Sig. < 0.05 se acepta Ha y se rechaza H0.
 - Si el valor de Sig. $\geq$ 0.05 se acepta H0 y se rechaza Ha.

Tabla 28 — Prueba de normalidad erosión en los suelos

Material por tamiz		Shapiro-Wilk ($n < 50$)		
		Estadístico	gl-	Sig.
Erosión en los suelos	Ret N°4	0.84738	4	0.21780
	Pas N°4 - Ret N°200	0.95123	4	0.72381
	Pas N°200	0.783	4	0.07527
NOTA En la primera tabla, se presentan los resultados de la prueba de normalidad Shapiro-Wilk aplicada a tres conjuntos de datos sobre erosión en los suelos: Ret N°4, Pas N°4 - Ret N°200 y Pas N°200. Los valores de significancia para todos los conjuntos de datos son mayores a 0.05 (0.21780, 0.72381 y 0.07527, respectivamente), lo que indica que los datos siguen una distribución normal y, por lo tanto, son aptos para análisis estadísticos posteriores. FUENTE: Procesamiento con Python, 2025				

b) Subsistencia en la estructura del pavimento

- Hipótesis
 - H_0 : Los datos tienen distribución normal
 - H_a : Los datos no tienen distribución normal

- Decisión
 - Si el valor de Sig. < 0.05 se acepta H_a y se rechaza H_0
 - Si el valor de Sig. ≥ 0.05 se acepta H_0 y se rechaza H_a

Tabla 29 — Prueba de normalidad subsidencia en la estructura del pavimento

Subsidencia		Shapiro-Wilk (n < 50)		
		Estadístico	gl-	Sig.
Subsidencia en la estructura del pavimento	Erodabilidad (K) Factor de erosividad (R)	0.93474	4	0.622588652
NOTA En esta tabla se presenta la prueba de normalidad Shapiro-Wilk aplicada al factor de erodabilidad (K). El valor de significancia es 0.622588652, que es superior a 0.05, lo que indica que los datos siguen una distribución normal. Esto implica que los datos de erodabilidad son adecuados para realizar análisis estadísticos adicionales sin la necesidad de transformarlos. Este análisis también fue realizado utilizando Python, asegurando la exactitud de los resultados. FUENTE: Procesamiento con Python, 2025				

5.2 Contrastación de hipótesis

5.2.1 Contrastación de hipótesis general

- Hipótesis nula (H_0).
 - Hipótesis alternativa (H_1).
- a) H_0 : Los suelos calizos erosionables NO influyen significativamente en la subsidencia del pavimento flexible en el sector Parcca del distrito Lambrama, provincia Abancay – Apurímac, 2025.

- b) H_1 : Los **suelos calizos erosionables** influyen significativamente en la **subsistencia del pavimento flexible** en el sector Parcca del distrito Lambrama, provincia Abancay – Apurímac, 2025.

Tabla 30 — Contrastación de hipótesis general

			Estadístico	P
Shapiro-Wilk W	Media		-76.448	0.02623
	Shapiro-Wilk	W	0.935	
		p	0.02623	
	Prueba t unilateral para media > 3.0			
	Media nivel de vulnerabilidad:		0.538	
	Desv. estándar		0.064	

NOTA

1. Prueba de normalidad Shapiro-Wilk:

- Estadístico W = 0.935 y Valor p = 0.02623:
- El valor p es **menor que 0.05**, lo que sugiere que **rechazamos la hipótesis nula** de que los datos siguen una distribución normal. Es decir, los datos de **erodabilidad (K)** se ajustan bien a una distribución normal.

Por tanto, concluimos que los suelos calizos erosionables influyen significativamente en la subsidencia del pavimento flexible en el sector Parcca del distrito Lambrama, provincia Abancay – Apurímac, 2025.

5.2.2 Contrastación de hipótesis específica

a) Hipótesis específica 1

- **H_0 :**
La pérdida de masa por erosión (PME) de los suelos calizos erosionables NO afectó directamente la subsistencia del pavimento flexible, de manera que, a mayor erosión, mayor es el nivel de subsistencia en el sector Parcca.
- **H_1 :**
La pérdida de masa por erosión (PME) de los suelos calizos erosionables afectó directamente la subsistencia del pavimento flexible, de manera que, a mayor erosión, mayor es el nivel de subsistencia en el sector Parcca.

Tabla 31 — Contrastación de hipótesis específica 1

		Subsidencia	Correlación
PME	Correlación de Rho Spearman	0.86	Correlación alta y positiva
	Sig. (bilateral)	0.039999999	
	N	4	
NOTA Correlación de Rho de Spearman (ρ): 0.86 Interpretación: Una correlación de 0.86 indica una correlación alta y positiva, lo que significa que hay una relación fuerte entre las dos variables. En este caso, a medida que una variable aumenta, la otra también tiende a aumentar de manera significativa. Valor p (Sig. bilateral): 0.04 Interpretación: El valor p de 0.04 es menor que 0.05, lo que indica que la correlación es estadísticamente significativa. Esto significa que hay suficiente evidencia para rechazar la hipótesis nula y aceptar la hipótesis alternativa, que sugiere que existe una relación significativa entre las variables. <i>Por tanto concluimos que la pérdida de masa por erosión (PME) de los suelos calizos erosionables afecta directamente la subsidencia del pavimento flexible, de manera que a mayor erosión, mayor es el nivel de subsidencia en el sector Parcca..</i>			

b) Hipótesis específica 2

• **H₀:**

La variación granulométrica de los suelos calizos erosionables NO influyó de forma significativa en el factor de erodabilidad (K) y en la subsidencia del pavimento flexible, disminuyendo la estabilidad estructural del pavimento en el sector Parcca.

• **H₁:**

La variación granulométrica de los suelos calizos erosionables influyó de forma significativa en el factor de erodabilidad (K) y en la subsidencia del pavimento flexible, disminuyendo la estabilidad estructural del pavimento en el sector Parcca.



Tabla 32 — Contrastación de hipótesis específica 2

		Factor de erodabilidad (K)	Correlación
Variación granulométrica	Correlación de Rho Spearman	0.76	Correlación alta y positiva
	Sig. (bilateral)	0.00013	
	N	4	
NOTA Correlación de Rho de Spearman (ρ): 0.76 Interpretación: La correlación alta y positiva de 0.76 indica que existe una relación fuerte y positiva entre erodabilidad (K) y variación granulométrica. Esto significa que a medida que la variación granulométrica cambia, también lo hace la erodabilidad del suelo en la misma dirección. Valor p (Sig. bilateral): 0.00013 Interpretación: El valor p de 0.00013 es mucho menor que 0.05, lo que indica que la correlación es estadísticamente significativa. Esto sugiere que la relación entre Variación granulométrica y el factor de erodabilidad tiene una relación real y significativa. <i>La variación granulométrica de los suelos calizos erosionables influye de forma significativa en el factor de erodabilidad (K) y en la subsidencia del pavimento flexible, disminuyendo la estabilidad estructural del pavimento en el sector Parcca.</i>			

5.3 Discusión

En la presente investigación titulada “**Influencia de los suelos calizos erosionables en la subsidencia del pavimento flexible en el sector Parcca del distrito Lambrama, provincia Abancay – Apurímac, 2025**”, se comprobó que los suelos calizos erosionables tuvieron una influencia significativa en la subsidencia de los pavimentos flexibles. Los resultados estadísticos obtenidos validaron la hipótesis general, al demostrar que la interacción entre la pérdida de masa por erosión (PME) y la variación granulométrica incrementa el grado de subsidencia del pavimento en el sector Parcca.

Este hallazgo coincide con lo expuesto por Frid et al. (2025) quienes mediante métodos geofísicos y satelitales comprobaron que la subsidencia está asociada a la pérdida de resistencia del suelo y la presencia de cavidades subterráneas, y con lo descrito por Lee

et al. (2025), quienes identificaron que la densidad relativa y la granulometría fueron determinantes en la formación de hundimientos superficiales.

En relación con la **hipótesis específica 1**, que plantea que la pérdida de masa por erosión (PME) influyó directamente en la subsidencia del pavimento flexible, los resultados mostraron un coeficiente de correlación de Spearman de $\rho = 0.86$ con un valor $p = 0.04$, lo que indicó una relación fuerte y positiva. Esto significó que a mayor pérdida de masa, mayor subsidencia del pavimento. Este comportamiento es consistente con los resultados de Galeana et al. (2022), quienes, mediante ortomosaicos y modelos digitales de elevación generados con VANT y GPS, registraron asentamientos de hasta 5.7 cm en zonas con subsidencia asociada a erosión interna del suelo. De manera similar, Mendoza y Quispe (2022) en Puno, encontraron que el exceso de humedad y la erosión disminuyen el CBR in situ de la subrasante, ocasionando deformaciones y fallas prematuras en los pavimentos.

Esto confirma que, al igual que en otras regiones, en el sector Parcca la erosión de materiales finos en los suelos calizos provocó un deterioro progresivo y hundimientos diferenciales en la carpeta asfáltica.

Respecto a la **hipótesis específica 2**, que plantea que la variación granulométrica de los suelos calizos influyó en el factor de erodabilidad (K) y en la subsidencia del pavimento, los resultados de Spearman mostraron una correlación de $\rho = 0.76$ con un valor $p = 0.00013$, confirmando la relación significativa. Estos hallazgos son coherentes con lo señalado por Andrade, Erazo y Tejada (2024), quienes establecieron que la granulometría de la subrasante incide directamente en el módulo de elasticidad y la deflexión del pavimento, condicionando los espesores de mejoramiento necesarios. De manera complementaria, Mahmoudi et al. (2024) demostraron que la modificación microestructural de arenas calcáreas con cal y zeolita incrementa su resistencia frente a ciclos húmedo-seco, reduciendo su vulnerabilidad a la erosión, lo cual refuerza la relación entre granulometría y erodabilidad. Asimismo, Castillo y Hidalgo (2024) señalaron que la textura superficial y las características hidráulicas de las capas granulares son determinantes en el comportamiento de los pavimentos flexibles, lo que coincidió con los resultados obtenidos en el sector Parcca, donde la erosión selectiva de partículas finas incrementa el factor K y, en consecuencia, la subsidencia del pavimento.



Finalmente, los resultados de esta investigación tuvieron implicancias técnicas y prácticas de gran relevancia. En primer lugar, confirmaron lo señalado por Bustamante (2024) en Cajamarca y por Carhuapoma y Tito (2021) en Amazonas, quienes destacaron que la calidad de la subrasante es fundamental para garantizar el desempeño estructural del pavimento flexible y que la estabilización con materiales alternativos puede mejorar su comportamiento. En el caso de Parcca, los resultados sugirieron la necesidad de aplicar técnicas de estabilización química en suelos calizos erosionables, implementar sistemas de drenaje profundo que reduzcan la erosión interna, y ajustar los espesores de mejoramiento de subrasante siguiendo criterios como los propuestos por, (Andrade, Erazo y Tejada, 2024).

De este modo, se valida que la subsidencia de los pavimentos flexibles en el sector Parcca está directamente asociada a la pérdida de masa por erosión y a la variación granulométrica de los suelos calizos, lo que debe ser considerado en futuros proyectos de diseño y mantenimiento vial en la región de Apurímac.



CAPÍTULO VI

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 Conclusiones

La presente investigación permitió demostrar, con base en análisis geotécnicos, ensayos de laboratorio y correlaciones estadísticas, que los suelos calizos erosionables ejercieron una influencia determinante en la subsidencia del pavimento flexible en el sector Parcca, distrito Lambrama, provincia Abancay – Apurímac.

Los resultados obtenidos evidenciaron que la erosión interna del suelo, generada por la pérdida de masa y la modificación de su estructura granulométrica, constituyó un proceso clave que debilitó progresivamente la subrasante y disminuyó su capacidad de soporte, provocando asentamientos diferenciales y deformaciones en la carpeta asfáltica.

Se comprobó que la subsidencia no es producto exclusivo del tránsito vehicular o la acción climática, sino que respondió principalmente a la naturaleza geológica y mecánica de los suelos calizos, los cuales presentaron alta susceptibilidad a la disgregación por efecto del agua. Esto validó plenamente la hipótesis general y aportó evidencia científica para comprender la problemática de pavimentos en zonas con litologías carbonáticas, como muchas áreas de Apurímac.

- **Objetivo específico 1:** Influencia de la pérdida de masa por erosión (PME)

El estudio reveló que la pérdida de masa por erosión (PME) tiene un impacto directo, significativo y cuantificable sobre la subsidencia del pavimento flexible. La correlación estadística obtenida ($\rho = 0.86$; $p = 0.04$) indicó una relación positiva fuerte, lo que confirmó que a medida que aumentó la erosión del suelo, la magnitud de los asentamientos también se incrementó.

Este comportamiento se explicó porque la erosión interna generó vacíos y discontinuidades dentro de la matriz del suelo calizo, reduciendo su compacidad y su

capacidad de distribuir cargas. Como consecuencia, el pavimento perdió soporte estructural y desarrolló deformaciones plásticas y fallas localizadas.

En términos técnicos, la PME es un indicador crítico del deterioro de la subrasante, por lo que debió incorporarse explícitamente en los estudios de mecánica de suelos aplicados a diseño y mantenimiento de pavimentos en regiones con materiales calizos o erosionables.

- **Objetivo específico 2:** Influencia de la variación granulométrica y el factor de erodabilidad (K)

Los resultados demostraron que la variación granulométrica de los suelos calizos fue un factor fundamental en el incremento del valor del factor de erodabilidad (K), lo que a su vez aumentó la susceptibilidad del suelo a la erosión hídrica. La correlación encontrada ($\rho = 0.76$; $p = 0.00013$) evidenció que, conforme el suelo perdió finos y se volvió más abierto y heterogéneo, se aceleró el proceso erosivo y se facilitó el transporte de partículas.

Esta degradación interna redujo la cohesión y alteró la microestructura del suelo, debilitando el soporte de la subrasante y contribuyendo a la subsidencia del pavimento. De igual modo, se determinó que los suelos calizos del sector Parcca presentaron características geotécnicas típicas de materiales susceptibles a disolución, disgregación y arrastre hidráulico, lo que explicó su comportamiento frente a los procesos erosivos.

En consecuencia, la granulometría y el valor de K se consolidaron como parámetros esenciales para anticipar la progresión de la subsidencia, especialmente en áreas donde el agua de infiltración y la precipitación estacional fueron factores relevantes.

6.2 Recomendaciones

Se recomienda que los estudios de diseño y mantenimiento de pavimentos flexibles dentro del sector Parcca y en zonas similares de la región Apurímac incorporen de manera obligatoria la evaluación de parámetros como la pérdida de masa por erosión (PME), la variación granulométrica y el factor de erodabilidad (K). Los resultados obtenidos en esta

investigación demostraron que estos parámetros influyen directamente en la capacidad portante del suelo calizo y, por consiguiente, en la subsidencia del pavimento flexible.

Considerar estos indicadores desde la etapa de diseño permitirá implementar secciones estructurales más resistentes, anticipar los efectos de la erosión interna y reducir de manera significativa las fallas prematuras que afectan la vida útil del pavimento, evitando elevadas inversiones en mantenimiento correctivo.

En relación con el primer objetivo específico, que analizó cómo la pérdida de masa por erosión (PME) afecta la subsidencia del pavimento flexible, se recomienda implementar técnicas de estabilización química en los tramos donde los valores de PME resulten elevados. La aplicación de cal, cemento u otros aditivos puede incrementar la cohesión del suelo calizo y disminuir su susceptibilidad a la disgregación y al arrastre de partículas finas. Asimismo, se aconseja desarrollar un programa de monitoreo continuo de la erosión mediante ensayos periódicos en laboratorio y herramientas modernas como la fotogrametría con VANT, lo que permitirá identificar oportunamente sectores críticos donde la pérdida de masa está generando vacíos internos que aceleran el hundimiento del pavimento. También resulta imprescindible mejorar el sistema de drenaje superficial y subterráneo, ya que la infiltración del agua es el principal factor que intensifica la PME y conduce al debilitamiento progresivo de la subrasante.

Respecto al segundo objetivo específico, que evaluó la influencia de la variación granulométrica en el factor de erodabilidad (K) y en la subsidencia del pavimento, se recomienda establecer controles granulométricos más rigurosos durante la selección y colocación de materiales en las capas inferiores del pavimento. El uso de materiales bien graduados y estructuralmente estables reduce la susceptibilidad a la erosión interna y limita la progresiva pérdida de finos que incrementa el valor de K. Asimismo, se recomienda complementar el diseño con sistemas eficientes de drenaje subterráneo y lateral que reduzcan la infiltración de agua hacia los suelos calizos erosionables, mitigando así la variación granulométrica y la erosión asociada. En tramos donde los cambios granulométricos sean más pronunciados, se sugiere utilizar geotextiles, geomallas o estructuras de confinamiento que ayuden a reforzar la subrasante y evitar la movilización de partículas.



Finalmente, se recomienda ampliar esta investigación mediante estudios piloto en campo que permitan validar los resultados de laboratorio bajo condiciones reales de tránsito y clima. Es fundamental explorar alternativas de estabilización con materiales reciclados o geosintéticos para desarrollar soluciones sostenibles y de menor costo que puedan ser aplicadas en zonas con suelos calizos erosionables. Además, resulta necesario fortalecer la generación de información geotécnica en la región Apurímac mediante una base de datos sistematizada que incluya valores de PME, variación granulométrica, erodabilidad (K) y comportamiento estructural de los pavimentos. Esta base permitirá ajustar futuras normativas locales y mejorar las prácticas de diseño vial en territorios con alta vulnerabilidad erosiva como el sector Parcca.



REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AASHTO, 1997. *Guía AASHTO para el diseño de estructuras de pavimentos 1993*. S.l.: s.n.
- ANDRADE, S., ERAZO, M. y TEJADA, E., 2024. Espesores de mejoramiento para incrementar la resistencia de subrasantes en pavimentos flexibles de carreteras.
- ARAÚJO, M.A., 2016. *Análisis comparativo de los métodos de suelo pavimento duro (hormigón) vs flexible (asfalto)*. Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento [en línea], vol. 110, no. 11. [Consulta: 21 noviembre 2024]. Disponible en: <https://www.nucleodoconhecimento.com.br/ingenieria-civil/metodos-de-pavimentacao-2>
- ARIAS, F.G., 2012. *El proyecto de investigación*. 6.ª ed. [en línea]. Disponible en: <https://www.researchgate.net/publication/301894369>
- ATARAXIAINC, 2006. *Mecánica de suelos: problemas resueltos*. S.l.: s.n.
- BERRY, P.L. y REID, D., 2003. *Mecánica de suelos*. S.l.: s.n.
- BOWLES, J., 1981. *Manual de laboratorio de suelos*. S.l.: s.n.
- BUSTAMANTE, J., 2024. *Determinación del comportamiento estructural del pavimento flexible de la carretera Cajamarca–San Marcos; tramo Iscocongá–Llacanora*. S.l.: s.n.
- CAPUFE, 2024. *Capa de rodadura y su importancia en la seguridad vial*. [en línea]. [Consulta: 21 noviembre 2024]. Disponible en: <https://www.gob.mx/capufe/articulos/capa-de-rodadura-y-su-importancia-en-la-seguridad-vial>
- CARHUAPOMA, C. y TITO, J., 2021. *Propuesta de mejora del comportamiento mecánico de pavimentos flexibles mediante la aplicación de polvo de fibra de vidrio reciclado sobre subrasante arcillosa de baja plasticidad*. Perú: Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas (UPC). Disponible en: <http://hdl.handle.net/10757/656814>
- CASTILLO, I. y HIDALGO, J., 2024. *Caracterización física–hidráulica del pavimento flexible en el tramo Colta–Guamote del corredor vial E-35 Riobamba–Cuenca*. Riobamba: s.n.
- CASTILLO, R., 2005. *La ingeniería de suelos*. México: Limusa. ISBN 9681800540.
- DAS, B.M., 2013. *Fundamentos de ingeniería geotécnica*. S.l.: s.n.
- DUQUE, G. y ESCOBAR, C.E., 2002. *Mecánica de los suelos*. S.l.: s.n.
- FONSECA, A.M., 1998. *Ingeniería de pavimentos para carreteras*. Vol. 2.
- FRID, M. et al., 2025. Estudio integrado de la subsidencia de pavimentos de carreteras mediante métodos geofísicos terrestres y satelitales. *Applied Sciences* [en línea], vol. 15, no. 4. [Consulta: 25 agosto 2025]. DOI: 10.3390/APP15041758. Disponible en: <https://www.mdpi.com/2076-3417/15/4/1758/htm>



- GALEANA, V.M. et al., 2022. Medición de asentamientos en pavimentos dañados por subsidencia usando ortomosaicos y MDE mediante GPS y VANT. *Ingeniería Investigación y Tecnología*, pp. 1–13.
- GIORDANI, C. y LEONE, D., 2023. *Pavimentos*. S.l.: s.n.
- GRANELES, T., 2000. *Tipo de investigación*. S.l.: s.n.
- GUZMÁN, M., 2012. *Diseño de pavimento flexible y rígido*. S.l.: s.n.
- HERNÁNDEZ, R., FERNÁNDEZ, C. y BAPTISTA, P., 2014. *Metodología de la investigación*. McGraw-Hill.
- JAIME, A. et al., 2022. Análisis de asentamientos súbitos por sismo y subsidencia en la Ciudad de México mediante imágenes satelitales. *Revista de Ingeniería Sísmica*, no. 108. DOI: 10.18867/ris.108.592.
- JUÁREZ, E. y RICO, A., 1997. *Mecánica de suelos. Tomo II*. S.l.: s.n.
- JUÁREZ, E. y RICO, A., 2005. *Fundamentos de la mecánica de suelos. Tomo I*. S.l.: s.n.
- LAMBE, T.W. y WHITMAN, R., 2004. *Mecánica de suelos*. S.l.: s.n.
- LEE, S. et al., 2025. Comportamiento de la subsidencia del terreno y formación de cavidades bajo condiciones de subsuelo. *Applied Sciences* [en línea], vol. 15, no. 14. [Consulta: 25 agosto 2025]. DOI: 10.3390/APP15147744. Disponible en: <https://www.mdpi.com/2076-3417/15/14/7744/htm>
- LEIVA, E., 2022. *Determinación del método más frecuente para el diseño de pavimentos flexibles en Perú–Cajamarca*. S.l.: s.n.
- LÓPEZ, P., 2021. *Amenaza global: la subsidencia de suelos*. Gaceta UNAM. [Consulta: 20 noviembre 2024]. Disponible en: <https://www.gaceta.unam.mx/amenaza-global-la-subsidencia-de-suelos/>
- MAHMOUDI, R. et al., 2024. Effects of Hydrated Lime and Zeolite on the Mechanical Behavior of Calcareous Sand Subjected to Wet–Dry Cycles. *Journal of Materials in Civil Engineering* [en línea], vol. 37, no. 1. DOI: 10.1061/JMCEE7.MTENG-17997.
- MARTÍNEZ, G., 2020. *Tipos de pavimento: Conócelos*. Ingeniería y Construcción Colombia. [Consulta: 1 enero 2025]. Disponible en: <https://www.ingenieriayconstruccioncolombia.com/tipos-de-pavimento/>
- MENDOZA, N. y QUISPE, E., 2022. *Análisis del comportamiento de la subrasante en pavimento flexible convencional, red vial San Juan del Oro – Quispicanchis*. S.l.: s.n.
- MONJE, C., 2011. *Metodología de la investigación cuantitativa y cualitativa: guía didáctica*. S.l.: s.n.
- MONTEJO, A., 1998. *Ingeniería de pavimentos*. Vol. 2. ISBN 958-96036-2-9.



- MTC, 2008. *Manual de diseño de carreteras no pavimentadas de bajo volumen de tránsito*. S.l.: Ministerio de Transportes y Comunicaciones.
- MTC, 2014. *Manual de carreteras: suelos, geología, geotecnia y pavimentos. Sección: suelos y pavimentos* [en línea]. Disponible en: www.mtc.gob.pe
- MTC, 2016. *Manual de ensayos de materiales*. S.l.: s.n.
- NORMA E.050, 2020. *Suelos y cimentaciones* [en línea]. SENCICO. ISBN 9786124842733. Disponible en: www.gob.pe/sencico
- SENAMHI, 2017. *Atlas de erosión de suelos por regiones hidrológicas del Perú*. [en línea]. Disponible en: www.senamhi.gob.pe
- RICO, A., TÉLLEZ, R. y GARNICA, P., 1998. *Pavimentos flexibles: problemática, metodologías de diseño y tendencias*. S.l.: s.n.
- RONDÓN, H. y REYES, F., 2022. *Pavimentos: materiales, construcción y diseño*. S.l.: s.n.
- TOMÁS, R., HERRERA, G., DELGADO, J. y PEÑA, F., 2025. *Subsidencia del terreno*. [en línea]. Disponible en: <https://www.researchgate.net/publication/254492214>
- VERGARA, A., 2010. *Deterioros en pavimentos flexibles y rígidos*. S.l.: s.n.
- VILLALAZ, C., 2004. *Mecánica de suelos y cimentaciones*. S.l.: s.n.
- VILLALOBOS, F., 2016. *Mecánica de suelos*. ISBN 9789567943715.



ANEXOS



Anexo A

Tabla 33 — Matriz de consistencia

Problema	Objetivos	Hipótesis	Variables e indicadores			Metodología
Problema general: ¿De qué manera los suelos calizos erosionables influyen en la subsidencia del pavimento flexible en el sector Parcca del distrito Lambrama, provincia Abancay – Apurímac, 2025?	Objetivo general: Evaluar la influencia de los suelos calizos erosionables en la subsidencia del pavimento flexible en el sector Parcca del distrito Lambrama, provincia Abancay – Apurímac, 2025.	Hipótesis general: Los suelos calizos erosionables influyen significativamente en la subsidencia del pavimento flexible en el sector Parcca del distrito Lambrama, provincia Abancay – Apurímac, 2025.	Dimensión	Indicadores	Unidad	Tipo de investigación: Investigación experimental Nivel: aplicada y descriptiva. Diseño: Experimental La Población: La población objeto de estudio comprende los suelos calizos erosionables ubicados en el sector Parcca, Lambrama, , Abancay, Apurímac.
			VARIABLE INDEPENDIENTE: Erosión en los suelos			
			Propiedades geotecnias del Suelo	- Contenido de humedad - Límites de atemberg - Análisis granulométrico	- % - Adimensional - %	
Problemas específicos: PE1: ¿Cómo afecta la pérdida de masa por erosión (PME) de los suelos calizos erosionables a la subsidencia del pavimento flexible en el sector Parcca del distrito Lambrama, provincia Abancay – Apurímac, 2025? PE2:	Objetivos específicos: OE1: Determinar cómo la pérdida de masa por erosión (PME) de los suelos calizos erosionables afecta la subsidencia del pavimento flexible en el sector Parcca del distrito Lambrama, provincia Abancay – Apurímac, 2025.	Hipótesis específicas: HE1: - La pérdida de masa por erosión (PME) de los suelos calizos erosionables afecta directamente la subsidencia del pavimento flexible, de manera que a mayor erosión, mayor es el nivel de subsidencia en el sector Parcca.				
			VARIABLE DEPENDIENTE: subsidencia en la estructura del pavimento			

100

¿Cómo influye la variación granulométrica de los suelos calizos erosionables en el factor de erodabilidad (K) y en la subsidencia del pavimento flexible en el sector Parcca del distrito Lambrama, provincia Abancay – Apurímac, 2025?	OE2: Analizar cómo la variación granulométrica de los suelos calizos erosionables influye en el factor de erodabilidad (K) y en la subsidencia del pavimento flexible en el sector Parcca del distrito Lambrama, provincia Abancay – Apurímac, 2025.	HE2: La variación granulométrica de los suelos calizos erosionables influye de forma significativa en el factor de erodabilidad (K) y en la subsidencia del pavimento flexible, disminuyendo la estabilidad estructural del pavimento en el sector Parcca.	Factor de erosividad (R)	– mide la capacidad erosiva de las lluvia	– MJ mm ha ⁻¹ h ⁻¹ año ⁻¹ (Megajulios por milímetro por hectárea por hora por año).	Este tipo de suelo es reconocido por su susceptibilidad a la erosión y sus implicaciones directas en la estabilidad de pavimentos flexibles. Mostró: La selección de la mostró será realizada considerando representatividad, accesibilidad y características técnicas de los suelos en estudio.
NOTA TITULO: Influencia de los suelos calizos erosionables en la subsidencia del pavimento flexible en el sector Parcca del distrito Lambrama provincia Abancay - Apurímac 2025.						

Anexo B

Panel fotográfico



Figura 23 — Exploración de campo C1



Figura 24 — Exploración de campo C2



Figura 25 — Exploración de campo C3



Figura 26 — Exploración de campo C4



Figura 27 — Cuarteo de muestras



Figura 28 — Estudio de la erodabilidad 1



Figura 29 — Estudio de la erodabilidad 2



Figura 30 — Estudio de la erodabilidad 3



Figura 31 — Estudio de la erodabilidad 4



Figura 32 — Estudio de la erodabilidad tamiz NRO. 200



Figura 33 — Análisis granulométrico

Anexo C Resultados de laboratorio



LABORATORIO DE SUELOS, CONCRETO Y PAVIMENTO
LF INGENIEROS CONSULTORES Y EJECUTORES E.I.R.L.
 Urb. Maucacalle S/N - Abancay - Apurímac
 LFICYE@gmail.com/elizabethlesly71@gmail.com/Cel:986745538

PROYECTO : Influencia de los suelos calizos erosionables en la subsistencia del pavimento flexible en el sector Parcca del distrito Lambrama provincia Abancay - Apurímac 2025.

LUGAR : sector Parcca, Lambrama Progresiva 01+600

SOLICITA : Bach. Aristofanes Hiparco Callali Merino

MUESTRA : M1

FECHA : Marzo, 2025

DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO DE HUMEDAD DE UN SUELO
[NTP 309.037 | ASTM D2216 | MTC E106]

CONTENIDO DE HUMEDAD		LÍMITE LÍQUIDO			C1	
		T1	T2	T3	PROMEDIO	
1	Tara N°					10.42%
2	Peso de la tara + Peso del suelo húmedo (gr)	80.5	85.65	82.65		
3	Peso de la tara + Peso del suelo seco (gr)	75.8	80.2	77.8		
4	Peso del agua contenida (gr) (2) - (3)	4.7	5.45	4.85		
5	Peso de la tara (gr)	30.00	30.00	30.00		
6	Peso del suelo seco (gr) (3) - (5)	45.8	50.2	47.8		
7	Contenido de humedad (%) (4) / (6)	10.26%	10.86%	10.15%		



Lucho Farfán Huamani
 LABORATORISTA DE SUELOS
 Y CONCRETO

Figura 34 — Contenido de humedad C1



LABORATORIO DE SUELOS, CONCRETO Y PAVIMENTO
LF INGENIEROS CONSULTORES Y EJECUTORES E.I.R.L.
 Urb. Maucacalle S/N - Abancay - Apurímac
 LFICYE@gmail.com/elizabethlesly71@gmail.com/Cel:986745538

PROYECTO : Influencia de los suelos calizos erosionables en la subsidencia del pavimento flexible en el sector Parcca del distrito Lambrama provincia Abancay - Apurímac 2025. MUESTRA : M1

LUGAR : sector Parcca, Lambrama Progresiva 01+600

SOLICITA : Bach. Aristofanes Hiparco Callalli Merino FECHA : Marzo, 2025

DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO DE HUMEDAD DE UN SUELO
[NTP 339.037 | ASTM D2216 | MTC E108]

CONTENIDO DE HUMEDAD		LÍMITE LÍQUIDO			PROMEDIO
		T1	T2	T3	
1	Tara N°				9.20%
2	Peso de la tara + Peso del suelo húmedo (gr)	75.5	74.2	72.5	
3	Peso de la tara + Peso del suelo seco (gr)	71.2	70.1	68.5	
4	Peso del agua contenida (gr) (2) - (3)	4.3	4.1	4	
5	Peso de la tara (gr)	25.00	25.00	25.00	
6	Peso del suelo seco (gr) (3) - (5)	46.2	45.1	43.5	
7	Contenido de humedad (%) (4) / (6)	9.31%	9.09%	9.20%	



Lucho Parfán Huamani
 LABORATORISTA DE SUELOS
 Y CONCRETO

Figura 35 — Contenido de humedad C2



LABORATORIO DE SUELOS, CONCRETO Y PAVIMENTO
LF INGENIEROS CONSULTORES Y EJECUTORES E.I.R.L
 Urb. Maucacalle S/N - Abancay - Apurímac
 LFICYE@gmail.com/elizabethlesly71@gmail.com/Cel:986745538

PROYECTO : Influencia de los suelos calizos erosionables en la subsidencia del pavimento flexible en el sector Parcca del distrito Lambrama provincia Abancay -Apurímac 2025.

LUGAR : sector Parcca, Lambrama Progresiva 01+600

SOLICITA : Bach. Aristofanes Hiparco Callalli Merino

MUESTRA : M1

FECHA : Marzo, 2025

DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO DE HUMEDAD DE UN SUELO
(NTP 339.037 | ASTM D2236 | MITC E106)

CONTENIDO DE HUMEDAD		LÍMITE LÍQUIDO			C3	
		T1	T2	T3	PROMEDIO	
1	Tara N°					10.69%
2	Peso de la tara + Peso del suelo húmedo (gr)	82.5	86	84.2		
3	Peso de la tara + Peso del suelo seco (gr)	76.98	80.2	78.5		
4	Peso del agua contenida (gr) (2) - (3)	5.52	5.8	5.7		
5	Peso de la tara (gr)	25.5	25.5	25.5		
6	Peso del suelo seco (gr) (3) - (5)	51.48	54.7	53		
7	Contenido de humedad (%) (4) / (6)	10.72%	10.60%	10.75%		



Lucho Farfán Huamani
 LABORATORISTA DE SUELOS
 Y CONCRETO

Figura 36 — Contenido de humedad C3



LABORATORIO DE SUELOS, CONCRETO Y PAVIMENTO
LF INGENIEROS CONSULTORES Y EJECUTORES E.I.R.L.
 Urb. Maucacalle S/N - Abancay - Apurímac
 LFICYE@gmail.com/elizabethlesty71@gmail.com/Cel:986745538

PROYECTO : Influencia de los suelos calizos erosionables en la subsistencia del pavimento flexible en el sector Parcca del distrito Lambrama provincia Abancay -Apurímac 2025. **MUESTRA :** M1
LUGAR : sector Parcca, Lambrama Progresiva 01+600
SOLICITA : Bsch. Aristofanes Hiparco Callalli Merino **FECHA :** Marzo, 2025

DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO DE HUMEDAD DE UN SUELO
[NTP 339.037 | ASTM D2216 | MTC E306]

CONTENIDO DE HUMEDAD		LÍMITE LÍQUIDO			CALCULATA
		T1	T2	T3	C4
1	Tara N°				9.19%
2	Peso de la tara + Peso del suelo húmedo (gr)	75.2	77.2	71.2	
3	Peso de la tara + Peso del suelo seco (gr)	71.00	72.8	67.3	
4	Peso del agua contenida (gr) (2) - (3)	4.2	4.4	3.9	
5	Peso de la tara (gr)	25.00	25.00	25.00	
6	Peso del suelo seco (gr) (3) - (5)	46	47.8	42.3	
7	Contenido de humedad (%) (4) / (6)	9.13%	9.21%	9.22%	



Lucho Farfán Huamani
 LABORATORISTA DE SUELOS
 Y CONCRETO

Figura 37 — Contenido de humedad C4

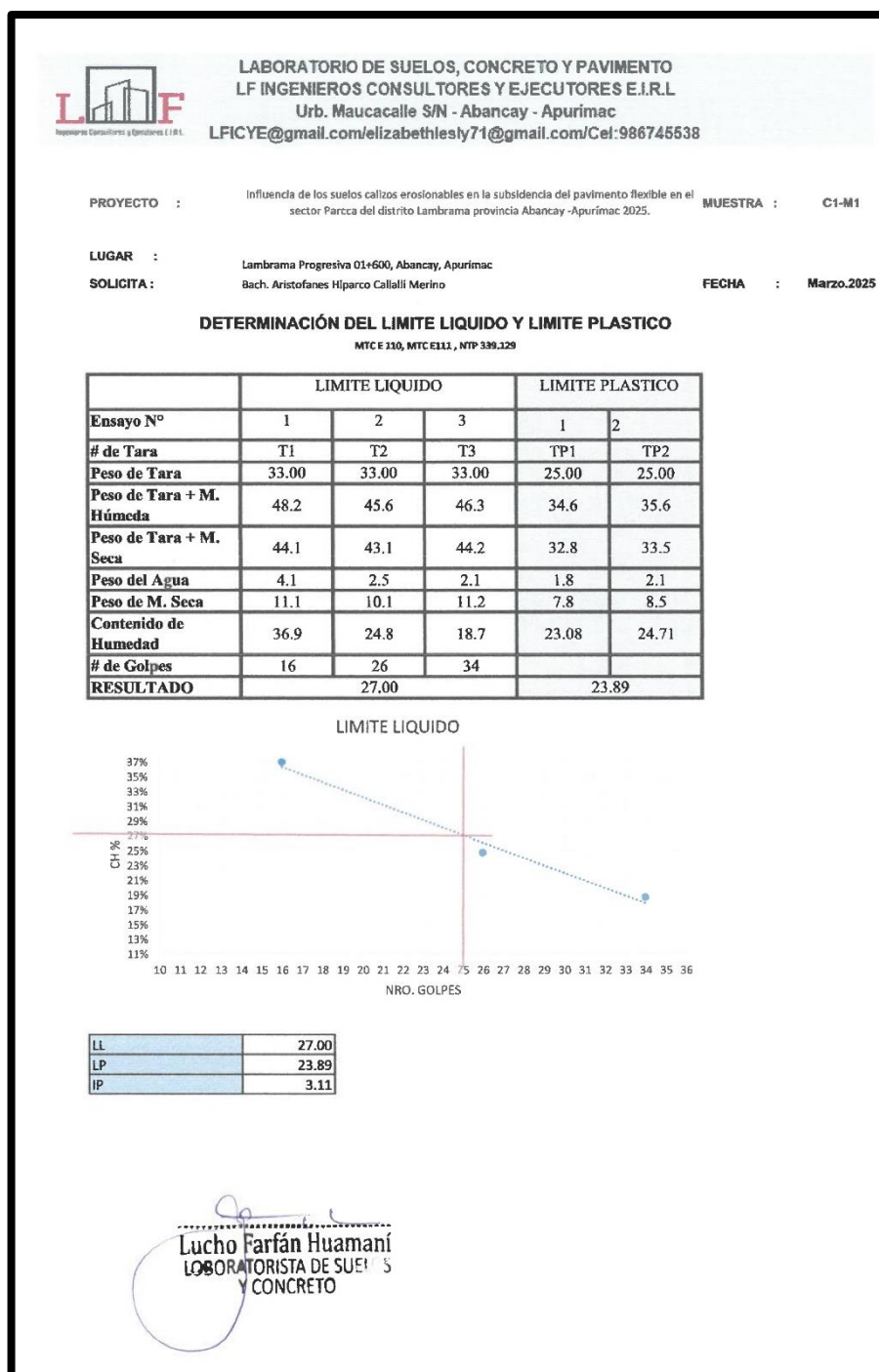


Figura 38 — LL y LP – C1

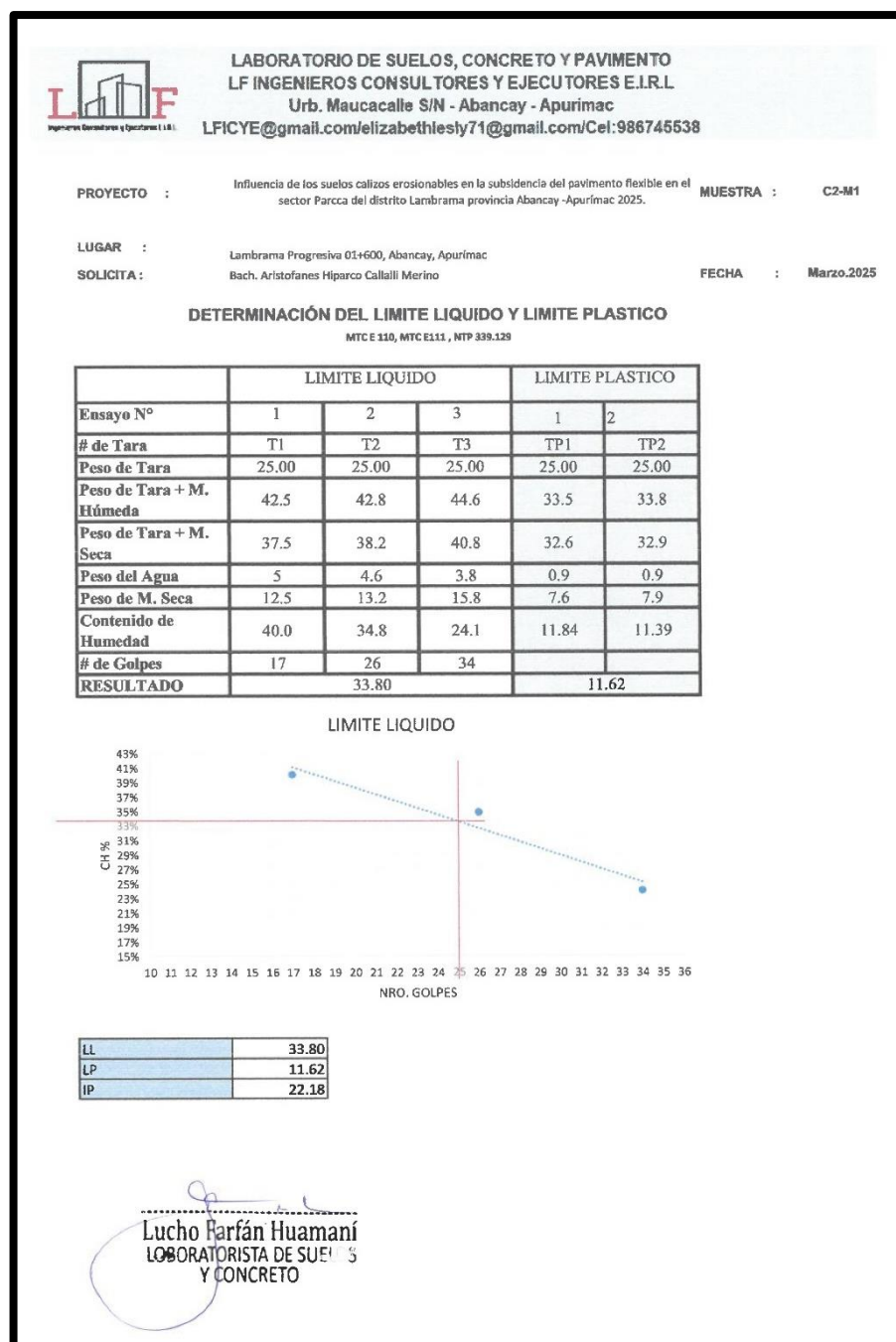


Figura 39 — LL y LP – C2

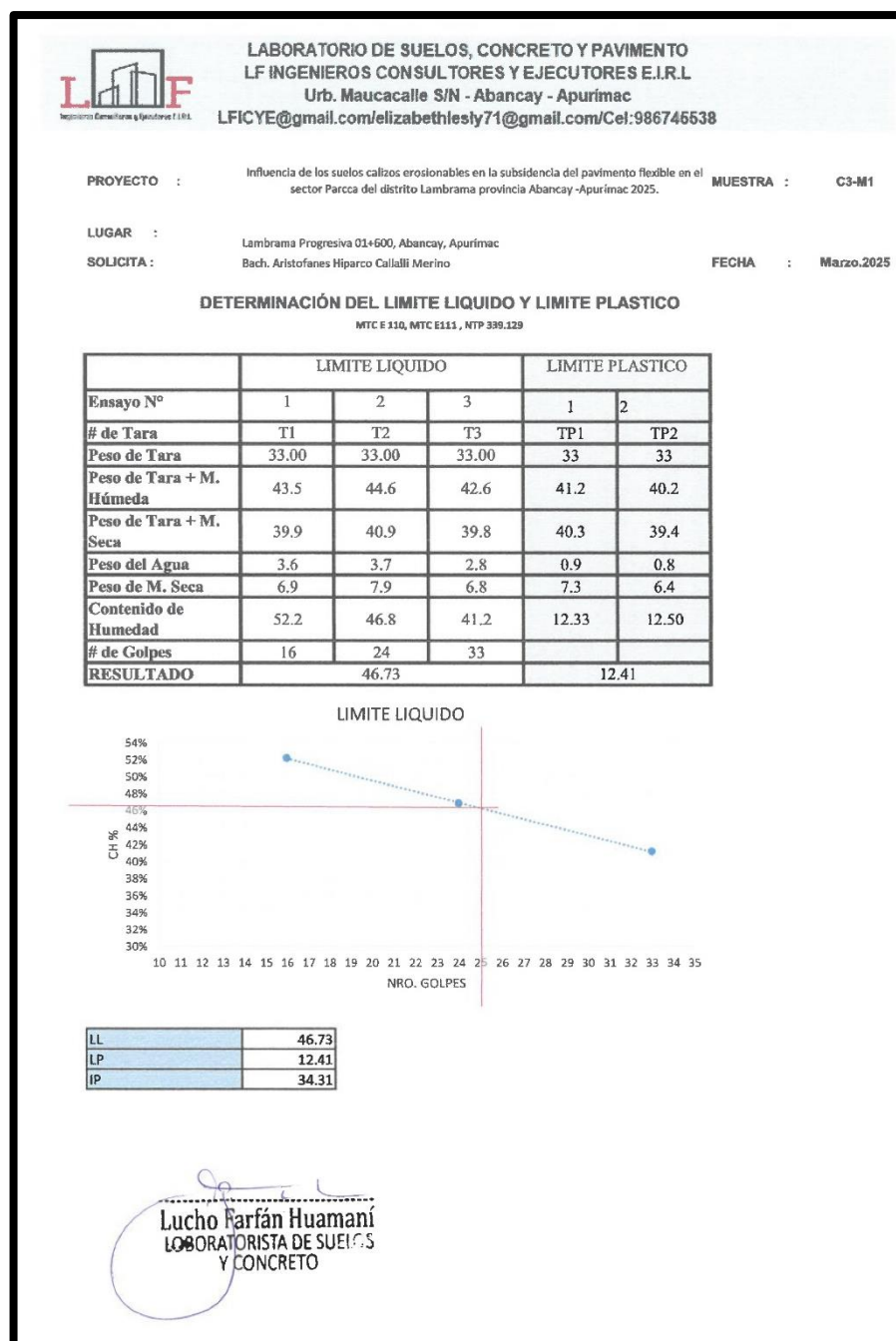


Figura 40 — LL y LP – C3

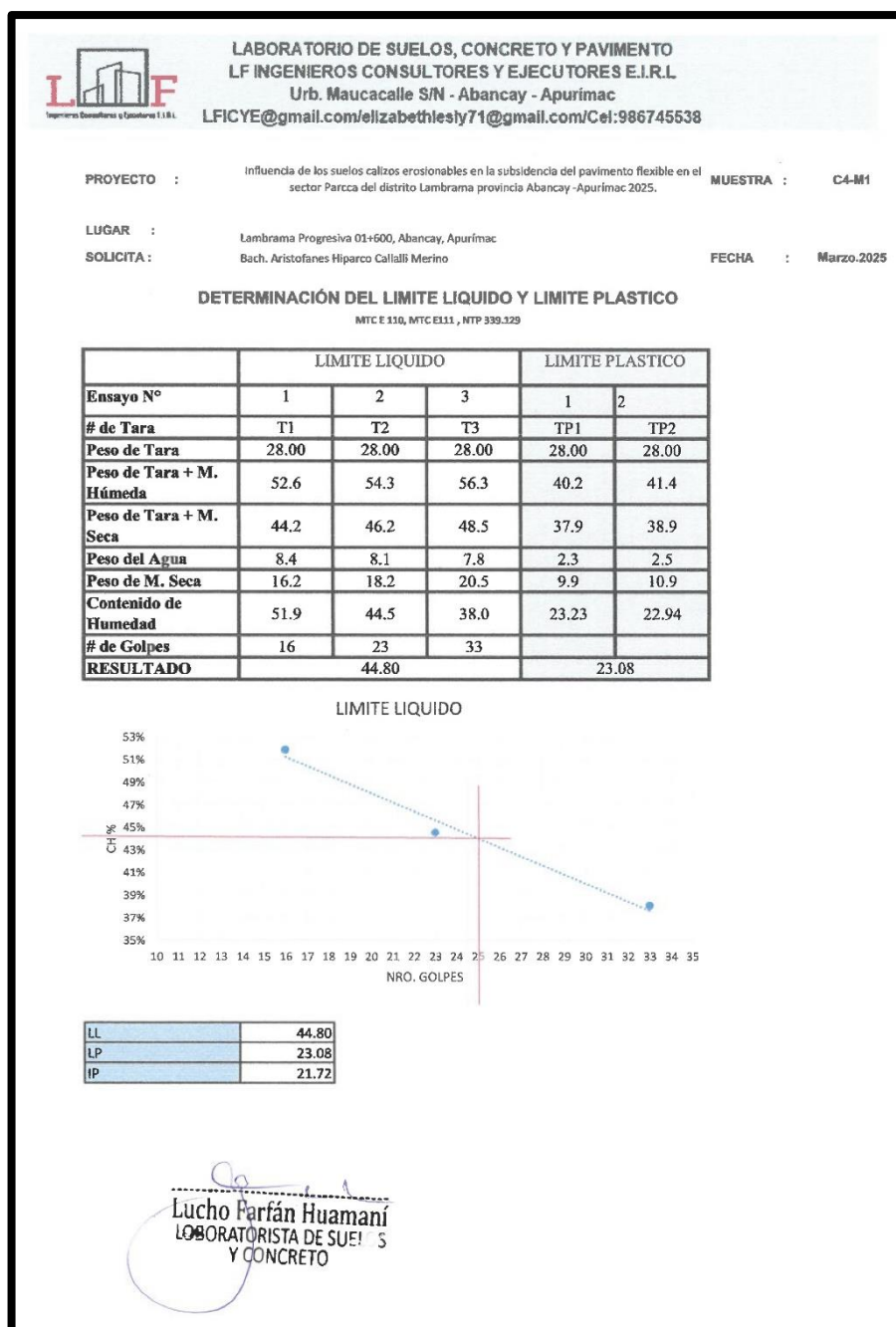


Figura 41 — LL y LP – C4

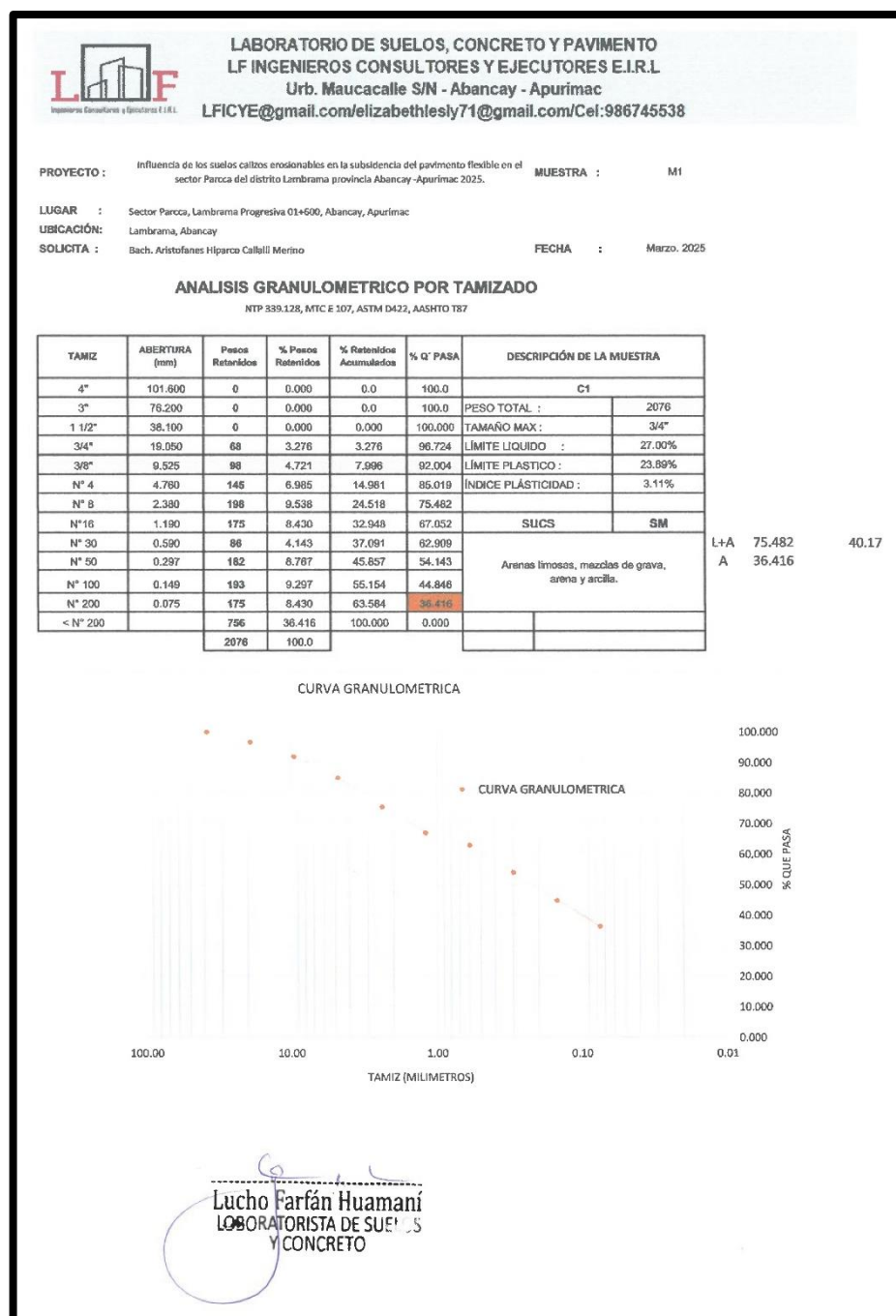


Figura 42 — Análisis granulométrico – C1

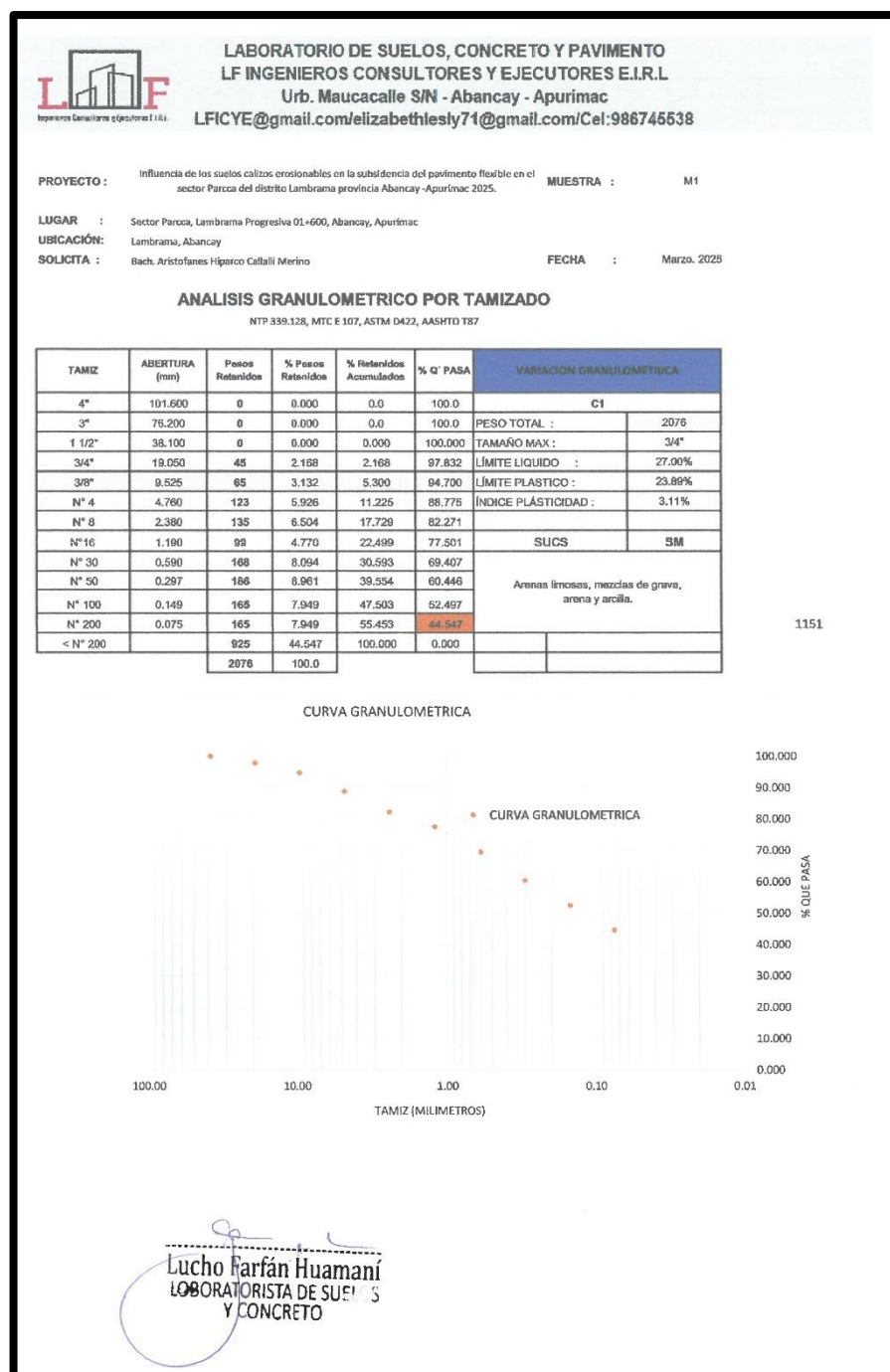


Figura 43 — Variación granulométrico – C1

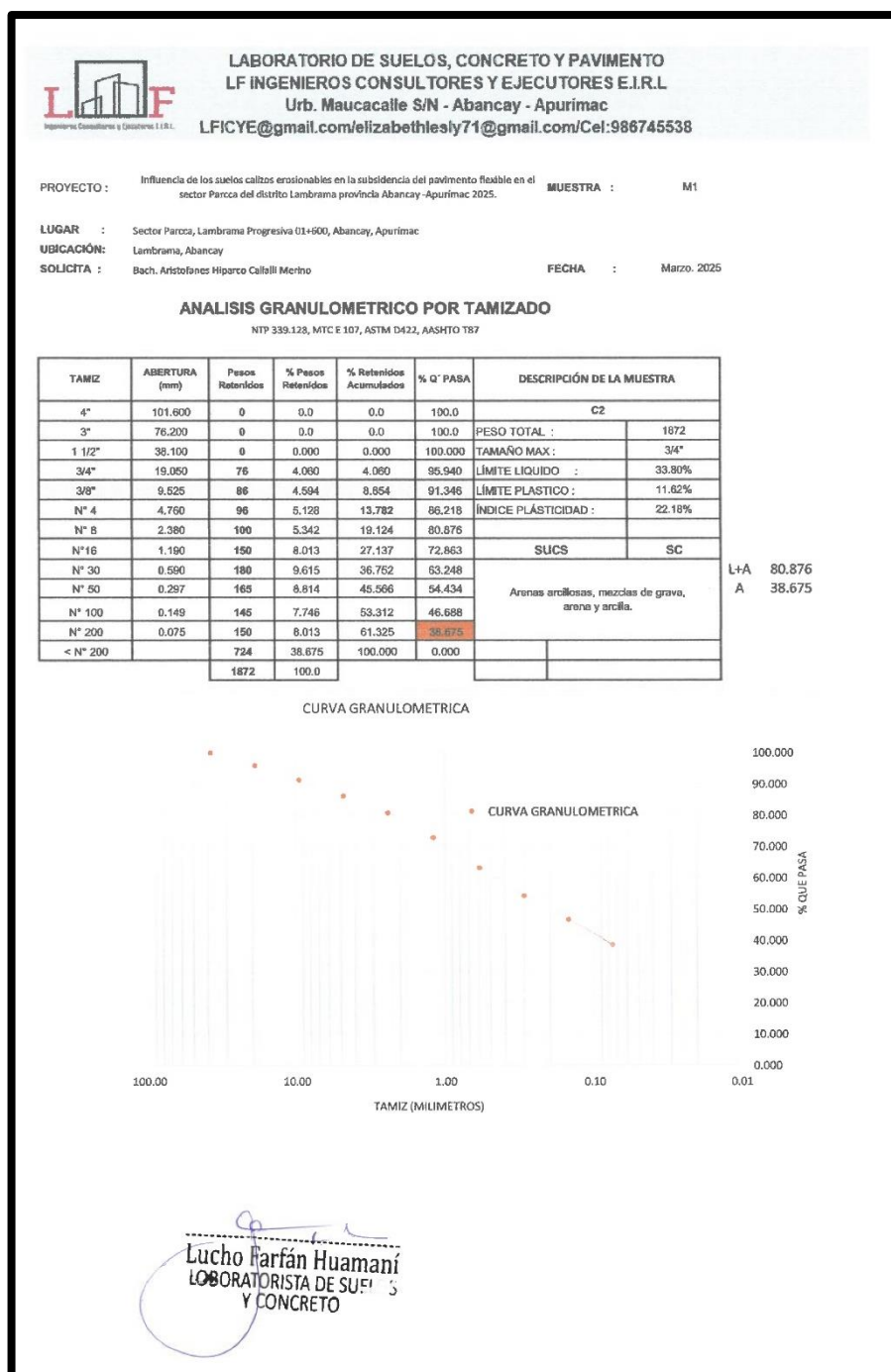


Figura 44 — Análisis granulométrico – C2

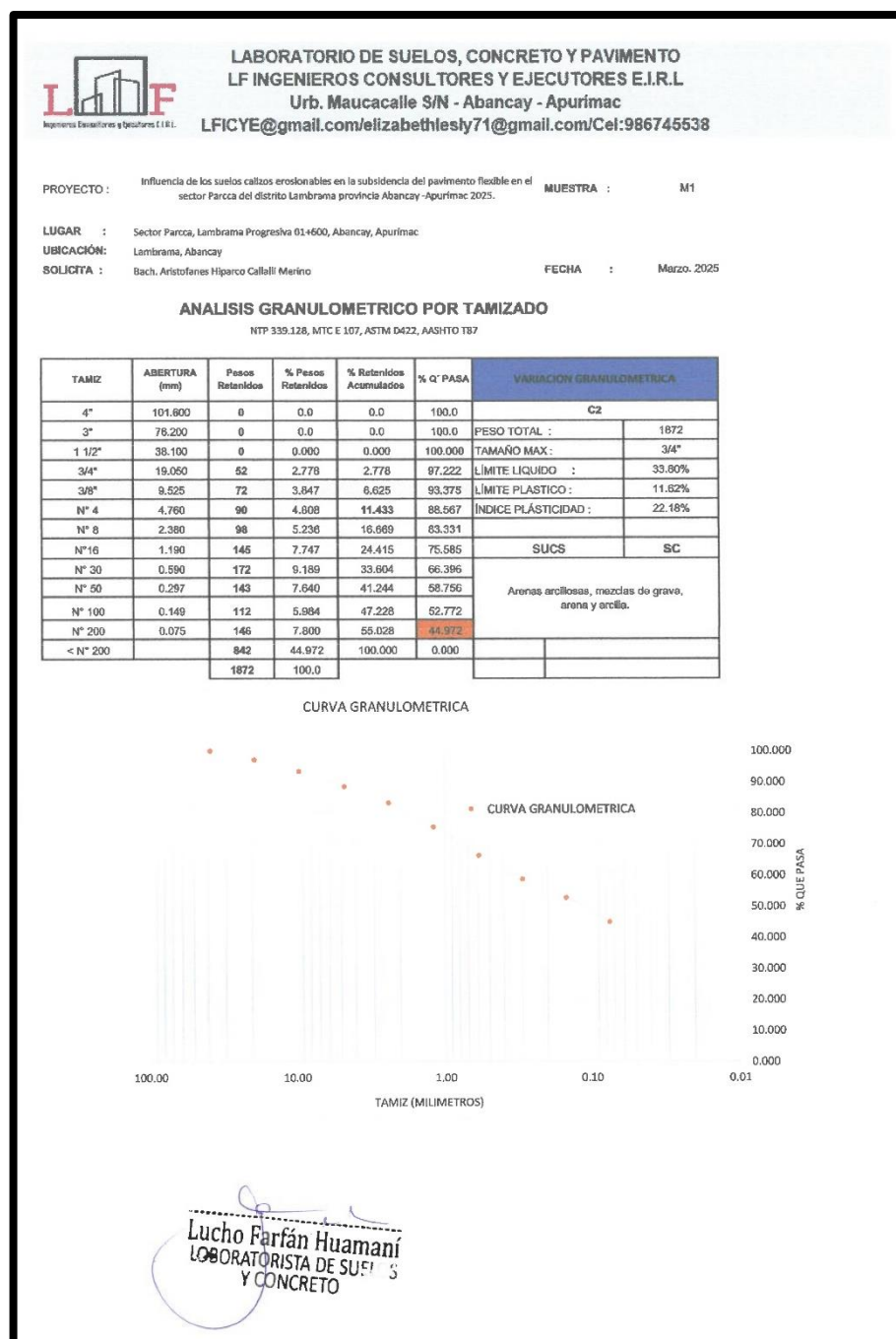


Figura 45 — Variación granulométrico – C2

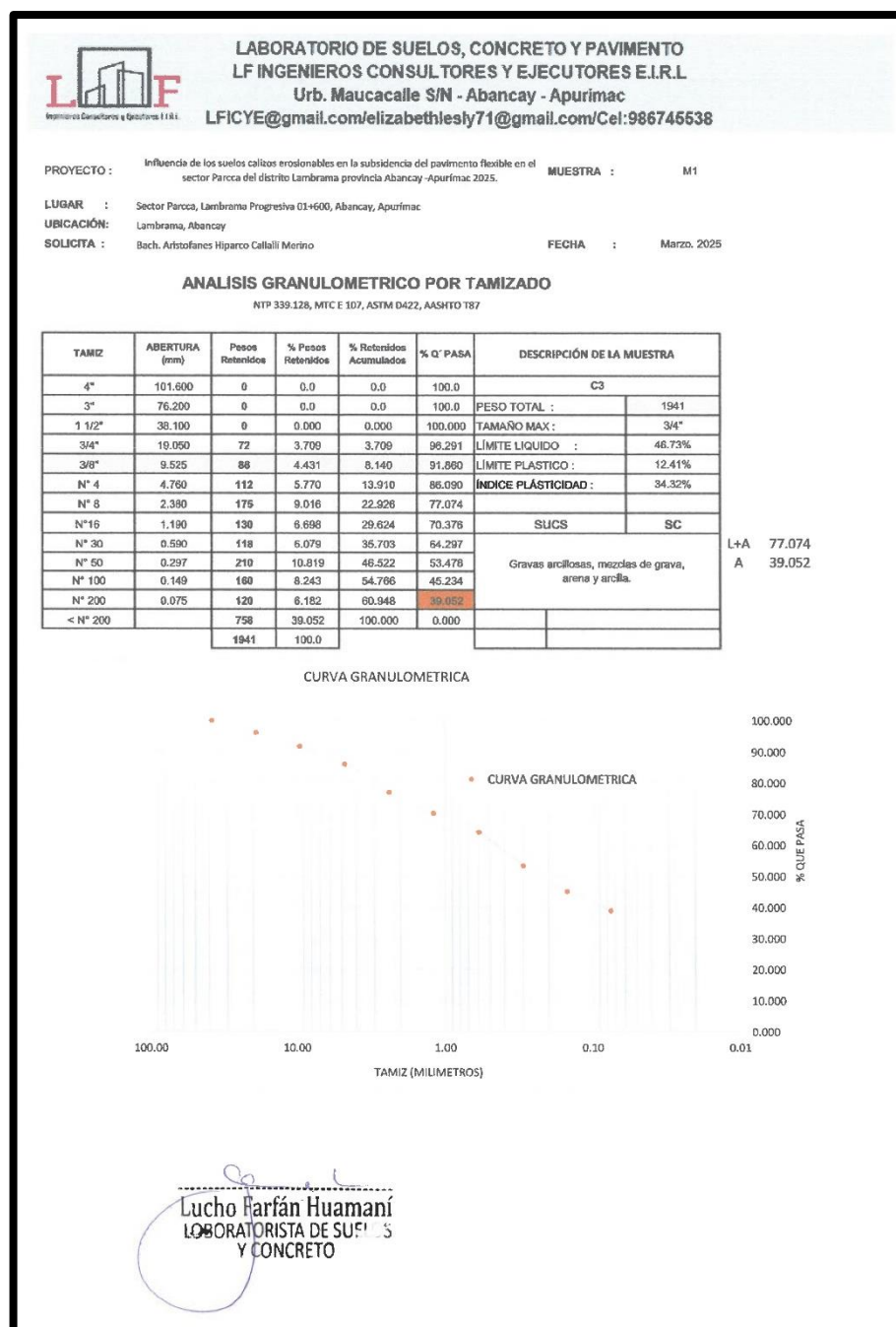


Figura 46 — Análisis granulométrico – C3

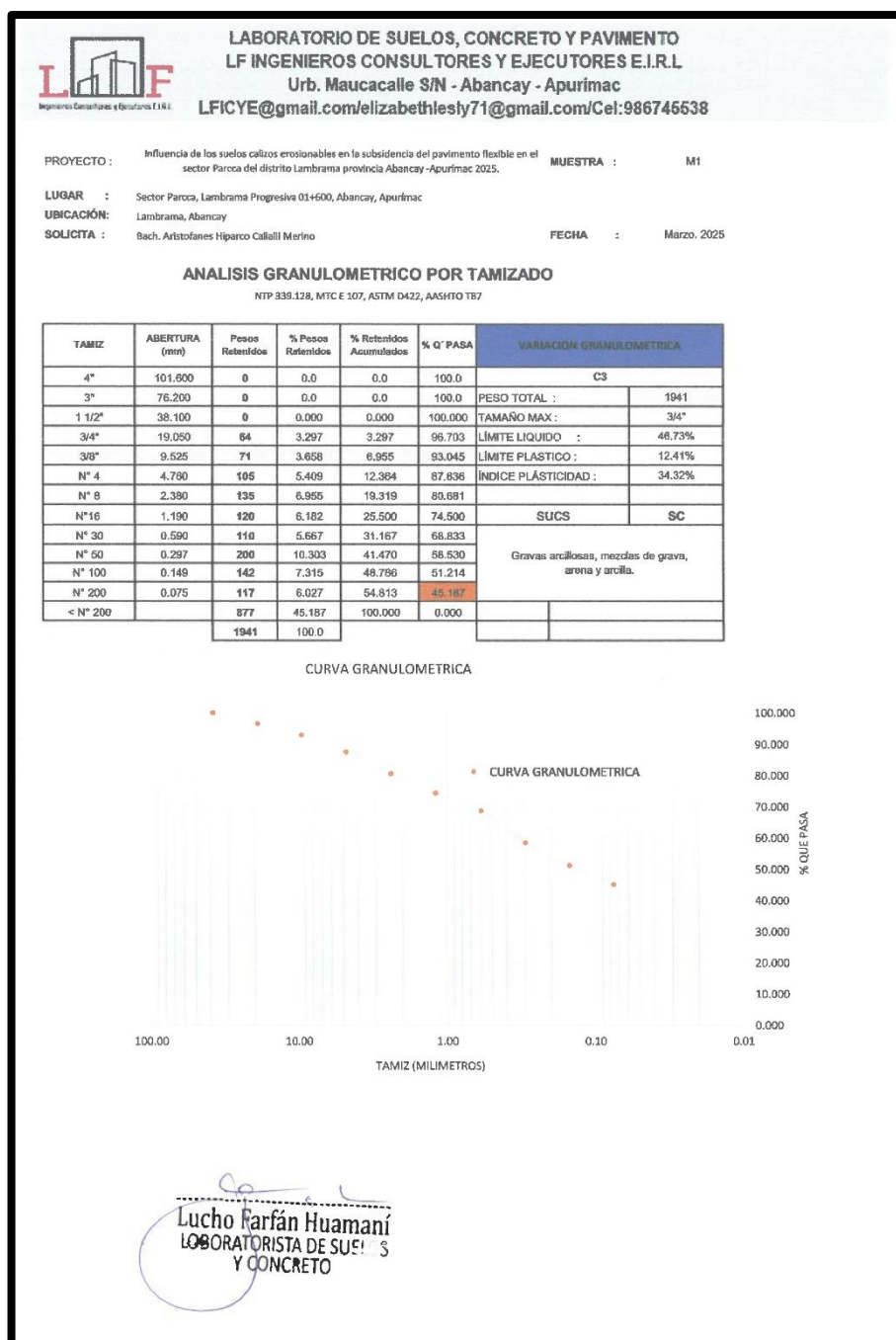


Figura 47 — Variación granulométrico – C3

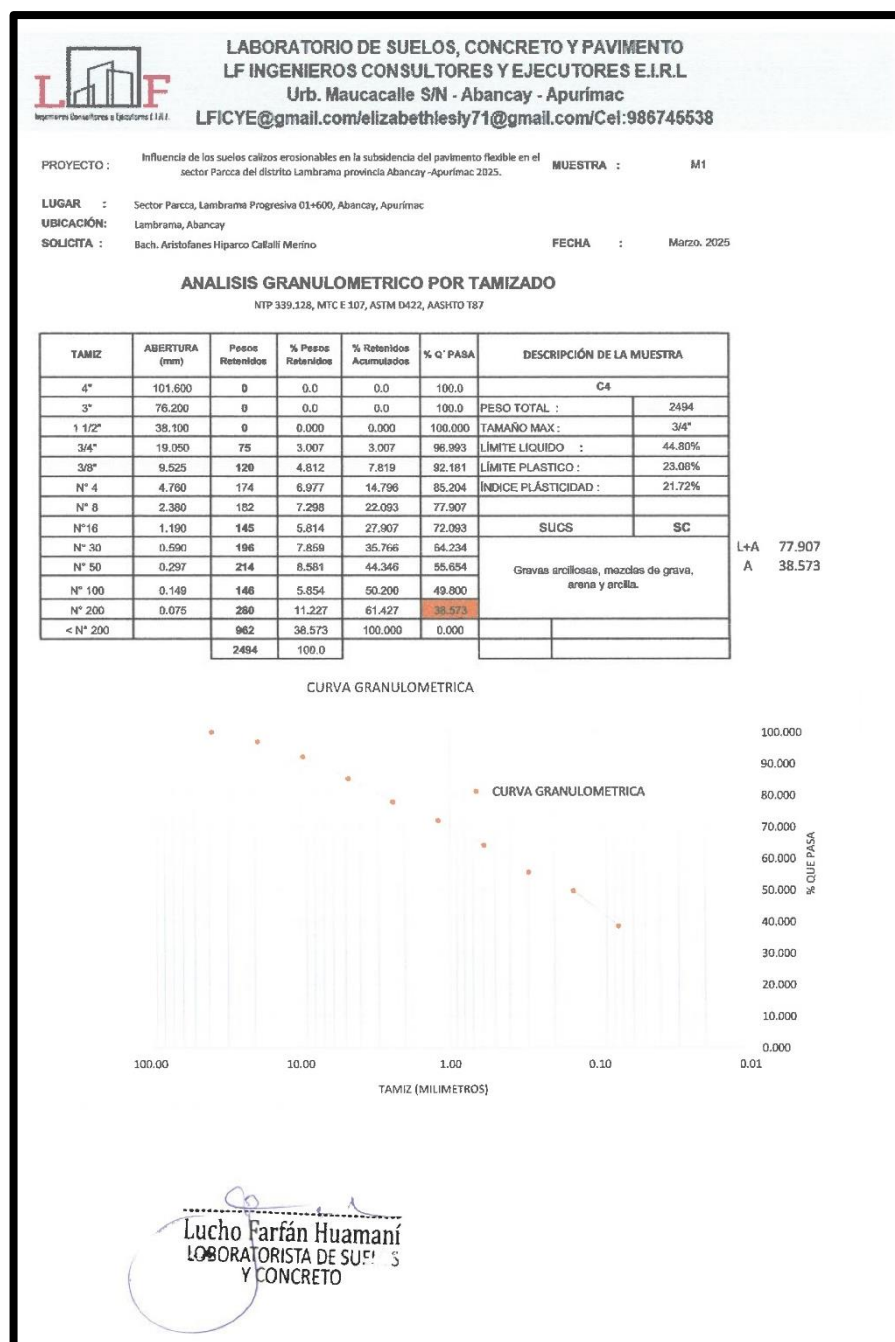


Figura 48 — Análisis granulométrico – C4

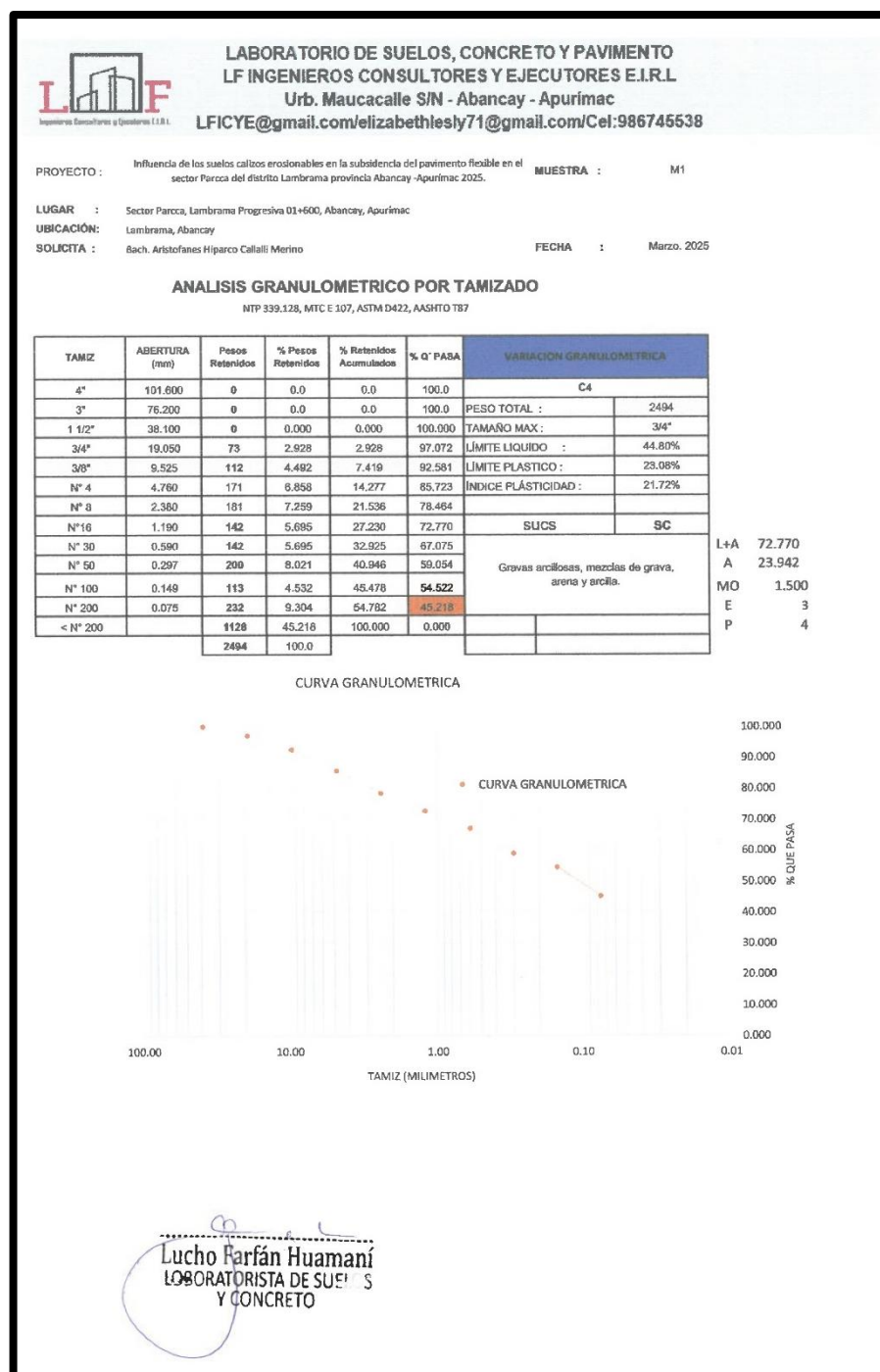


Figura 49 — Variación granulométrico – C4

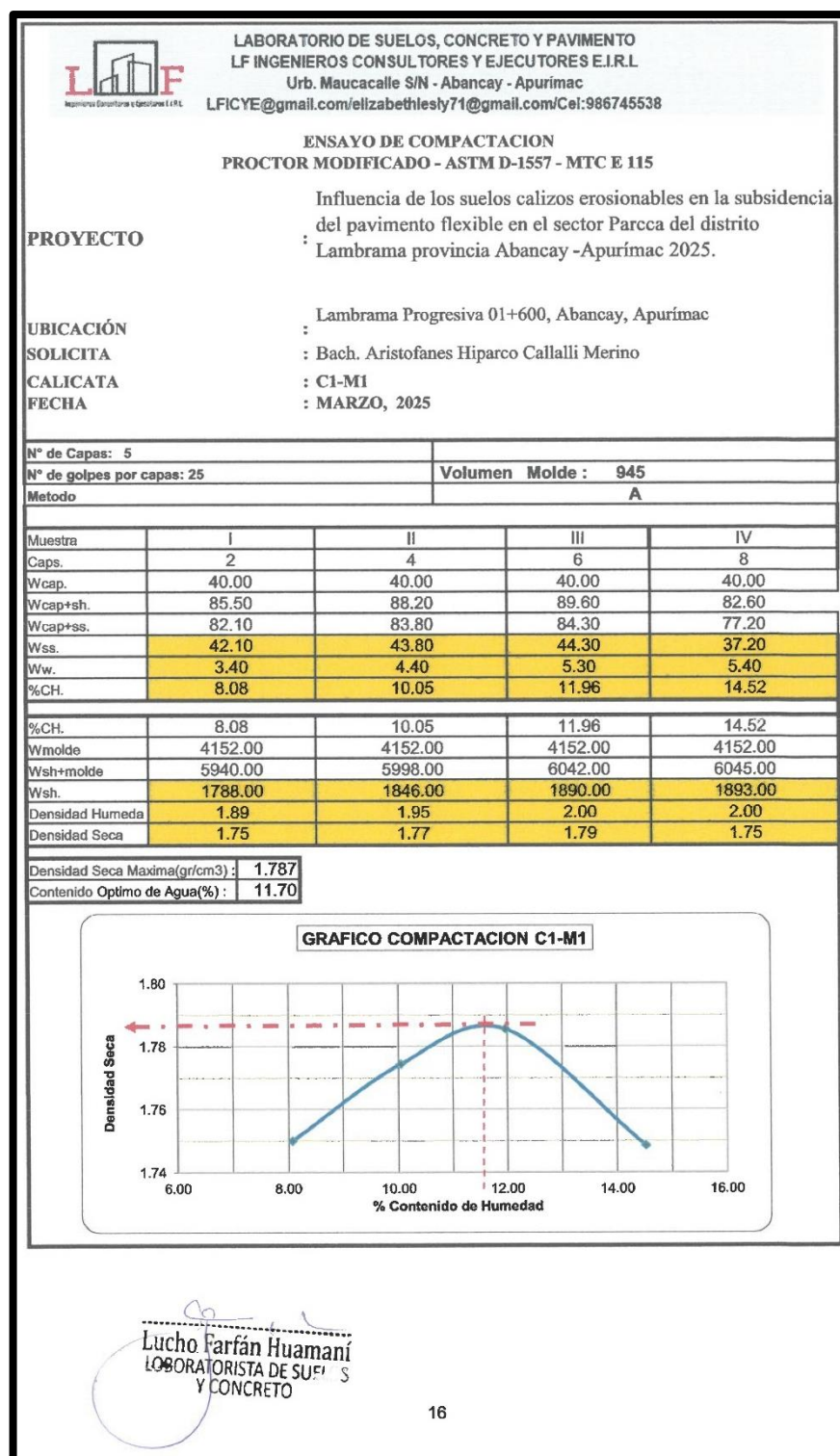


Figura 50 — Proctor modificado – C1

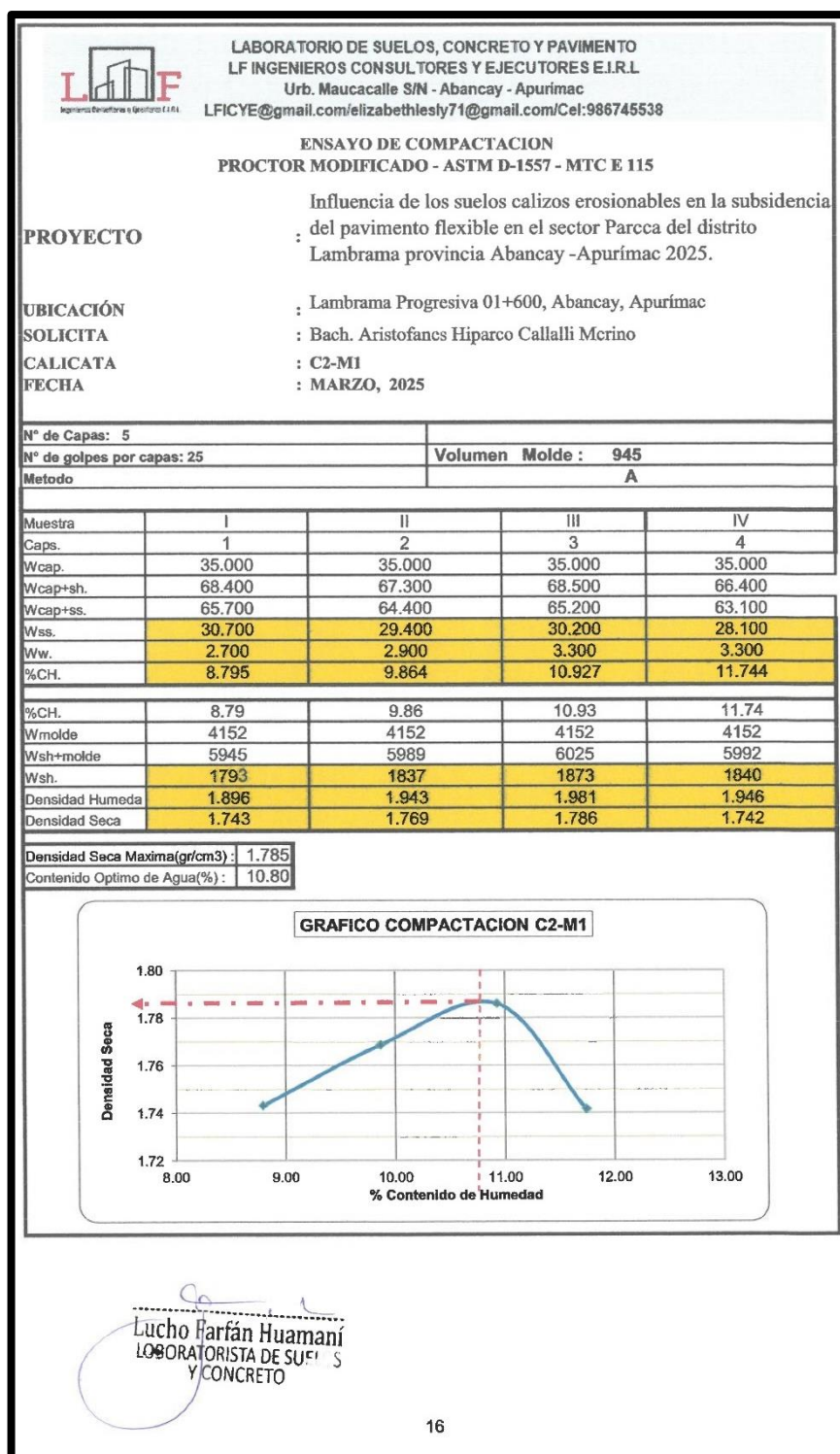


Figura 51 — Proctor modificado – C2

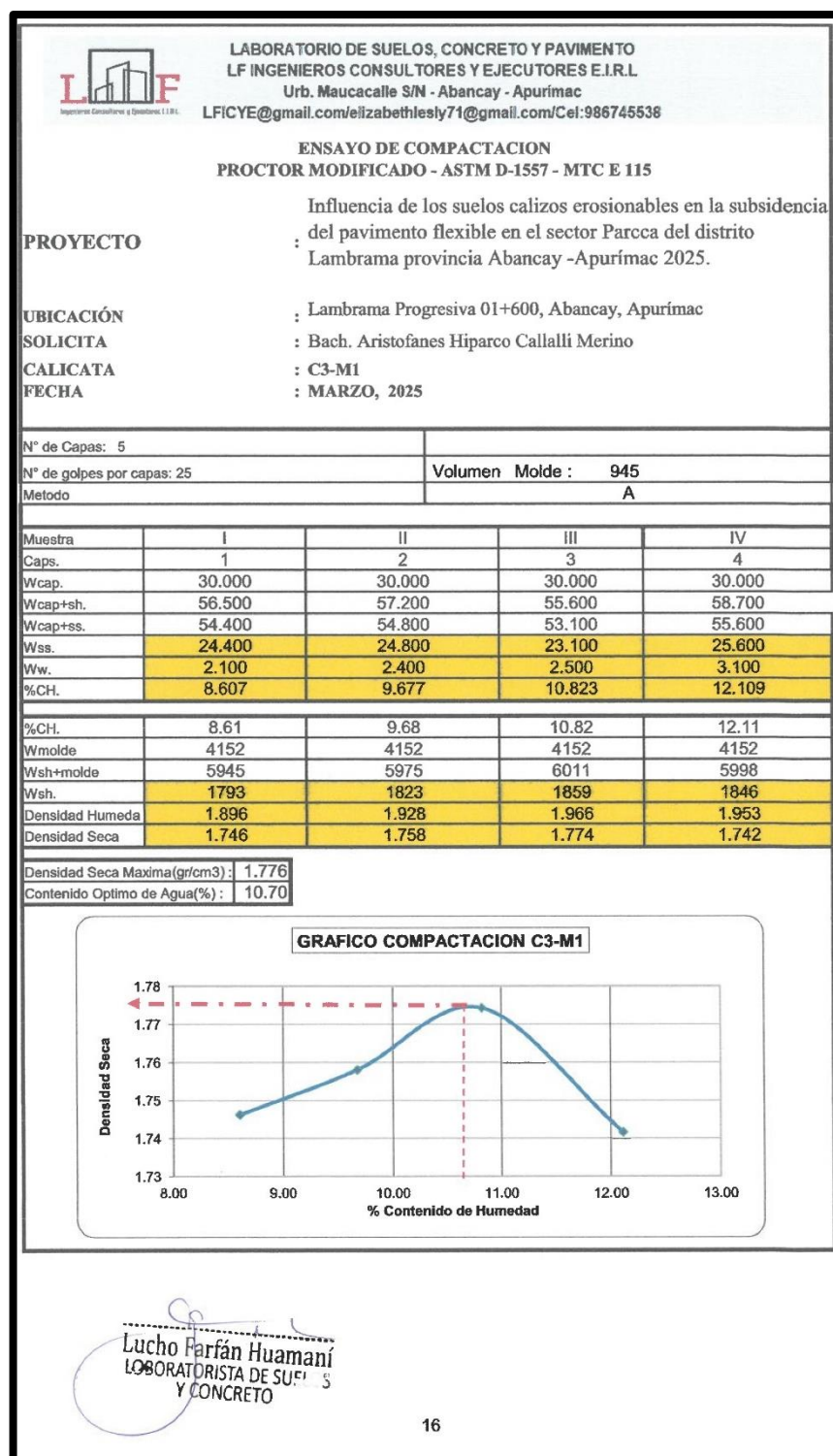


Figura 52 — Proctor modificado – C3



LABORATORIO DE SUELOS, CONCRETO Y PAVIMENTO
LF INGENIEROS CONSULTORES Y EJECUTORES E.I.R.L.
 Urb. Maucacalle S/N - Abancay - Apurímac
 LFICYE@gmail.com/elizabethlesly71@gmail.com/Cel:986745538

ENSAYO DE COMPACTACION
PROCTOR MODIFICADO - ASTM D-1557 - MTC E 115

Influencia de los suelos calizos erosionables en la subsidencia del pavimento flexible en el sector Parcca del distrito Lambra provincia Abancay -Apurímac 2025.

PROYECTO :

UBICACIÓN : Lambra Progresiva 01+600, Abancay, Apurímac

SOLICITA : Bach. Aristofanes Hiparco Callalli Merino

CALICATA : C4-M1

FECHA : MARZO, 2025

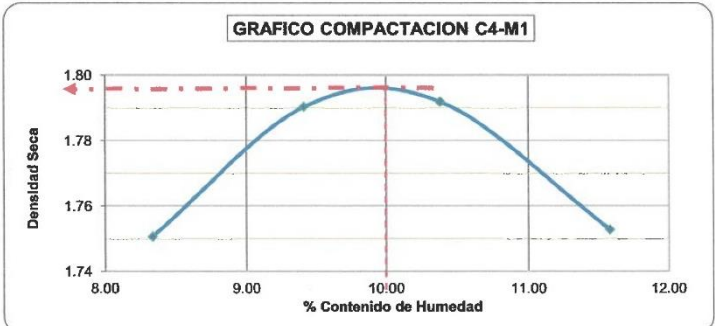
N° de Capas: 5		Volumen Molde : 945	
N° de golpes por capas: 25		Metodo : A	

Muestra	I	II	III	IV
Caps.	1	2	3	4
Wcap.	35.000	35.000	35.000	35.000
Wcap+sh.	67.500	68.700	66.900	66.800
Wcap+ss.	65.000	65.800	63.900	63.500
Wss.	30.000	30.800	28.900	28.500
Ww.	2.500	2.900	3.000	3.300
%CH.	8.333	9.416	10.381	11.579
%CH.	8.33	9.42	10.38	11.58
Wmolde	4152	4152	4152	4152
Wsh+molde	5945	6004	6022	6001
Wsh.	1793	1852	1870	1849
Densidad Humeda	1.896	1.959	1.978	1.956
Densidad Seca	1.751	1.790	1.792	1.753

Densidad Seca Maxima(gr/cm3) : 1.788

Contenido Optimo de Agua(%) : 10.00

GRAFICO COMPACTACION C4-M1





Lucho Farfán Huamani
 LABORATORISTA DE SUELOS
 Y CONCRETO

16

Figura 53 — Proctor modificado – C4

 LABORATORIO DE SUELOS, CONCRETO Y PAVIMENTO LF INGENIEROS CONSULTORES Y EJECUTORES E.I.R.L Urb. Maucacalle S/N - Abancay - Apurímac LFICYE@gmail.com/elizabethlesly71@gmail.com/Cel:986745538												
RELACION DE SOPORTE DE CALIFORNIA												
ASTM 1833 - 73												
PROYECTO:	Influencia de los suelos calizos erosionables en la subsistencia del pavimento flexible en el sector Parcca del distrito Lambra provincia Abancay - Apurímac 2025.											
UBICACIÓN:	DIST :	Lambra				C1 - M1						
	PROV:	Abancay				Humedad Optima(%)			11.700			
	DPTO:	Apurímac				Densidad Seca Maxima(g/cm3)			1.787			
						95% de la Densidad Seca Máxima			1.698			
	DIMENSIONES DE MOLDE		Diametro	Altura	Area	Diametro	Altura	Area	Diametro	Altura	Area	
			15.20	11.85	181.46	15.20	11.75	181.46	15.30	11.73	183.85	
	N° DE GOLPES POR CAPA		12			25			56			
	CONDICIONES DE LA MUESTRA		SIN MOJAR			SIN MOJAR			SIN MOJAR			
	Peso del molde(gr).		7910			7873			7919			
	Volumen de la Muestra(cc).		2150.65			2132.14			2156.61			
	Muestra Humeda + Molde(gr).		11895			11898			12070			
	Muestra Humeda(gr).		3985			4025			4151			
	Densidad Humeda(gr/cm3).		1.85			1.888			1.92			
	CONTENIDO DE HUMEDAD DE LA MUESTRA		ABAJO			ABAJO			ABAJO			
	Peso de la capsula(gr).		30.00			30.00			30.00			
	Muestra Humeda + Capsula(gr).		75.50			76.50			77.40			
	Muestra Seca+ Capsula(gr).		70.72			71.60			72.35			
	Muestra Seca(gr).		40.72			41.60			42.35			
	Contenido de Agua(gr)		4.78			4.90			5.05			
	Contenido de Humedad(%)		11.74			11.78			11.92			
	Promedio de Contenido de Humedad(%)		11.74			11.78			11.92			
	Densidad Seca(gr/cm3).		1.658			1.689			1.720			
	% Compactación		92.80			94.51			96.23			
	MEDICION DE LA EXPANSION		DIA	HORAS	INTER VALO	LECT. DEFOR.	EXPANSION PULGS	%	LECT. DEFOR.	EXPANSION PULGS	%	
			1.00	0	0.00							
			2.00	24	1.00		0.0000	0.0000		0.0000	0.0000	
			3.00	48	2.00		0.0000	0.0000		0.0000	0.0000	
			4.00	72	3.00		0.0000	0.0000		0.0000	0.0000	
			5.00	96	4.00		0.0000	0.0000		0.0000	0.0000	
	PENETRACION "PULGADAS"		CARG. PATR	FACTOR CARGA IND(KG)	CARGA 12	FACTOR CARGA IND(KG)	CARGA 25	FACTOR CARGA IND(KG)	CARGA 56			
			0	0	0.00	0	0.00	0	0.00			
			0.025	1.2	0.04	2.6	0.08	3.9	0.12			
			0.050	3.6	0.11	7.8	0.24	8.2	0.25			
			0.075	7.3	0.23	11.3	0.35	11.5	0.36			
			0.100	6.90	10.6	0.33	4.75	12	0.37			
			0.125	16.8	0.52	22.5	0.70	5.38	0.76			
			0.150	24.2	0.75	28.6	0.88	30.2	0.93			
			0.175	29.5	0.91	34.5	1.07	36.5	1.13			
			0.200	10.35	35.1	1.09	10.48	40.2	1.24			
								12.01	44.8			
									1.38			
									13.38			



Lucho Farfán Huamani
LABORATORISTA DE SUELOS Y CONCRETO

Figura 54 — CBR carga - C1

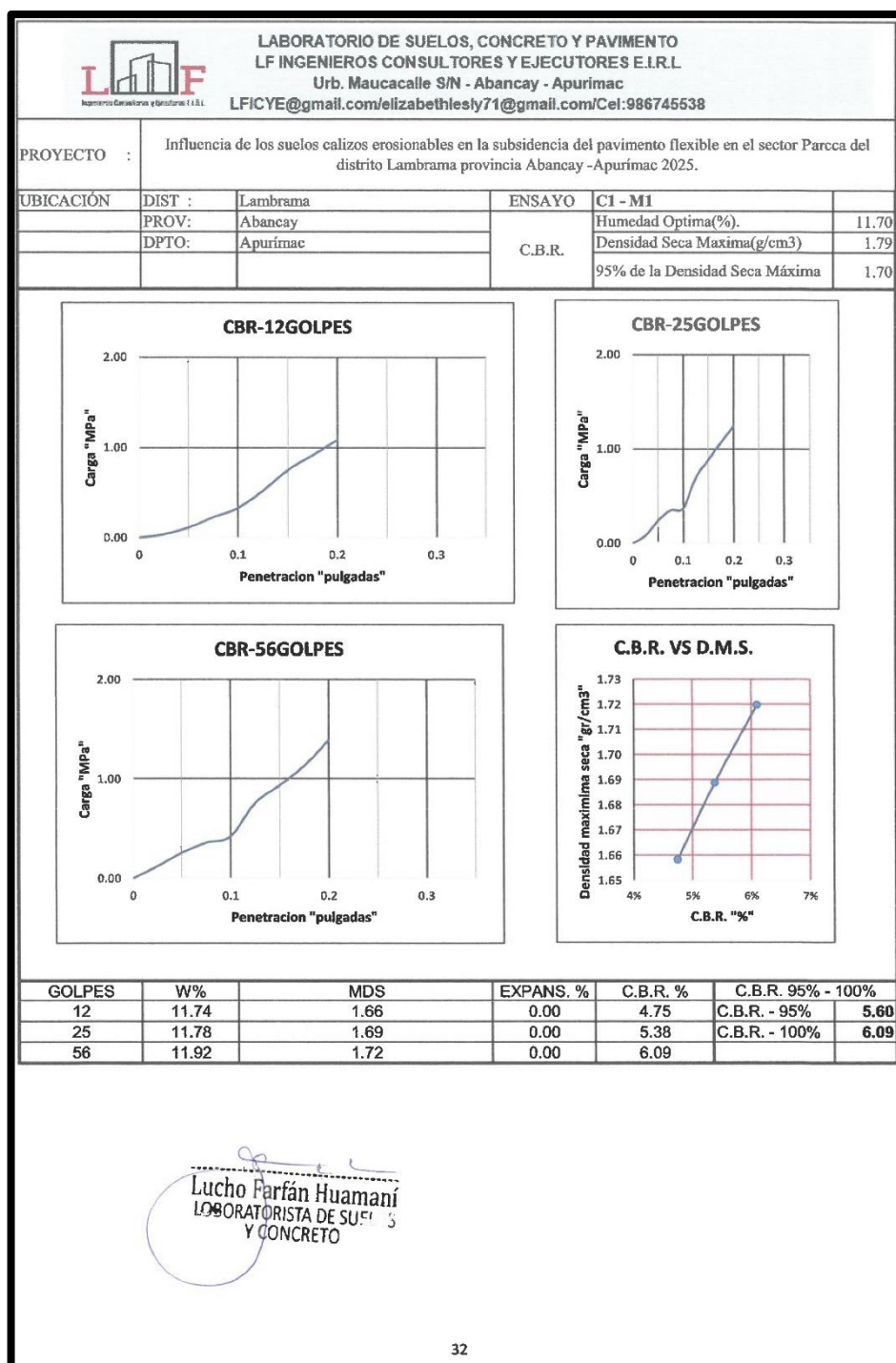


Figura 55 — CBR gráfico - C1

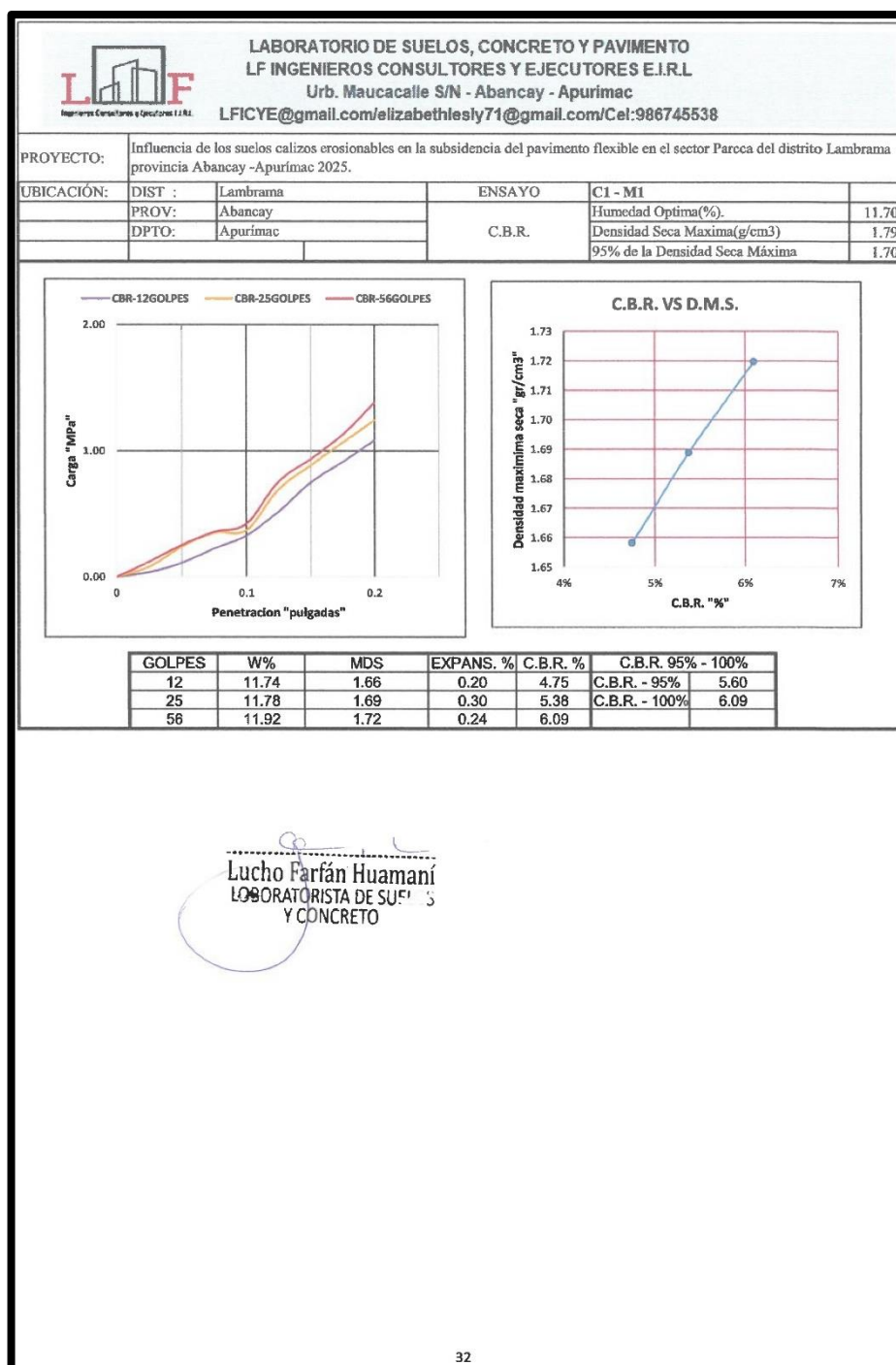


Figura 56 — CBR vs DSM - C1



LABORATORIO DE SUELOS, CONCRETO Y PAVIMENTO
LF INGENIEROS CONSULTORES Y EJECUTORES E.I.R.L.
 Urb. Maucacalle S/N - Abancay - Apurímac
LFICYE@gmail.com/elizabethlesly71@gmail.com/Cel: 986745538

RELACION DE SOPORTE DE CALIFORNIA (CBR)
ASTM 1833 - 73

PROYECTO: Influencia de los suelos calizos erosionables en la subsistencia del pavimento flexible en el sector Parcca del distrito Lambra provincia Abancay - Apurímac 2025.

UBICACIÓN: DIST : Lambra
 PROV: Abancay
 DPTO: Apurímac

C2 - M1

Humedad Optima(%). 10.80
Densidad Seca Maxima(g/cm3) 1.787
95% de la Densidad Seca Máxima 1.70

DIMENSIONES DE MOLDE			Diametro			Altura			Area		
15.20	11.85	181.46	15.20	11.75	181.46	15.30	11.73	183.85			

N° DE GOLPES POR CAPA 12 25 56

CONDICIONES DE LA MUESTRA SIN MOJAR SIN MOJAR SIN MOJAR

Peso del molde(gr). 7910 7873 7919
 Volumen de la Muestra(cc). 2150.65 2132.14 2156.61
 Muestra Humeda + Molde(gr). 11874 11870 12045
 Muestra Humeda(gr). 3964 3997 4126
 Densidad Humeda(gr/cm3). 1.84 1.87 1.91

CONTENIDO DE HUMEDAD DE LA MUESTRA

	ABAJO	ARRIBA	ARRIBA	ABAJO	ARRIBA	ARRIBA	ABAJO	ARRIBA	ARRIBA
Peso de la capsula(gr).	35.00			35.00			35.00		
Muestra Humeda + Capsula(gr).	65.40			67.40			68.50		
Muestra Seca+ Capsula(gr).	62.40			64.20			65.20		
Muestra Seca(gr).	27.40			29.20			30.20		
Contenido de Agua(gr)	3.00			3.20			3.30		
Contenido de Humedad(%)	10.95			10.96			10.93		
Promedio de Contenido de Humedad(%).	10.95			10.96			10.93		
Densidad Seca(gr/cm3).	1.661			1.689			1.725		

% Compactación

	DIA	HORAS	INTER VALO	LECT. DEFOR.	EXPANSIÓN		LECT. DEFOR.	EXPANSIÓN		LECT. DEFOR.	EXPANSIÓN	
					PULGS	%		PULGS	%		PULGS	%
MEDICIÓN DE LA EXPANSIÓN	1.00	0	0.00									
	2.00	24	1.00		0.0000	0.0000		0.0000	0.0000		0.0000	0.0000
	3.00	48	2.00		0.0000	0.0000		0.0000	0.0000		0.0000	0.0000
	4.00	72	3.00		0.0000	0.0000		0.0000	0.0000		0.0000	0.0000
	5.00	96	4.00		0.0000	0.0000		0.0000	0.0000		0.0000	0.0000

PENETRACION "PULGADAS"

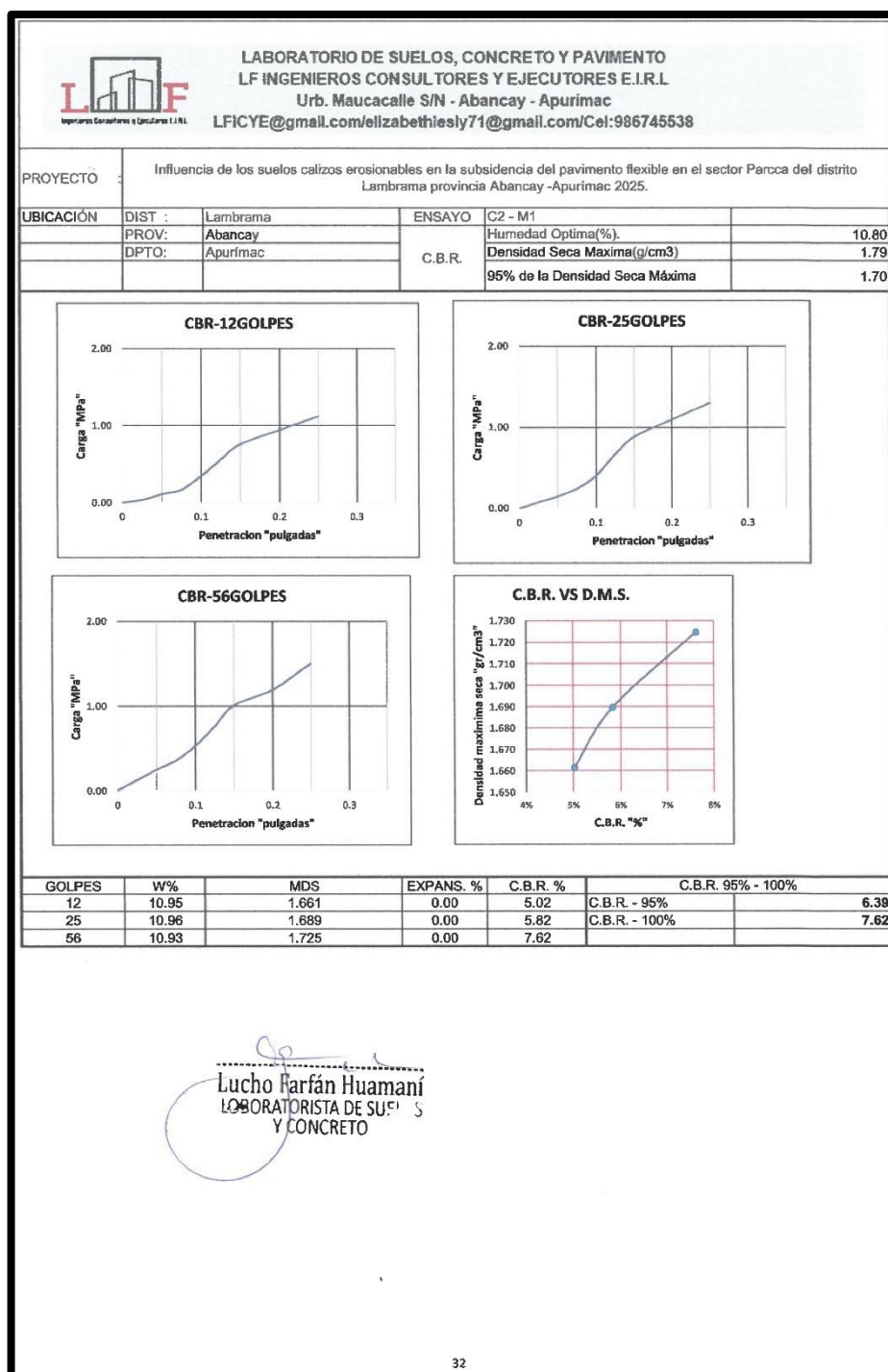
	CARG. PATRO	FACTOR CARGA		CBR	FACTOR CARGA		CBR	FACTOR CARGA		CBR	
		IND(KG)	MPa		IND(KG)	MPa		IND(KG)	MPa		
ENSAYO DE PENETRACION	0	0	0.00	12	0	0.00	25	0	0.00	56	
	0.025	1.2	0.04		2.4	0.07		4	0.12		
	0.050	3.6	0.11		4.8	0.15		8	0.25		
	0.075	5.4	0.17		7.8	0.24		11.5	0.36		
	0.100	6.90	11.2	0.35	5.02	13	0.40	5.82	17	0.53	7.62
	0.125		18.2	0.56		21.5	0.66		24.5	0.76	
	0.150		24.5	0.76		28.5	0.88		32.5	1.00	
	0.200	10.35	30.5	0.94	9.11	35.4	1.09	10.57	38.5	1.19	11.50
	0.250		36.2	1.12		42.1	1.30		48.5	1.50	



Lucho Parfán Huamani
 LABORATORISTA DE SUELOS Y CONCRETO

31

Figura 57 — CBR carga – C2



32

Figura 58 — CBR gráfico – C2

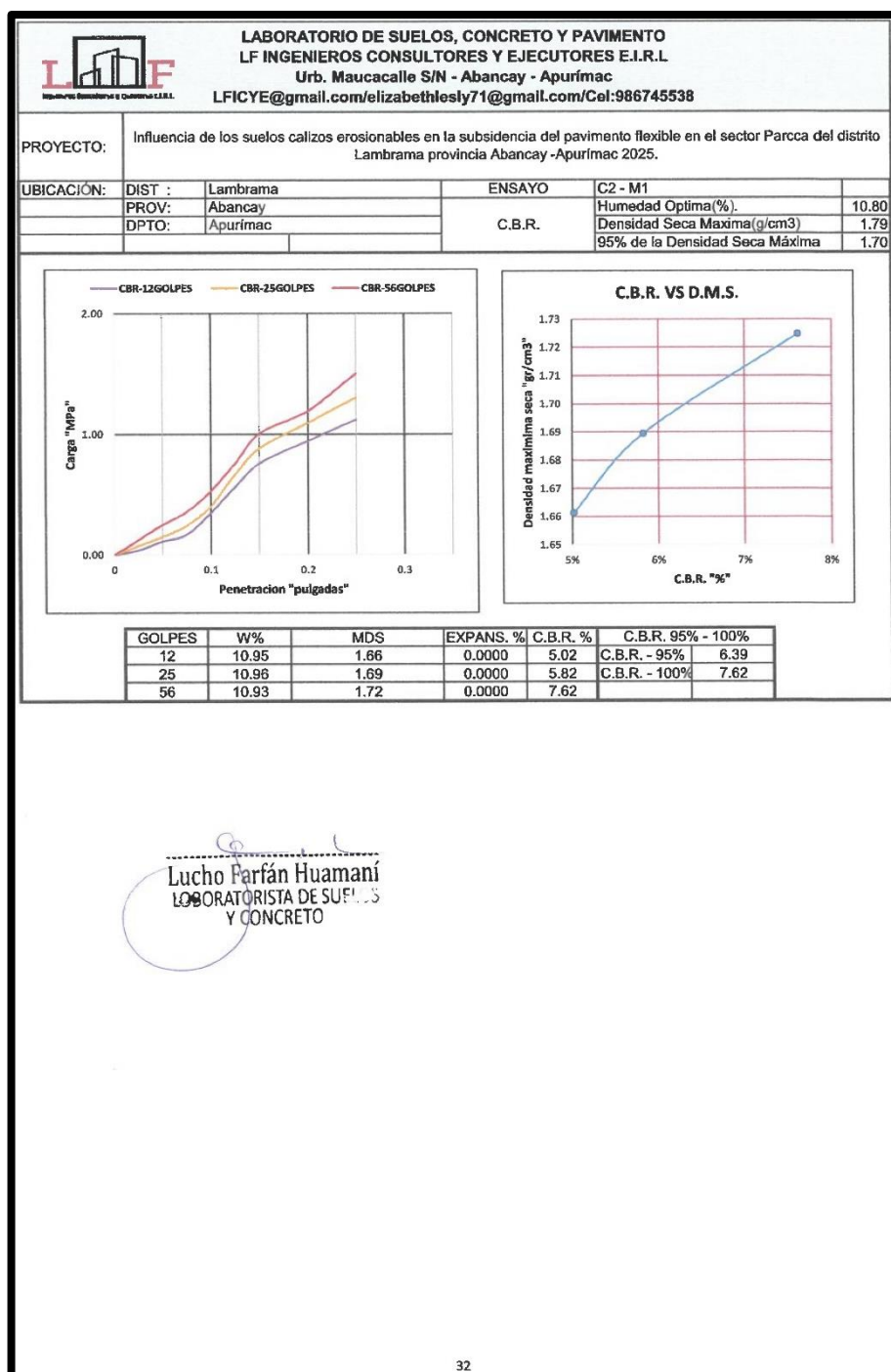


Figura 59 — CBR vs DSM – C2

 LABORATORIO DE SUELOS, CONCRETO Y PAVIMENTO LF INGENIEROS CONSULTORES Y EJECUTORES E.I.R.L Urb. Maucacalle S/N - Abancay - Apurímac LFICYE@gmail.com/elizabethiesly71@gmail.com/Cel:986745538												
RELACION DE SOPORTE DE CALIFORNIA												
ASTM 1833 - 73												
PROYECTO:	Influencia de los suelos calizos erosionables en la subsidencia del pavimento flexible en el sector Parcca del distrito Lambrama provincia Abancay -Apurímac 2025.											
UBICACIÓN:	DIST :	Lambrama				C3 - M1						
	PROV:	Abancay				Humedad Optima(%).			10.700			
	DPTO:	Apurímac				Densidad Seca Maxima(g/cm3)			1.776			
						95% de la Densidad Seca Máxima			1.687			
	DIMENSIONES DE MOLDE		Diametro	Altura	Area	Diametro	Altura	Area	Diametro	Altura	Area	
			15.20	11.85	181.46	15.20	11.75	181.46	15.30	11.73	183.85	
N° DE GOLPES POR CAPA		12				25			56			
CONDICIONES DE LA MUESTRA		SIN MOJAR				SIN MOJAR			SIN MOJAR			
Peso del molde(gr).		7910				7873			7919			
Volumen de la Muestra(cc).		2150.65				2132.14			2156.61			
Muestra Humeda + Molde(gr).		11885				11841			12021			
Muestra Humeda(gr).		3975				3968			4102			
Densidad Humeda(gr/cm3).		1.85				1.861			1.90			
CONTENIDO DE HUMEDAD DE LA MUESTRA		ABAJO				ABAJO			ABAJO			
Peso de la capsula(gr).		35.00				35.00			35.00			
Muestra Humeda + Capsula(gr).		78.40				74.60			76.50			
Muestra Seca+ Capsula(gr).		74.20				70.75			72.45			
Muestra Seca(gr).		39.20				35.75			37.45			
Contenido de Agua(gr)		4.20				3.85			4.05			
Contenido de Humedad(%).		10.71				10.77			10.81			
Promedio de Contenido de Humedad(%).		10.71				10.77			10.81			
Densidad Seca(gr/cm3).		1.669				1.680			1.716			
% Compactación		94.00				94.60			96.65			
MEDICION DE LA EXPANSION	DIA	HORAS	INTER VALO	LECT. DEFOR.	EXPANSIÓN		LECT. DEFOR.	EXPANSIÓN		LECT. DEFOR.	EXPANSIÓN	
					PULGS	%		PULGS	%		PULGS	%
	1.00	0	0.00									
	2.00	24	1.00		0.0000	0.0000		0.0000	0.0000		0.0000	0.0000
	3.00	48	2.00		0.0000	0.0000		0.0000	0.0000		0.0000	0.0000
	4.00	72	3.00		0.0000	0.0000		0.0000	0.0000		0.0000	0.0000
	5.00	96	4.00		0.0000	0.0000		0.0000	0.0000		0.0000	0.0000
PENETRACION "PULGADAS"			CARG. PATR	FACTOR CARGA		CBR	FACTOR CARGA		CBR	FACTOR CARGA		CBR
				IND(KG)	CARGA	12	IND(KG)	CARGA	25	IND(KG)	CARGA	56
ENSAYO DE PENETRACION	0			0	0.00		0	0.00		0	0.00	
	0.025			0.8	0.02		2.8	0.09		4.2	0.13	
	0.050			3.5	0.11		7.2	0.22		8.6	0.27	
	0.075			6.5	0.20		9.8	0.30		12.6	0.39	
	0.100		6.90	8.5	0.26	3.81	10.5	0.32	4.70	14.1	0.44	6.32
	0.125			15.8	0.49		18.6	0.58		18.5	0.57	
	0.150			20.5	0.63		26.5	0.82		25.6	0.79	
	0.175			26.5	0.82		32	0.99		29.6	0.92	
0.200		10.35	31.5	0.97	9.41	36.2	1.12	10.81	39.8	1.23	11.89	

Lucho Farfán Huamani

LABORATORISTA DE SUELOS Y CONCRETO

31


Lucho Farfán Huamani
LABORATORISTA DE SUELOS Y CONCRETO

Figura 60 — CBR carga – C3

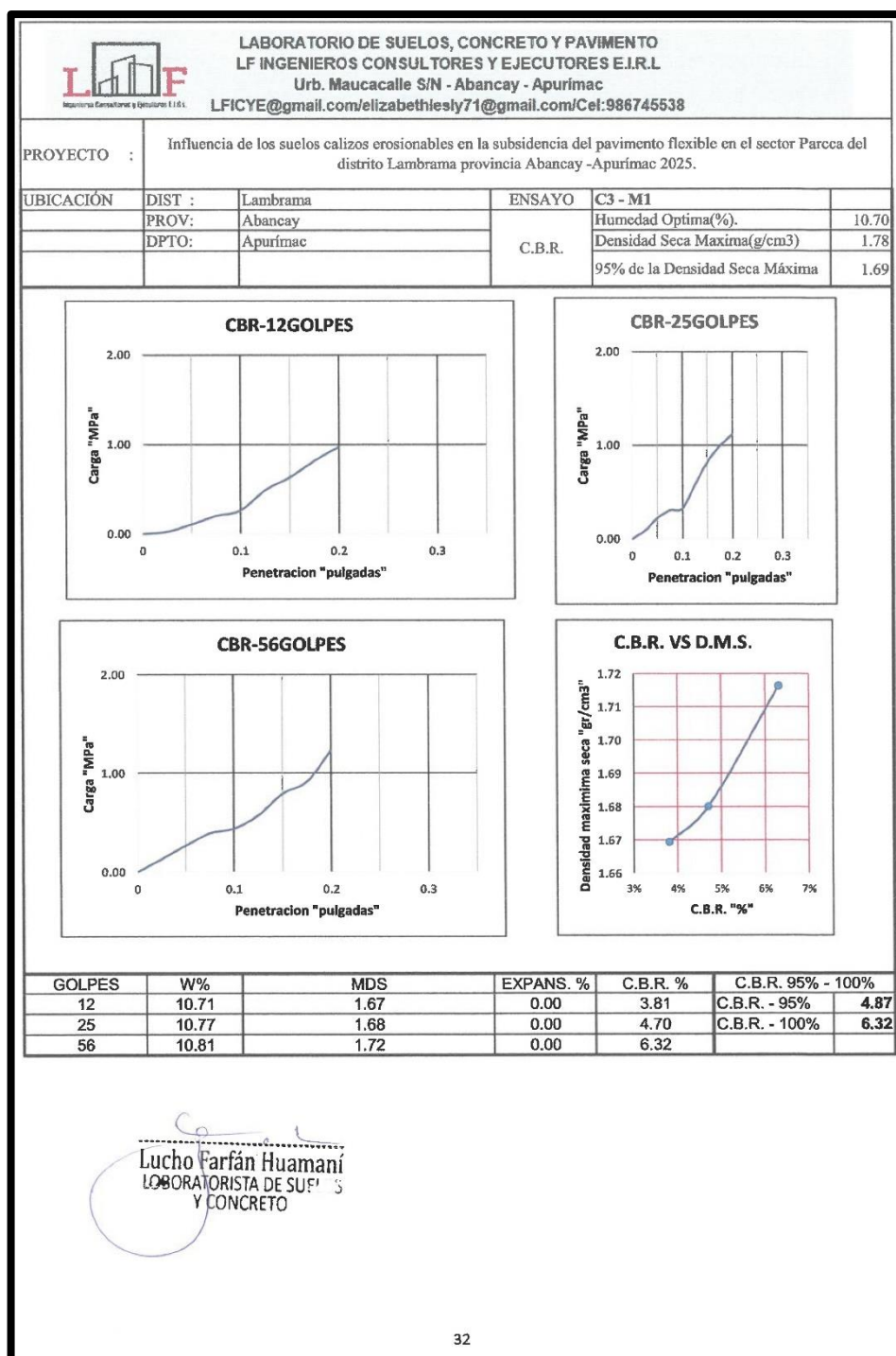


Figura 61 — CBR gráfico – C3

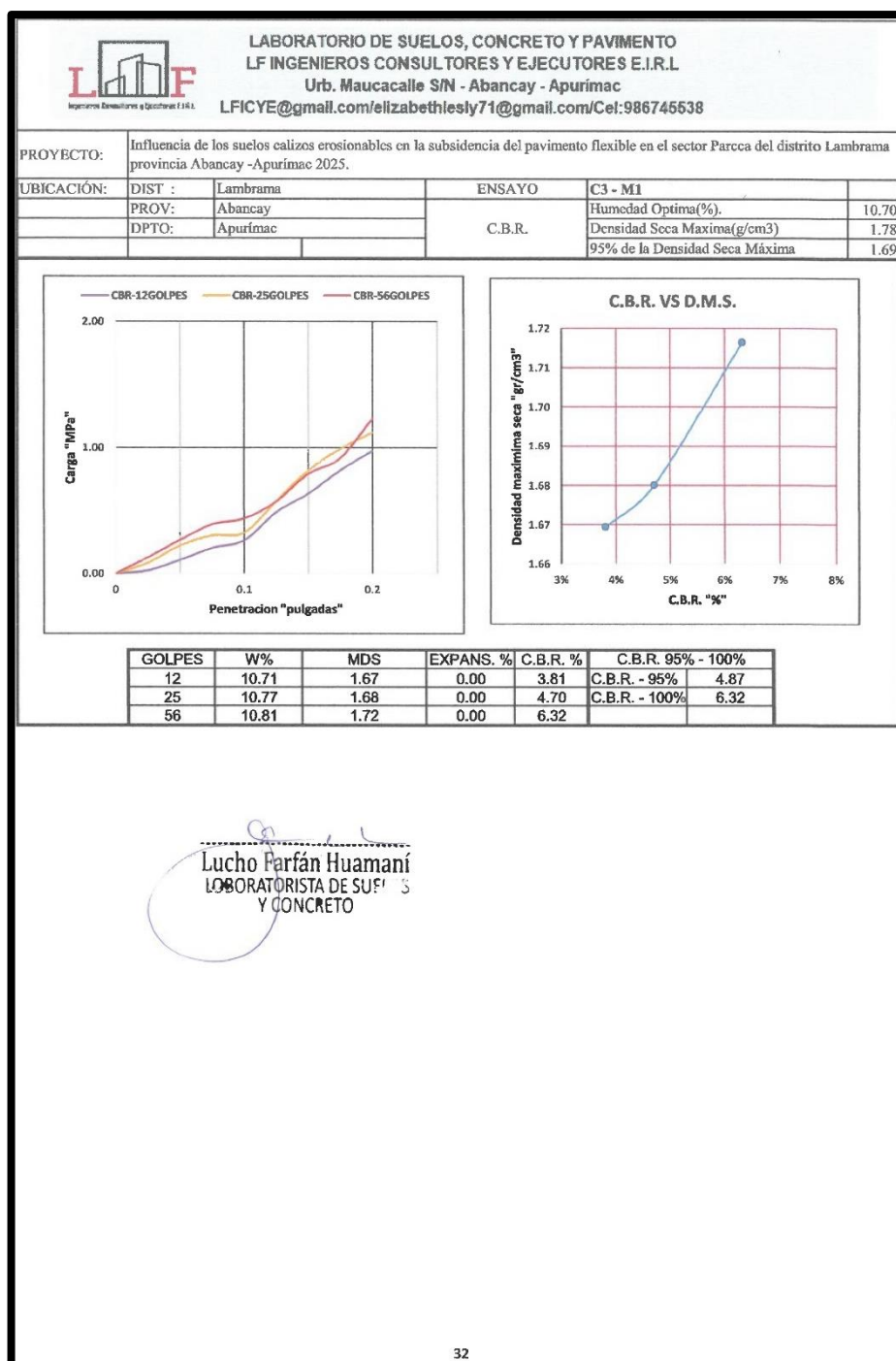
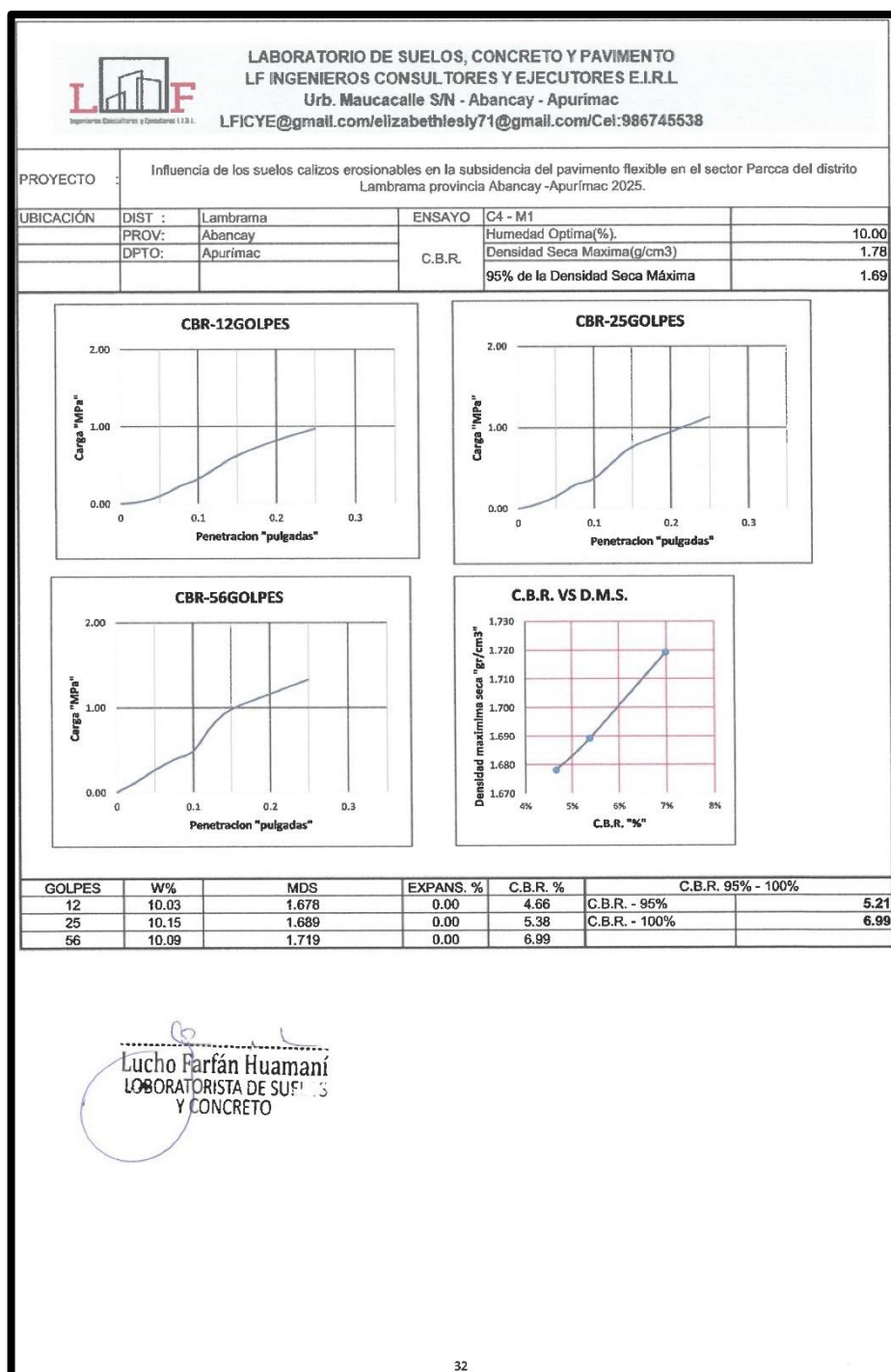


Figura 62 — CBR vs DSM – C3

 LABORATORIO DE SUELOS, CONCRETO Y PAVIMENTO LF INGENIEROS CONSULTORES Y EJECUTORES E.I.R.L Urb. Maucacalle S/N - Abancay - Apurímac LFICYE@gmail.com/elizabethlesly71@gmail.com/Cel:986745538												
RELACION DE SOPORTE DE CALIFORNIA (CBR)												
ASTM 1833 - 73												
PROYECTO:	Influencia de los suelos calizos erosionables en la subsidencia del pavimento flexible en el sector Parcca del distrito Lambrama provincia Abancay - Apurímac 2025.											
UBICACIÓN:	DIST :	Lambrama					C4 - M1					
	PROV:	Abancay					Humedad Optima(%).					
	DPTO:	Apurímac					Densidad Seca Maxima(g/cm3)					
							95% de la Densidad Seca Máxima					
	DIMENSIONES DE MOLDE	Diametro	Altura	Area	Diametro	Altura	Area	Diametro	Altura	Area		
		15.20	11.85	181.46	15.20	11.75	181.46	15.30	11.73	183.85		
N° DE GOLPES POR CAPA		12			25			56				
CONDICIONES DE LA MUESTRA		SIN MOJAR			SIN MOJAR			SIN MOJAR				
Peso del molde(gr).		7910			7873			7919				
Volumen de la Muestra(cc).		2150.65			2132.14			2156.61				
Muestra Humeda + Molde(gr).		11881			11840			12001				
Muestra Humeda(gr).		3971			3967			4082				
Densidad Humeda(gr/cm3).		1.85			1.86			1.89				
CONTENIDO DE HUMEDAD DE LA MUESTRA		ABAJO	ARRIBA	ARRIBA	ABAJO	ARRIBA	ARRIBA	ABAJO	ARRIBA	ARRIBA		
Peso de la capsula(gr).		32.00			32.00			32.00				
Muestra Humeda + Capsula(gr).		66.00			65.54			64.50				
Muestra Seca+ Capsula(gr).		62.90			62.45			61.52				
Muestra Seca(gr).		30.90			30.45			29.52				
Contenido de Agua(gr)		3.10			3.09			2.98				
Contenido de Humedad(%).		10.03			10.15			10.09				
Promedio de Contenido de Humedad(%).		10.03			10.15			10.09				
Densidad Seca(gr/cm3).		1.678			1.689			1.719				
% Compactación		94.49			95.11			96.80				
MEDICIÓN DE LA EXPANSIÓN	DIA	HORAS	INTER VALO	LECT. DEFOR.	EXPANSIÓN PULGS %		LECT. DEFOR.	EXPANSIÓN PULGS %		LECT. DEFOR.	EXPANSIÓN PULGS %	
	1.00	0	0.00									
	2.00	24	1.00		0.0000	0.0000		0.0000	0.0000		0.0000	0.0000
	3.00	48	2.00		0.0000	0.0000		0.0000	0.0000		0.0000	0.0000
	4.00	72	3.00		0.0000	0.0000		0.0000	0.0000		0.0000	0.0000
	5.00	96	4.00		0.0000	0.0000		0.0000	0.0000		0.0000	0.0000
PENETRACION "PULGADAS"		CARG. PATRO	FACTOR CARGA IND(KG) MPa		CBR	FACTOR CARGA IND(KG) MPa		CBR	FACTOR CARGA IND(KG) MPa		CBR	
ENSAYO DE PENETRACION	0	0	0.00		12	0	0.00		25	0	0.00	56
	0.025		0.9	0.03		1.9	0.06		3.8	0.12		
	0.050		3.2	0.10		4.9	0.15		8.5	0.26		
	0.075		7.2	0.22		9.5	0.29		12.5	0.39		
	0.100	6.90	10.4	0.32	4.66	12	0.37	5.38	15.6	0.48	6.99	
	0.125		15.4	0.48		18.5	0.57		25.3	0.78		
	0.150		20.2	0.62		24.5	0.76		31.5	0.97		
	0.200	10.35	26.5	0.82	7.92	30.6	0.95	9.14	37.4	1.16	11.17	
	0.250		31.5	0.97		36.5	1.13		42.9	1.33		
 Lucho Farfán Huamani LABORATORISTA DE SUELOS Y CONCRETO												


Lucho Farfán Huamani
LABORATORISTA DE SUELOS Y CONCRETO

Figura 63 — CBR carga – C4



32

Figura 64 — CBR gráfico – C4

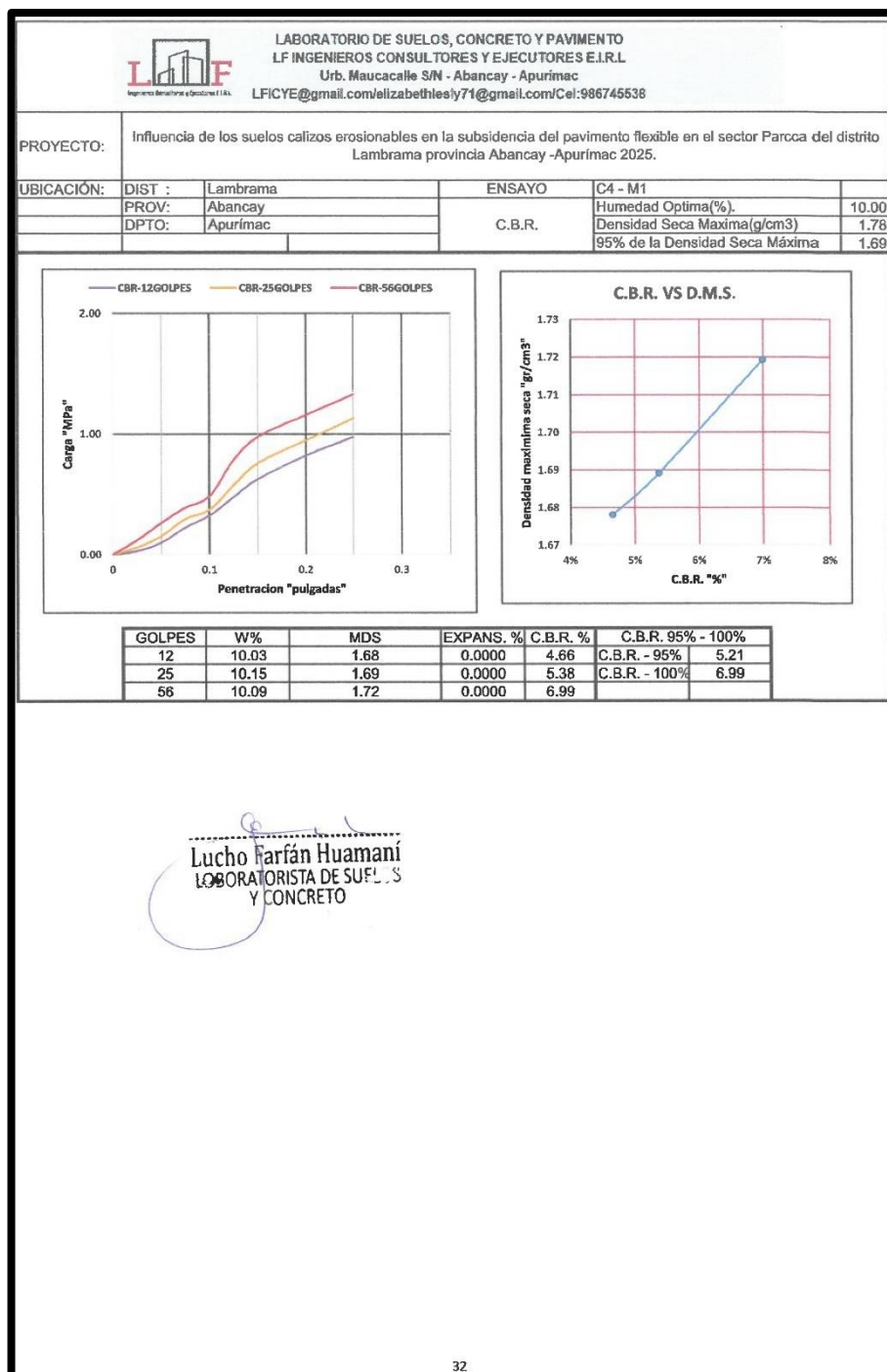
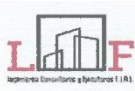


Figura 65 — CBR vs DSM – C4



LABORATORIO DE SUELOS, CONCRETO Y PAVIMENTO
LF INGENIEROS CONSULTORES Y EJECUTORES E.I.R.L
 Urb. Maucacalle S/N - Abancay - Apurímac
 LFICYE@gmail.com/elizabethtiesly71@gmail.com/Cel:986745538

PROYECTO : Influencia de los suelos calizos erosionables en la subsistencia del pavimento flexible en el sector Paroca del distrito Lambra provincia Abancay - Apurímac 2025. **MUESTRA** : M1

LUGAR : sector Paroca, Lambra Progresiva 01+600

SOLICITA : Bach. Aristofanes Hiparco Callalli Merino **FECHA** : Marzo, 2025

ERODABILIDAD DEL SUELO
TAMIZ Nro.200

TAMIZ Nro.200		ERODABILIDAD	CLASIFICACION
1	Tara N°	T1	ALTA
2	Peso Inicial de la Muestra (g)	2076	
3	Peso final de la Muestra (g)	1151.35	
4	Peso del Material que Pasó por el Tamiz N° 200 (g)	924.65	
5	Peso del Material Retenido (g)	1151.35	
6	Porcentaje Pasado por el Tamiz (%)	44.54	



Lucho Parfán Huamani
 LABORATORISTA DE SUELOS
 Y CONCRETO

Figura 66 — Erodabilidad – C1



LABORATORIO DE SUELOS, CONCRETO Y PAVIMENTO
LF INGENIEROS CONSULTORES Y EJECUTORES E.I.R.L
 Urb. Maucacalle S/N - Abancay - Apurímac
 LFICYE@gmail.com/elizabethlesly71@gmail.com/Cel:986745538

PROYECTO : Influencia de los suelos calizos erosionables en la subsistencia del pavimento flexible en el sector Parcca del distrito Lambrama provincia Abancay - Apurímac 2025. **MUESTRA** : M1

LUGAR : sector Parcca, Lambrama Progresiva 01+600

SOLICITA : Bach. Aristofanes Hiparco Callali Merino **FECHA** : Marzo, 2025

ERODABILIDAD DEL SUELO
TAMIZ Nro.200

TAMIZ Nro.200		ERODABILIDAD	CLASIFICACION
1	Tara N°	T1	MEDIA
2	Peso Inicial de la Muestra (g)	1872	
3	Peso final de la Muestra (g)	1030.21	
4	Peso del Material que Pasó por el Tamiz N° 200 (g)	841.79	
5	Peso del Material Retenido (g)	1030.21	
6	Porcentaje Pasado por el Tamiz (%)	44.97	



Lucho Farfán Huamani
 LABORATORISTA DE SUELOS
 Y CONCRETO

Figura 67 — Erodabilidad – C2



LABORATORIO DE SUELOS, CONCRETO Y PAVIMENTO
LF INGENIEROS CONSULTORES Y EJECUTORES E.I.R.L
 Urb. Maucacalle S/N - Abancay - Apurímac
 LFICYE@gmail.com/elizabethlesly71@gmail.com/Cel:986745538

PROYECTO : Influencia de los suelos calizos erosionables en la subsidencia del pavimento flexible en el sector Parcca del distrito Lambra provincia Abancay -Apurímac 2025. **MUESTRA** : M1

LUGAR : sector Parcca, Lambra Progresiva 01+600

SOLICITA : Bach. Aristofanes Hiparco Callalli Merino **FECHA** : Marzo, 2025

ERODABILIDAD DEL SUELO
TAMIZ Nro.200

TAMIZ Nro.200		ERODABILIDAD	CLASIFICACION
1	Tara N°	T1	ALTA
2	Peso Inicial de la Muestra (g)	1941	
3	Peso final de la Muestra (g)	1063.86	
4	Peso del Material que Pasó por el Tamiz N° 200 (g)	877.14	
5	Peso del Material Retenido (g)	1063.86	
6	Porcentaje Pasado por el Tamiz (%)	45.19	



Lucho Parfán Huamani
 LABORATORISTA DE SUELOS
 Y CONCRETO

Figura 68 — Erodabilidad – C3



LABORATORIO DE SUELOS, CONCRETO Y PAVIMENTO
LF INGENIEROS CONSULTORES Y EJECUTORES E.I.R.L
 Urb. Maucacalle S/N - Abancay - Apurímac
 LFICYE@gmail.com/ellizabethlesly71@gmail.com/Cel:986745538

PROYECTO : Influencia de los suelos calizos erosionables en la subsidencia del pavimento flexible en el sector Parcca del distrito Lambrama provincia Abancay -Apurímac 2025. **MUESTRA** : M1

LUGAR : sector Parcca, Lambrama Progresiva 01+600

SOLICITA : Bach. Aristofanes Hiparco Calliali Merino **FECHA** : Marzo, 2025

ERODABILIDAD DEL SUELO
TAMIZ Nro.200

TAMIZ Nro.200		ERODABILIDAD	CLASIFICACION
1	Tara N°	T1	ALTA
2	Peso Inicial de la Muestra (g)	2494	
3	Peso final de la Muestra (g)	1366.46	
4	Peso del Material que Pasó por el Tamiz N° 200 (g)	1127.54	
5	Peso del Material Retenido (g)	1366.46	
6	Porcentaje Pasado por el Tamiz (%)	45.21	



Lucho Farfán Huamani
 LABORATORISTA DE SUELOS
 Y CONCRETO

Figura 69 — Erodabilidad – C4