



**UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y ARQUITECTURA**  
**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL**



**COMPARACIÓN DEL MÓDULO RESILIENTE BASADO EN  
CURVAS DE DISEÑO RAMCODES Y ENSAYOS CBR  
CONVENCIONAL PARA EL DISEÑO DE PAVIMENTOS  
FLEXIBLES DE LA CARRETERA CALACOTA-ILAVE, 2023**

**TESIS**

**PRESENTADA POR:**

**JOSE LUIS CONDORI MAMANI**

**JULIO CESAR CONDORI MAMANI**

**PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:**

**INGENIERO CIVIL**

**PUNO – PERÚ**

**2024**



NOMBRE DEL TRABAJO

**COMPARACIÓN DEL MÓDULO RESILIENTE BASADO EN CURVAS DE DISEÑO RACOMCODES Y ENSAYOS CBR CONVENCIONAL PARA EL DISEÑO DE PAVIMENTOS FLEXIBLES DE LA CARRETERA CALACOT A-ILAVE, 2023**

AUTOR

**JOSE LUIS CONDORI MAMANI - JULIO CESAR CONDORI MAMANI**

RECuento DE PALABRAS

**26969 Words**

RECuento DE CARACTERES

**141347 Characters**

RECuento DE PÁGINAS

**175 Pages**

TAMAÑO DEL ARCHIVO

**6.8MB**

FECHA DE ENTREGA

**Jun 18, 2024 5:30 PM GMT-5**

FECHA DEL INFORME

**Jun 18, 2024 5:32 PM GMT-5**

● **10% de similitud general**

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para cada base de datos.

- 9% Base de datos de Internet
- Base de datos de Crossref
- 7% Base de datos de trabajos entregados
- 1% Base de datos de publicaciones
- Base de datos de contenido publicado de Crossref

● **Excluir del Reporte de Similitud**

- Material bibliográfico
- Material citado
- Material citado
- Coincidencia baja (menos de 10 palabras)

  
Ing. Samuel Huaguistio Cáceres  
DOCENTE UNIVERSITARIO  
COD. UNA N° 2007537

  
VRSO  
Ing. Jaime Medina Leiva  
19 Junio 2024  
DOCENTE UNIVERSITARIO  
COD. UNA N° 210545  
SUBDIRECTOR DE INVESTIGACIÓN  
EDIC

Resumen



## DEDICATORIA

*Dedico este trabajo a mis padres, Ascencio Condori y Magdalena Mamani, por ser un soporte y motivación, que a través de su amor y moral contribuyeron a mi formación y crecimiento profesional y también a mi tío Luciano Mamani por haber compartido parte de mi infancia momentos de alegría.*

***Jose Luis Condori Mamani***



## DEDICATORIA

*Dedico esta tesis con profunda gratitud a mis queridos padres, Ascencio Condori y Magdalena Mamani, por los esfuerzos que han realizado para que pueda completar esta fase de mi educación, asimismo a mis hermanos Víctor y Zenayda por su comprensión, consejos y motivación de siempre salir adelante.*

***Julio Cesar Condori Mamani***



## AGRADECIMIENTOS

*Reconocemos con aprecio a la escuela profesional de Ingeniería Civil de la Universidad Nacional del Altiplano-Puno, por impartirnos conocimientos indispensables para nuestra preparación académica y profesional.*

*A vuestros ingenieros que han contribuido al desarrollo de este proyecto con sus conocimientos y orientación; de manera directa, al director de tesis y a los integrantes del jurado por su continuo respaldo en la consecución de este propósito.*

*Asimismo, agradecer a mis padres, quienes son parte de nuestro desarrollo y formación profesional, siendo el sostén económico y moral para la culminación de nuestro sueño académico.*

***Jose Luis Condori Mamani***

***Julio Cesar Condori Mamani***



# ÍNDICE GENERAL

	Pág.
<b>DEDICATORIA</b>	
<b>AGRADECIMIENTOS</b>	
<b>ÍNDICE GENERAL</b>	
<b>ÍNDICE DE TABLAS</b>	
<b>ÍNDICE DE FIGURAS</b>	
<b>ACRÓNIMOS</b>	
<b>RESUMEN .....</b>	<b>19</b>
<b>ABSTRACT.....</b>	<b>20</b>
<b>CAPÍTULO I</b>	
<b>INTRODUCCIÓN</b>	
<b>1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....</b>	<b>21</b>
<b>1.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA .....</b>	<b>22</b>
1.2.1. Problema general.....	22
1.2.2. Problemas específicos .....	22
<b>1.3. HIPÓTESIS DE LA INVESTIGACIÓN .....</b>	<b>22</b>
1.3.1. Hipótesis general.....	22
1.3.2. Hipótesis específicas .....	22
<b>1.4. JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN .....</b>	<b>23</b>
<b>1.5. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN.....</b>	<b>24</b>
1.5.1. Objetivo general .....	24
1.5.2. Objetivos específicos .....	24

## CAPÍTULO II

### REVISIÓN DE LITERATURA



<b>2.1.</b>	<b>ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN</b> .....	<b>25</b>
2.1.1.	Antecedentes internacionales .....	25
2.1.1.	Antecedentes nacionales .....	28
2.1.1.	Antecedentes locales .....	30
<b>2.2.</b>	<b>MARCO TEÓRICO</b> .....	<b>31</b>
2.2.1.	Pavimento flexible .....	31
2.2.1.1.	Partes del pavimento flexible.....	31
2.2.2.	Módulo resiliente .....	33
2.2.2.1.	Ecuación de correlación de módulo resiliente .....	33
2.2.3.	Caracterización de la subrasante .....	34
2.2.3.1.	Registro de excavación .....	35
2.2.3.2.	Metodología de las diferencias acumuladas.....	36
2.2.4.	Características físicas de la subrasante .....	39
2.2.4.1.	Contenido de humedad (MTC E 108).....	39
2.2.4.2.	Análisis granulométrico de suelos por tamizado (MTC E 107)	40
2.2.4.3.	Límite líquido (MTC E 110).....	41
2.2.4.4.	Límite plástico (L.P.) e índice de plasticidad (I.P.) (MTC E 111) .....	43
2.2.4.5.	Gravedad específica de sólidos de suelo (Gs) (MTC E 113)....	50
2.2.5.	Características mecánicas de subrasante .....	51
2.2.5.1.	Compactación de suelos – Proctor modificado (MTC E 115)..	52
2.2.5.2.	CBR de suelos - laboratorio (MTC E 132) .....	54
2.2.6.	Estimación de la variación de humedad de la subrasante .....	57
2.2.6.1.	Precipitación máxima diaria.....	57
2.2.6.2.	profundidad de análisis .....	58



2.2.6.3. Grado de saturación .....	59
2.2.7. RAMCODES para subrasante .....	60
2.2.7.1. Clasificación cuantitativa de subrasante .....	60
2.2.7.2. Potencial de densificación de subrasante .....	62
2.2.7.3. Relación entre humedad, densidad y resistencia de subrasante .....	64
2.2.8. Diseño de pavimentos (AASHTO-93) .....	69
2.2.8.1. Procedimiento de diseño AASHTO 93 .....	69
2.2.8.2. Parámetros de diseño AASHTO 93 .....	70
2.2.9. Diseño de pavimento empírico-mecánico .....	79
2.2.9.1. Formas de daño estructural del pavimento .....	79
2.2.9.2. Análisis deformacional de la estructura del pavimento .....	80

### CAPÍTULO III

#### MATERIALES Y MÉTODOS

<b>3.1. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN .....</b>	<b>81</b>
3.1.1. Tipo de investigación .....	81
3.1.2. Nivel de investigación .....	81
3.1.3. Diseño de investigación .....	82
3.1.4. Población .....	82
3.1.5. Muestra .....	84
3.1.5.1. Metodología de las diferencias acumuladas .....	86
3.1.6. Técnicas e instrumentos de recolección de datos .....	88
3.1.7. Operacionalización de variables .....	89
<b>3.2. MATERIALES .....</b>	<b>90</b>
3.2.1. Características físicas de subrasante .....	90
3.2.1.1. Contenido de humedad (MTC E 108) .....	90





3.2.1.2. Análisis granulométrico de suelos por tamizado (MTC E 107)	91
3.2.1.3. Límite líquido (MTC E 110)	93
3.2.1.4. Límite plástico e índice de plasticidad (MTC E 111)	94
3.2.1.5. Gravedad específica de sólidos de suelo (Gs) (MTC E 113)	97
3.2.2. Caracterización mecánica de subrasante	98
3.2.2.1. Compactación de suelos – Proctor modificado (MTC E 115)	99
3.2.2.2. CBR de suelos - laboratorio (MTC E 132)	102
3.2.3. Cálculo de la variación de saturación	105
3.2.4. RAMCODES para subrasante	109
3.2.4.1. Clasificación cuantitativa de subrasante	109
3.2.4.2. Potencial de densificación	109
3.2.4.3. Relación entre el contenido de agua, la densidad y la resistencia	110
3.2.5. Módulo resiliente con ensayos CBR convencional	135
3.2.6. Módulo resiliente basado en curvas de diseño RAMCODES	135
3.2.7. Parámetros de diseño AASHTO 93	136
3.2.8. Parámetros de diseño mecanístico-empírico	139

## CAPÍTULO IV

### RESULTADOS Y DISCUSIÓN

<b>4.1. RESULTADOS DE MÓDULO RESILIENTE RAMCODES</b>	<b>141</b>
4.1.1. Resultados de la clasificación RAMCODES	141
4.1.2. Resultados de la elaboración de experimentos factoriales	142
4.1.3. Resultados de módulo resiliente basado en curvas de diseño RAMCODES	148
<b>4.2. RESULTADOS DE MÓDULO RESILIENTE CONVENCIONAL</b>	<b>149</b>



4.2.1. Resultados de la caracterización física de la subrasante .....	149
4.2.2. Resultados de la caracterización mecánica de la subrasante.....	150
4.2.3. Resultados del módulo resiliente con ensayos CBR convencional.....	151
<b>4.3. CUMPLIMIENTO DE OBJETIVOS .....</b>	<b>152</b>
<b>4.4. DISCUSIÓN .....</b>	<b>161</b>
<b>V. CONCLUSIONES.....</b>	<b>165</b>
<b>VI. RECOMENDACIONES .....</b>	<b>166</b>
<b>VII. REFERENCIA .....</b>	<b>167</b>
<b>ANEXOS.....</b>	<b>171</b>

**Área:** Transportes

**Tema:** Pavimentos Flexibles

**Línea de investigación:** Transportes y gestión vial

**FECHA DE SUSTENTACIÓN:** 25 de junio del 2024



## ÍNDICE DE TABLAS

	<b>Pág.</b>
Tabla 1	Número de calicatas para exploración de suelos ..... 34
Tabla 2	Número de ensayos MR y CBR..... 35
Tabla 3	Serie de tamices ..... 40
Tabla 4	Muestra mínima para granulometría ..... 41
Tabla 5	Clasificación de materiales Granulares..... 48
Tabla 6	Clasificación de materiales Limo-Arcillosos ..... 49
Tabla 7	Cantidad de masa de suelo ..... 50
Tabla 8	Corrección por temperatura ..... 51
Tabla 9	Método a utilizar para el ensayo de proctor modificado..... 52
Tabla 10	Características de la muestra patrón ..... 55
Tabla 11	Fp Relacionado con la clasificación descriptiva ..... 61
Tabla 12	Datos estadísticos de correlación para Fp vs MDS..... 63
Tabla 13	Periodos estándar de diseño ..... 70
Tabla 14	Factor de distribución por carril $D_L$ ..... 71
Tabla 15	Niveles sugeridos de confiabilidad, R ..... 72
Tabla 16	Desviación estándar, $Z_R$ ..... 72
Tabla 17	Condiciones de drenaje ..... 78
Tabla 18	Coefficientes de drenaje, $m_i$ ..... 78
Tabla 19	Constantes obtenidas en pruebas experimentales ..... 80
Tabla 20	Coordenadas UTM del inicio y final del tramo ..... 83
Tabla 21	Identificación de puntos de análisis para pruebas de laboratorio..... 84
Tabla 22	Cantidad de puntos de análisis por tramo homogéneo..... 85
Tabla 23	Metodología de diferencias acumuladas del AASHTO 93..... 87



Tabla 24	Operacionalización de variables .....	89
Tabla 25	Resultados de contenido de humedad .....	90
Tabla 26	Resultados de Análisis Granulométrico (% que pasa) .....	91
Tabla 27	Resultados de Límite Líquido .....	93
Tabla 28	Resultados de límite plástico e índice de plasticidad .....	94
Tabla 29	Características de granulometría y plasticidad .....	95
Tabla 30	Resultados de la clasificación de suelo según SUCS y AASHTO .....	97
Tabla 31	Cantidad de masa de suelo para Gs.....	97
Tabla 32	Resultados del ensayo de gravedad específica (Gs) .....	98
Tabla 33	Elección del método para el ensayo de proctor modificado .....	99
Tabla 34	Resultados del ensayo de proctor modificado .....	100
Tabla 35	Resultados de CBR convencional .....	103
Tabla 36	Variación de saturación promedio mensual .....	108
Tabla 37	Saturación máxima promedio mensual .....	108
Tabla 38	Resultados de la clasificación cuantitativa RAMCODES .....	109
Tabla 39	Resultados de potencial densificación (DMS).....	110
Tabla 40	Variación y ordenamiento de humedades del suelo RS3.....	111
Tabla 41	Variación y ordenamiento de humedades del suelo RS2.....	111
Tabla 42	Variación y ordenamiento de humedades del suelo RS1 .....	112
Tabla 43	Resultados del experimento factorial CBR: RS3.....	115
Tabla 44	Resultados del experimento factorial CBR: RS2.....	115
Tabla 45	Resultados del experimento factorial CBR: RS1 .....	116
Tabla 46	CBR 0.1": RAMCODES .....	134
Tabla 47	Módulo resiliente convencional .....	135
Tabla 48	Módulo resiliente RAMCODES .....	136



Tabla 49	Coeficientes de Poisson .....	140
Tabla 50	Espesores de capa del pavimento flexible .....	140
Tabla 51	Resumen de la clasificación cuantitativa RAMCODES .....	141
Tabla 52	Resumen de experimentos factoriales para suelo: RS3, RS2 y RS1 .....	142
Tabla 53	Resumen de módulo resiliente RAMCODES correlacionado .....	148
Tabla 54	Resumen de las características físicas del suelo de subrasante.....	149
Tabla 55	Resumen de las características mecánicas del suelo de subrasante .....	150
Tabla 56	Resumen de módulo resiliente convencional correlacionado .....	151
Tabla 57	Altura del pavimento respecto a módulo resiliente RAMCODES .....	152
Tabla 58	Altura del pavimento respecto a módulo resiliente convencional .....	153
Tabla 59	Costo del diseño de pavimento flexible RAMCODES .....	154
Tabla 60	Costo del diseño de pavimento flexible convencional.....	155
Tabla 61	Espesores del pavimento con curvas de diseño RAMCODES .....	156
Tabla 62	Espesores del pavimento con ensayos CBR convencional .....	156
Tabla 63	Verificación mecanística de pavimento con curvas de diseño RAMCODES .....	157
Tabla 64	Verificación mecanística de pavimento con ensayos CBR convencional .	157
Tabla 65	Correlaciones no paramétricas de variables.....	159



## ÍNDICE DE FIGURAS

	<b>Pág.</b>
Figura 1 Estructura típica de pavimentos asfálticos .....	32
Figura 2 Correlación entre las propiedades del suelo y módulo resiliente.....	33
Figura 3 Equipo para realizar el ensayo .....	42
Figura 4 Herramienta de corte estándar .....	42
Figura 5 Diagrama de flujo para clasificación de suelos de partículas gruesas .....	46
Figura 6 Carta de plasticidad.....	47
Figura 7 Molde para realizar el ensayo de proctor modificado: "A" y "B".....	53
Figura 8 Molde para realizar el ensayo de proctor modificado: "C".....	53
Figura 9 Equipos y materiales de CBR .....	55
Figura 10 Curva para el cálculo de índice de CBR .....	56
Figura 11 Serie de tiempo de precipitación anual .....	58
Figura 12 Determinación de la línea 70 .....	59
Figura 13 Variación de la MDS del proctor modificado vs Fp.....	62
Figura 14 Variación del CAO del Proctor vs Fp .....	63
Figura 15 Contenido de agua de elaboración vs. densidad seca y CBR .....	64
Figura 16 Superficie de respuesta .....	65
Figura 17 Mapa de resistencias .....	65
Figura 18 Distribución referencial del rango de humedad y golpes por capa.....	66
Figura 19 Cuadrícula kriging con correlación aleatoria.....	67
Figura 20 Carta para estimar el coeficiente estructural de concreto asfáltico.....	74
Figura 21 Rangos de coeficiente estructural de la capa de base granular ( $a_2$ ).....	75
Figura 22 Rangos de coeficiente estructural de base estabilizada con asfalto ( $a_2$ ) .....	76
Figura 23 Rangos de coeficiente de capa de subbase granular ( $a_3$ ).....	77



Figura 24	Distribución de las cargas de tránsito .....	80
Figura 25	Ubicación del tramo, km: 4+750 al km: 9+750 .....	83
Figura 26	Ubicación de los puntos de evaluación: C-1, C-2, C-3, C-4, C-5, C-6.....	85
Figura 27	Tramificación por sectores homogéneos .....	88
Figura 28	Muestreo para contenido de humedad: C-2, C-4, C-6 .....	90
Figura 29	Muestreo para contenido de humedad: C-1, C-3, C-5 .....	91
Figura 30	Lavado de muestra para análisis granulométrico.....	92
Figura 31	Ensayo de análisis granulométrico.....	92
Figura 32	Realización de límite líquido .....	93
Figura 33	Realización de límite plástico.....	94
Figura 34	Realización del ensayo de gravedad específica (Gs).....	98
Figura 35	Realización del ensayo proctor modificado .....	101
Figura 36	Extracción de muestra compactada.....	101
Figura 37	Ensayo CBR: selección de moldes .....	103
Figura 38	Ensayo CBR: compactación .....	104
Figura 39	Ensayo de CBR: inmersión de muestras .....	104
Figura 40	Ensayo de CBR: penetración de la muestra.....	105
Figura 41	Serie histórica de precipitación diaria anual .....	106
Figura 42	Serie temporal de variación de saturación del suelo: ML.....	106
Figura 43	Serie temporal de variación de saturación del suelo: SM .....	107
Figura 44	Serie temporal de variación de saturación del suelo: SW-SM.....	107
Figura 45	Muestras preparadas variando humedades .....	112
Figura 46	Compactación de muestras con rango de humedades.....	113
Figura 47	Enrasamiento de la muestra compactada .....	113
Figura 48	Penetración de la muestra compactada .....	114



Figura 49	Extracción de muestra compactada y penetrada .....	114
Figura 50	Curvas de compactación del suelo: RS3 .....	116
Figura 51	Curvas de compactación del suelo: RS2 .....	117
Figura 52	Curvas de compactación del suelo: RS1 .....	117
Figura 53	Curvas de resistencia CBR 0.1" del suelo: RS3.....	118
Figura 54	Curvas de resistencia CBR 0.1" del suelo: RS2.....	118
Figura 55	Curvas de resistencia CBR 0.1" del suelo: RS1.....	119
Figura 56	Datos del experimento factorial del suelo: RS3.....	120
Figura 57	Datos del experimento factorial del suelo: RS2.....	120
Figura 58	Datos del experimento factorial del suelo: RS1.....	121
Figura 59	Red matricial del suelo: RS3.....	122
Figura 60	Red matricial del suelo: RS2.....	123
Figura 61	Red matricial del suelo: RS1 .....	124
Figura 62	Superficie de respuesta tridimensional del suelo: RS3 .....	125
Figura 63	Mapa de resistencia del suelo: RS3 .....	125
Figura 64	Superficie de respuesta tridimensional del suelo: RS2 .....	126
Figura 65	Mapa de resistencia del suelo: RS2 .....	126
Figura 66	Superficie de respuesta tridimensional del suelo: RS1 .....	127
Figura 67	Mapa de resistencia del suelo: RS1 .....	127
Figura 68	Mapas de resistencia vs curvas de saturación: RS3 .....	129
Figura 69	Mapas de resistencia vs curvas de saturación: RS2 .....	129
Figura 70	Mapas de resistencia vs curvas de saturación: RS1 .....	130
Figura 71	Espectros de curvas de diseño: RS3.....	131
Figura 72	Espectros de curvas de diseño: RS2.....	131
Figura 73	Espectros de curvas de diseño: RS1.....	132





Figura 74	CBR 0.1" (RAMCODES): RS3 .....	133
Figura 75	CBR 0.1" (RAMCODES): RS2 .....	133
Figura 76	CBR 0.1" (RAMCODES): RS1 .....	134
Figura 77	Resumen de las curvas de compactación con ensayos factoriales .....	143
Figura 78	Resumen de las curvas de resistencia CBR con ensayos factoriales .....	144
Figura 79	Resumen de superficies de respuestas tridimensionales .....	145
Figura 80	Resumen de mapas de resistencias de los suelos .....	146
Figura 81	Resumen de espectros de curvas de diseño RAMCODES .....	147
Figura 82	Altura de la subbase en el diseño estructural del pavimento .....	158
Figura 83	Relación entre diseño de pavimentos Convencional y RAMCODES .....	160



## ACRÓNIMOS

CBR:	California Bearing Ratio
RAMCODES:	Metodología Racional para el Análisis de Densidad y Resistencia de Geomateriales Compactados
ASTM:	American Society for Testing and Materials
AASHTO:	American Association Standards Highway Transportation Officials
SUCS:	Sistema Unificado de Clasificación de Suelos
LP:	Límite plástico
LL:	Límite líquido
IP:	Índice de plasticidad
NP:	No Plástico
MDS:	Máxima Densidad Seca
CHO:	Contenido de Humedad Óptima
MTC:	Ministerio de Transportes y Comunicaciones
EE:	Ejes equivalentes
ESAL:	Valor total de ejes equivalentes
UTM:	Universal Transverse Mercator
E:	Módulo elástico
Fp:	Factor característico



## RESUMEN

En el contexto nacional, respecto al diseño de pavimentos flexibles, el cálculo del módulo resiliente del suelo subrasante, se obtiene con ensayos CBR. Este enfoque presupone que el suelo alcanzará la saturación completa en algún momento de su vida útil, condición ideal que no necesariamente se refleja en todas las regiones del país. De ahí surge la necesidad de revisar metodologías racionales que permitan obtener CBR efectivos, considerando la saturación real de la subrasante. Este estudio tiene por objetivo comparar el módulo resiliente basado en curvas de diseño RAMCODES y ensayos CBR convencional para el diseño de pavimentos flexibles de la carretera Calacota-IIave, del tramo: km 4+750 al 9+750. El tipo de investigación es aplicada, de nivel correlacional y diseño no experimental. Se empleó la metodología de las diferencias acumuladas para establecer la cantidad de puntos de exploración, lo que permitió identificar 03 tramos homogéneos. El procedimiento consistió en calcular el módulo resiliente con ensayos CBR convencional y la metodología RAMCODES, este último incluye el uso de un modelo matemático para estimar el grado de saturación de la subrasante, y luego se generaron curvas de diseño con el programa OringPro2023b, a fin de comparar en el diseño estructural de pavimento flexible. Se concluye que el módulo resiliente con las curvas de diseño RAMCODES, optimiza el diseño de pavimentos flexibles, ya que el módulo resiliente se incrementa en un 10.64 % respecto al convencional, lo que representa una reducción del 13.79% de espesor y 12.24 % de costo de la capa de subbase.

**Palabras clave:** CBR, Diseño de pavimento, Módulo resiliente, RAMCODES, Saturación.



## ABSTRACT

In the national context, regarding the design of flexible pavements, the calculation of the resilient modulus of the subgrade soil is obtained with CBR tests. This approach assumes that the soil will reach full saturation at some point in its useful life, an ideal condition that is not necessarily reflected in all regions of the country. Hence arises the need to review rational methodologies that allow obtaining effective CBR, considering the real saturation of the subgrade. This study aims to compare the resilient module based on RAMCODES design curves and conventional CBR tests for the design of flexible pavements of the Calacota-Ilave highway, from the section: km 4+750 to 9+750. The type of research is applied, correlational level and non-experimental design. The methodology of accumulated differences was used to establish the number of exploration points, which allowed 03 homogeneous sections to be identified. The procedure consisted of calculating the resilient modulus with conventional CBR tests and the RAMCODES methodology, the latter includes the use of a mathematical model to estimate the degree of saturation of the subgrade, and then design curves were generated with the OringPro2023b program, in order to compare in the structural design of flexible pavement. It is concluded that the resilient module with the RAMCODES design curves optimizes the design of flexible pavements, since the resilient module increases by 10.64% compared to the conventional one, which represents a reduction of 13.79% in thickness and 12.24% in cost. of the subbase layer.

**Keywords:** CBR, Design of pavement, Resilient module, RAMCODES, saturation.



# CAPÍTULO I

## INTRODUCCIÓN

### 1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Los procedimientos de diseño para pavimentos flexibles, en nuestro país, considera que eventualmente los suelos de la subrasante podrían llegar a saturarse completamente a lo largo de su vida útil, lo cual es una suposición simplificada y costosa, debido a que no todas las regiones del país llegarán a tener subrasantes en esta condición. Asimismo, los resultados de campo y varias investigaciones de modelamiento numérico han resuelto que el contenido de agua de la subrasante cambiará con el tiempo (Zapata, 2018).

A consecuencia de esta premisa, es necesario estudiar metodologías de diseño que incluya considerar la subrasante en condición insaturada, así como la guía de diseño de pavimentos mecanístico-empírico del AASTHO, el cual no se logra adaptar en el Perú por el uso de costosos equipos dinámicos como el triaxial cíclico, pruebas para medir la succión y poca disponibilidad de extensa información climática (Maximiliano, 2016).

En nuestra región de Puno, se sigue usando el ensayo de CBR saturado para calcular el módulo resiliente de las carreteras, lo cual es muy convencional. Ante esta situación, se presenta la necesidad de estimar el módulo resiliente con el uso de las curvas de diseño RAMCODES, considerando la condición de clima del área analizado. Por lo expuesto, este estudio pretende comparar el módulo resiliente obtenido con las curvas de diseño RAMCODES y ensayos CBR convencional, para posteriormente evaluar el diseño estructural de la carretera Calacota, situada en la provincia Ilave-Puno.



## **1.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA**

### **1.2.1. Problema general**

- ¿Cuál es la diferencia del módulo resiliente basado en curvas de diseño RAMCODES y ensayos CBR convencional para el diseño de pavimentos flexibles de la carretera Calacota-IIave, 2023?

### **1.2.2. Problemas específicos**

- ¿Cuál es el módulo resiliente basado en curvas de diseño RAMCODES para el diseño de pavimentos flexibles de la carretera Calacota-IIave,2023?
- ¿Cuál es el módulo resiliente basado en ensayos CBR convencional para el diseño de pavimentos flexibles de la carretera Calacota-IIave,2023?
- ¿Cuál es la diferencia de costo entre el diseño de pavimentos flexibles con las curvas de diseño RAMCODES y los ensayos CBR convencional?

## **1.3. HIPÓTESIS DE LA INVESTIGACIÓN**

### **1.3.1. Hipótesis general**

- El módulo resiliente basado en curvas de diseño RAMCODES respecto a ensayos CBR convencional optimiza el diseño de pavimentos flexibles de la carretera Calacota-IIave, 2023.

### **1.3.2. Hipótesis específicas**

- El módulo resiliente basado en curvas de diseño RAMCODES mejorará el diseño de pavimentos flexibles de la carretera Calacota-IIave,2023.



- El módulo resiliente basado en ensayos CBR convencional sobredimensionará el diseño de pavimentos flexibles de la carretera Calacota-Ilave, 2023.
- Existirá diferencia significativa de costo entre el diseño de pavimentos flexibles con las curvas de diseño RAMCODES y los ensayos CBR convencional.

#### **1.4. JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN**

En la república de Perú, la estimación de módulo de resiliencia en el diseño de pavimentos se basa en ensayos CBR convencionales que asume una condición completamente saturada de la subrasante del pavimento, sin embargo, la guía empírico-mecanicista de AASHTO, sugiere evaluar el módulo resiliente a través de equipos dinámicos como el cíclico triaxial, metodología aún no implementada en el país, debido a su elevado costo, y la no disponibilidad de pruebas para medir la succión del suelo y un amplio registro de información climática.

Ante esta situación, se fundamenta la necesidad de calcular el módulo de resiliencia de subrasante empleando las curvas de diseño RAMCODES, esto permite alcanzar diseños de capas de rodadura óptimos y económicos, debido a la elección de un CBR efectivo, en función al porcentaje mínimo de compactación y la saturación máxima de la zona en estudio. Por lo tanto, se obtienen menores espesores de subbase, lo cual se traduce en una reducción de costos.

Asimismo, el mapa de resistencias, calcula el porcentaje de compactación requerida, el cual se verifica por la prueba de cono de arena y se establece el número de pasadas del rodillo liso vibratorio, siendo menor respecto al método convencional.



Finalmente, la presente investigación proporcionará respaldo para realizar investigaciones posteriores en la ingeniería vial y la mecánica de suelos no saturados, por lo tanto, se justifica la contribución y la innovación de este análisis.

## **1.5. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN**

### **1.5.1. Objetivo general**

- Comparar el módulo resiliente basado en curvas de diseño RAMCODES y ensayos CBR convencional para el diseño de pavimentos flexibles de la carretera Calacota-Ilave, 2023.

### **1.5.2. Objetivos específicos**

- Determinar el módulo resiliente basado en curvas de diseño RAMCODES para el diseño de pavimentos flexibles de la carretera Calacota-Ilave,2023.
- Evaluar el módulo resiliente basado en ensayos CBR convencional para el diseño de pavimentos flexibles de la carretera Calacota-Ilave,2023.
- Explicar la diferencia de costo entre el diseño de pavimentos flexibles con las curvas de diseño RAMCODES y los ensayos CBR convencional.





## CAPÍTULO II

### REVISIÓN DE LITERATURA

#### 2.1. ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN

Para enmarcar el estudio se revisaron trabajos relacionados al tema. A continuación, se presenta los siguientes antecedentes:

##### 2.1.1. Antecedentes internacionales

Sánchez (2019), en su publicación presentó un enfoque llamado método RAMCODES para el diseño de suelos compactados, probados en proyectos reales. El diseño de un suelo, implica determinar el grado de compactación mínimo donde el suelo muestre una respuesta solicitada bajo condiciones específicas de hidratación, sobrecarga y tasa de carga. Esto se lleva a cabo mediante una curva de diseño, que es un gráfico que relaciona el grado de compactación del suelo con su respuesta en condiciones constantes de hidratación, sobrecarga y tasa de carga. Este método permite diseñar un suelo mediante el método simple o compuesto que produce un valor de resistencia promedio ponderado, con respecto a varias condiciones de hidratación a lo largo del periodo de diseño. En este artículo, los riesgos y las implicaciones económicas de diseñar con criterios basados en normas en lugar de criterios basados en el desempeño, se explican utilizando una construcción conceptual llamada pirámide de diseño RAMCODES.

Pulecio et al. (2019), en su estudio evaluó el comportamiento de materiales granulares de subbase de las canteras "La Caima" y "Martínez" ubicadas en Ibagué, Colombia, utilizando mapas de resistencia validados con los datos



tradicionales de contenido óptimo de humedad, peso unitario seco máximo y CBR. Los resultados de los mapas de resistencia generados para ambas canteras mediante el software Grapher revelaron que un contenido de humedad inferior al óptimo (determinado en la prueba proctor), conlleva a valores superiores de CBR. Por ejemplo, en las canteras "La Caima" y "Martínez", de materiales arcillosos no plásticos se observó un aumento del 31.61% y 24.46% respectivamente en el valor de CBR, al reducir la humedad óptima en un 0.5%. Estos resultados subrayan la eficacia de los mapas de resistencia para mejorar el control de la compactación en los materiales granulares de la subbase.

Oyola Guzmán & Oyola Morales (2019), en su investigación tuvieron como objetivo proponer el uso de técnicas de programación lineal para la generación de la zona de aceptación de la metodología RAMCODES, llamada "zona de rendimiento óptimo". Utilizaron material de una planta de producción de suelo ubicada en las colinas del Urubó, en el departamento de Santa Cruz, Bolivia. Esta metodología vincula variables del diseño de suelos (resistencia, condiciones de hidratación) con el control de la calidad tradicional (porcentaje mínimo de compactación). Dividieron su análisis en dos fases: la primera fue la caracterización del material y obtención de la zona óptima de comportamiento y la segunda se dedicó a comprobar los resultados obtenidos en la primera fase utilizando muestras compactadas. El suelo coincidió con la designación A-2-4(0) según ASTM D3282. Graficaron una superficie de respuesta a partir de datos experimentales, el mapa de resistencia del suelo, se obtuvo mediante el enfoque RAMCODES y propusieron una zona de comportamiento óptimo, que es un sitio geométrico en el plano cartesiano, en el cual un porcentaje de compactación tiene alta probabilidad de cumplir un valor preestablecido de respuesta mecánica. Estos



resultados implican que la zona de desempeño óptimo tiene aplicaciones de campo para control de calidad y aceptación de suelos compactados, garantizando un desempeño mecánico óptimo, que cumpla con el porcentaje mínimo de compactación y así mejorar la calidad de los suelos compactados.

Oyola Guzmán & Oyola Morales (2018), en su investigación explicaron la falla inesperada de suelos compactados utilizando curvas de diseño de la metodología RAMCODES. Su análisis se centró en el uso exclusivo del porcentaje mínimo de compactación como criterio de control de calidad de compactación suelos, utilizando las pruebas proctor estándar y modificado para suelo compactado con equipo liviano y pesado respectivamente. Después de cambiar las condiciones del contenido de agua, el suelo compactado con equipo pesado y liviano mostraron cambios en la capacidad de carga; el suelo compactado con equipo liviano presentó falla, mientras que el suelo compactado con equipo pesado no. Para identificar las causas de falla, se analizaron muestras de suelo en laboratorio, mediante curvas de diseño obtenidas de un diseño experimental factorial. El análisis reveló que el criterio del porcentaje mínimo de compactación no era adecuado para determinar el desempeño mecánico real del suelo.

Queiroz & Gutiérrez (2016), en su investigación tuvo como objetivo caracterizar el suelo laterítico de Brasilia bajo los criterios de la metodología RAMCODES. La zona de estudio fue el terreno ubicado en 503 norte, al lado del edificio Disbrave, Distrito Federal-Brasilia, teniendo como muestra un suelo tipo limo de baja compresibilidad (ML). El proceso de estudio se subdividió en tres fases principales: caracterización física del suelo, pruebas de compactación e índice de Soporte de California (ISC). Se realizaron pruebas CBR en muestras compactadas a distintas energías y grados de saturación, conforme a las curvas de



compactación del material bajo energías normales, intermedias y modificadas. Los resultados se analizaron mediante la elaboración de curvas de rendimiento y superficies para identificar la combinación óptima entre grado de saturación, energía de compactación y resistencia mecánica. Se observó que el aumento de la humedad disminuyó los valores de ISC en el suelo compactado, lo cual indica que la humedad óptima no necesariamente garantiza la máxima resistencia del suelo. Se sugiere la necesidad de desarrollar una nueva metodología que considere no solo parámetros como la humedad óptima, sino también otros factores relevantes para determinar la mejor condición de resistencia del suelo.

### **2.1.2. Antecedentes nacionales**

Ccarita (2024), en su tesis busca determinar el impacto de la metodología RAMCODES, mediante un enfoque BIM, en el diseño de pavimentos asociados a la Carretera Chivay - Canacota. La investigación fue descriptiva de diseño experimental. La sección de análisis abarca desde el kilómetro 14+300 hasta la entrada del distrito de Caylloma. El procedimiento consistió en llevar a cabo 21 experimentos factoriales, cuyos resultados fueron procesados utilizando el software OringPro2023 para crear el mapa de resistencia. La superposición de este mapa con las curvas de saturación facilitó la generación del conjunto de curvas de diseño vinculadas a la vía. El diseño se optimizó, al incrementar el Índice de Soporte California (CBR) en un 26%, alcanzando una compactación del 96.5% y disminuyendo el grosor de la capa base en 5 centímetros. Posteriormente, se efectuó un análisis económico y cronológico mediante el modelado BIM, resultando en una reducción del 3% tanto en el presupuesto como en el cronograma inicial.



Inga & Gutiérrez (2022), en su artículo de investigación tienen como propósito implementar el espectro de curvas de diseño RAMCODES de subrasantes no saturadas para el diseño de pavimentos flexibles. La población analizada consistió en la carretera Oyón-Ambo, y se extrajo una muestra de 300 kg de arcilla limosa. Se efectuaron ensayos de CBR donde se variaron las intensidades de compactación y el contenido de agua. Luego, se integraron los resultados en el programa OringPro2019b para elaborar las curvas de diseño RAMCODES. Utilizó un modelo matemático para anticipar la evolución de la saturación durante el tiempo de estudio. Después, se determinaron los valores estacionales de CBR y se relacionaron entre sí para establecer los módulos resilientes. Finalmente, se llevaron a cabo dos diseños de estructuras de pavimento flexible, basado en la caracterización común de subrasante y conforme a la metodología propuesta. Los resultados muestran que considerar el comportamiento no saturado de la subrasante optimiza el diseño del pavimento, dado que el módulo resiliente de la subrasante aumenta en un 28.8%, lo cual conlleva a una reducción del 25% en el grosor de la capa de subbase.

Pariona (2014), en su tesis propone determinar las relaciones entre la resistencia (CBR), el contenido de humedad y la energía de compactación de suelos. El método utilizado se caracteriza por su enfoque cuantitativo y aplicativo, implementando un diseño experimental-cuasiexperimental. Se realizaron pruebas en muestras aptas de la “cantera-Puente Negro” según las exigencias de las normativas ASTM y MTC, La cantidad de muestra representativa es de 555 kg. El procedimiento consiste en la realización de experimentos factoriales cuyos datos son analizados y organizados mediante los mapas de resistencia para establecer relaciones entre las variables dependiente e independiente. Se deduce



que la resistencia se ve significativamente influenciada por la humedad del material, evidenciando una disminución pronunciada en niveles de humedad elevados. Además, se evidencia una relación directa entre la energía de compactación y la resistencia (CBR).

### **2.1.3. Antecedentes locales**

Luque & Ccolque (2016), en su tesis tienen el propósito de Contrastar el método AASHTO con RAMCODES para el diseño de suelos compactados como mejoramiento de la subrasante en pavimentos localizados en la ciudad de Juliaca. La investigación fue del tipo descriptiva. La población de estudio fue la cantera Taparachi con suelos del tipo GP-GC, se requirió una muestra total de 320 kg. El procedimiento implicó la realización de ensayos de laboratorio cuyos resultados fueron esenciales para analizar el material a través de la gráfica de densidad seca vs CBR (método proctor modificado) y los mapas de resistencia (metodología RAMCODES). De acuerdo con estos gráficos, se concluye que, en términos de optimización de los materiales, la metodología RAMCODES resulta más eficaz, ya que proporciona valores de resistencia (CBR) superiores en comparación con el método convencional (método proctor modificado AASHTO).



## 2.2. MARCO TEÓRICO

### 2.2.1. Pavimento flexible

MTC (2014) “menciona que es un sistema estratificado de capas granulares superpuestas, específicamente diseñadas para soportar las cargas de tráfico vehicular. Estas estructuras comprenden una capa asfáltica que se apoya en capas subyacentes de menor rigidez, compuestas de materiales granulares no tratados, que descansan directamente sobre el terreno natural” (p. 25).

#### 2.2.1.1. Partes del pavimento flexible

Minaya & Ordóñez (2006) “en la configuración de un pavimento se encuentra una capa asfáltica que generalmente se sostiene sobre dos capas menos rígidas, conocidas como base y subbase” (p. 1).

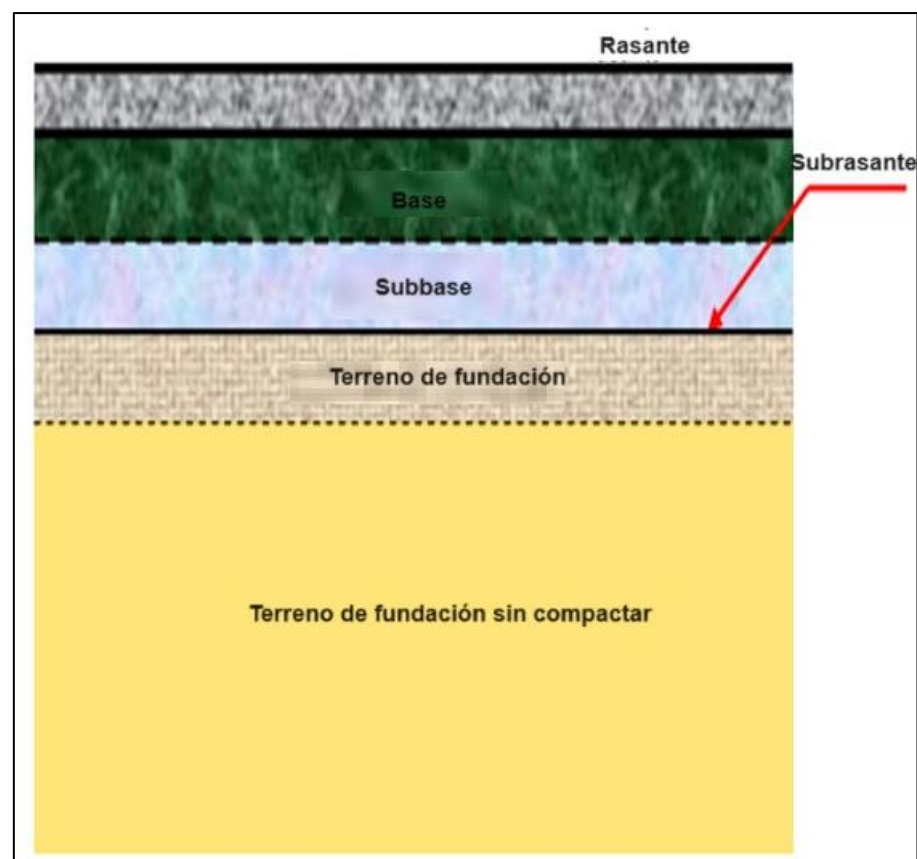
La disposición típica de estas partes es:

- a) **Superficie de rodadura:** “Corresponde a la sección superior de la estructura del pavimento, la cual está compuesta de material bituminoso, y tiene como función principal proporcionar el soporte directo al tráfico vehicular” (MTC, 2014, p. 25).
- b) **Base:** “Constituye la capa subyacente a la capa de rodadura, donde su función principal es la de soportar, distribuir y transmitir las cargas resultantes del tránsito vehicular. Esta capa puede estar compuesta por material granular drenante con un CBR igual o superior al 80%” (MTC, 2014, p. 25).

- c) **Subbase:** “Es una capa diseñada con el propósito de ofrecer soporte a la base y a la carpeta, además, se utiliza como estrato de drenaje y para regular la capilaridad del agua. Esta capa puede estar compuesta por material granular con un CBR de 40% o más.” (MTC, 2014, p. 25).
- d) **Subrasante:** “Su función principal es brindar apoyo a la integridad estructural del pavimento. Los materiales por debajo de este nivel deben ser estables con un  $CBR \geq 6$ , de lo contrario requiere estabilización” (MTC, 2014, pp. 24-25).

**Figura 1**

*Estructura típica de pavimentos asfálticos*



Nota: Componentes de la estructura del pavimento flexible. Fuente: (Minaya & Ordóñez, 2006, p.1).



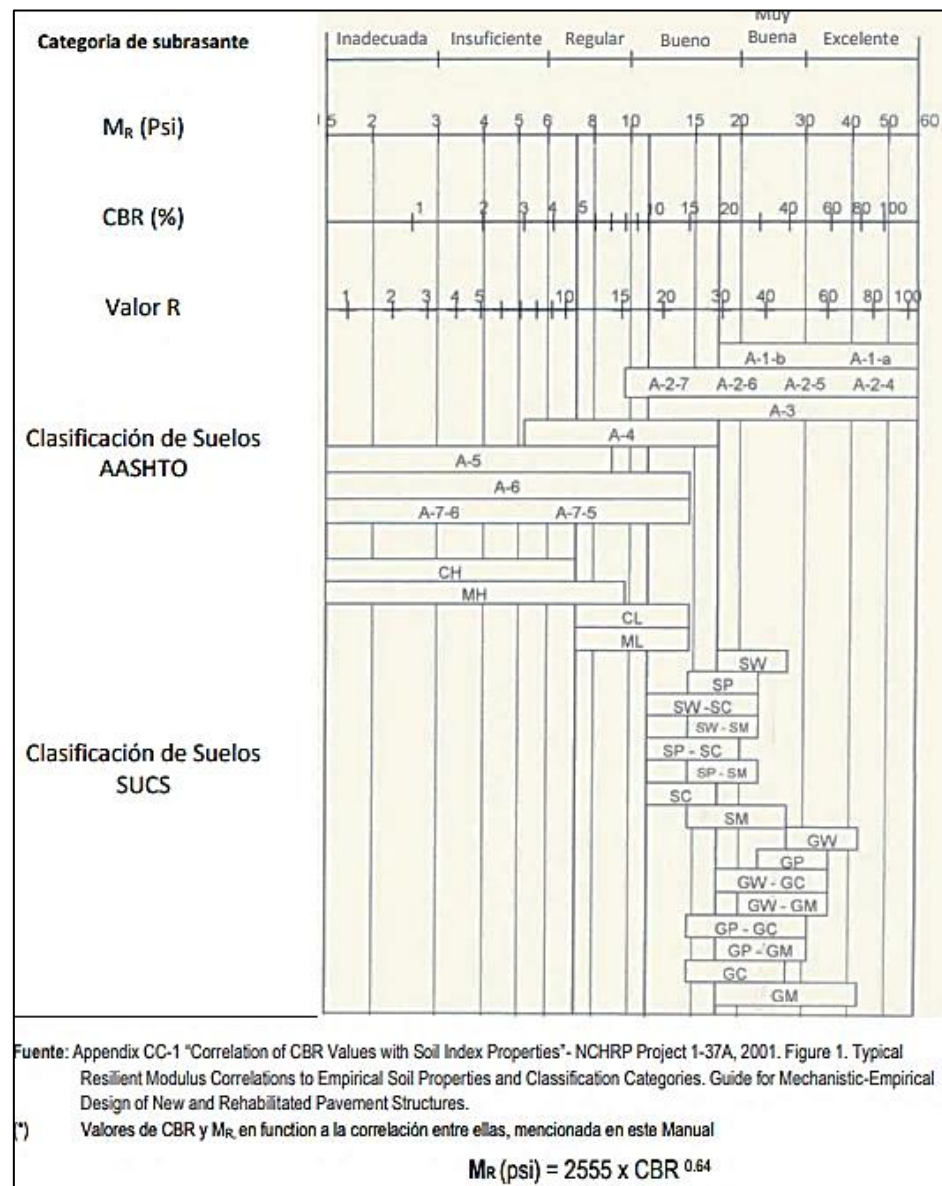
## 2.2.2. Módulo resiliente

“Es un parámetro que evalúa la respuesta elástica del suelo, considerando particularidades no lineales. Su aplicación directa se extiende al diseño de pavimentos flexibles” (AASHTO, 1993).

### 2.2.2.1. Ecuación de correlación de módulo resiliente

**Figura 2**

*Correlación entre las propiedades del suelo y módulo resiliente*



Nota: Ecuación general de correlación y valores de CBR. Fuente: (MTC, 2014, p. 38).

### 2.2.3. Caracterización de la subrasante

Las exploraciones deben realizarse a intervalos especificados según la norma MTC, siguiendo la configuración siguiente:

**Tabla 1**

*Número de calicatas para exploración de suelos*

Tipo de Carretera	Profundidad (m)	Número mínimo de Calicatas	Observación
Autopistas: carreteras de IMDA mayor de 6000 veh/día, de calzadas separadas, cada una con dos o más carriles	1.50 m respecto al nivel de subrasante del proyecto	Calzada 2 carriles por sentido: 4 calicatas x km x sentido	Las calicatas se Ubicarán longitudinalmente y en forma alternada
		Calzada 3 carriles por sentido: 4 calicatas x km x sentido	
		Calzada 4 carriles por sentido: 6 calicatas x km x sentido	
Carreteras Duales o Multicarril: carreteras de IMDA entre 6000 y 4001 veh/día, de calzadas separadas, cada una con dos o más carriles	1.50 m respecto al nivel de subrasante del proyecto	Calzada 2 carriles por sentido: 4 calicatas x km x sentido	Las calicatas se ubicarán longitudinalmente y en forma alternada
		Calzada 3 carriles por sentido: 4 calicatas x km x sentido	
		Calzada 4 carriles por sentido: 6 calicatas x km x sentido	
Carreteras de Primera Clase: carreteras con un IMDA entre 4000-2001 veh/día, de una calzada de dos carriles	1.50 m respecto al nivel de subrasante del proyecto.	4 calicatas x km	
Carreteras de Segunda Clase: carreteras con un IMDA entre 2000-401 veh/día, de una calzada de dos carriles.	1.50 m respecto al nivel de subrasante del proyecto	3 calicatas x km	Las calicatas se ubicarán longitudinalmente y en forma alternada
Carreteras de Tercera Clase: carreteras con un IMDA entre 400-201 veh/día, de una calzada de dos carriles	1.50 m respecto al nivel de subrasante del proyecto	2 calicatas x km	
Carreteras de Bajo Volumen de Tránsito: carreteras con un IMDA $\leq$ 200 veh/día, de una calzada	1.50 m respecto al nivel de subrasante del proyecto	1 calicata x km	

Nota: Número de calicatas según el tipo vía. Fuente: (MTC, 2014, p. 28).

### 2.2.3.1. Registro de excavación

“Se recolectarán muestras representativas de cada calicata con el propósito de realizar ensayos CBR y posteriormente correlacionar los resultados a través de ecuaciones de módulo resiliente. La cantidad de ensayos dependerá de la clasificación de la carretera” (MTC, 2014, p. 14).

**Tabla 2**

*Número de ensayos MR y CBR*

Tipo de Carretera	N° MR y CBR
Autopistas: carreteras de IMDA mayor de 6000 veh/día, de calzadas separadas, cada una con dos o más carriles	Calzada 2 carriles por sentido: 1 MR cada 3 km x sentido y 1 CBR cada 1 km x sentido
	Calzada 3 carriles por sentido: 1 MR cada 2 km x sentido y 1 CBR cada 1 km x sentido
	Calzada 4 carriles por sentido: 1 MR cada 1 km y 1 CBR cada 1 km x sentido
Carreteras Duales o Multicarril: carreteras de IMDA entre 6000 y 4001 veh/día, de calzadas separadas, cada una con dos o más carriles	Calzada 2 carriles por sentido: 1 MR cada 3 km x sentido y 1 CBR cada 1 km x sentido
	Calzada 3 carriles por sentido: 1 MR cada 2 km x sentido y 1 CBR cada 1 km x sentido
	Calzada 4 carriles por sentido: 1 MR cada 1 km y 1 CBR cada 1 km x sentido
Carreteras de Primera Clase: carreteras con un IMDA entre 4000 - 2001 veh/día, de una calzada de dos carriles.	1 MR cada 3 km y 1 CBR cada 1 km
Carreteras de Segunda Clase: carreteras con un IMDA entre 2000 – 401 veh/día, de una calzada de dos carriles.	Cada 1.5 km se realizará un CBR
Carreteras de Tercera Clase: carreteras con un IMDA entre 400 - 201 veh/día, de una calzada de dos carriles.	Cada 2 km se realizará un CBR
Carreteras con un IMDA $\leq$ 200 veh/día, de una calzada.	Cada 3 km se realizará un CBR

Nota: Número de ensayos CBR según al tipo de carretera. Fuente: (MTC, 2014, p. 30).



### 2.2.3.2. Metodología de las diferencias acumuladas

Este enfoque constituye una metodología estadística para segmentar de manera homogénea tramos de pavimento, mediante el análisis de diversas mediciones de respuesta como: deflexiones, CBR, niveles de servicio, coeficientes de fricción e índices de deterioro (AASHTO, 1993).

Según AASHTO (1993), indica realizar los siguientes pasos:

- La primera columna, en una hoja de cálculo Excel, refleja las abscisas asociadas a cada ensayo.

$$X_1, X_2, X_3, X_4, X_5, \dots \dots X_n$$

Donde:

$X_1$  : Abscisa en el punto 1.

$X_n$  : Abscisa en el enésimo punto.

- En la segunda columna, identificada como "Intervalo de separación", se presentará la variación entre las abscisas registradas en la primera columna.

$$\Delta X_1 = 0$$

$$\Delta X_1 = X_1 - X_0$$

$$\Delta X_2 = X_2 - X_1$$

$$\Delta X_n = X_n - X_{n-1}$$



- En la tercera columna, conocida como "intervalo acumulativo", se representará la suma acumulativa de las distancias de la segunda columna.

$$\sum \Delta X_1 = 0$$

$$\sum \Delta X_2 = \Delta X_1 + \Delta X_2$$

$$\sum \Delta X_3 = \Delta X_1 + \Delta X_2 + \Delta X_3$$

$$\sum \Delta X_n = \Delta X_1 + \Delta X_2 + \dots + \Delta X_{n-1} + \Delta X_n$$

- La cuarta columna representa la respuesta (r) del pavimento, que viene a ser mediciones de respuesta del pavimento.
- En la quinta columna se indica el promedio entre las mediciones de respuesta del pavimento.

$$\bar{r}_1 = r_1$$

$$\bar{r}_1 = \frac{r_1 + r_2}{2}$$

$$\bar{r}_n = \frac{r_{n-1} + r_n}{2}$$

- La sexta columna, llamada "área de intervalo", se calcula utilizando la siguiente expresión:

$$\sum a_1 = 0$$

$$\sum a_2 = a_1 + a_2$$

$$\sum a_3 = a_1 + a_2 + a_3$$



$$\sum a_n = a_1 + a_2 + a_3 \dots \dots + a_{n-1} + a_n$$

- En la séptima columna el factor de diferencia es con la siguiente fórmula matemática:

$$F = \frac{\text{Área acumulativa}}{\text{Distancia Acumulativa}}$$

$$F = \frac{\sum a_n}{\sum \Delta X_n}$$

- La octava columna establece la diferencia acumulativa mediante la siguiente expresión matemática.

$$Z_{X1} = 0$$

$$Z_{X2} = \sum a_2 - (F * \sum \Delta X_2)$$

$$Z_{Xn} = \sum a_n - (F * \sum \Delta X_n)$$

- Se genera un gráfico de  $Z_x$  en función de la abscisa, que facilita la visualización de las secciones homogéneas.



## 2.2.4. Características físicas de la subrasante

Las propiedades físicas se definen por el comportamiento del material con la materia orgánica y su vínculo exterior, comprender estas propiedades es esencial para entender sus posibles usos que puede darse.

### 2.2.4.1. Contenido de humedad (MTC E 108)

MTC (2016) “Se define como la proporción, medida en porcentaje, del peso del agua contenido dentro de una masa específica de suelo en relación con el peso total” (p. 49).

Bowles (1981) “menciona que es un procedimiento de laboratorio estándar que busca determinar la cantidad de agua presente en una masa específica de suelo, expresada como porcentaje del peso seco del suelo” (p. 20).

Para su cálculo se tiene la siguiente ecuación:

$$w = \frac{W_w}{W_s} * 100$$

Donde:

$w$  = Contenido de humedad (%)

$W_w$  = Peso del agua (g)

$W_s$  = Peso de sólidos (g)



#### 2.2.4.2. Análisis granulométrico de suelos por tamizado (MTC E

107)

Bowles (1981) “consiste en establecer las proporciones relativas de los diferentes tamaños de partículas que se encuentran en una muestra de suelo específica” (p. 37).

Además, se “refiere en calcular cuantitativamente la distribución de la gradación de las partículas que lo componen” (MTC, 2016, p. 44).

Las proporciones mencionadas se realiza con los tamices normalizados de malla metálica, los cuales tienen las siguientes aberturas:

**Tabla 3**

*Serie de tamices*

Tamices	Aberturas (mm)
3"	75.000
2"	50.800
1 ½"	38.100
1"	25.400
¾"	19.000
3/8"	9.500
N°4	4.760
N°10	2.000
N°20	0.840
N°40	0.425
N°60	0.260
N°140	0.106
N°200	0.075

Nota: Aberturas de los tamices para granulometría. Fuente: (MTC, 2016, p. 44).



**Tabla 4**

*Muestra mínima para granulometría*

<b>Diámetro Nominal de las Partículas más Grandes mm (pulg)</b>	<b>Peso Mínimo aproximado de la Porción (g)</b>
9.50 (3/8")	500
19.60 (3/4")	1000
25.70 (1")	2000
37.50 (1 ½")	3000
50.00 (2")	4000
75.00 (3")	5000

Nota: Cantidad mínima en peso para tamizado. Fuente:(MTC, 2016, p. 45).

Según la tabla N°4, la masa de la muestra, medida en gramos, varía en función del tamaño máximo nominal.

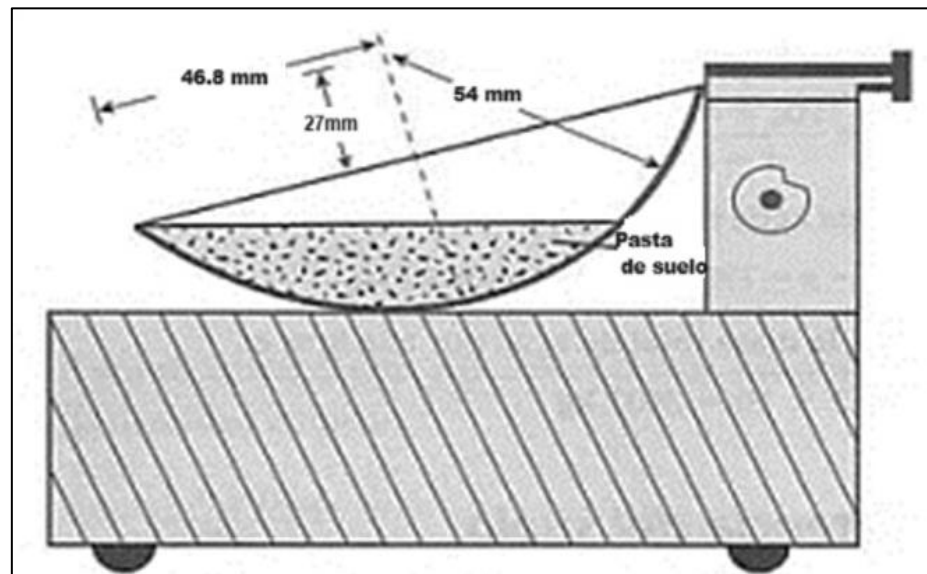
#### **2.2.4.3. Límite líquido (MTC E 110)**

MTC (2016) lo define como “la humedad al cual la ranura divisoria, ubicada entre dos partes de una mezcla de suelo, se cierra a lo largo de su base en una distancia de 13 mm (1/2") luego de dejar caer la copa 25 veces desde una altura de 1 cm, a una velocidad de 2 caídas por segundo” (p. 67).

Bowles (1981) se trata de una “evaluación de la capacidad del suelo para soportar esfuerzos cortantes, en función del contenido de humedad dada, este parámetro guarda similitud con un ensayo de resistencia, según observó Casa Grande en 1932. En sus investigaciones, determinó que cada golpe para cerrar la ranura en la copa se correlaciona con un esfuerzo cortante aproximado a un gramo por cm<sup>2</sup>” (p. 19).

**Figura 3**

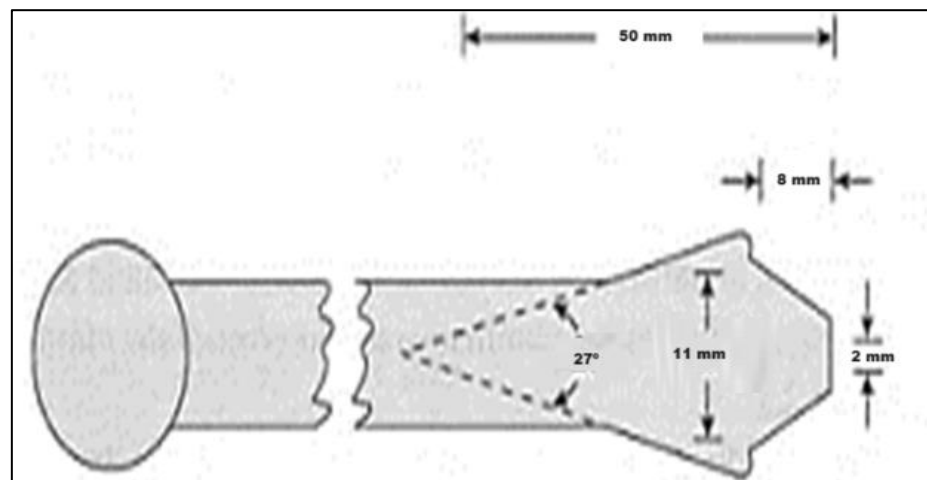
*Equipo para realizar el ensayo*



Nota: Vista lateral de la cuchara de Casagrande. Fuente: (Das, 2001, p. 28).

**Figura 4**

*Herramienta de corte estándar*



Nota: Ranurador que corta por el centro la pasta de suelo. Fuente: (Das, 2001, p. 28).

Luego de calibrar el equipo para realizar el ensayo a continuación se considera una muestra de suelo de 250 g, pasante en el tamiz N°40, la cual se prepara en una cápsula junto con el agua para poner la mezcla de suelo en la copa de bronce y dejar caer desde una altura de 1 cm, a una



frecuencia de 2 impactos/segundo, hasta que las dos porciones de suelo se hayan separado aproximadamente 12.7 mm

La ecuación siguiente se emplea para calcular el límite líquido en un punto:

$$LL = W^n \left( \frac{N}{25} \right)^{0,121}$$

Donde:

$N$  = Cantidad de impactos necesarios para cerrar la ranura.

$W^n$  = Humedad.

#### **2.2.4.4. Límite plástico (L.P.) e índice de plasticidad (I.P.) (MTC E 111)**

MTC (2016) “es la humedad mínima necesaria para moldear rollos de suelo con un diámetro de aproximadamente 3.2 mm (1/8”), al formar los rollos cilíndricos con la palma de la mano y un vidrio esmerilado” (p. 72).

Bowles (1981) lo define como “la humedad del suelo en el cual un cilindro se quiebra o agrieta al ser enrollado hasta alcanzar un diámetro de aproximadamente 3 mm” (p. 20).

Este procedimiento se utiliza para definir las fracciones granulométricas del suelo de acuerdo con las clasificaciones AASHTO y SUCS. Se calcula de la siguiente manera:



$$\text{Límite plástico} = \frac{\text{Peso de agua}}{\text{Peso de suelo secado al horno}} \times 100$$

La plasticidad, se define:

$$IP = LL - LP$$

Donde:

$LL$  = Límite líquido

$LP$  = Límite plástico

#### **A. Sistema unificado de clasificación de suelos**

Das (2013) “Casagrande introdujo este enfoque en 1948, destinado a ser utilizado en la construcción de aeropuertos por ingenieros militares durante la segunda guerra mundial. Este procedimiento se actualizó en 1952 con la colaboración del Bureau of Reclamation (US)” (p.82).

Esta técnica divide a los suelos en :

- “Suelos gruesos, integrados por grava y arena en su estado original, contienen menos del 50% de partículas que pasan por la malla N°200. Los símbolos de clasificación utilizan los prefijos G para grava y S para arena” (Das, 2013, p. 83).
- “Suelos de grano fino donde el 50% o más de las partículas pasan por el tamiz N°200. Los prefijos de categorización son M para limo inorgánico, C para arcilla inorgánica y O para limos y arcillas orgánicas. Pt se utiliza para designar turba y suelos muy orgánicos” (Das, 2013, p. 83).

Para llevar a cabo una clasificación adecuada según este sistema, se debe conocer los siguientes pasos:



- “Porcentaje de grava: Fracción que atraviesa la malla de 76.2 mm y es retenido en la malla N°4 (4.75 mm)” (Das, 2013, p. 84).
- “Porcentaje de arena: Fracción que atraviesa la malla N°4 (4.75 mm) y es retenido en la malla N°200” (Das, 2013, p. 84).
- “Porcentaje de Limo y Arcilla: Fracción que pasa la malla N°200” (Das, 2013, p. 83).
- El Cu y el Cc, definidos por:

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}}$$

$$C_c = \frac{(D_{30})^2}{D_{60} \cdot D_{10}}$$

Donde:

$C_u$  : Coeficiente de uniformidad.

$C_c$  : Coeficiente de curvatura.

$D_{10}$  : Diámetro al 10% de finos.

$D_{30}$  : Diámetro al 30% de finos.

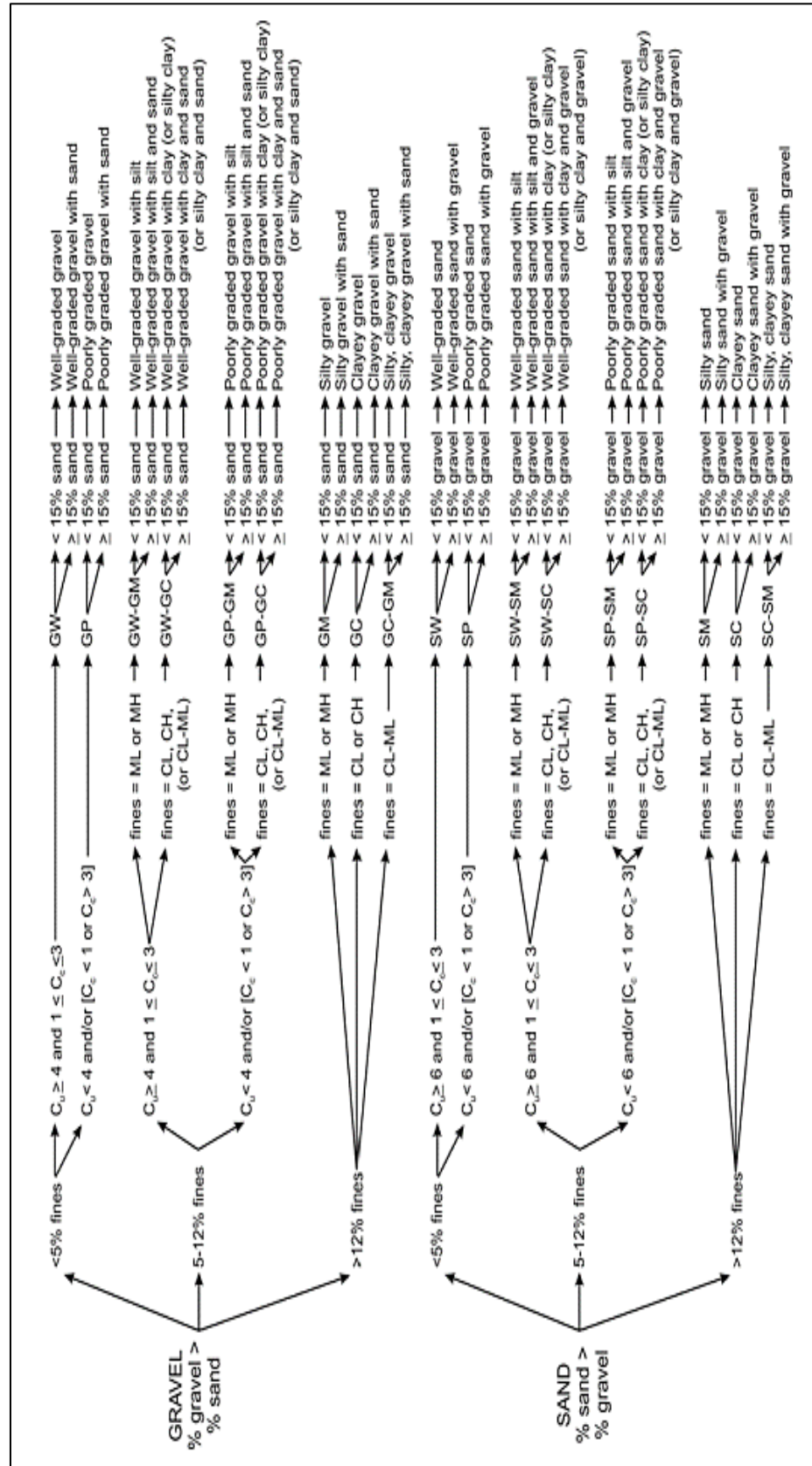
$D_{60}$  : Diámetro al 60% de finos.

- El LL e IP de las partículas pasantes el tamiz N°40.

Por lo tanto, el método de clasificación del suelo depende del porcentaje retenido en la malla N°200: para suelos de textura fina, donde más del 50% del suelo pasa a través del tamiz N°200, y se emplea la figura 6; mientras que para suelos donde más del 50% está retenido en el tamiz N°200, se utiliza la figura 5.

Figura 5

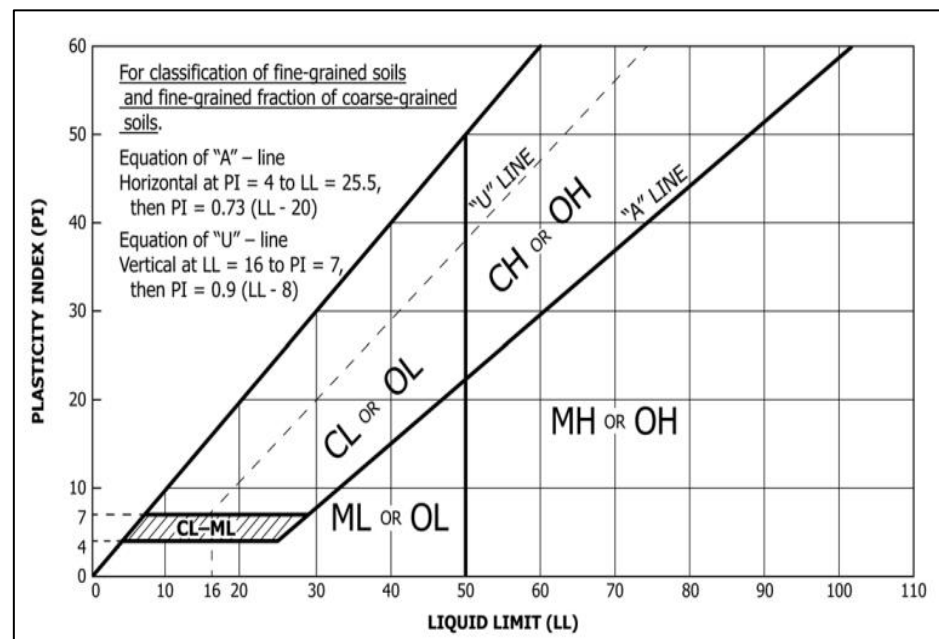
Diagrama de flujo para clasificación de suelos de partículas gruesas



Nota: Clasificación de gravas y arenas. Fuente: (ASTM D 2487-17, 2017, p. 5).

**Figura 6**

*Carta de plasticidad*



Nota: Clasificación según los límites de consistencia para suelos finos. Fuente: (ASTM D2487-17, 2017, p. 6).

## B. Sistema de clasificación AASHTO

Das (2013) “esta forma de clasificación de suelos, conocida como clasificación de administración de carreteras, fue desarrollada en 1929 y ha experimentado varias actualizaciones, siendo la versión de 1945 la que se utiliza en la actualidad. Divide a los suelos en 7 grupos, desde A1 hasta A7. Es así que, si  $\leq 35\%$  de partículas pasan de la malla N°200, son considerados materiales granulares y se identifican como A-1, A-2 y A-3. Por otro lado, si  $>35\%$  de partículas pasa la malla N°200, el suelo pertenece al grupo A-4, A-5 y A-7 y son suelos finos” (p. 78).

**Tabla 5**

*Clasificación de materiales Granulares*

Clasificación general	Materiales granulares (35% o menos del total de la muestra pasada por el núm. 200)						
	A-1			A-2			
Grupo de clasificación	A-1-a	A-1-b	A-3	A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7
Análisis de tamiz (porcentaje de paso)							
Núm.10	50 máx.	-	-	-	-	-	-
Núm.40	30 máx.	50 máx.	51 mín.	-	-	-	-
Núm.200	15 máx.	25 máx.	10 máx.	35 máx.	35 máx.	35 máx.	35 máx.
Características de la fracción de paso núm.40							
Límite Líquido	-	-	-	40 máx.	41 mín.	40 máx.	41 mín.
Índice de plasticidad	6 máx.	-	NP	10 máx.	10 máx.	11 mín.	11 mín.
Tipos comunes de materiales significativos constituyentes	Fragmentos de roca, grava y arena						
			Arena fina	Limo o grava arcillosa y arena			
Clasificación general de la subrasante	Excelente a bueno						

Nota: Clasificación según las características de granulometría y consistencia. Fuente: (Das, 2013, p. 79).



**Tabla 6**

*Clasificación de materiales Limo-Arcillosos*

Clasificación general	Materiales granulares (35% o menos del total de la muestra pasada por el núm. 200)			
	A-4	A-5	A-6	A-7
Grupo de clasificación				A-7-5* A-7-6†
Análisis de tamiz (porcentaje de paso)				
Núm. 10	-	-	-	-
Núm. 40	-	-	-	-
Núm. 200	36 mín.	36 mín.	36 mín.	36 mín.
Características de la fracción de paso núm.40				
Límite Líquido	40 máx.	41 mín.	40 máx.	41 mín.
Índice de plasticidad	10 máx.	10 máx.	11 mín.	11 mín.
Tipos comunes de materiales significativos constituyentes	Suelos limosos		Suelos arcillosos	
Clasificación general de la subrasante	Regular a malo			

Nota: \* para suelos del tipo: A-7-5,  $PI \leq LL-30$  y † para suelos de tipo A-7-6. Fuente: (Das, 2013, p. 79).

Además, este sistema de clasificación puede evaluar si un material es apto para el uso como subrasante de vías, mediante la ecuación siguiente:

$$IG = (F - 35)[0.2 + 0.005 (LL - 40)] + 0.01 (F - 15)(PI - 10)$$

Donde:

$F$  = Porcentaje pasante el tamiz N°200.

$LL$  = Límite líquido.

$PI$  = Índice de plasticidad.

Cuando el cálculo del IG arroja un resultado negativo, se interpreta como un valor equivalente a cero; además, el valor resultante del IG se aproxima al entero más próximo. Los valores de la fórmula propuesta se evalúan de manera secuencial de izquierda a derecha, y deben indicarse entre paréntesis (Das, 2013, p. 81).

#### 2.2.4.5. Gravedad específica de sólidos de suelo (Gs) (MTC E 113).

MTC (2016) “el ensayo incluye la medición de la gravedad específica de los sólidos de suelo que atraviesan la malla de 4.75 mm (malla N°4), empleando un picnómetro de agua” (p. 80).

“se define como la proporción entre su peso unitario y el peso unitario del agua destilada a una temperatura de 4°C” (Bowles, 1981, p. 62).

#### Tabla 7

##### *Cantidad de masa de suelo*

Tipo de suelo	Masa seca (g), para un picnómetro de 250 ml	Masa seca (g), para un picnómetro de 500 ml.
SP, SP-SM	60 ± 10	100 ± 10
SP-SC, SM, SC	45 ± 10	75 ± 10
Limo o arcilla	35 ± 10	50 ± 10

Nota: Cantidad de suelo para sumergir con agua en el picnómetro. Fuente: (MTC, 2016, p.82).

La fórmula empleada para su cálculo a una temperatura específica se presenta a continuación:

$$G_s = \frac{\alpha * M_s}{(M_{\rho_{ws,t}} - (M_{\rho_{w,t}} + M_s))}$$

Donde:

$M_s$  : Masa de los sólidos del suelo seco en horno (g)

$M_{\rho_{w,t}}$  : Masa del picnómetro y agua a temperatura de ensayo (g)

$M_{\rho_{ws,t}}$  : Masa del picnómetro, agua, y sólidos de suelo (g)

$\alpha$  : Coeficiente de corrección por temperatura

La siguiente tabla se emplea para realizar la corrección por temperatura:

**Tabla 8**

*Corrección por temperatura*

T. °C	$\alpha$	$\gamma$ g/cm <sup>3</sup>
16	1.0007	0.99897
18	1.0004	0.99862
20	1.0000	0.99823
22	0.9996	0.99780
24	0.9991	0.99732
26	0.9986	0.99681

Nota: Valores “ $\alpha$ ”, para cada temperatura de ensayo. Fuente: (Bowles, 1981, p. 64).

### 2.2.5. Características mecánicas de subrasante

Se refieren a las propiedades que describen el comportamiento del suelo a diferentes condiciones de carga y deformación. Estas propiedades son fundamentales para entender la capacidad de un suelo para soportar estructuras, su respuesta a cargas y su comportamiento en distintos contextos geotécnicos.

### 2.2.5.1. Compactación de suelos – Proctor modificado (MTC E 115)

“ Es establecer la relación entre el contenido de agua y el peso unitario seco de los suelos mediante la elaboración de la curva de compactación. Esto se logra compactando el suelo en un molde de 101.6 o 152.4 mm (4" o 6") de diámetro con un pisón de 44.5 N (10 lbf) que cae desde una altura de 457 mm (18"). Este proceso genera una energía de compactación de 2700 kN-m/m<sup>3</sup> (56000 pie-lbf/pie<sup>3</sup>)” (MTC, 2016, p. 105).

**Tabla 9**

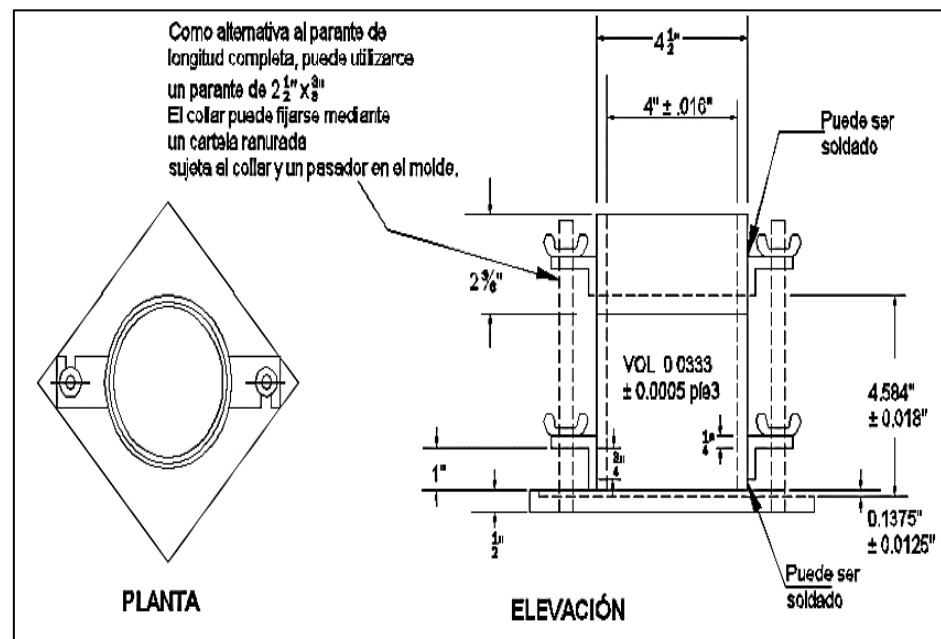
*Método a utilizar para el ensayo de proctor modificado*

Elemento	Método A	Método B	Método C
Diámetro del molde	101.6 mm	101.6 mm	152.4 mm
Volumen del molde	943.3 cm <sup>3</sup>	943.3 cm <sup>3</sup>	2124 cm <sup>3</sup>
Peso del martillo	44.5 N	44.5 N	44.5 N
Altura de la caída del martillo	457.2 mm	457.2 mm	457.2 mm
Número de golpes de martillo por capa de suelo	25	25	56
Número de capas de compactación	5	5	5
Energía de compactación	2696 kN-m/m <sup>3</sup>	2696 kN-m/m <sup>3</sup>	2696 kN-m/m <sup>3</sup>
Suelo utilizado	Porción que pasa el tamiz N°4. Puede ser utilizada si 20% o menos del peso de material es retenido en el tamiz N°4	Porción que pasa el tamiz de 9.5 mm. Puede utilizarse si el suelo retenido en el tamiz N°4 es más de 20% y 20% o menos del peso es retenido en el tamiz de 9.5 mm.	Porción que pasa el tamiz de 19 mm. Puede utilizarse si más de 20% del material es retenido en el tamiz de 9.5 mm y menos de 30% del peso es retenido en el tamiz de 19 mm.

Nota: Método a utilizar según el suelo pasante o retenido en el tamiz de 9.5 mm y el tamiz N°4. Fuente: (Das, 2013, p. 102).

**Figura 7**

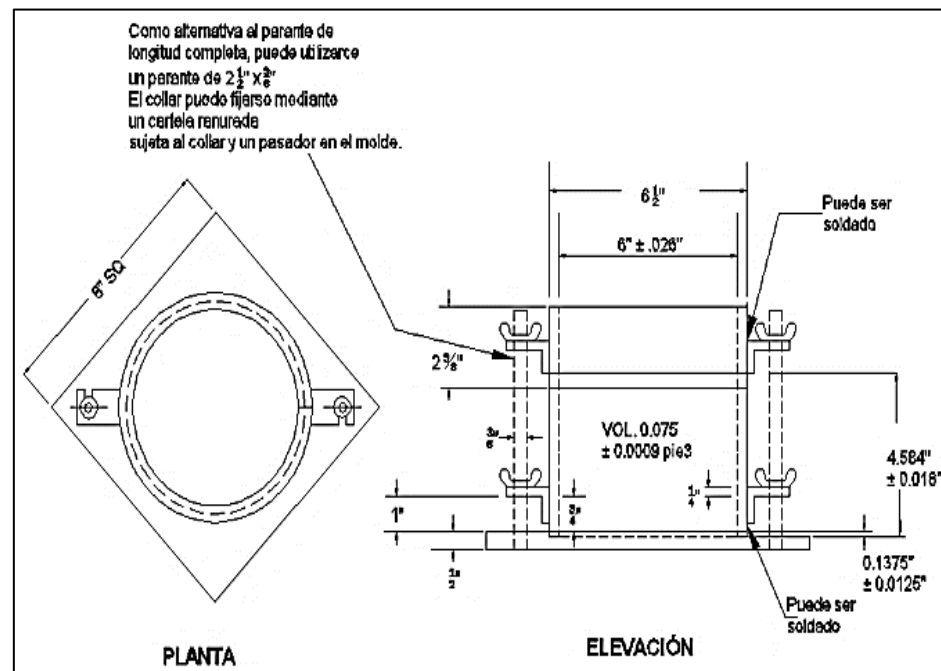
*Molde para realizar el ensayo de proctor modificado: "A" y "B"*



Nota: Molde para prueba por el método A y B. Fuente: (MTC, 2016, p. 117).

**Figura 8**

*Molde para realizar el ensayo de proctor modificado: "C"*



Nota: Molde para prueba por el método C. Fuente: (MTC, 2016, p. 117).



El cálculo de la densidad húmeda y seca se realiza utilizando la siguiente fórmula:

$$\gamma_h = \frac{M_h}{V_m}$$

Donde:

$\gamma_h$  : Densidad del suelo húmedo

$M_h$  : Peso del suelo húmedo compactado

$V_m$  : Volumen del molde cilíndrico

$$\gamma_d = \frac{\gamma_h}{1 + \frac{w}{100}}$$

Donde:

$\gamma_d$  : Densidad seca del suelo compactado

$w$  : Porcentaje del contenido de humedad

#### 2.2.5.2. CBR de suelos - laboratorio (MTC E 132)

“Es un procedimiento bastante práctico que se emplea con frecuencia para calcular la resistencia del suelo en capas como la subrasante, base y subbase” (Minaya & Ordóñez, 2006, p.6).

Minaya & Ordóñez (2006) “define el índice de California Bearing Ratio (CBR) como la relación, en porcentaje, entre la resistencia a la penetración necesaria para que un pistón estándar penetre 0.1" en un suelo, y la resistencia a la penetración de una muestra estándar de referencia, que es una piedra chancada con una resistencia de 1000 psi” (p. 7).

La expresión del CBR es la siguiente:

$$CBR = \frac{\text{Resistencia a la penetración (psi)}}{1000 \text{ lb/pulg}^2} * 100$$

**Tabla 10**

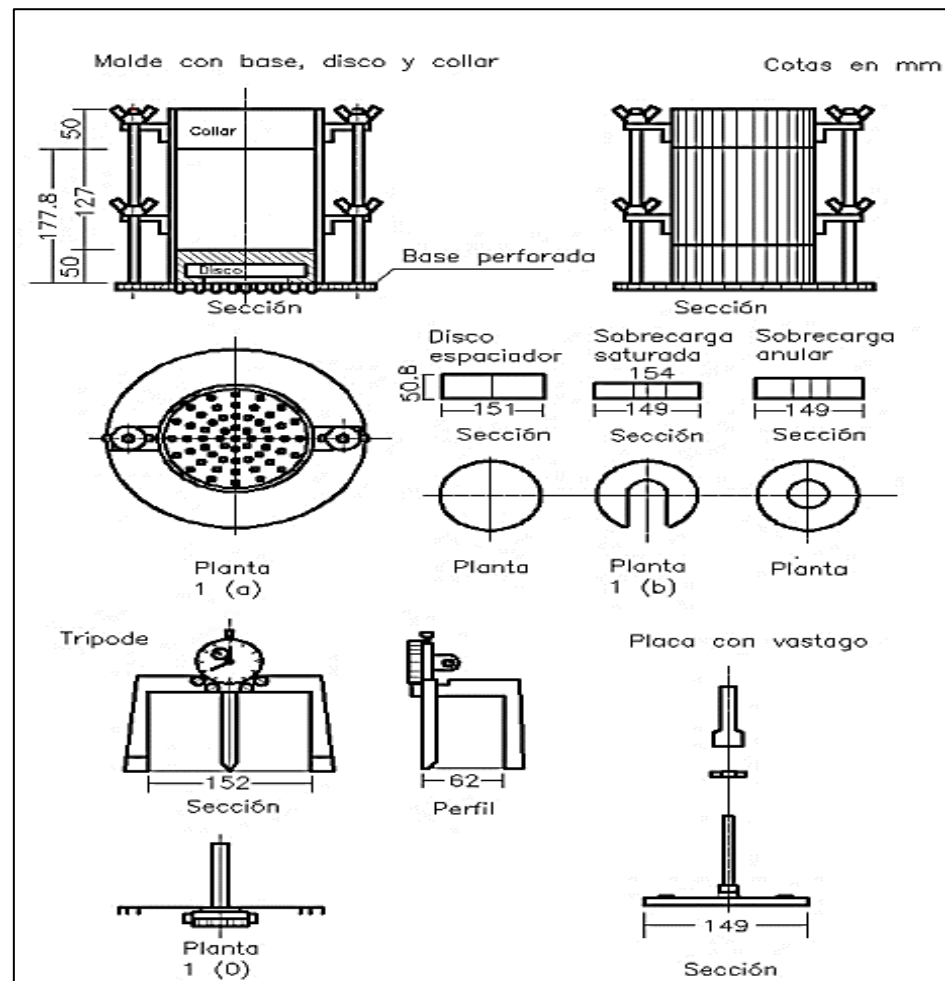
*Características de la muestra patrón*

Penetración			Presión	
mm	pulgadas	MN/m <sup>2</sup>	kgf/cm <sup>2</sup>	lb/plg <sup>2</sup>
2.54	0.1	6.9	70.31	1.000
5.08	0.2	10.35	105.46	1.500

Nota: Valor estándar de penetración y presión en una piedra chancada. Fuente: (MTC, 2016, p. 255).

**Figura 9**

*Equipos y materiales de CBR*



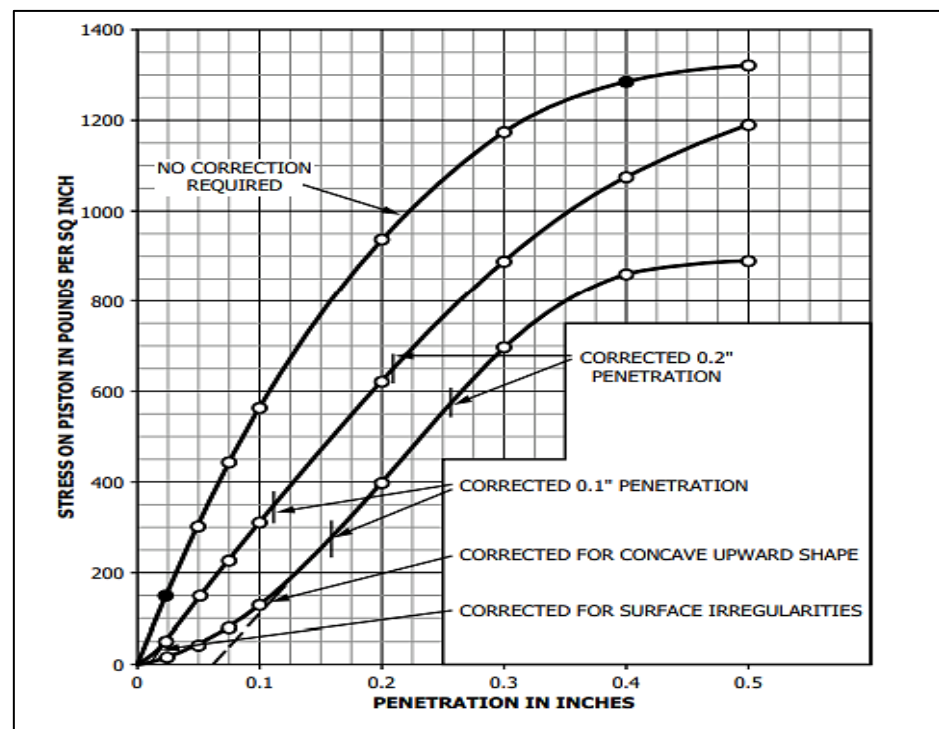
Nota: Molde, disco espaciador, sobrecargas y aparato medidor de expansión. Fuente: (MTC, 2016, p. 247).

“Si más del 75% del peso de la muestra atraviesa la malla de 3/4" (19.1 mm), se emplea el material que pasa a través de esta malla. Por otro lado, si la fracción de la muestra retenida en el tamiz 3/4" (19.1 mm) supera el 25% en peso, se sustituye por una proporción de material situada en los tamices de 3/4" y N°4” (ASTM D 1883-16, 2016, p. 5).

“La prueba consiste en fabricar tres especímenes con una humedad óptima y distinta cantidad de golpes por capa 12, 25 y 56, para luego sumergirlos en un tanque con sobrecargas que simulan el efecto de sobrecarga sobre la subrasante y tomando la primera lectura del hinchamiento, después de 4 días de estar sumergido se extrae los especímenes, para someterlo al ensayo” (MTC, 2016, pp. 251-252).

### Figura 10

*Curva para el cálculo de índice de CBR*



Nota: Ajuste por superficie irregular y concavidad. Fuente: (ASTM D 1883-16, 2016, p.8).





## 2.2.6. Estimación de la variación de humedad de la subrasante

Hedayati & Hossain (2015, p. 1), a través de la ejecución de un estudio de caso, desarrollaron un modelo basado en datos en tiempo real para calcular la variación de la humedad del subsuelo en función de la precipitación. Se seleccionó un área específica del pavimento en el norte de Texas, donde se instalaron sensores de humedad y pluviómetros a diferentes profundidades del suelo con el fin de recopilar datos a cada hora durante un periodo de 2 años. Los datos registrados se analizaron para desarrollar un modelo estadístico capaz de estimar la variación de la humedad en tiempo real.

$$\theta = 0.1699 + 0.053e^{-0.639z} \sin(0.0172(t + 70)) + 0.00058P$$

Donde:

$\theta$  = contenido volumétrico de agua ( $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ )

$z$  = profundidad (m).

$t$  = El tiempo desde un punto de vista arbitrario (días).

$P$  = Precipitaciones definidas en series temporales (mm).

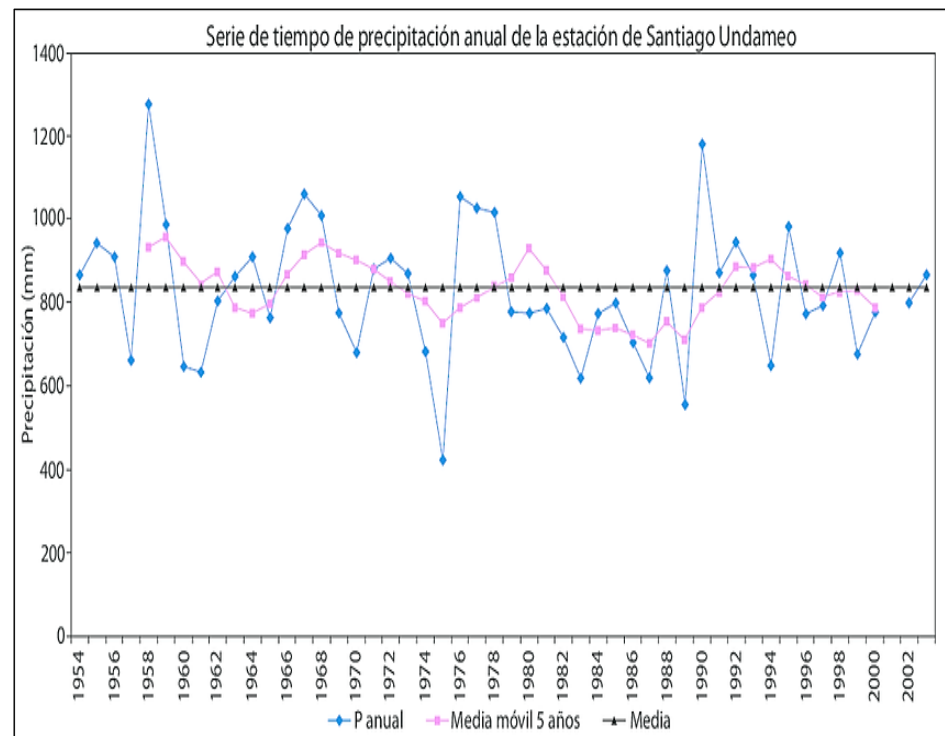
### 2.2.6.1. Precipitación máxima diaria

El registro total de la cantidad de lluvia en un periodo de 24 horas se efectúa en el programa de observación de prácticamente todas las estaciones meteorológicas del país. Este registro comprende la precipitación ocurrida entre las 07:00 horas de un día determinado y las 07:00 horas del día siguiente, periodo conocido como "Día pluviométrico". A partir de las mediciones diarias de precipitación, se determinan las máximas mensuales y, a partir de las series históricas de estas máximas, se identifican las máximas absolutas para cada ubicación de medición. Con

estos datos, se elaboran los mapas mensuales y anuales de las lluvias máximas en 24 horas, los cuales ofrecen una representación espacial de los eventos extremos.

**Figura 11**

*Serie de tiempo de precipitación anual*



Nota: Serie precipitación anual de la Estación de Santiago Undameo. Fuente: (Allende & Mendoza, 2007, p. 69)

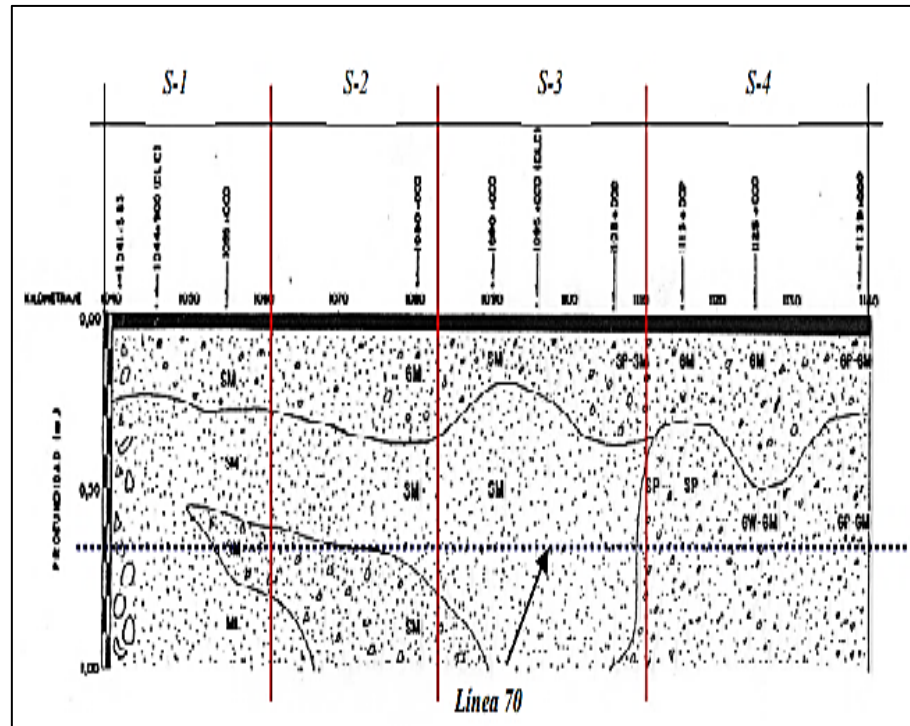
### 2.2.6.2. profundidad de análisis

Gutiérrez (2007) “recomienda evaluar el (CBR) mediante el método línea 70, que implica trazar una línea a 70 cm de altura desde la cota rasante o el nivel del terreno que sostendrá la estructura del pavimento, considerando como representativos aquellos suelos que por debajo de ella tengan 25 cm de espesor como mínimo. Asimismo, basándose en los principios de la distribución de esfuerzos en el suelo, se puede hacer una estimación inicial del bulbo de presiones, observando que

a 0.70 m de profundidad permanece el 80% de la carga equivalente. Esta Altura está libre de perturbaciones debido a movimientos en el terreno, manteniendo su capacidad de respuesta a la carga aplicada” (pp. 54-55).

**Figura 12**

*Determinación de la línea 70*



Nota: Configuración propuesta para la delimitación de sectores que permita una evaluación particularizada de la carretera. Fuente: (Gutiérrez, 2007, p. 55).

### 2.2.6.3. Grado de saturación

“La relación entre la humedad volumétrica presente en el suelo y la humedad volumétrica que corresponde a su estado de saturación se conoce como grado de saturación” (Espinoza et al., 2015, p. 78).



$$S_r = \frac{G_s \gamma_w}{G_s \gamma_w - \gamma_d} \theta$$

Donde:

$S_r$  = Grado de saturación (%)

$G_s$  = Gravedad específica de los sólidos

$\gamma_w$  = Peso específico del agua (g/cm<sup>3</sup>)

$\gamma_d$  = peso unitario seco del suelo (g/cm<sup>3</sup>)

$\theta$  = contenido volumétrico de agua (cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>)

### 2.2.7. RAMCODES para subrasante

Sánchez et al. (2009) se basa en “los principios estadísticos tanto para la ejecución y análisis de experimentos en el diseño como para el control de calidad, asegurando un manejo preciso de los niveles de error. Asimismo, esta metodología encuentra su fundamento en los principios de la mecánica de suelos no saturados, los cuales describen las variables más relevantes para obtener respuestas relacionadas con la densificación y resistencia del material” (p.3).

“Los experimentos factoriales suponen una innovación en los enfoques de diseño, persiguiendo la optimización y la utilización eficiente de materiales para la obtención de productos más confiables a un costo reducido” (Sánchez et al., 2009, p.4).

#### 2.2.7.1. Clasificación cuantitativa de subrasante

“Este enfoque se orienta a dar un valor único las propiedades índices del suelo que tienen un mayor impacto en su comportamiento, tales como la proporción granulométrica y la superficie específica de la fracción fina” (Sánchez et al., 2002, p.3).

Sánchez et al. (2002) define “el factor característico, denotado como  $F_p$ , como el resultado de la multiplicación de la proporción entre las partículas finas y gruesas y el LL, el cual proporciona una medida de la superficie específica de las partículas finas” (p.4).

La ecuación matemática propuesta es la siguiente:

$$F_p = (1 + W_L) * \frac{F}{1 + G}$$

Donde:

$W_L$  : Límite líquido.

F : Porción que pasa el tamiz # 200

G : Fracción retenida en el tamiz # 4

**Tabla 11**

*F<sub>p</sub> Relacionado con la clasificación descriptiva*

<b>Tipo</b>	<b>Rangos de F<sub>p</sub></b>	<b>Clasificación</b>
RS1	0.0-0.2	“Gravas limosas y arcillosas”
RS2	0.2-0.5	“Arenas limosas y arcillosas con grava”
RS3	0.5-0.7	“Arenas limosas y arcillosas”
RS4	0.7-1.4	“Arcillas ligeras limosas y arenosas”
RS5	>1.4	“Arcillas francas”
RS1*	0.0-0.2	“Arenas limpias”
RS2*	0.0-0.2	“Arenas sin grava”

Fuente: (Sánchez et al., 2002, p.4).

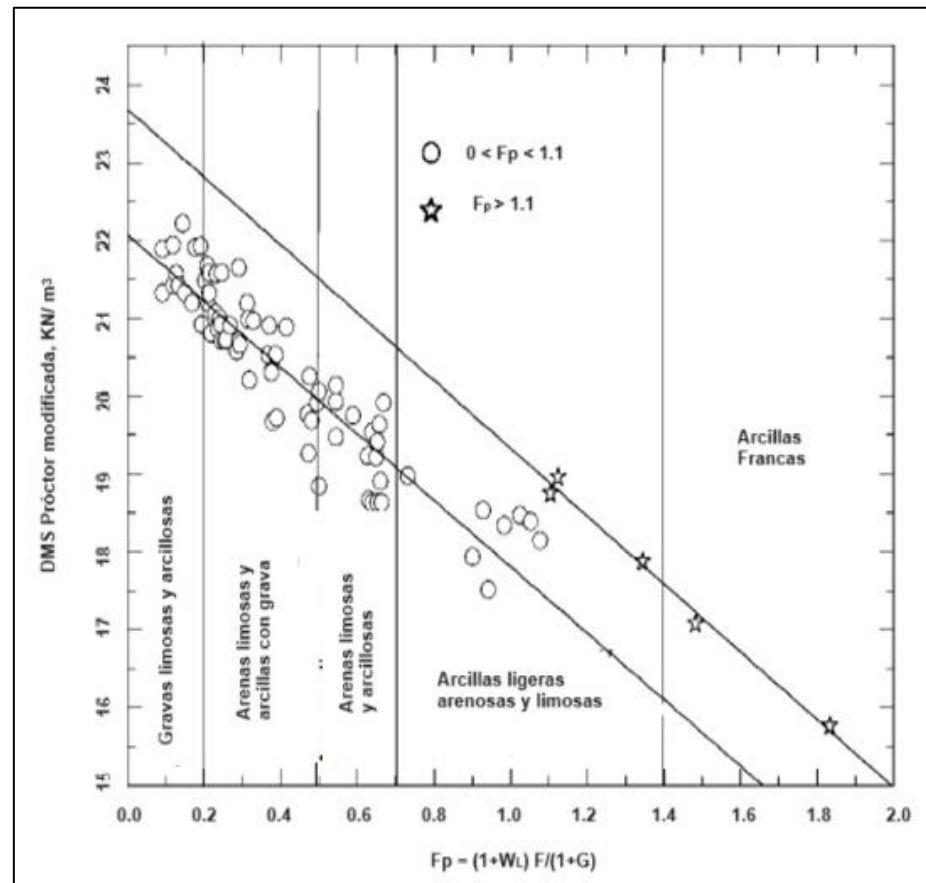
### 2.2.7.2. Potencial de densificación de subrasante

Los parámetros para evaluar el potencial de densificación son la máxima densidad seca (MDS), la humedad óptima (CHO) y la forma de la curva que representa esta relación, conocida como curva de compactación.

“A través del factor característico  $F_p$ , estableció correlaciones lineales directas con los indicadores mencionados, para un conjunto de 84 muestras provenientes de la región Mesa de Guanipa en venezolana” (Sánchez et al., 2002, p.6).

**Figura 13**

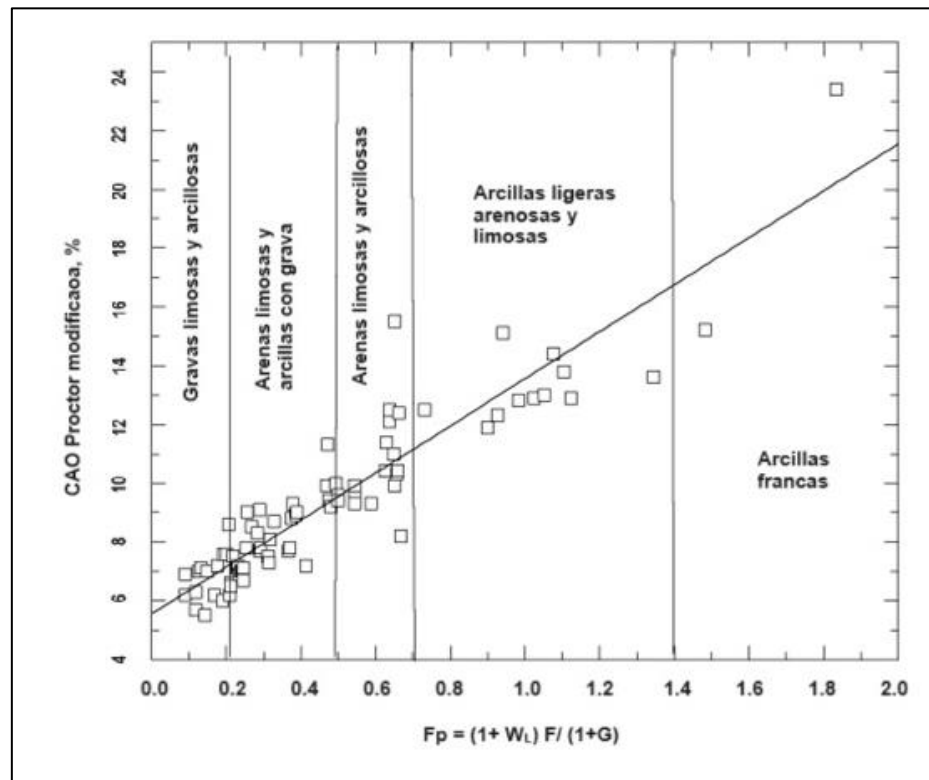
*Variación de la MDS del proctor modificado vs  $F_p$*



Nota: Los intervalos  $F_p$  coinciden con la Tabla 11. Fuente: (Sánchez et al., 2002, p.6).

**Figura 14**

*Variación del CAO del Proctor vs Fp*



Nota: Los intervalos Fp coinciden con la Tabla 11. Fuente: (Sánchez et al., 2002, p.7).

Se tienen<sup>3</sup>la ecuación que relaciona DMS y Fp:

$$MDS = A + B \cdot Fp$$

**Tabla 12**

*Datos estadísticos de correlación para Fp vs MDS*

Rangos para Fp	0.0-1.1	>1.1
A	22.07	23.68
B	-4.26	-4.35
n	79	5
r <sup>2</sup>	0.869	0.988
SD	0.43	0.16

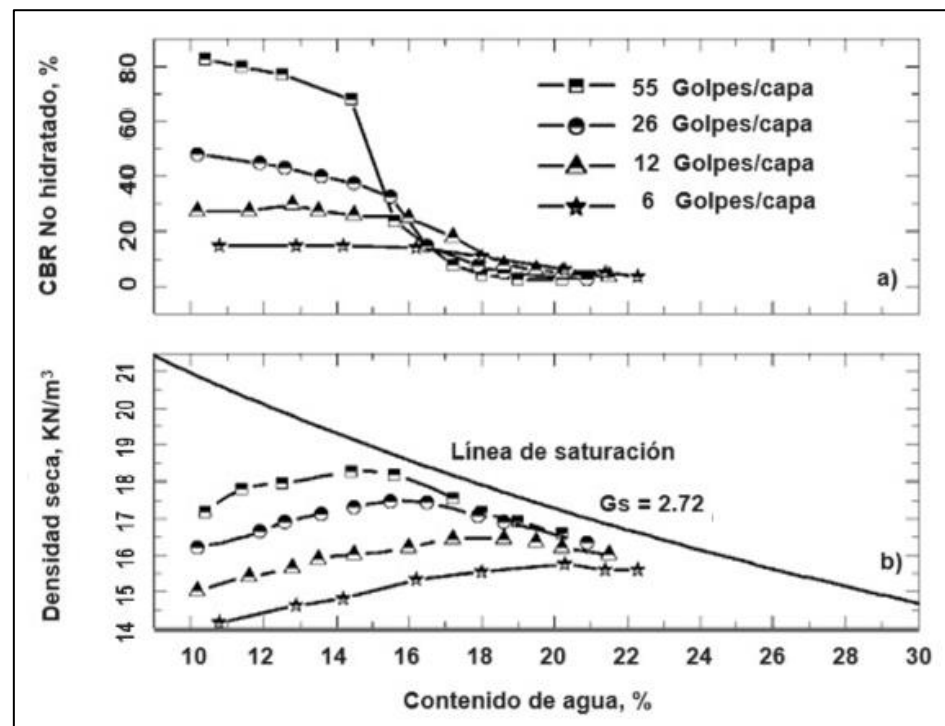
Fuente: (Sánchez et al., 2002, p. 7).

### 2.2.7.3. Relación entre humedad, densidad y resistencia de subrasante

Según el ASTM D 1883-99 (1999) indica que para la “relación de carga para un rango de contenido agua, se prepara las muestras de manera análoga a lo explicado para el CBR convencional, con la particularidad de que cada muestra destinada a construir la curva de compactación debe ser penetrada. Asimismo, es imperativo desarrollar la relación entre el contenido de agua y el peso unitario para las compactaciones realizadas con 25 y 10 golpes por capa, y es necesario penetrar cada muestra de prueba compactada. Además, se requiere llevar a cabo todo el procedimiento de compactación utilizando el molde CBR seleccionado” (p.4).

**Figura 15**

*Contenido de agua de elaboración vs. densidad seca y CBR*

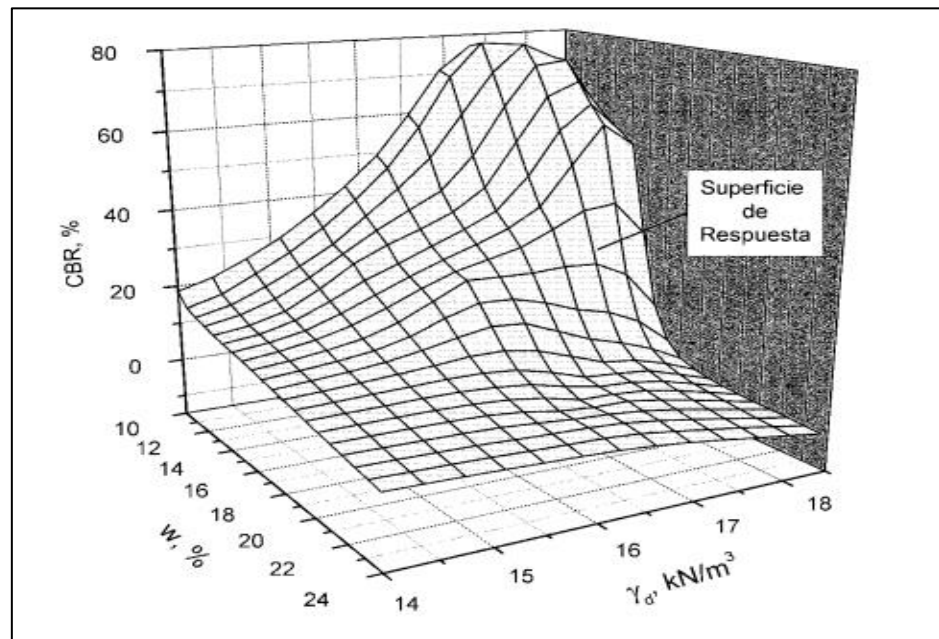


Nota: Comportamiento “arcilla-Vicksburg”. Fuente: (Sánchez et al., 2002, p.10).



**Figura 16**

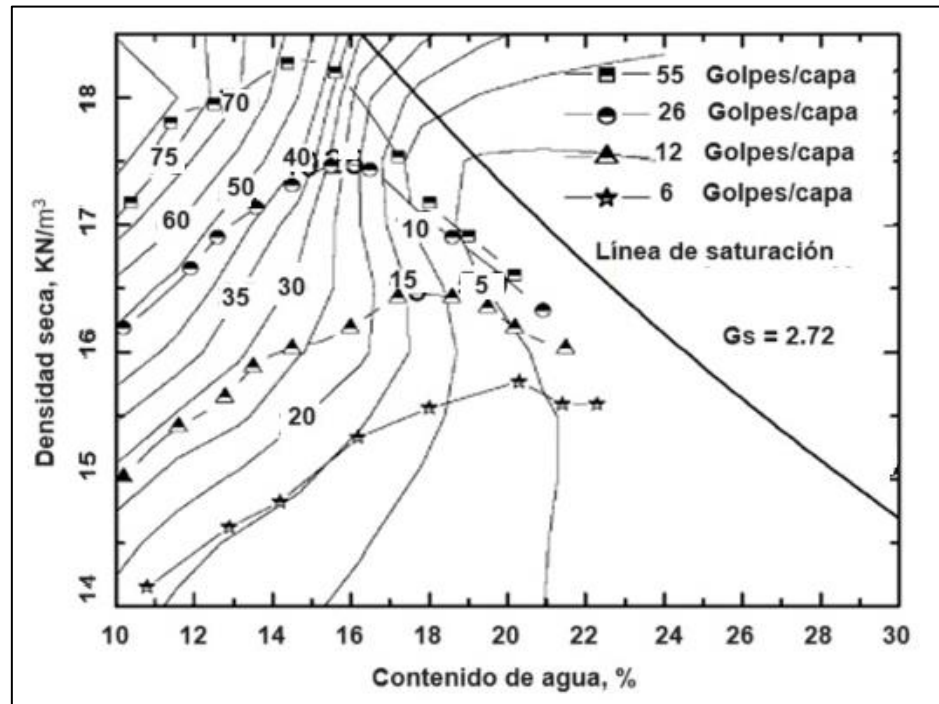
*Superficie de respuesta*



Nota: Superficie de respuesta de Arcilla de Vicksburg. Fuente: (Sánchez et al., 2002, p.11).

**Figura 17**

*Mapa de resistencias*



Nota: Mapa de resistencia de la arcilla de Vicksburg. Fuente: (Sánchez et al., 2002, p.12).

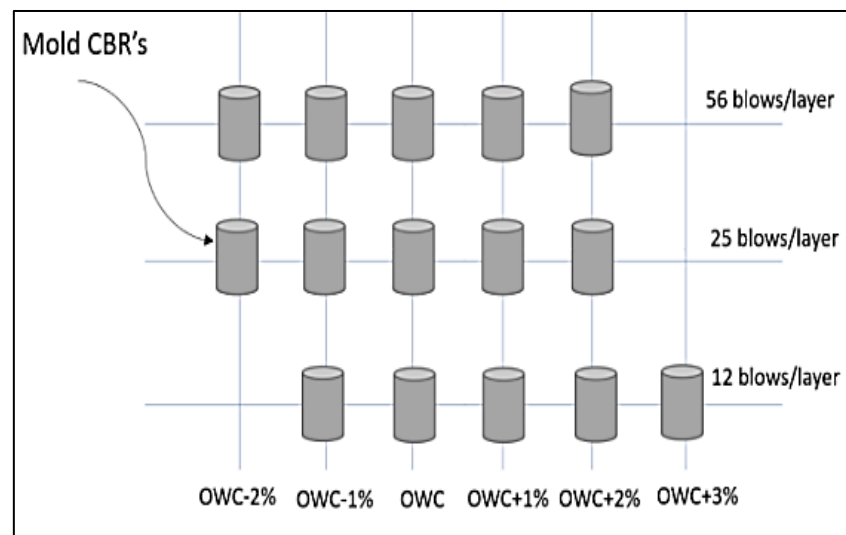
Sánchez et al. (2002) “propuso la concepción de los mapas de resistencia, los cuales se caracterizan por representar, a través de gráficos de contorno, la superficie de respuesta que describe la resistencia del suelo cuando es compactado, abarcando un amplio rango de contenidos de agua y densidades secas, tal como se trata en un experimento factorial” (p. 9).

### A. Diseño y elaboración del experimento factorial

Sánchez Leal (2009) “afirma que la realización de un experimento factorial en suelos es justificable únicamente cuando estos poseen una superficie específica de finos considerable. En consecuencia, no es adecuado aplicar experimentos factoriales en (SP, SW, GP, GW) ni en sus combinaciones” (p. 81).

### Figura 18

*Distribución referencial del rango de humedad y golpes por capa*



Nota: Distribución de humedad y cantidad de golpes (12,25,56 golpes) para un experimento factorial de 15 especímenes. Fuente: (Inga & Gutiérrez, 2022, p. 4).

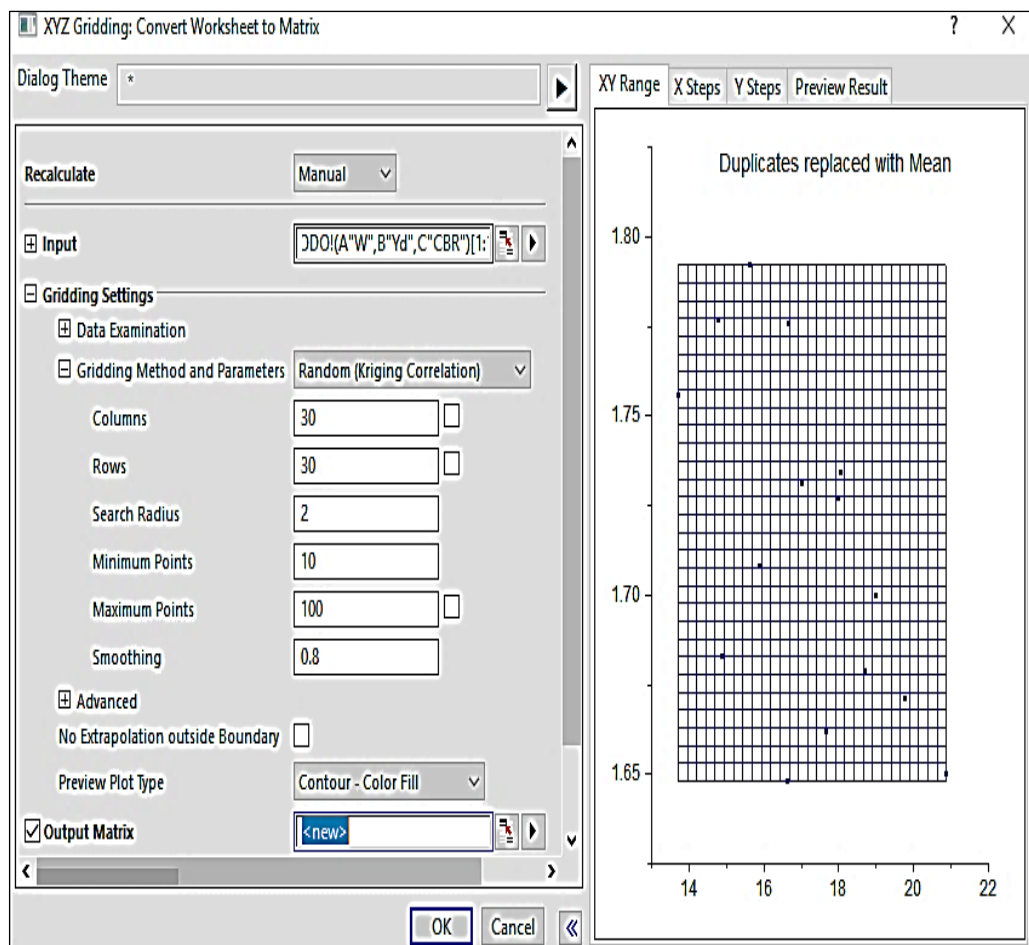
## B. Procedimiento de obtención de las curvas de diseño

Los datos de los ensayos factoriales CBR, se procesaron en el programa estadístico OriginPro 2023b. Los pasos para obtener las curvas de diseño RAMCODES se desarrollan a continuación:

- Los datos provenientes de los ensayos factoriales CBR se introdujeron en una hoja de trabajo del programa OriginPro 2023b.
- A partir de los datos ingresados, se generó una representación matricial usando una técnica de cuadrícula kriging.

**Figura 19**

*Cuadrícula kriging con correlación aleatoria*





Nota: Configuración de columnas, filas, alcance de búsqueda, valores extremos y procedimientos de suavizado.

- c) A partir de la estructura matricial de datos, se crearon superficies tridimensionales (superficies de respuestas) y mapas de contornos (mapas de resistencias) utilizando la función "plot".
- d) Se habilitan nuevas hojas de cálculo con el propósito de ingresar diferentes valores de contenido de agua, con el fin de derivar las curvas de saturación empleando la siguiente ecuación:

$$\gamma_d = \frac{\gamma_w}{\frac{1}{G_s} + \frac{w}{S_r}}$$

Donde:

$\gamma_d$  : Peso unitario seco (g/cm<sup>3</sup>)

$\gamma_w$  : Densidad específica del agua (g/cm<sup>3</sup>)

$w$  : Humedad (%)

$G_s$  : Gravedad específica

$S_r$  : Grado de saturación (%)

- e) Se añadieron al mapa de contornos las curvas de saturación obtenidas.
- f) En una hoja de Excel, se anotaron las coordenadas donde las curvas de saturación interceptan a los mapas de contorno (mapas de resistencia).
- g) Utilizando los datos consignados en el software cálculo Excel, se elaboraron las curvas de diseño RAMCODES.



## 2.2.8. Diseño de pavimentos (AASHTO-93)

“Esta metodología se basa en proporcionar una estimación del número de ejes equivalentes estándar de 80 kN que el pavimento puede soportar antes de alcanzar un valor definido de deterioro en su nivel de servicio. Esta estimación permite evaluar la duración proyectada del pavimento” (AASHTO,1993).

### 2.2.8.1. Procedimiento de diseño AASHTO 93

Minaya & Ordóñez (2006, p. 106), el número estructural SN es utilizado en el método AASHTO 1993 como una herramienta para cuantificar la resistencia estructural requerida por el pavimento, tomando en consideración aspectos como la resistencia del suelo, el volumen de tráfico anticipado y la pérdida de funcionalidad.

En consecuencia, se establece ecuación siguiente:

$$\log(W_{18}) = Z_R * s_O + 9.36 * \log(SN + 1) - 0.20 + \frac{\log \left[ \frac{\Delta PSI}{4.2 - 1.5} \right]}{0.4 + \frac{1094}{(SN + 1)^{5.19}}} + 2.32 * \log(M_R) - 8.07$$

Donde:

$SN$  : Número estructural necesario por la sección de la vía

$W_{18}$  : Número de ejes equivalentes de 80 kN, durante el diseño

$Z_R$  : Desviación estándar normal, en función de la confiabilidad

$s_O$  : Error estándar resultante del impacto del tráfico

$\Delta PSI$  : Variación del índice de serviciabilidad

$M_R$  : Módulo resiliente de la subrasante (psi)

La determinación de los espesores de la carpeta asfáltica, base y sub base, se realiza mediante el número estructural SN. La ecuación de diseño es el siguiente:

$$SN = a_1 * D_1 + a_2 * D_2 * m_2 + a_3 * D_3 * m_3$$

Donde:

$a_1, a_2, a_3$  : coeficientes estructurales correspondientes a la capa de rodadura, base y subbase. (1/pulg)

$D_1, D_2, D_3$  : espesores de capa de rodadura, base y subbase. (pulg)

$m_2, m_3$  : factores de drenaje específicos de la capa de base y subbase. (adimensional)

### 2.2.8.2. Parámetros de diseño AASHTO 93

#### A. Período de Diseño

“Es el intervalo de tiempo desde que el pavimento comienza a ser utilizado hasta el momento previo a que sea necesario llevar a cabo algún tipo de trabajo de rehabilitación” (Minaya & Ordóñez, 2006, p. 8).

**Tabla 13**

*Periodos estándar de diseño*

Condición de las vías	Intervalo de estudio (años)
Vías urbanas con tráfico alto	30-50
Vías rurales con tráfico alto	20-50
Pavimentos con tráfico bajo	15-25
Superficie granular con tráfico bajo	10-20

Nota: Periodo de análisis (años). Fuente: (Minaya & Ordóñez, 2006, p. 8).

## B. Tránsito

“En la etapa de diseño, se evalúa el número de ejes equivalentes (ESAL) para el intervalo de análisis en el carril correspondiente. Esto se obtiene mediante recuentos de tráfico vehicular y su conversión a ejes equivalentes” (Minaya & Ordóñez, 2006, p. 108).

Se tiene la siguiente ecuación:

$$W_{18} = D_D \cdot D_L \cdot \hat{w}_{18}$$

Donde:

$D_D$  : Factor de distribución direccional

$D_L$  : Factor de distribución por carril

$\hat{w}_{18}$  : Flujo vehicular total en ambos sentidos

**Tabla 14**

*Factor de distribución por carril  $D_L$*

N° carriles en una dirección	% ESAL en carril diseño
1	100
2	80-100
3	60-80
4	50-75

Nota: El % de ESAL para N° de carriles. Fuente: (Minaya & Ordóñez, 2006, p. 108).

## C. Factor de confiabilidad, R.

Involucra un margen de seguridad durante el diseño para garantizar que los parámetros sean aptos para el tiempo de análisis.

**Tabla 15***Niveles sugeridos de confiabilidad, R*

Tipo de vía	Confiabilidad recomendada	
	Zona urbana	Zona rural
Rutas interestatales	85-99.9	80-99.9
Arterias principales	80-99	75-99
Colectoras	80-95	75-95
Locales	50-80	50-80

Nota: Fiabilidad por tipo de vía. Fuente: (Minaya &amp; Ordóñez, 2006, p.111).

**D. Desviación Estándar Normal ( $Z_R$ )**

La confiabilidad del proyecto guarda una relación directa con la desviación estándar normal. Se tiene la siguiente tabla:

**Tabla 16***Desviación estándar,  $Z_R$* 

Confiabilidad	$Z_R$
50%	0.000
60%	- 0.253
70%	- 0.524
75%	-0.674
80%	-0.841
85%	-1.037
90%	-1.282
91%	-1.340
92%	-1.405
93%	-1.476
94%	-1.555
95%	-1.645
96%	-1.751
97%	-1.881
98%	-2.054
99%	-2.327



Confiabilidad	$Z_R$
99.9%	-3.090
99.99%	-3.750

Nota: Valores de  $Z_R$  para distintos grados de confiabilidad., R. Fuente: (Minaya & Ordóñez, 2006, p. 112).

### E. Pérdida de Serviciabilidad

Minaya & Ordóñez (2006) se utiliza el “Índice de Serviciabilidad Presente (PSI) para evaluar la calidad de servicio proporcionada por el pavimento, este índice fluctúa en una escala que va desde 0 (reflejando carreteras prácticamente intransitables) hasta 5 (indicando un estado óptimo de la carretera). La obtención del PSI implica la medición de la rugosidad y la evaluación de daños, como agrietamiento, parcheo y deformación permanente, a lo largo del periodo de servicio” (p. 12).

Según la guía AASHTO (1993), se utiliza la ecuación correspondiente:

$$\Delta psi = p_0 - p_t$$

Donde:

$p_0$  : Índice de serviciabilidad inicial

$p_t$  :Índice de serviciabilidad final, antes de comenzar trabajos

de rehabilitación en el pavimento

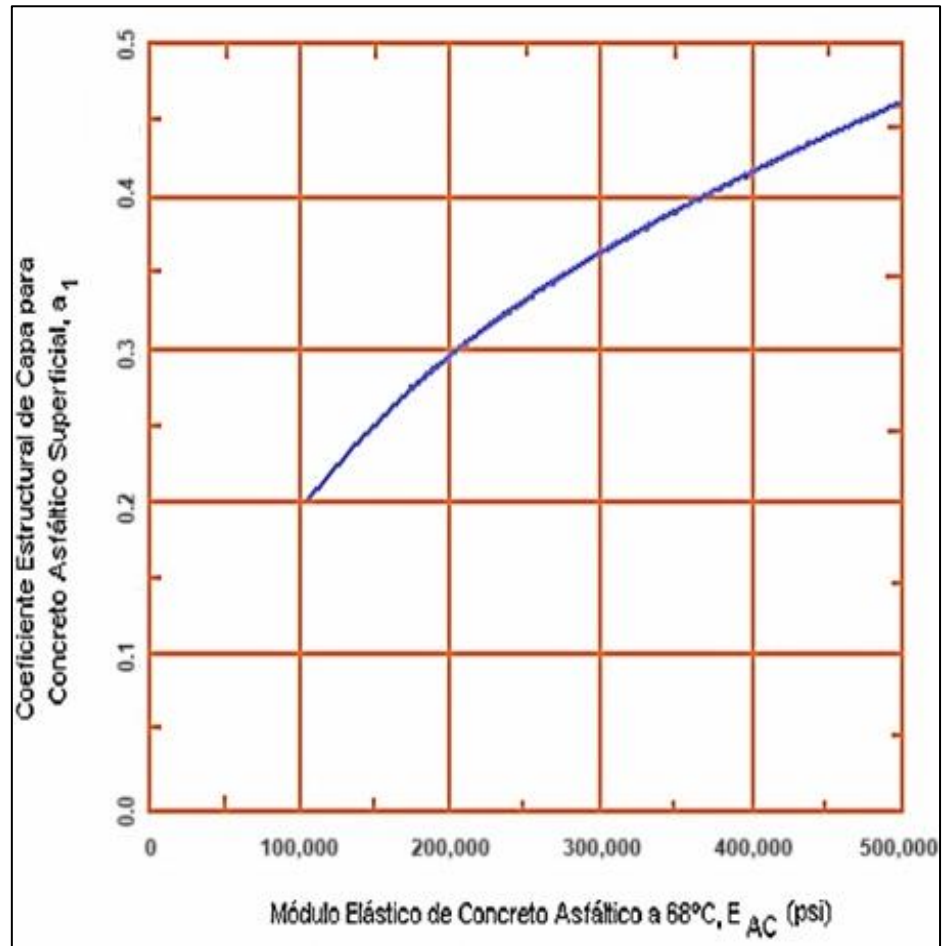
### F. Coeficiente de capa ai

“Se establece una relación empírica entre el número estructural, SN, y el espesor de la capa mediante el coeficiente de capa” (Minaya & Ordóñez, 2006, p.113).

- **Concreto asfáltico:** se tiene la carta recomendada por AASHTO 93 y se muestra a continuación:

**Figura 20**

*Carta para estimar el coeficiente estructural de concreto asfáltico*

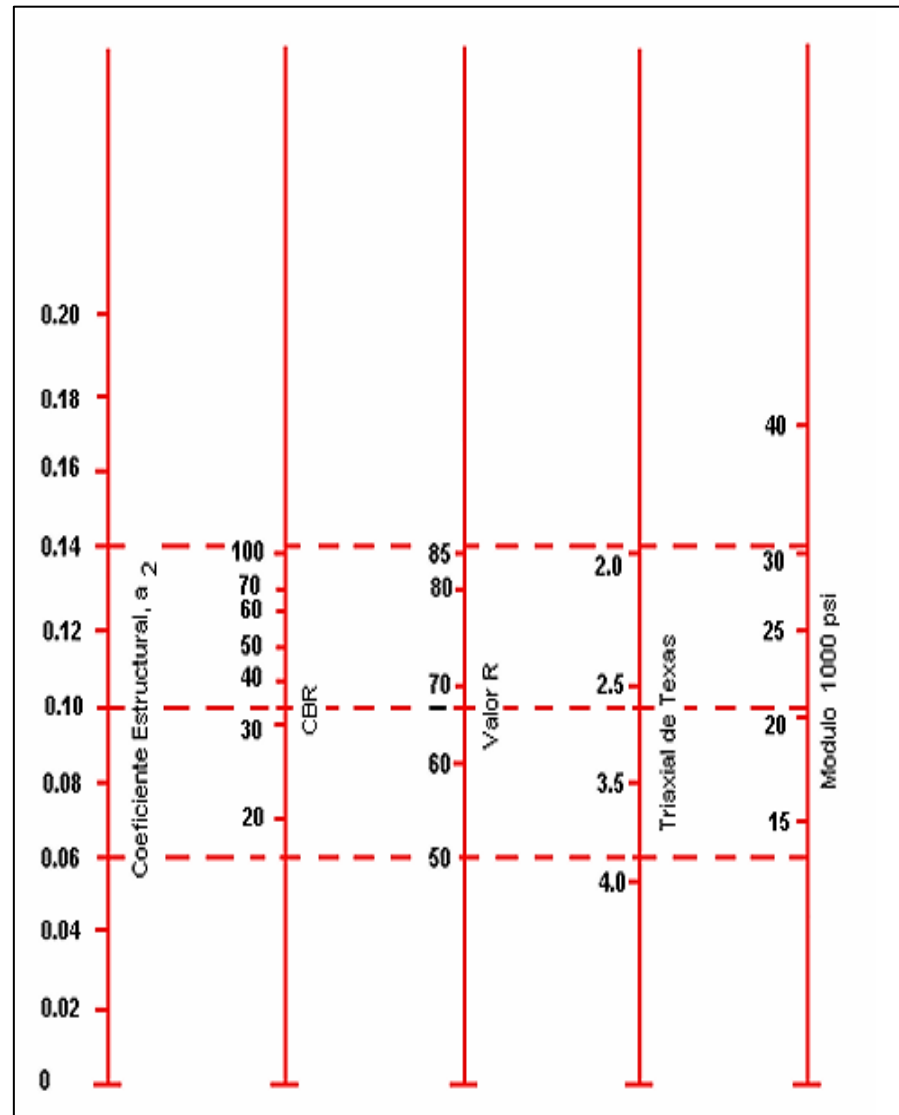


Fuente: (Minaya & Ordóñez, 2006, p. 114).

- **Base:** se tiene las siguientes cartas sugeridas por AASHTO 93:

**Figura 21**

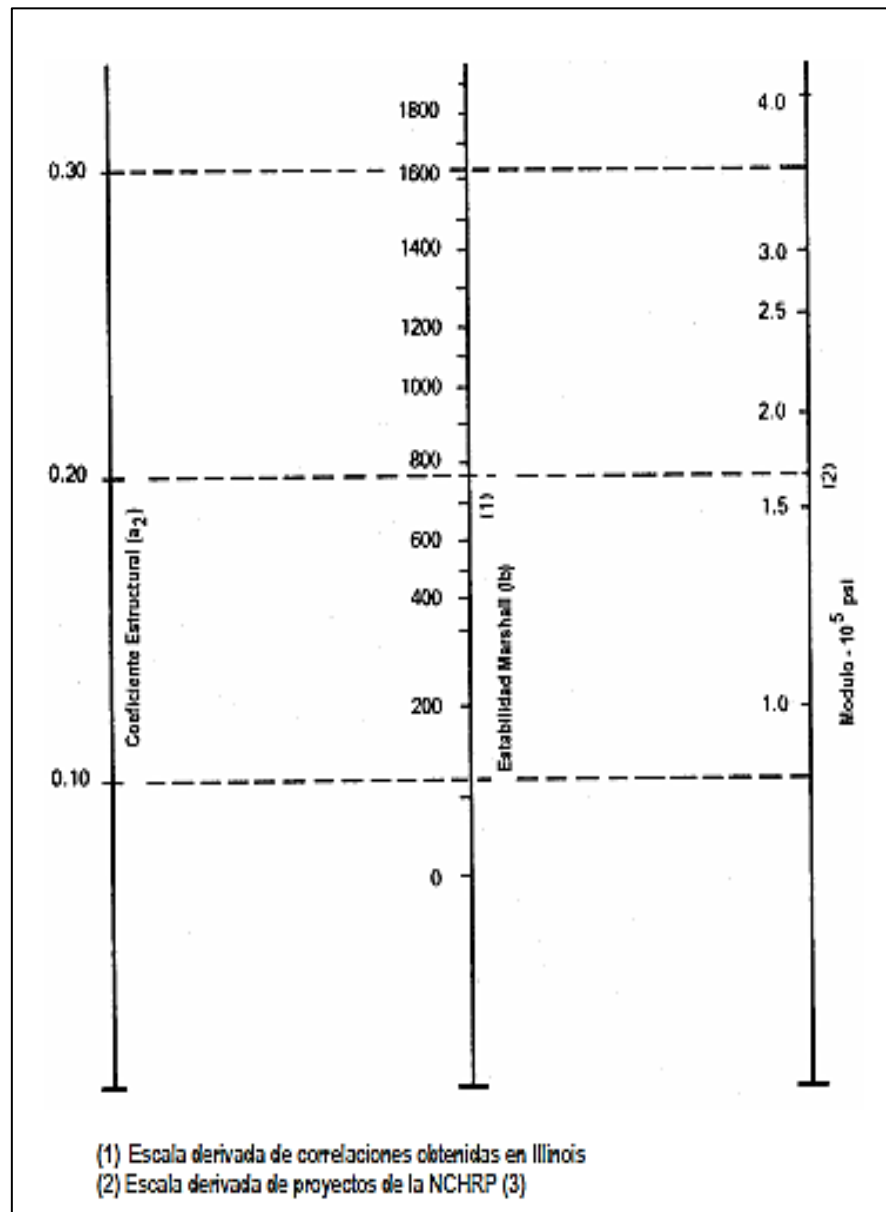
*Rangos de coeficiente estructural de la capa de base granular ( $a_2$ )*



Fuente:(Minaya & Ordóñez, 2006, p. 115).

**Figura 22**

*Rangos de coeficiente estructural de base estabilizada con asfalto ( $a_2$ )*

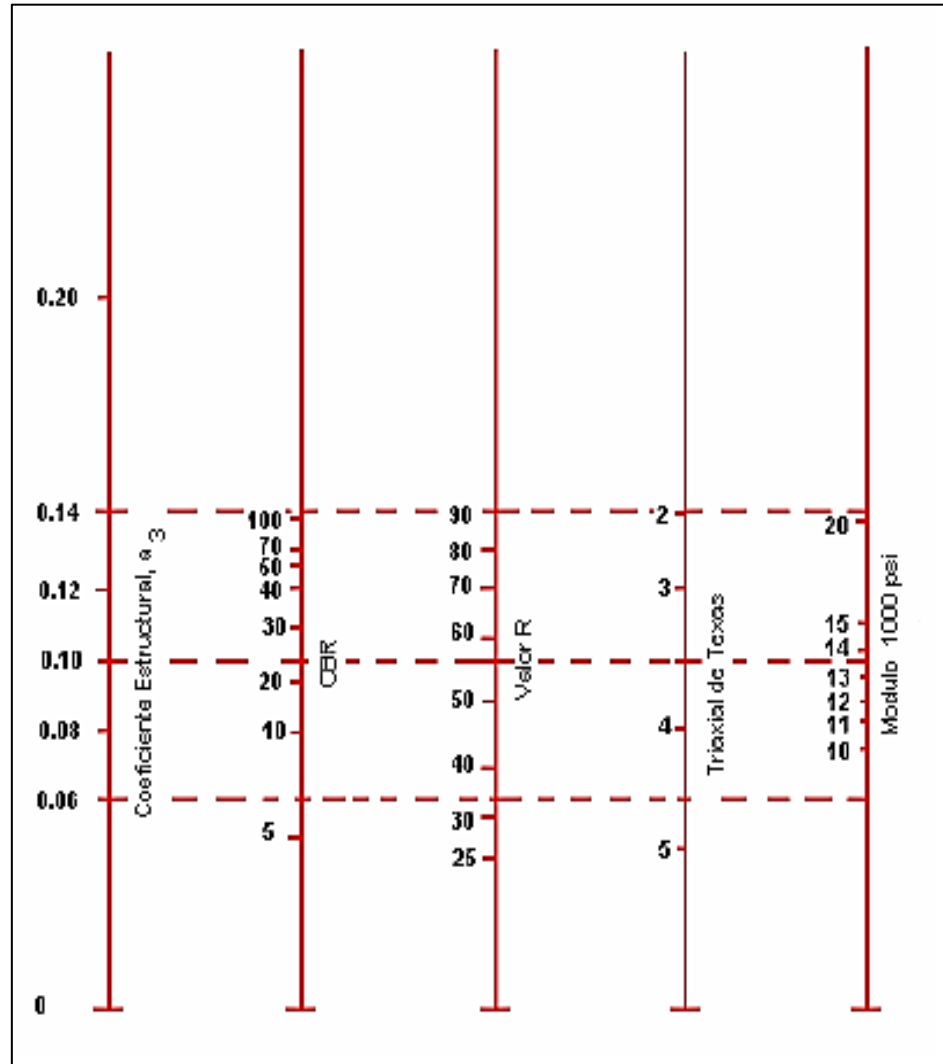


Fuente:(Minaya & Ordóñez, 2006, p. 116).

- **Sub base granular:** se tiene la siguiente carta sugerida:

**Figura 23**

*Rangos de coeficiente de capa de subbase granular ( $a_3$ )*



Fuente: (Minaya & Ordóñez, 2006, p. 118).

## G. Coeficientes de drenaje

Incorporar la “eficiencia de drenaje en el diseño conlleva a adaptaciones en los coeficientes de capa, el parámetro "mi" es el responsable de estas adaptaciones en los coeficientes de capa. No se toma en cuenta el eventual efecto del drenaje en el concreto asfáltico” (Minaya & Ordóñez, 2006, p. 119).

**Tabla 17**

*Condiciones de drenaje*

Calidad de Drenaje	Eliminación de agua dentro de:
Excelente	2 horas
Bien	1 día
Justo	1 semana
Pobre	1 mes
Muy pobre	El agua no drena

Nota: Se exponen los niveles de drenaje. Fuente:(Minaya & Ordóñez, 2006, p. 113).

**Tabla 18**

*Coeficientes de drenaje, mi*

Calidad del drenaje	Porcentaje de tiempo de la estructura de pavimento expuesto a humedad a niveles de saturación			
	Menos del 1%	1-5%	5-25%	Mayor a 25%
Excelente	1.40-1.35	1.35-1.30	1.30-1.20	1.20
Bueno	1.35-1.25	1.25-1.15	1.15-1.00	1.00
Justo	1.25-1.15	1.15-1.05	1.00-0.80	0.80
Pobre	1.15-1.05	1.05-0.80	0.80-0.60	0.60
Muy pobre	1.05-0.95	0.95-0.75	0.75-0.40	0.40

Fuente:(Minaya & Ordóñez, 2006, p. 119).

## 2.2.9. Diseño de pavimento empírico-mecanístico

Minaya & Ordóñez (2006) afirma que está “Fundamentada en la mecánica estructural para analizar el desempeño de los distintos componentes del pavimento ante las cargas inducidas por el tráfico. Este proceso implica analizar esfuerzos, deformaciones” (p. 124).

### 2.2.9.1. Formas de daño estructural del pavimento

- a) Deformación horizontal en la capa asfáltica es producida por las cargas longitudinales. La ecuación que describe el daño causado por agrietamiento por fatiga se presenta de la siguiente forma:

$$N_f = f_1 \cdot \varepsilon_t^{-f_2} \cdot E^{-f_3}$$

Donde:

$N_f$  = Repeticiones de carga para la falla por tracción

$\varepsilon_t$  = Deformación horizontal de tracción en la capa

$E$  = Módulo elástico de la carpeta asfáltica ( $\text{kg/cm}^2$ )

$f_1, f_2, f_3$  = Constantes obtenidas en pruebas experimentales

- b) Deformación vertical en la subrasante es producida por las cargas verticales y cuando supera los límites permisibles se produce el fenómeno de ahuellamiento.

La forma de daño se expresa como:

$$N_d = f_4 \cdot \varepsilon_z^{-f_5}$$

Donde:

$N_d$  = Cantidad de repeticiones de carga admisible por deformación vertical elástica

$\varepsilon_z$  = Deformación vertical elástica

$f_4, f_5$  = Constantes obtenidas en pruebas experimentales.

**Tabla 19**

*Constantes obtenidas en pruebas experimentales*

Criterios de Diseño	$f_1$	$f_2$	$f_3$	$f_4$	$f_5$
Instituto del asfalto	0.0796	3.291	0.854	$1.365 \times 10^{-9}$	4.477
Shell	0.0685	5.671	2.363	$1.13 \times 10^{-6}$	3.571

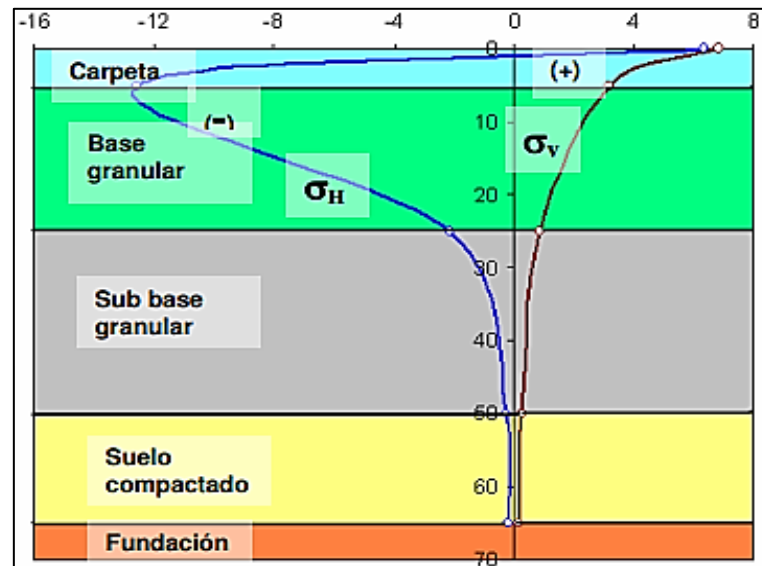
Nota: Constantes empíricos de regresión para ambos criterios de diseño.

### 2.2.9.2. Análisis deformacional de la estructura del pavimento

Su finalidad primordial es gestionar la distribución de las cargas de y no sobrepasen los valores permitidos.

**Figura 24**

*Distribución de las cargas de tránsito*



Nota: Distribución de esfuerzos por tracción y compresión. Fuente: (Minaya & Ordóñez, 2006, p. 137).





## CAPÍTULO III

### MATERIALES Y MÉTODOS

#### 3.1. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

##### 3.1.1. Tipo de investigación

“Es aplica, por utilizar los conocimientos generados en la investigación básica en ciencias fácticas o formales para identificar problemas concretos y proponer hipótesis orientadas a resolver las necesidades de la sociedad en su ámbito productivo” (Ñaupas et al., 2014, p. 93).

Este estudio sigue un “enfoque cuantitativo, fundamentado en la recopilación de datos con el propósito de validar hipótesis, apoyado en técnicas de medición numérica y procedimientos estadísticos para para elaborar modelos de comportamiento y validar las teorías planteadas” (Hernández et al., 2010, p. 4).

##### 3.1.2. Nivel de investigación

“Es correlacional porque permite evaluar el grado de relación entre 2 conceptos, categorías o variables dentro de un contexto determinado” (Hernández et al., 2010, p. 81).

En este estudio se calcula el módulo resiliente a través de la aplicación de las curvas de diseño RAMCODES y ensayos CBR convencionales, para posteriormente analizar y comparar cómo este valor afecta el diseño estructural de la carretera Calacota-Ilave.



### 3.1.3. Diseño de investigación

Se considera un “diseño no experimental, dado que se trata de estudios que no manipulan variables independientes, sino que se centran en la observación de fenómenos en su entorno natural y en su posterior evaluación” (Hernández et al., 2010, p. 149).

Las variables independientes como las curvas de diseño RAMCODES y CBR convencional que determinan el módulo resiliente no se manipulan, cada teoría se desarrolla tal como se dan para después analizarlas en el diseño estructural de pavimentos.

### 3.1.4. Población

Se trata de un conjunto de elementos que presentan similitudes inherentes, sobre los cuales las conclusiones obtenidas de la investigación se aplicarán de manera generalizada.

La población es la cantidad total de material de suelo, que se obtiene de la vía que une al centro poblado de Calacota con Santa Rosa, en el Distrito de Ilave, Provincia del Collao (Ruta 11). Esta vía tiene una longitud total de 5000 m (5 km), que comprende desde el kilómetro 4+750 hasta el kilómetro 9+750, donde convergen las rutas PU-1153, Emp. PU-1152 y PU-1160. Además, atraviesa el centro poblado de Camicachi y la IEI N° 310. A continuación, se presentan las coordenadas UTM del inicio y fin de la población:

**Tabla 20**

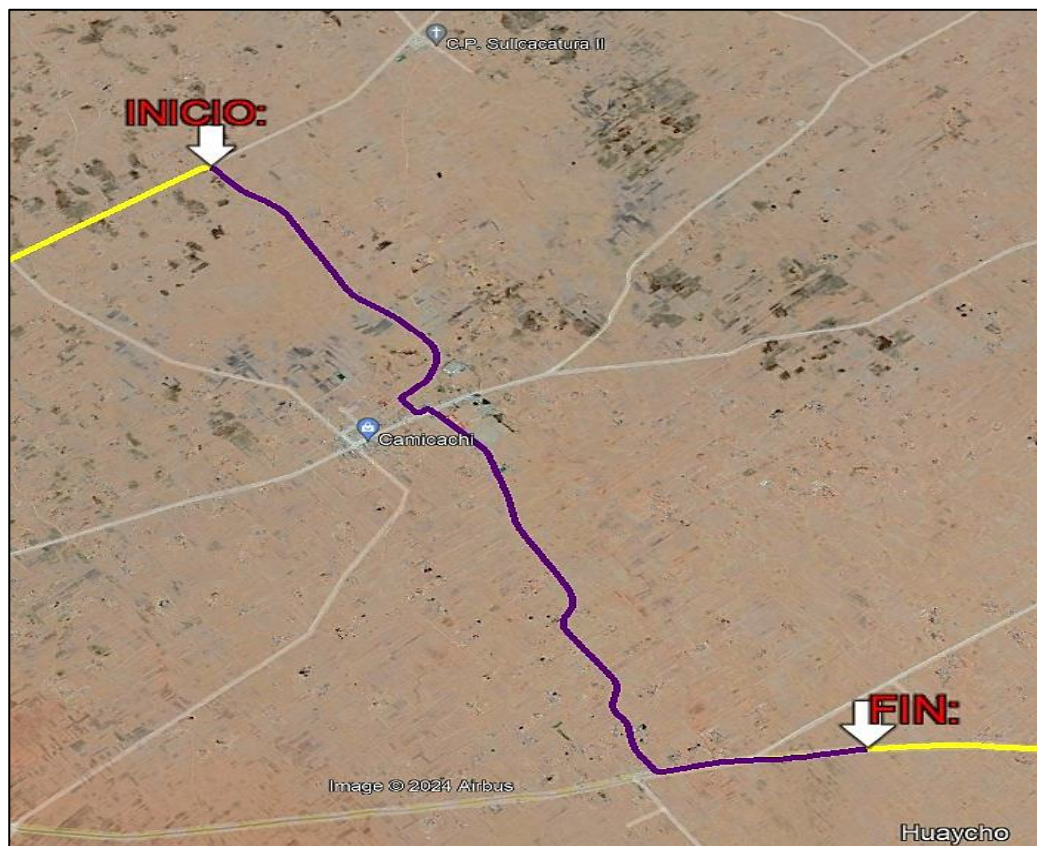
*Coordenadas UTM del inicio y final del tramo*

Ubicación			Coordenadas UTM		
Ruta	Punto	Progresiva (km)	Este (m)	Norte (m)	Zona
PU-1153	INICIO	4+750	438096.00	8228895.00	19 K
PU-1160	FIN	9+750	440851.00	8225814.00	

Nota: Ruta y coordenadas UTM del tramo.

**Figura 25**

*Ubicación del tramo, km: 4+750 al km: 9+750*



Nota: Se observa el inicio y fin del tramo. Fuente: Google Earth

El área estudiada se encuentra entre los kilómetros 4+750 y 9+750, cubriendo 5 km de longitud. La carretera tiene doble sentido, un carril por sentido, una calzada de 6.60 m de ancho y bermas de 0.90 m en ambos lados. No hay separador central y tiene una capa asfáltica de 2” de grosor, además de cunetas y obras de arte en áreas específicas a ambos márgenes.

### 3.1.5. Muestra

El proceso de muestreo se realiza según el criterio del investigador, así “la muestra se considera no probabilística cuando las técnicas empleadas no se basan en la probabilidad o el azar, lo que genera sesgos en las muestras y limita la certeza en la confiabilidad de los resultados” (Ñaupas et al., 2014, p. 253).

Para describir los suelos de subrasante del tramo que va del km 4+750 al km 9+750, se procederá a la excavación de calicatas con una frecuencia determinada por el número de tramos homogéneos, basándose en las mediciones del CBR.

La identificación de los tramos homogéneos se realizará mediante el método de diferencias acumuladas, conforme a las recomendaciones de AASHTO 93, descrito en los siguientes párrafos.

**Tabla 21**

*Identificación de puntos de análisis para pruebas de laboratorio.*

<b>Tramificación</b>	<b>Tramos homogéneos</b>	<b>N° calicatas para ensayos de laboratorio</b>	<b>Descripción</b>
Metodología de diferencias acumuladas, sugerida por AASHTO 93	03 tramos homogéneos	06 calicatas (02 por tramo homogéneo)	La ubicación de calicatas se realizará de forma alternada

Nota: Metodología utilizada para la caracterización de la muestra.

**Tabla 22**

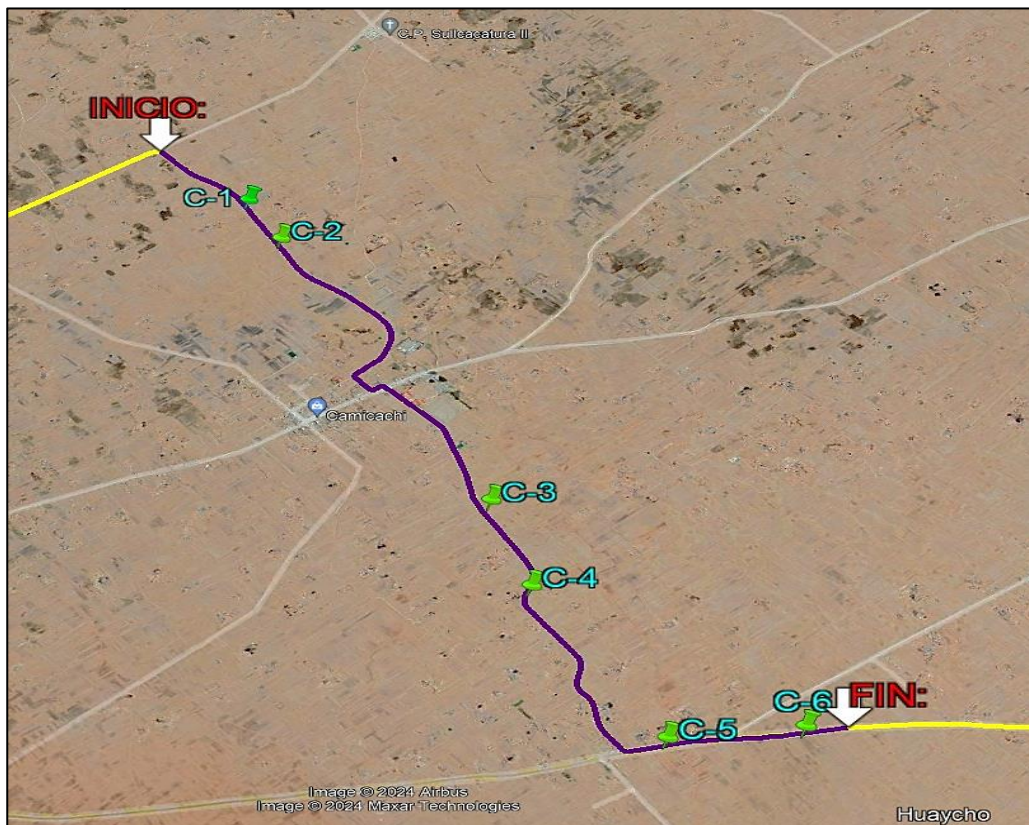
*Cantidad de puntos de análisis por tramo homogéneo*

Tramos homogéneos			N° de calicatas para ensayos de laboratorio			Coordenadas UTM		
Tramo	Prog. inicial	Prog. final	Calicata	Ubicación (km)	Lado	Este (m)	Norte (m)	Zona
1	4+750	6+250	C-1	5+000	Der.	438479	8228548	19 k
			C-2	5+250	Izq.	438630	8228314	
2	6+250	8+500	C-3	7+000	Der.	439536	8226856	
			C-4	7+500	Izq.	439701	8226417	
3	8+500	9+750	C-5	9+000	Der.	440201	8225700	
			C-6	9+500	Izq.	440687	8225784	

Nota: Ubicación y cantidad de calicatas por tramo homogéneo.

**Figura 26**

*Ubicación de los puntos de evaluación: C-1, C-2, C-3, C-4, C-5, C-6*



Nota: Ubicación de las calicatas: C-1, C-2, C-3, C-4, C-5, C-6. Fuente: Google Earth



### 3.1.5.1. Metodología de las diferencias acumuladas

“Para obtener datos de los suelos de la subrasante entre las progresivas km: 4+750 y km: 9+750, se llevarán a cabo perforaciones exploratorias (calicatas) con una frecuencia determinada por el número de tramos homogéneos, calculadas en base a las mediciones de respuesta de la subrasante (CBR) obtenidas en estudios previos contenidos en el expediente técnico. Se hace referencia a esta técnica como diferencias acumuladas” (AASHTO, 1993).

La técnica de diferencias acumuladas se basa en un análisis matemático que utiliza la variable  $Z_x$ , que mide la diferencia entre el área bajo la curva hasta una distancia "x" y el área cubierta por el promedio general del parámetro en esa misma distancia. Al representar gráficamente  $Z_x$  en relación con la distancia a lo largo de la sección examinada, es factible detectar segmentos homogéneos donde se nota un cambio de pendiente en la curva.

A continuación, se muestra la tramificación mediante la metodología de diferencias acumuladas a partir de datos de CBR, obtenidos del expediente técnico y procesando valores de cada columna conforme a la base teórica desarrollada.



**Tabla 23**

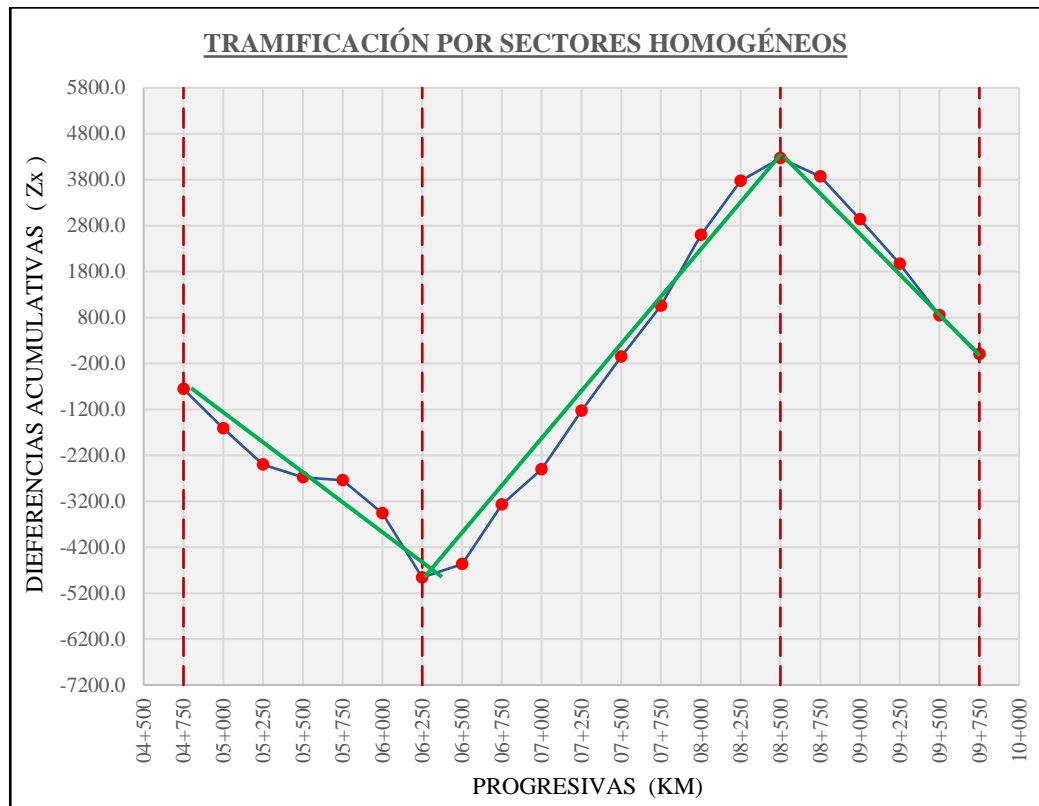
*Metodología de diferencias acumuladas del AASHTO 93*

1	2	3	4	5	6	7	8	9
Progresiva	CBR (%)	# Intervalo	Dist. Entre intervalo	Dist. Acumulada entre intervalos	Intervalo promedio	Área del intervalo	Área acumulada	Zx
04+750	10.2	1	250	250	10.2	2550	2550	-758.33
05+000	9.4	2	250	500	9.8	2450	5000	-1616.67
05+250	10.8	3	250	750	10.1	2525	7525	-2400.00
05+500	13.4	4	250	1000	12.1	3025	10550	-2683.33
05+750	12.6	5	250	1250	13.0	3250	13800	-2741.67
06+000	8.1	6	250	1500	10.4	2587.5	16387.5	-3462.50
06+250	7.2	7	250	1750	7.7	1912.5	18300	-4858.33
06+500	21.6	8	250	2000	14.4	3600	21900	-4566.67
06+750	15.2	9	250	2250	18.4	4600	26500	-3275.00
07+000	17.4	10	250	2500	16.3	4075	30575	-2508.33
07+250	19.3	11	250	2750	18.4	4587.5	35162.5	-1229.17
07+500	16.6	12	250	3000	18.0	4487.5	39650	-50.00
07+750	18.7	13	250	3250	17.7	4412.5	44062.5	1054.17
08+000	20.1	14	250	3500	19.4	4850	48912.5	2595.83
08+250	15.8	15	250	3750	18.0	4487.5	53400	3775.00
08+500	14.6	16	250	4000	15.2	3800	57200	4266.67
08+750	8.7	17	250	4250	11.7	2912.5	60112.5	3870.83
09+000	10.3	18	250	4500	9.5	2375	62487.5	2937.50
09+250	8.4	19	250	4750	9.4	2337.5	64825	1966.67
09+500	9.1	20	250	5000	8.8	2187.5	67012.5	845.83
09+750	10.6	21	250	5250	9.9	2462.5	69475	0.00
<b>At</b>							69475	
<b>Lp</b>							5250	
<b>F</b>							13.23	

Nota: Procedimiento de cálculo de los valores Zx según la metodología de diferencias acumuladas.

**Figura 27**

*Tramificación por sectores homogéneos*



Nota: Tramificación en sectores homogéneos por diferencias acumuladas.

De acuerdo con la representación gráfica anterior, se distinguen (03) tramos homogéneos, lo que implica la ejecución de (02) calicatas como mínimo por cada tramo, sumando un total de (06) calicatas para identificar las propiedades de la subrasante.

### 3.1.6. Técnicas e instrumentos de recolección de datos

Para la recolección de datos de los ensayos se usó formatos que permiten registrar valores como peso, porcentajes, tiempo, esfuerzos, entre otros.

Los instrumentos para recopilar información comprenden manuales de procedimiento de ensayo, cámara fotográfica, equipos de laboratorio, equipo de computación con software Excel y OriginPro2023lab.



### 3.1.7. Operacionalización de variables

Ñaupas et al. (2014) “dice que trata de un método sistemático que implica la conversión de variables conceptuales en variables intermedias, seguidamente en variables observables o indicadores, y culmina con la construcción de índices de medida” (p. 191).

En este estudio se encuentran tanto las variables dependientes como las independientes, las cuales se operacionalizan en detalle a continuación:

**Tabla 24**

*Operacionalización de variables*

<b>Variables</b>	<b>Dimensiones</b>	<b>Indicadores</b>	<b>Unidad de medida</b>
Variable independiente: Curvas de diseño RAMCODES	Condiciones de hidratación	Gravedad específica	(-)
		Peso unitario seco	(g/cm <sup>3</sup> )
	Estudio climatológico Experimento factorial	Precipitación máxima diaria	(mm)
		Próctor modificado Ensayo CBR	(gr/cm <sup>3</sup> ), (%) (%)
Variable independiente: Ensayo CBR convencional	Propiedades físicas del suelo	Contenido de humedad	(%)
		Análisis granulométrico	(mm), (pulg)
		Límites de Atterberg	(%)
	Propiedades mecánicas del suelo	Próctor modificado Ensayo CBR	(gr/cm <sup>3</sup> ), (%) (%)
Variable dependiente: Diseño de pavimentos flexibles	Estudio de tráfico	Índice medio diario anual	(veh/ día)
	Diseño estructural	Espesores de capas	(cm)
	Evaluación económica	Costo	(s/.)

Nota: Operacionalización de variables en sus dimensiones e indicadores.

## 3.2. MATERIALES

### 3.2.1. Características físicas de subrasante

A continuación, se tiene un resumen detallado de pruebas efectuadas.

#### 3.2.1.1. Contenido de humedad (MTC E 108)

se tiene los siguientes resultados (Anexo 2):

**Tabla 25**

*Resultados de contenido de humedad*

CALICATA	PROGRESIVA	LADO	CONTENIDO DE HUMEDAD (%)
C-1	KM: 5+000	Derecha	19.04
C-2	KM: 5+250	Derecha	20.18
C-3	KM: 7+000	Izquierda	10.80
C-4	KM: 7+500	Izquierda	9.29
C-5	KM: 9+000	Derecha	10.75
C-6	KM: 9+500	Derecha	8.43

Nota: Contenidos de humedad de las calicatas identificadas.

**Figura 28**

*Muestreo para contenido de humedad: C-2, C-4, C-6*



Nota: Muestreo de las calicatas: C-2, C-4, C-6.

**Figura 29**

*Muestreo para contenido de humedad: C-1, C-3, C-5*



Nota: Muestreo de las calicatas: C-1, C3, C-5.

### 3.2.1.2. Análisis granulométrico de suelos por tamizado (MTC E 107)

Los ensayos se realizaron de acuerdo al MTC E 107 y se tiene los siguientes resultados (Anexo 3):

**Tabla 26**

*Resultados de Análisis Granulométrico (% que pasa)*

Calicata	Prog. (km)	Lado	ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO % QUE PASA						
			3/4"	3/8"	N°4	N°10	N°40	N°60	N°200
C-1	5+000	Der.	-	100	99	97.42	94.53	91.86	52.56
C-2	5+250	Der.	-	100	98.71	95.17	88.79	84.30	52.97
C-3	7+000	Izq.	-	100	99.39	95.13	76.48	51.62	20.36
C-4	7+500	Izq.	100	98.36	94.23	87.81	71.74	53.35	20.71
C-5	9+000	Der.	100	92.38	79.17	61.12	28.36	18.18	9.46
C-6	9+500	Der.	100	97.85	86.61	65.12	27.35	16.43	7.70

Nota: Porcentaje que pasa en cada N° tamiz.

**Figura 30**

*Lavado de muestra para análisis granulométrico*



Nota: Lavado de 250 g de muestra en el tamiz N°200.

**Figura 31**

*Ensayo de análisis granulométrico*



Nota: Tamizado de la muestra previamente lavada y secada en un horno.

### 3.2.1.3. Límite líquido (MTC E 110)

Los ensayos se realizaron acorde al MTC E 110, y se obtienen los siguientes resultados (Anexo 3):

**Tabla 27**

*Resultados de Límite Líquido*

CALICATA	PROGRESIVA	LADO	LÍMITE LÍQUIDO %
C-1	5+000	Der.	27.3
C-2	5+250	Der.	27.1
C-3	7+000	Izq.	NP
C-4	7+500	Izq.	NP
C-5	9+000	Der.	NP
C-6	9+500	Der.	NP

Nota: Límite líquido de las muestras por calicatas.

**Figura 32**

*Realización de límite líquido*



Nota: Prueba de límite líquido en la copa de Casagrande.

### 3.2.1.4. Límite plástico e índice de plasticidad (MTC E 111)

Los ensayos se realizaron acorde al MTC E 111, (Anexo 4):

**Tabla 28**

*Resultados de límite plástico e índice de plasticidad*

CALICATA	PROGRESIVA	LADO	LÍMITE PLÁSTICO %	ÍNDICE DE PLASTICIDAD
C-1	5+000	Der.	25.4	1.96
C-2	5+250	Der.	24.9	2.3
C-3	7+000	Izq.	NP	NP
C-4	7+500	Izq.	NP	NP
C-5	9+000	Der.	NP	NP
C-6	9+500	Der.	NP	NP

Nota: Calicatas y su índice de plasticidad.

**Figura 33**

*Realización de límite plástico*



Nota: Límite plástico en el vidrio esmerilado.

## A. Clasificación de suelo

Para obtener una descripción detallada y tener mayor seguridad del tipo de suelo de subrasante a trabajar, se ha realizado la clasificación por los métodos de categorización SUCS y AASHTO (Anexo 5).

**Tabla 29**

*Características de granulometría y plasticidad*

CALICATA	% QUE PASA N°4	% QUE PASA N°200	LL	IP
C-1	99.00	52.65	27.3	2.0
C-2	98.71	52.97	27.1	2.3
C-3	99.39	20.36	NP	NP
C-4	94.23	20.71	NP	NP
C-5	79.17	9.46	NP	NP
C-6	86.61	7.70	NP	NP

Nota: Porcentajes que pasa para cada material sobre los tamices N°4 y N°200.

Las siguientes deducciones se extraen de la Tabla 30 con respecto a la categorización SUCS:

- Las calicatas C-1 y C-2 revelan que la fracción que atraviesa el tamiz N°200 supera el 50%, lo que indica la presencia de arcillas o limos.
- Las calicatas C-3, C-4, C-5, C-6, se nota que el % de material que pasa el tamiz N°200 es inferior al 50% por lo que son gravas o arenas.
- Las calicatas C-1 y C-2 presentan límite líquido menores que 50% e índice de plasticidad menor que 4% por lo que son suelos limos inorgánicos.
- Las calicatas C-3 y C-4 revelan la presencia de muestras donde más del 50% atraviesa el tamiz N°4, con más del 12% que atraviesa el



tamiz N°200 y un índice de plasticidad inferior al 4%, lo que sugiere la presencia de arenas limosas.

- Las calicatas C-5 y C-6 con más del 50 % que pasa la malla N°4, con un porcentaje de finos entre 5 a 12%, coeficiente de uniformidad mayor a 6 y coeficiente de curvatura  $> a 1$  y  $<$  que 3; se caracterizan como arenas bien graduadas con limos.

De la tabla N°26 se obtiene las siguientes conclusiones para la clasificación AASHTO:

- En las calicatas C-1 y C-2 el % de suelo que pasa por la malla N°200 son mayores al 35% y son suelos finos.
- Las calicatas C-3, C-4, C-5 y C-6 el porcentaje de muestra de suelo que pasa la malla N°200 son menores al 35% se tratan de suelos de grano grueso.
- Las calicatas C-1 y C-2 el % que pasa la malla N°200 es mayor al 36%,  $LL < 40\%$ ,  $IP < 10\%$ , características que pertenecen a suelos limosos del grupo A-4 con índice de grupo 0.
- De las calicatas C-3 y C-4 el % que atraviesa la malla N°200 es menor al 35%, sin LL ni LP, pertenecen a suelos arenosos del grupo A-2-4 de  $IG= 0$ .
- En las calicatas C-5 y C-6 el % que pasa la malla N°40 y N°200 son menores al 50% y 25% por lo que corresponde a suelos arenosos del grupo A-1-b con índice de grupo igual a 0.



**Tabla 30***Resultados de la clasificación de suelo según SUCS y AASHTO*

CALICATAS	UBICACIÓN	LADO	MÉTODO SUCS	MÉTODO AASHTO
C-1	5+000	Derecho	ML	A-4 (4)
C-2	5+250	Derecho	ML	A-4 (4)
C-3	7+000	Izquierdo	SM	A-2-4 (0)
C-4	7+500	Izquierdo	SM	A-2-4 (0)
C-5	9+000	Derecho	SW-SM	A-1-b (0)
C-6	9+500	Derecho	SW-SM	A-1-b (0)

Nota: Tipos de suelo de las calicatas realizadas.

**3.2.1.5. Gravedad específica de sólidos de suelo (Gs) (MTC E 113)**

Para su determinación se usa un extractor de aire y probetas graduadas en 500 ml (Anexo 6).

**Tabla 31***Cantidad de masa de suelo para Gs*

Tipo de suelo	Masa seca (g), para un picnómetro de 500 ml.
ML	118.38; 117.47
SM	120.04; 120.03
SW-SM	120.07; 120.17

Nota: Cantidad de masa de suelo pasante la malla N°4.

- Luego de realizar los métodos SUCS y AASHTO, de las 6 calicatas muestreadas, se obtiene 3 tipos de suelos según la clasificación mencionada, se realiza el ensayo de gravedad específica según el MTC E 113, donde obtenemos los siguientes resultados:

**Tabla 32**

*Resultados del ensayo de gravedad específica (Gs)*

Calicata	Prog. (km)	Lado	Clasificación		T °c	Gs	Gs (prom)
			AASTHO	SUCS			
C-1; C-2	5+000	Der.	A-4 (4)	ML	22	2.72	2.73
	5+250				°C	2.74	
C-3; C-4	7+000	Izq.	A-2-4 (0)	SM	22°	2.70	2.70
	7+500				C	2.69	
C-5; C-6	9+000	Der.	A-1-b (0)	SW-SM	22	2.67	2.67
	9+500				°C	2.67	

Nota: Gravedad específica (Gs), de los 3 tipos de suelos obtenidos.

**Figura 34**

*Realización del ensayo de gravedad específica (Gs)*



Nota: Extracción de vacíos llenos de aire

### 3.2.2. Caracterización mecánica de subrasante

para evaluar mecánicamente la subrasante del pavimento actual, con el propósito de determinar su capacidad de soporte se realizaron las siguientes pruebas:

### 3.2.2.1. Compactación de suelos – Proctor modificado (MTC E 115)

se realiza con las indicaciones de la norma MTC E 115 (Anexo 7).

Antes de llevar a cabo esta prueba, se selecciona el método de compactación utilizando la siguiente tabla:

**Tabla 33**

*Elección del método para el ensayo de proctor modificado*

Calicata	Prog (km)	% Retenido acumulado tamiz 3/8"	% Retenido acumulado tamiz N°4	% Pasante tamiz N°4	Método selecto
C-1; C-2	5+000	0.00	1.29	98.71	A
	5+250				
C-3; C-4	7+000	1.64	5.77	94.23	A
	7+500				
C-5; C-6	9+000	7.62	20.83	79.17	B
	9+500				

Nota: Porcentaje retenido en el tamiz N°4.

- Las calicatas C-1 y C-2 corresponden a un suelo clasificado como ML, A-4 (4), y se compacta mediante el método A, dado que el % retenido en la malla N°4 es menor o igual de 20%.
- Los suelos de las calicatas C-3; C-4 corresponde a un suelo: SM, A-2-4 (0) y se realiza por el método A, porque % retenido en el tamiz N°4  $\leq$  20 %.
- Las calicatas C-5; C-6 están clasificados como SW-SM, A-1-b (0) y se compactan por el método B, porque % retenido en la malla N°4 es mayor al 20 %.

El procedimiento se realizó de la siguiente manera:



- Siguiendo los métodos A y B, el suelo con un contenido de humedad definido se introduce en el molde en 5 capas. Luego se compacta mediante 25 golpes de un pisón de 10 lbf (44.5 N) desde una altura de 18 pulgadas (457 mm), ejerciendo un esfuerzo de compactación total cercano a 56,000 pie-lbf/pie<sup>3</sup> (2,700 kN-m/m<sup>3</sup>). Luego, se mide la densidad seca obtenida.
- Este procedimiento se realiza con cuatro diferentes contenidos de humedad, estableciendo así una relación.
- Los resultados se trazan en un gráfico, evidenciando una relación de tipo curvilínea (curva de Compactación). Los valores de contenido humedad óptimo y máxima densidad seca modificada son obtenidos de la curva de compactación.

**Tabla 34**

*Resultados del ensayo de proctor modificado*

<b>Calicata</b>	<b>Prog. (km)</b>	<b>Lado</b>	<b>Contenido de humedad óptima (%)</b>	<b>Máxima densidad seca (g/cm<sup>3</sup>)</b>
C-1; C-2	5+000 5+250	Der.	17.38	1.750
C-3; C-4	7+000 7+500	Izq.	14.55	1.852
C-5; C-6	9+000 9+500	Der.	14.01	1.871

Nota: Relación del contenido de humedad óptima (%) y la máxima densidad seca (g/cm<sup>3</sup>).

**Figura 35**

*Realización del ensayo proctor modificado*



Nota: Ejecución según método A y B elegido.

**Figura 36**

*Extracción de muestra compactada*



Nota: Extracción de muestra, con la gata hidráulica.



### 3.2.2.2. CBR de suelos - laboratorio (MTC E 132)

Las normas utilizadas para el ensayo CBR son: MTC E 132 y ASTM D 1883 (Anexo 8).

El procedimiento de esta prueba es el siguiente:

- Se prepara una muestra de 20 kg
- Se seca la muestra al horno a 60 °C, luego desmenuzar los fragmentos existentes.
- Se tamiza por en  $\frac{3}{4}$ " y N°4, la fracción retenida en la malla  $\frac{3}{4}$ ", deberá eliminarse y reemplazarse por la misma cantidad de material pasante por los tamices mencionados, luego se mezcla correctamente.
- Se obtiene la humedad.

A continuación, se presenta el equipo necesario para llevar a cabo la compactación y pruebas de penetración:

- Molde de 6" de diámetro, altura de 7" a 8" y un collarín de 2"
- Un disco espaciador de diámetro de 5  $\frac{15}{16}$ " y altura de 2.5"
- Pisón de 10 lb, altura de caída de 18", trípode y extensómetro
- Dos pesas de plomo de 5 lb c/u
- Pistón circular de 2" de diámetro y prensa hidráulica

El ensayo de CBR también comprende:

**Tabla 35**

*Resultados de CBR convencional*

Calicata	Prog. (km)	Clasificación SUCS y AASHTO		CBR al	CBR al	CBR al	CBR al
				100 % de MDS a 0.1"	95 % de MDS a 0.1"	100 % de MDS a 0.2"	95 % de MDS a 0.2"
C-1; C-2	5+000	ML	A-4 (4)	25.18	18.05	29.60	18.80
	5+250						
C-3; C-4	7+000	SM	A-2-4 (0)	48.35	22.8	62.80	24.80
	7+500						
C-5; C-6	9+000	SW-SM	A-1-b (0)	68.20	38.6	74.9	40.10
	9+500						

Nota: Resultados de CBR a 0.1" y 0.2" de 03 tipos de suelos.

**Figura 37**

*Ensayo CBR: selección de moldes*



Nota: Selección de 03 moldes.

**Figura 38**

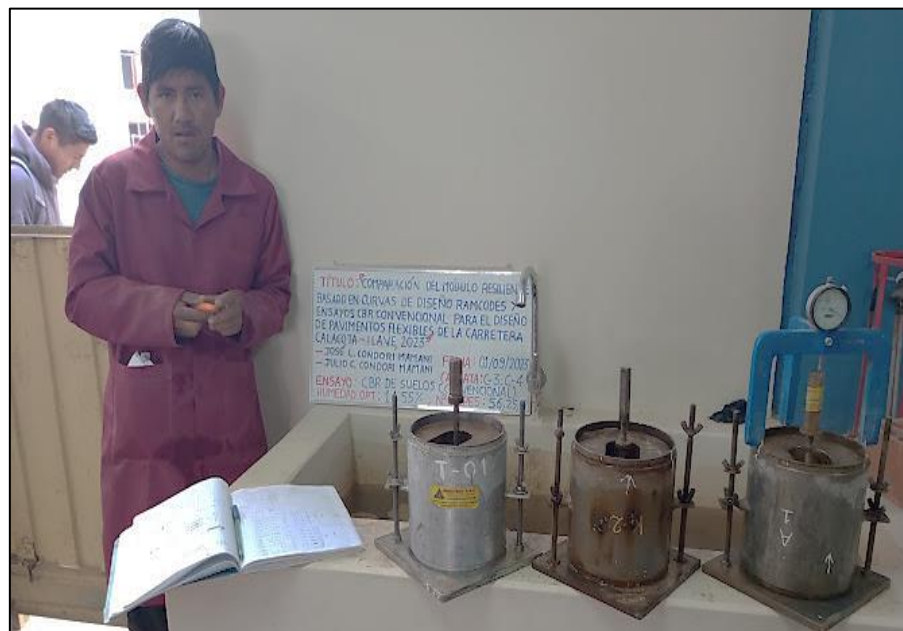
*Ensayo CBR: compactación*



Nota: Compactación de suelo, en el molde CBR.

**Figura 39**

*Ensayo de CBR: inmersión de muestras*



Nota: Inmersión de las muestras, la cual se lectura inicialmente con el deformímetro.



**Figura 40**

*Ensayo de CBR: penetración de la muestra*



Nota: Prueba CBR del espécimen.

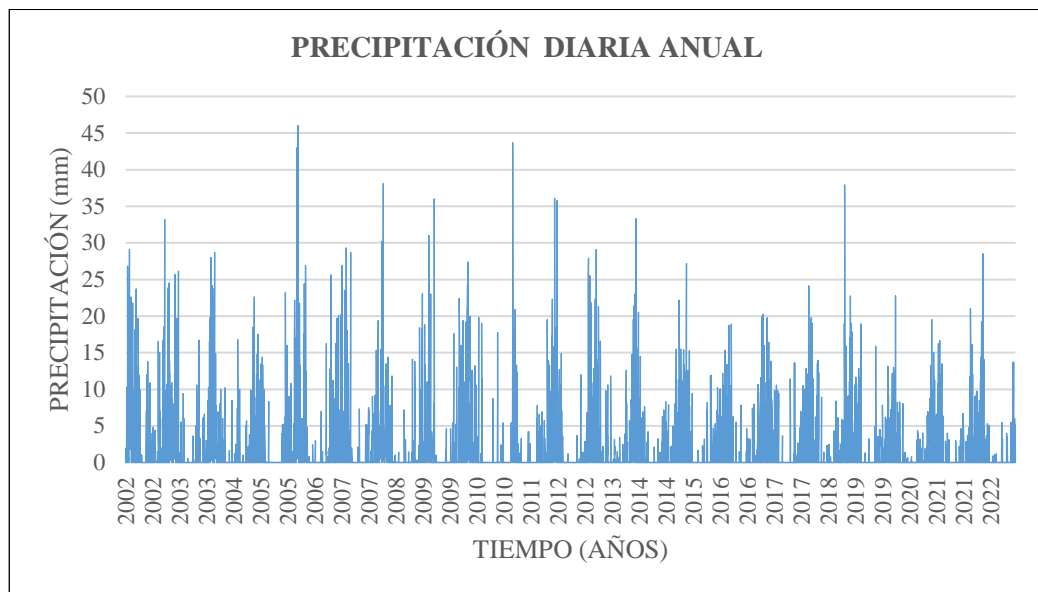
### 3.2.3. Cálculo de la variación de saturación

Para analizar la variación de saturación de subrasante, se tuvo en cuenta las condiciones climáticas del tramo en estudio. Para ello fue necesario recopilar datos históricos sobre las precipitaciones diarias en la región de Ilave durante 20 años (Anexo 9).

La temporada húmeda va de diciembre a marzo y la temporada seca va de mayo a agosto así mismo se presenta dos periodos de transición (setiembre-noviembre y abril), la precipitación máxima es de 46.0 mm, la mínima es de 0.0 mm y la precipitación promedio es 11.5 mm, según la figura 43 que se muestra a continuación:

**Figura 41**

*Serie histórica de precipitación diaria anual*

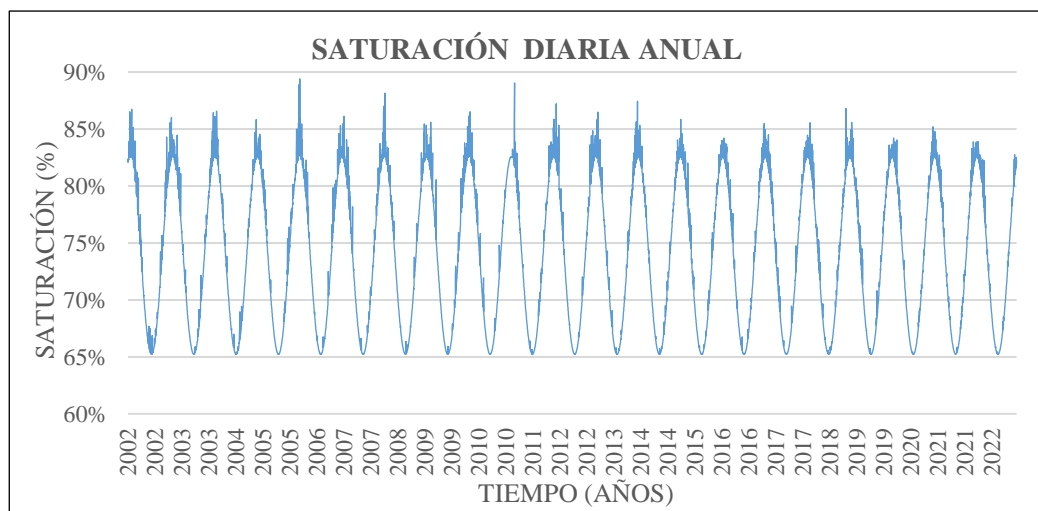


Nota: Datos de precipitaciones máximas diarias de la estación llave, en el periodo 2002-2022.  
Fuente: (SENAMHI, 2023)

De la ecuación adaptada para el contenido volumétrico de agua y el grado de saturación en la subrasante en función de la precipitación, la profundidad de análisis y el tipo de suelo; se obtuvo la variación de las saturaciones diarias (Anexo 10).

**Figura 42**

*Serie temporal de variación de saturación del suelo: ML*

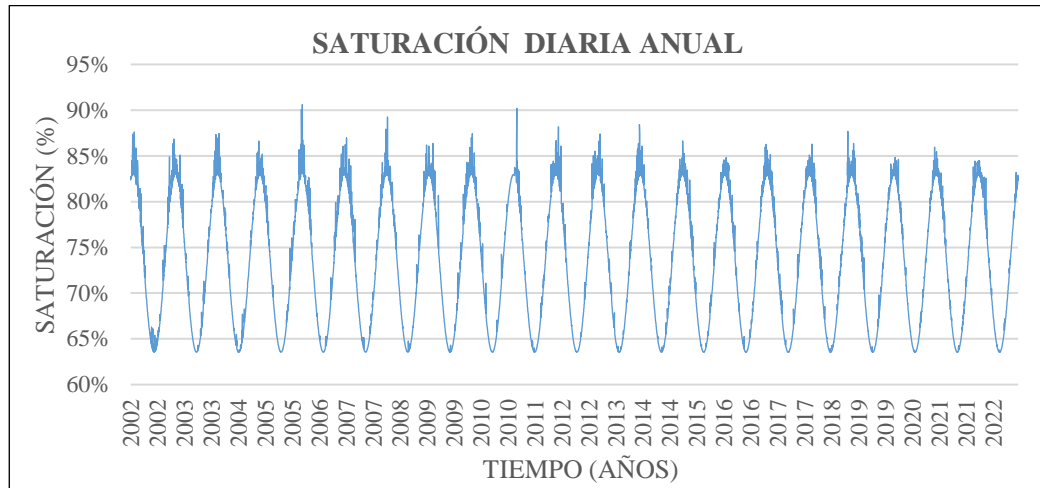


Nota: Variaciones de saturación diaria de la subrasante del suelo ML, en un periodo de 20 años.

- La saturación máxima encontrada es de 89.38%, mientras que la mínima es 65.23%.

**Figura 43**

*Serie temporal de variación de saturación del suelo: SM*

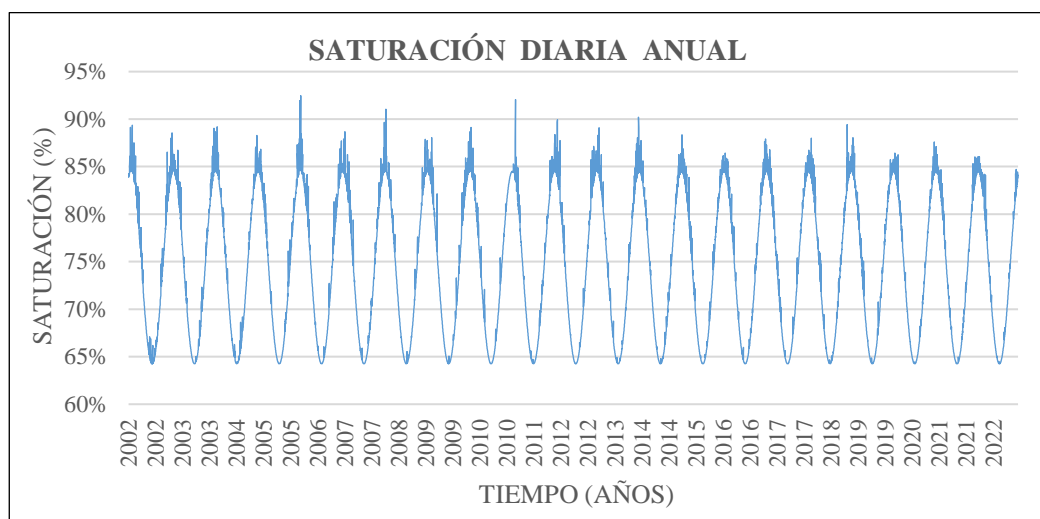


Nota: Variaciones de saturación diaria de la subrasante de suelo SM en un periodo de 20 años.

- La saturación máxima encontrada es de 90.60%, mientras que la mínima es 63.55%

**Figura 44**

*Serie temporal de variación de saturación del suelo: SW-SM*



Nota: Variaciones de saturación diaria de la subrasante de suelo SW-SM, en un periodo de 20 años.

- La saturación máxima encontrada es de 92.47%, mientras que la mínima es 64.25%.

**Tabla 36**

*Variación de saturación promedio mensual*

Meses	Suelo: ML	Suelo: SM	Suelo: SW-SM
Enero	83.09 %	83.56 %	85.12 %
Febrero	82.45 %	82.83 %	84.37 %
Marzo	79.67 %	79.73 %	81.13 %
Abril	75.24 %	74.77 %	75.95 %
Mayo	70.68 %	69.66 %	70.62 %
Junio	67.10 %	65.64 %	66.43 %
Julio	65.43 %	63.77 %	64.48 %
Agosto	66.06 %	64.48 %	65.22 %
Setiembre	68.88 %	67.64 %	68.52 %
Octubre	73.06 %	72.32 %	73.40 %
Noviembre	77.47 %	77.26 %	78.55 %
Diciembre	81.27 %	81.52 %	82.99 %

Nota: Variación promedio mensual de saturación en la subrasante para los tipos de suelos estudiados.

- Finalmente, se obtienen las saturaciones máximas promedio mensuales de un periodo de 20 años, utilizando esta información en la metodología RAMCODES.

**Tabla 37**

*Saturación máxima promedio mensual*

Tipo de suelo según SUCS	Saturación máxima promedio mensual (20 años)
ML	83.09 %
SM	83.56 %
SW-SM	85.12 %

Nota: Saturación máxima del suelo de subrasante.

### 3.2.4. RAMCODES para subrasante

#### 3.2.4.1. Clasificación cuantitativa de subrasante

Se resume a través del valor de factor característico  $F_p$ , el cual se calcula según la guía metodológica RAMCODES (Anexo 11).

**Tabla 38**

*Resultados de la clasificación cuantitativa RAMCODES*

Calicata	Prog. (km)	$W_L$	F	G	$F_p$	Tipo	Clasificación
C-1	5+000	0.273	0.5265	0.0100	0.6636	RS3	“Arenas limosas y arcillosas”
C-2	5+250	0.271	0.5297	0.0129	0.6647	RS3	“Arenas limosas y arcillosas”
C-3	7+000	0	0.2036	0.0061	0.2024	RS2	“Arenas limosas y arcillosas con grava”
C-4	7+500	0	0.2071	0.0577	0.1958	RS2	“Arenas limosas y arcillosas con grava”
C-5	9+000	0	0.0946	0.2083	0.0783	RS1	Gravas limosas y arcillosas”
C-6	9+500	0	0.0770	0.1339	0.0689	RS1	Gravas limosas y arcillosas”

Nota: Clasificación cuantitativa en relación con  $W_L$ : límite líquido, F: fracción pasa tamiz N°200 y G: fracción retenida tamiz N°4.

#### 3.2.4.2. Potencial de densificación

Los parámetros clave utilizados para el potencial de compactación incluyen la (MDS), el (CHO) y la característica de la curva que ilustra esta relación, referida.

A continuación, la tabla muestra los resultados del potencial de densificación (MDS):

**Tabla 39***Resultados de potencial densificación (DMS)*

Calicata	Prog. (km)	F <sub>p</sub>	Tipo	Clasificación RAMCODES	MDS (kN/m <sup>3</sup> )	MDS (g/cm <sup>3</sup> )
C-1	5+000	0.6636	RS3	Arenas limosas y arcillosas	19.24	1.92
C-2	5+250	0.6647	RS3	Arenas limosas y arcillosas	19.24	1.92
C-3	7+000	0.2024	RS2	Arenas limosas y arcillosas con grava	21.21	2.12
C-4	7+500	0.1958	RS2	Arenas limosas y arcillosas con grava	21.24	2.12
C-5	9+000	0.0783	RS1	Gravas limosas y arcillosas	21.74	2.17
C-6	9+500	0.0679	RS1	Gravas limosas y arcillosas	21.78	2.18

Nota: Cálculo de MDS, en función del F<sub>p</sub> (factor característico), tipo y clasificación del suelo.

### 3.2.4.3. Relación entre el contenido de agua, la densidad y la resistencia

Para determinar la vinculación entre estas variables de diseño se empleó la técnica de los experimentos factoriales de 15 especímenes establecidos en la guía RAMCODES.

## A. Diseño y elaboración del experimento factorial

Se realiza 15 especímenes según el (Anexo 12):

- Se utilizan los mismos equipos y accesorios que se requieren para el ensayo CBR convencional.
- Se elaboran quince (15) muestras de suelo (4.500 kg), con los contenidos de agua calculados, para luego ser conservadas en bolsas herméticas (para un mejor control de humedad).

**Tabla 40**

*Variación y ordenamiento de humedades del suelo RS3*

Calicata	Tipo	Método Electo	CHO (%)	N° Golpes	Variaciones de Humedad (%)				
					W <sub>0-3</sub>	W <sub>0-2</sub>	W <sub>0-1</sub>	W <sub>0</sub>	W <sub>0+1</sub>
C-1; C-2	RS3	A	17.38	56	W <sub>0-3</sub>	W <sub>0-2</sub>	W <sub>0-1</sub>	W <sub>0</sub>	W <sub>0+1</sub>
					13.71	14.78	15.63	16.67	18.04
				25	W <sub>0-2</sub>	W <sub>0-1</sub>	W <sub>0</sub>	W <sub>0+1</sub>	W <sub>0+2</sub>
					14.88	15.88	17.00	17.97	18.98
				12	W <sub>0-1</sub>	W <sub>0</sub>	W <sub>0+1</sub>	W <sub>0+2</sub>	W <sub>0+3</sub>
					16.63	17.66	18.71	19.75	20.88

Nota: Preparación de muestras del suelo RS3, variando el contenido de humedad a partir de C.H.O. (W<sub>0</sub>) y el N° golpes.

**Tabla 41**

*Variación y ordenamiento de humedades del suelo RS2*

Calicata	Tipo	Método Electo	CHO (%)	N° Golpes	Variaciones de Humedad (%)				
					W <sub>0-4</sub>	W <sub>0-3</sub>	W <sub>0-2</sub>	W <sub>0-1</sub>	W <sub>0</sub>
C-3; C-4	RS2	A	14.55	56	W <sub>0-4</sub>	W <sub>0-3</sub>	W <sub>0-2</sub>	W <sub>0-1</sub>	W <sub>0</sub>
					9.98	10.77	12.21	12.95	14.15
				25	W <sub>0-3</sub>	W <sub>0-2</sub>	W <sub>0-1</sub>	W <sub>0</sub>	W <sub>0+1</sub>
					10.98	12.11	13.10	13.64	14.85
				12	W <sub>0-2</sub>	W <sub>0-1</sub>	W <sub>0</sub>	W <sub>0+1</sub>	W <sub>0+2</sub>
					12.20	13.29	14.32	15.26	16.14

Nota: Preparación de muestras del suelo RS2, variando el contenido de humedad a partir de C.H.O. (W<sub>0</sub>) y el N° golpes.

**Tabla 42**

*Variación y ordenamiento de humedades del suelo RS1*

Calicata	Tipo	Método Electo	CHO (%)	N° Golpes	Variaciones de Humedad (%)				
					W <sub>0-3</sub>	W <sub>0-2</sub>	W <sub>0-1</sub>	W <sub>0</sub>	W <sub>0+1</sub>
C-5; C-6	RS1	B	14.01	56	W <sub>0-3</sub>	W <sub>0-2</sub>	W <sub>0-1</sub>	W <sub>0</sub>	W <sub>0+1</sub>
					11.10	12.13	12.79	13.95	14.80
				25	W <sub>0-3</sub>	W <sub>0-2</sub>	W <sub>0-1</sub>	W <sub>0</sub>	W <sub>0+1</sub>
					11.13	12.31	13.04	13.92	14.53
				12	W <sub>0-2</sub>	W <sub>0-1</sub>	W <sub>0</sub>	W <sub>0+1</sub>	W <sub>0+2</sub>
					13.23	13.81	14.36	14.91	16.00

Nota: Preparación de muestras del suelo RS1, variando el contenido de humedad a partir de C.H.O. (W<sub>0</sub>) y el N° golpes.

**Figura 45**

*Muestras preparadas variando humedades*



Nota: La figura muestra las 15 muestras preparadas con varias humedades.

- Empleando el molde proctor de 6" y el martillo proctor de 10 lb, se organizan las quince muestras en tres grupos distintos según las energías de compactación: 56, 25 y 12 golpes por capa, y se procede a la compactación conforme a los métodos A y B del proctor modificado.



**Figura 46**

*Compactación de muestras con rango de humedades*



Nota: Compactación de 15 especímenes preparados.

- Tras finalizar la compactación, se retira el collar y la muestra se nivela con una regla metálica. Luego, el molde se desmonta y se anota el peso.

**Figura 47**

*Enrasamiento de la muestra compactada*



Nota: Enrasamiento de la muestra con la regla metálica.

- La muestra compactada, que luego se introduce en la prensa universal para la penetración.

**Figura 48**

*Penetración de la muestra compactada*



Nota: Penetración de la muestra con los anillos puestos.

- En el paso final, el molde se desmonta y se extraen porciones para analizar su humedad.

**Figura 49**

*Extracción de muestra compactada y penetrada*



Nota: Extracción de la muestra penetrada, para luego obtener su humedad.

- Los datos se analizan en una hoja de Excel, aplicando las ecuaciones previamente establecidas para el ensayo CBR convencional, con el fin de obtener información sobre humedad, densidad y CBR.

**Tabla 43**

*Resultados del experimento factorial CBR: RS3*

Tipo	N° Golpes	Humedad(%)	Densidad seca (g/cm <sup>3</sup> )	CBR 0.1" (%)	
RS3	56	13.71 ; 14.78 ;	1.756 ; 1.777 ;	132.56 ; 107.18 ;	
		15.63 ; 16.67 ;	1.792 ; 1.776 ;	69.95 ; 29.30 ;	
		18.04	1.734	8.82	
	25	14.88 ; 15.88 ;	1.683 ; 1.708 ;	73.61 ; 65.14 ;	
		17.00 ; 17.97 ;	1.731 ; 1.727 ;	49.07 ; 30.58 ;	
		18.98	1.700	7.25	
		16.63 ; 17.66 ;	1.648 ; 1.662 ;	37.93 ; 31.67 ;	
		12	18.71 ; 19.75	1.679 ; 1.671 ;	28.16 ; 8.62 ;
		; 20.88	1.650	1.92	

Nota: Resultados del experimento factorial CBR del suelo RS3.

**Tabla 44**

*Resultados del experimento factorial CBR: RS2*

Tipo	N° Golpes	Humedad(%)	Densidad seca (g/cm <sup>3</sup> )	CBR 0.1" (%)	
RS2	56	9.98 ; 10.77 ;	1.862 ; 1.903 ;	157.59 ; 163.28 ;	
		12.21 ; 12.95 ;	1.941 ; 1.910 ;	109.80 ; 42.67 ;	
		14.15	1.860	14.51	
	25	10.98 ; 12.11 ;	1.777 ; 1.864 ;	80.77 ; 103.90 ;	
		13.10 ; 13.64 ;	1.876 ; 1.863 ;	75.95 ; 29.23 ;	
		14.85	1.828	12.94	
		12.20 ; 13.29 ;	1.769 ; 1.800 ;	56.60 ; 57.43 ;	
		12	14.32 ; 15.26 ;	1.825 ; 1.791 ;	50.35 ; 15.96 ;
		16.14	1.772	7.54	

Nota: Resultados del experimento factorial CBR del suelo RS2 (SM).

**Tabla 45**

*Resultados del experimento factorial CBR: RS1*

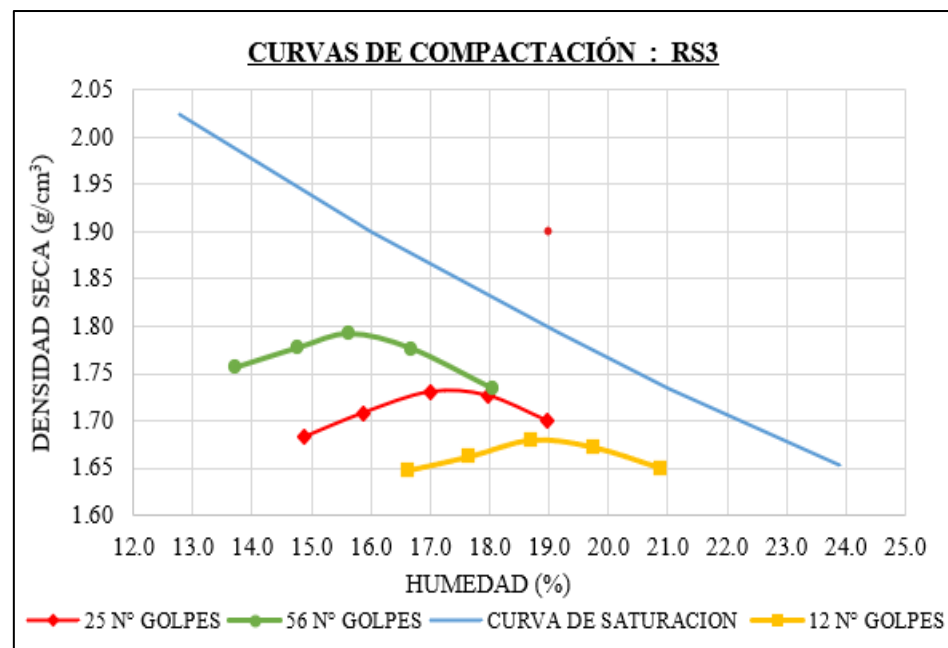
Tipo	Nº Golpes	Humedad(%)	Densidad seca (g/cm <sup>3</sup> )	CBR 0.1" (%)
RS1	56	11.10 ; 12.13 ;	1.921 ; 1.942 ;	241.22 ; 168.11 ;
		12.79 ; 13.95 ;	1.932 ; 1.892	65.42 ; 26.10 ;
		14.80	; 1.847	12.94
	25	11.13 ; 12.31 ;	1.844 ; 1.873 ;	134.32; 139.69 ;
		13.04 ; 13.92 ;	1.911 ; 1.871 ;	124.16 ; 54.05 ;
		14.53	1.857	4.48
	12	13.23 ; 13.81 ;	1.795 ; 1.832 ;	36.69 ; 72.54 ;
		14.36 ; 14.91 ;	1.851 ; 1.818	35.27 ; 20.08 ;
		16.00	; 1.791	7.82

Nota: Resultados del experimento factorial CBR del suelo RS1 (SW-SM).

- Con los quince (15) datos de humedad, densidad seca y CBR, se generan gráficos de curvas de compactación y de resistencia CBR de cada tipo de suelo.

**Figura 50**

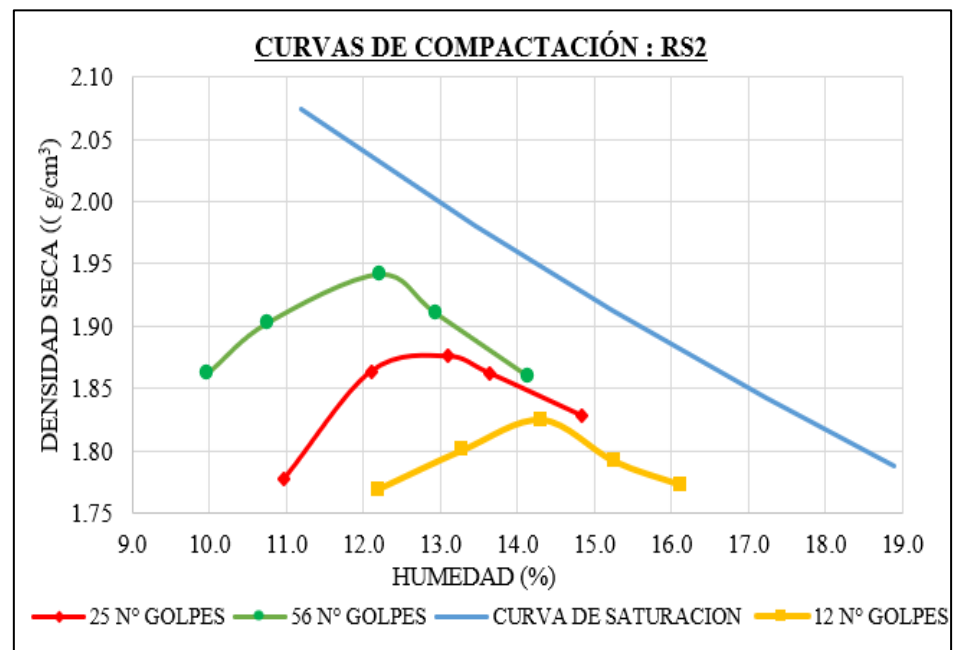
*Curvas de compactación del suelo: RS3*



Nota: Curvas de compactación del suelo : ML (RS3).

**Figura 51**

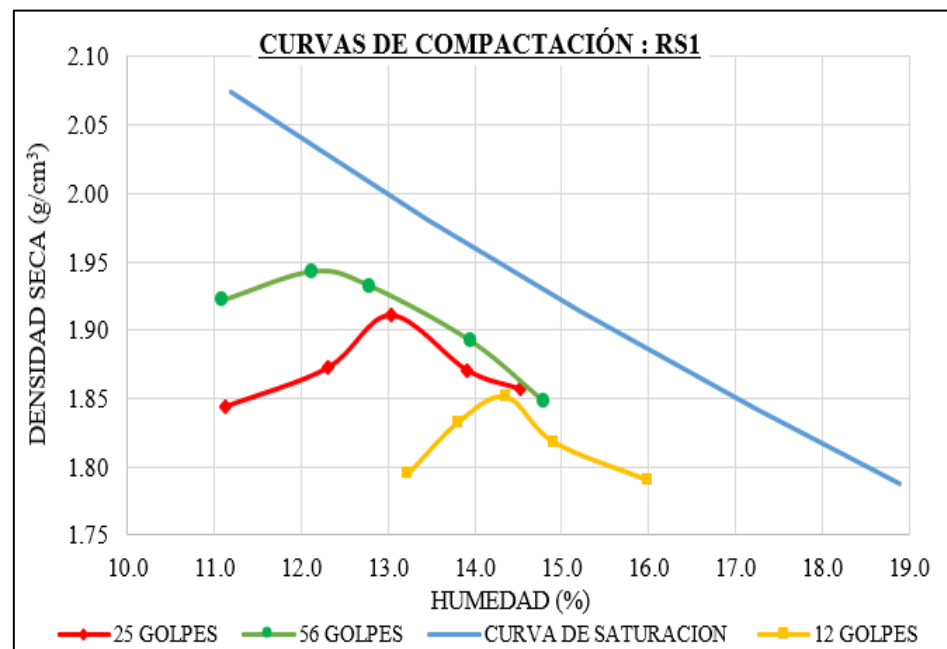
*Curvas de compactación del suelo: RS2*



Nota: Curvas de compactación del tipo suelo : SM (RS2).

**Figura 52**

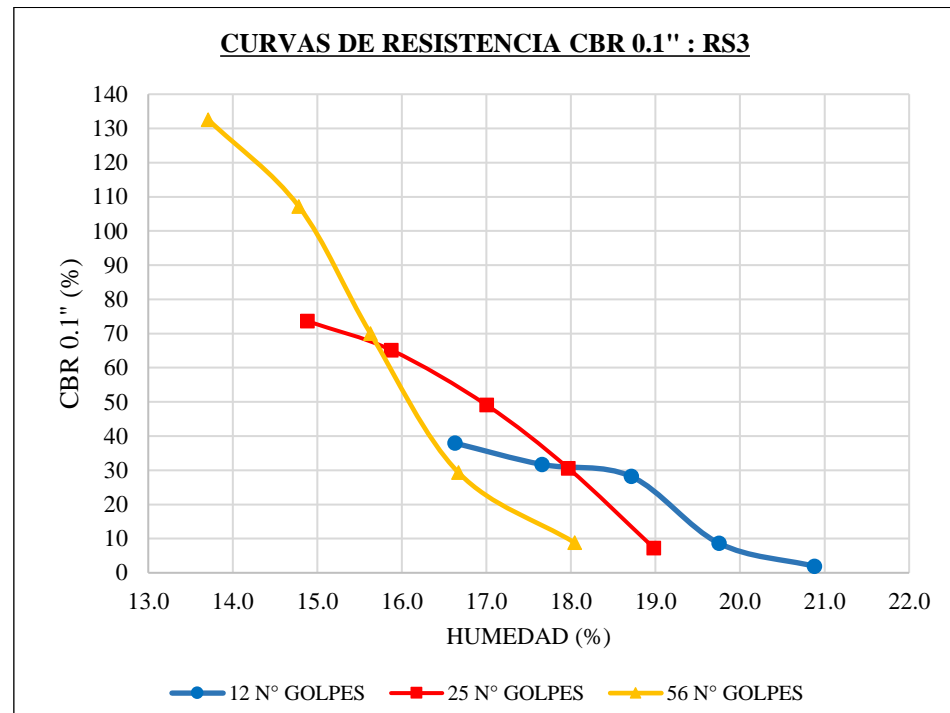
*Curvas de compactación del suelo: RS1*



Nota: Curvas de compactación del suelo : SW-SM (RS2).

**Figura 53**

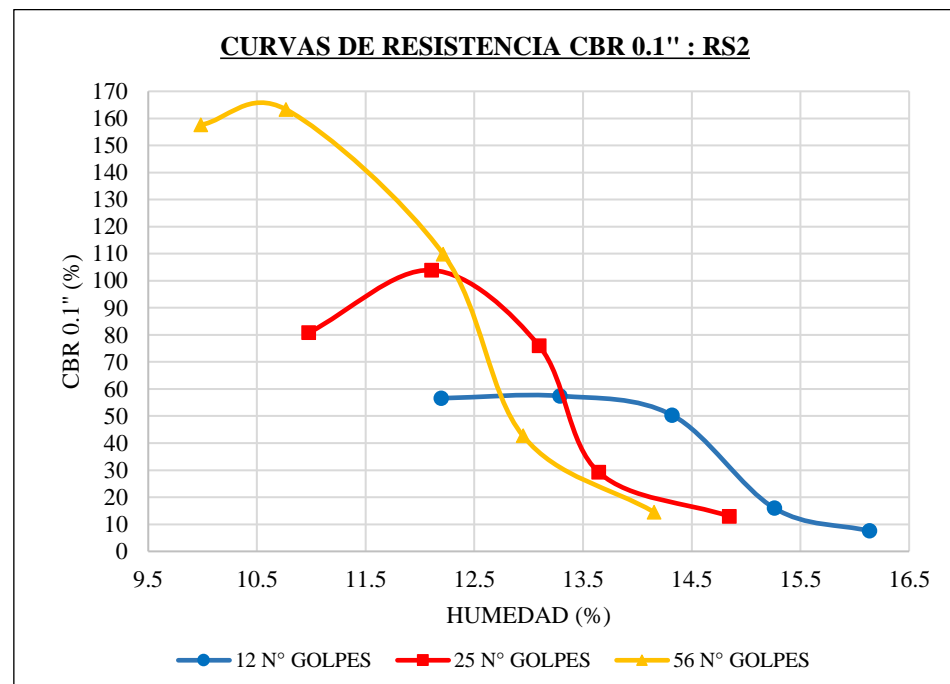
*Curvas de resistencia CBR 0.1" del suelo: RS3*



Nota: Curvas de resistencia CBR , del suelo : ML (RS3).

**Figura 54**

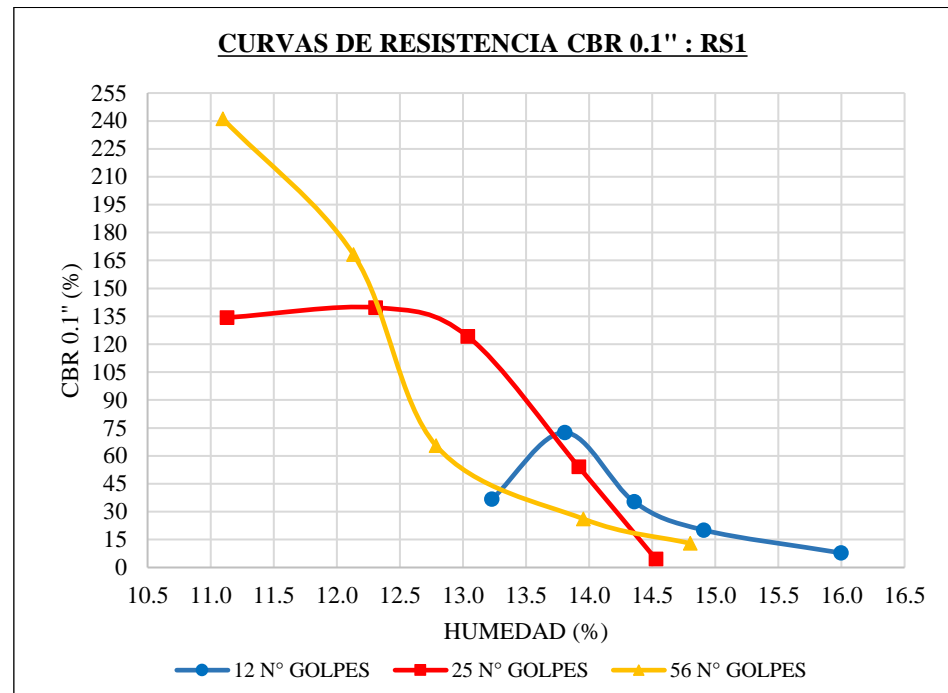
*Curvas de resistencia CBR 0.1" del suelo: RS2*



Nota: Curvas de resistencia CBR ,del suelo : SM (RS2).

**Figura 55**

*Curvas de resistencia CBR 0.1" del suelo: RS1*



Nota: Curvas de resistencia CBR, muestras de suelo: SW-SM (RS1).

## **B. Procedimiento de obtención de las curvas de diseño**

Los datos derivados del experimento factorial CBR se procesaron con el software de análisis estadístico OriginPro 2023b. Se presentan a continuación los pasos empleados para obtener las curvas de diseño RAMCODES.

- Los datos obtenidos del experimento factorial CBR se ingresaron en una nueva hoja de trabajo del programa.

**Figura 56**

*Datos del experimento factorial del suelo: RS3*

	A(X)	B(Y)	C(Z)
Long Name	W	Yd	CBR
Units	%	g/cm3	%
Comments	HUMEDAD	DENSIDAD	CBR
F(x)=			
1	13.71	1.756	132.56
2	14.78	1.777	107.18
3	15.63	1.792	69.95
4	16.67	1.776	29.3
5	18.04	1.734	8.82
6	14.88	1.683	73.61
7	15.88	1.708	65.14
8	17	1.731	49.07
9	17.97	1.727	30.58
10	18.98	1.7	7.25
11	16.63	1.648	37.93
12	17.66	1.662	31.67
13	18.71	1.679	28.16
14	19.75	1.671	8.62
15	20.88	1.65	1.92

Nota: Datos del ensayo factorial del suelo: RS3 (ML).

**Figura 57**

*Datos del experimento factorial del suelo: RS2*

	A(X)	B(Y)	C(Z)
Long Name	W	Yd	CBR
Units	%	g/cm3	%
Comments	HUMEDAD	DENSIDAD	CBR
F(x)=			
1	9.98	1.862	157.59
2	10.77	1.903	163.28
3	12.21	1.941	109.8
4	12.95	1.91	42.67
5	14.15	1.86	14.51
6	10.98	1.777	80.77
7	12.11	1.864	103.9
8	13.1	1.876	75.95
9	13.64	1.863	29.23
10	14.85	1.828	12.94
11	12.2	1.769	56.6
12	13.29	1.8	57.43
13	14.32	1.825	50.35
14	15.26	1.791	15.96
15	16.14	1.772	7.54

Nota: Datos del ensayo factorial del suelo: RS2 (SM).



**Figura 58**

*Datos del experimento factorial del suelo: RS1*

	A(X)	B(Y)	C(Z)
Long Name	W	Yd	CBR
Units	%	g/cm3	%
Comments	HUMEDAD	DENSIDAD	CBR
F(x)=			
1	11.1	1.921	241.22
2	12.13	1.942	168.11
3	12.79	1.932	65.42
4	13.95	1.892	26.1
5	14.8	1.847	12.94
6	11.13	1.844	134.32
7	12.31	1.873	139.69
8	13.04	1.911	124.16
9	13.92	1.871	54.05
10	14.53	1.857	4.48
11	13.23	1.795	36.69
12	13.81	1.832	72.54
13	14.36	1.851	35.27
14	14.91	1.818	20.08
15	16	1.791	7.82

Nota: Datos del ensayo factorial del suelo: RS1 (SW-SM).

- A partir de los datos ingresados, se generó una representación matricial

Figura 59

Red matricial del suelo: RS3

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	72.12454	69.96195	67.66715	65.23731	62.67082	59.98808	57.1319	54.16715	51.07927	47.87146	44.5392	41.05219	37.73177	36.07876	34.2219
2	73.71664	71.53564	69.2145	66.74898	64.13611	61.37579	58.47221	55.43402	52.27326	49.00473	45.56188	42.29339	39.30255	36.99643	34.8901
3	75.40459	73.21271	70.87399	68.38239	65.7327	62.92386	59.96262	56.86499	53.65531	50.36733	47.05555	43.82679	40.85665	38.22768	35.8109
4	77.18464	74.98903	72.64182	70.13459	67.45765	64.60613	61.589	58.43254	55.17553	51.86591	48.56852	45.35704	42.32828	39.51603	36.8781
5	79.05	76.85622	74.50923	71.99849	69.30583	66.41418	63.3318	60.10141	56.77995	53.42411	50.09165	46.8431	43.73223	40.7876	38.0085
6	80.99087	78.80049	76.45941	73.9593	71.27074	68.3411	65.1671	61.83161	58.41922	54.98934	51.59052	48.26741	45.0586	41.99218	39.0891
7	82.99575	80.80265	78.46281	75.9813	73.33769	70.38597	67.05376	63.57146	60.04642	56.52285	53.03517	49.61516	46.29152	43.0897	40.0357
8	85.05502	82.84318	80.47936	77.98305	75.39017	72.50375	68.87701	65.25147	61.61801	57.99571	54.40791	50.87686	47.42251	44.06369	40.8209
9	87.16612	84.91376	82.48599	79.89238	77.12041	74.01597	70.49504	66.82252	63.10751	59.39139	55.70035	52.05144	48.45594	44.92301	41.46
10	89.33648	87.02527	84.50361	81.76947	78.80059	75.54814	72.01667	68.30682	64.51601	60.70657	56.91273	53.14614	49.40743	45.69466	42.0046
11	91.58156	89.20145	86.57416	83.69802	80.56656	77.17601	73.55061	69.75224	65.85864	61.94415	58.05058	54.17381	50.29841	46.41243	42.5032
12	93.92012	91.46751	88.73109	85.71521	82.42842	78.8876	75.12516	71.19036	67.14763	63.10158	59.12355	55.15043	51.14895	47.10404	42.9997
13	96.37106	93.845	90.9957	87.83518	84.38474	80.6753	76.74737	72.6476	68.419	64.17399	60.16219	56.0918	51.96925	47.77924	43.5057
14	98.95267	96.35221	93.38234	90.06376	86.43069	82.52828	78.40987	74.13418	69.76791	65.42757	61.19975	56.99258	52.74901	48.4219	43.987
15	101.6834	99.0063	95.90234	92.40291	88.55743	84.4278	80.08388	75.60141	71.06363	66.55929	62.14235	57.79597	53.45124	48.99472	44.3570
16	104.58332	101.82525	98.56609	94.852	90.75217	86.3485	81.72865	76.98303	72.20323	67.47572	62.8651	58.39425	54.00826	49.4732	44.4794
17	107.67586	104.82947	101.38336	97.4071	92.99787	88.26179	83.30444	78.22849	73.13329	68.11252	63.2494	58.61232	54.23906	49.91262	44.2166
18	110.98995	108.04243	104.36071	100.05675	95.27018	90.13593	84.77555	79.30009	73.81376	68.4146	63.19242	58.22782	53.59634	49.32404	42.8093
19	114.56332	111.48927	107.49238	102.77095	97.52968	91.93252	86.10906	80.17151	74.22431	68.36458	62.67423	57.20035	51.89636	46.40877	39.9646
20	118.44938	115.18822	110.73449	105.47787	99.70942	93.60219	87.2739	80.82778	74.36611	67.98704	61.77004	55.74669	49.84823	43.84921	37.4698
21	122.73699	119.10861	113.93413	108.0246	101.70387	95.08539	88.24342	81.26501	74.25477	67.32333	60.56944	54.05377	47.76579	41.61268	35.4854
22	127.63627	122.91701	116.66785	110.14596	103.38012	96.32793	89.00482	81.49235	73.91352	66.40793	59.11669	52.16527	45.63171	39.51783	33.7713
23	130.98872	124.79696	118.18238	111.54953	104.64193	97.31623	89.57379	81.53604	73.37432	65.26949	57.41656	50.03472	43.32709	37.37969	32.1185
24	127.19719	123.52795	118.18708	112.17471	105.52904	98.11536	89.99925	81.43587	72.68463	63.95677	55.4794	47.58359	40.70111	35.05349	30.4341
25	124.19901	121.38526	117.27143	112.25979	106.25061	98.86969	90.32452	81.21519	71.91015	62.58606	53.41167	44.77768	37.5554	32.48322	28.7989
26	121.4351	119.07662	115.84543	111.95572	107.11197	99.70174	90.43911	80.81408	71.12169	61.38905	51.60186	41.86983	33.66581	29.94915	27.6063
27	118.68133	116.54069	113.80217	110.70125	107.68288	99.77525	89.81712	80.0608	70.36591	60.65454	50.8202	40.69093	30.84321	29.21022	27.6049
28	115.83798	113.70058	111.01396	107.77865	103.54468	96.73434	88.01462	78.85929	69.64918	60.48133	51.39254	42.65812	35.55671	31.54914	29.092
29	112.91563	110.64675	107.78272	104.18043	99.47248	93.2285	85.65455	77.38479	68.95332	60.68583	52.662	45.23865	39.08039	34.60494	31.4073
30	109.99171	107.56076	104.51904	100.72939	95.99767	90.19123	83.41733	75.96904	68.29916	61.0885	54.0475	47.5459	41.9501	37.44517	33.9016

Nota: Red matricial del suelo RS3 (ML).

**Figura 60**

*Red matricial del suelo: RS2*

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	94.27373	91.21605	87.95168	84.49511	80.91111	77.39165	74.01466	70.57171	66.94219	63.06998	58.84593	56.16692	54.67062	52.84465	50.77649
2	96.77699	93.68092	90.34863	86.77127	82.94001	79.22802	76.07732	72.70838	69.12041	65.36442	61.66264	58.80706	56.72083	54.6629	52.44984
3	99.52656	96.43097	93.09134	89.50737	85.70631	82.03031	78.4841	75.35901	71.82785	68.25021	64.83536	61.85335	59.29462	56.897	54.46427
4	102.51981	99.45989	96.16461	92.66014	89.02371	85.41682	81.91446	78.41289	74.87161	71.35208	67.97782	64.86487	62.02099	59.34486	56.70702
5	105.74087	102.73732	99.5043	96.07715	92.52048	88.91655	85.31217	81.7028	78.09163	74.52325	71.07101	67.80001	64.72963	61.82871	59.03351
6	109.18839	106.22789	103.05186	99.67383	96.14302	92.51386	88.82791	85.11013	81.38613	77.69644	74.09331	70.62518	67.32189	64.19261	61.2361
7	112.78263	109.90365	106.77094	103.41419	99.87375	96.19386	92.41489	88.57151	84.69807	80.83406	77.02377	73.31065	69.73148	66.31407	63.0744
8	116.56871	113.74631	110.64123	107.28063	103.7013	99.94426	96.04989	92.05593	87.99907	83.91734	79.851	75.84144	71.92908	68.14996	64.52472
9	120.51727	117.74549	114.65161	111.26286	107.61683	103.75545	99.72009	95.54917	91.27833	86.9423	82.577	78.22124	73.9176	69.71159	65.64723
10	124.624	121.89654	118.79575	115.35296	111.6115	107.61807	103.41654	99.04489	94.5353	89.9164	85.21703	80.47068	75.7197	71.01888	66.43867
11	128.88935	126.19904	123.06896	119.54145	115.67275	111.51913	107.12867	102.53829	97.77421	92.85511	87.79803	82.62603	77.3759	72.10534	66.90106
12	133.31879	130.65556	127.46435	123.81205	119.77908	115.43675	110.83876	106.02015	100.99854	95.77774	90.3561	84.73993	78.94993	73.0392	67.09352
13	137.92435	135.26999	131.96614	128.13338	123.89281	119.33418	114.51588	109.47008	104.20419	98.70166	92.93192	86.87306	80.52982	73.93411	67.15122
14	142.72919	140.04229	136.53367	132.4445	127.95163	123.15468	118.11041	112.84842	107.3694	101.6331	95.56208	89.09208	82.21559	74.94475	67.28881
15	147.78098	144.94253	141.05901	136.63308	131.86302	126.82195	121.55231	116.08683	110.43675	104.55074	98.26693	91.43062	84.08073	76.24205	67.80281
16	153.21036	149.74517	145.27324	140.52302	135.51708	130.25405	124.75928	119.08209	113.27817	107.35704	101.04397	93.81855	86.08261	77.95003	69.06116
17	157.30253	153.32115	148.73856	143.93843	138.832	133.39491	127.66205	121.71437	115.66446	109.65378	103.97653	95.79926	87.92477	80.01633	71.40064
18	157.72804	155.16111	151.35316	146.86732	141.81936	136.2507	130.24126	123.91484	117.41204	110.83599	104.01663	96.55001	89.07448	81.96602	74.81003
19	158.60243	156.63263	153.54381	149.50767	144.60291	138.90183	132.54458	125.71834	118.59906	111.29744	103.82802	96.26746	88.99446	82.51215	77.41331
20	159.63068	158.14308	155.67287	152.11672	147.37328	141.47691	134.65678	127.21191	119.38425	111.33138	103.17171	95.08515	87.38321	80.40708	74.05167
21	160.63171	159.65748	157.86156	154.90139	150.33988	144.0993	136.63108	128.4497	119.86137	111.02572	102.06162	93.13554	84.50082	76.40648	68.75896
22	161.39126	160.95964	159.99357	157.9845	153.72428	146.77393	138.38277	129.3979	120.08047	110.49903	100.69443	90.76261	80.92486	71.58084	63.20168
23	161.65253	161.64554	161.50664	161.12566	157.7696	149.01608	139.54648	129.92157	120.08038	109.93233	99.40507	88.48017	77.28491	66.37512	57.19771
24	161.20425	161.27162	161.29134	161.30231	158.38963	149.14244	139.57481	129.88801	119.9313	109.5557	98.61599	88.97602	74.53598	61.44497	50.24445
25	160.0187	159.78446	159.18729	157.68821	153.79762	146.87958	138.45441	129.36762	119.77122	109.60087	98.72004	86.992	74.17457	60.08819	45.72893
26	158.26707	157.58438	156.30744	153.97428	149.96604	144.09172	136.81814	128.63972	119.77195	110.22268	99.90058	88.72867	76.79789	64.71954	54.86088
27	156.1862	155.09841	153.35862	150.67206	146.75502	141.52989	135.17904	127.96167	120.04216	111.44077	102.06658	91.87615	81.169	70.80563	62.14641
28	153.96578	152.57534	150.56507	147.7568	144.00973	139.29432	133.709	127.41479	120.54611	113.12918	104.98717	95.85097	86.05424	76.58624	68.37276
29	151.72316	150.12559	147.97163	145.15475	141.60448	137.31939	132.37598	126.90663	121.06295	114.96147	108.43121	100.25659	90.73055	81.63546	73.64679
30	149.52075	147.78785	145.56641	142.79316	139.435	135.50616	131.07505	126.2596	121.2213	116.17659	111.49137	104.14021	94.37568	85.63958	77.94054

Nota: Red matricial del suelo RS2 (SM).

**Figura 61**

*Red matricial del suelo: RSI*

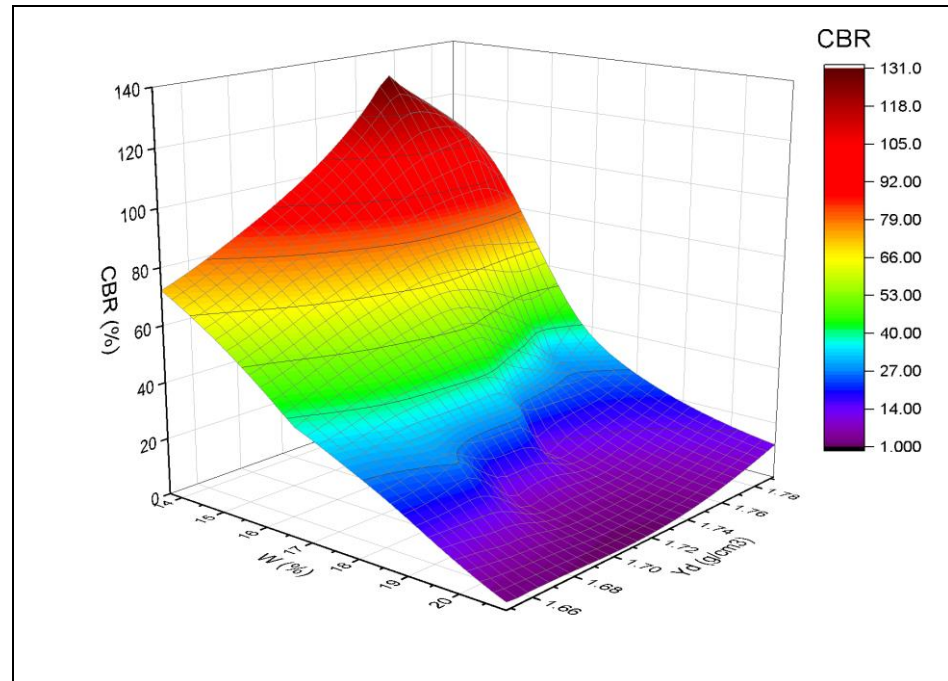
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	100.19185	96.47656	92.59497	88.53773	84.29309	79.84695	75.18269	70.28055	65.11657	59.66143	53.88233	47.76837	41.58778	37.72184	36.88138
2	102.96076	99.23864	95.35055	91.28612	87.03209	82.57268	77.88941	72.96005	67.75626	62.23872	56.3479	49.98335	42.96077	38.649	38.85657
3	105.92051	102.2099	98.33909	94.29747	90.07164	85.64679	81.0077	76.13923	71.02666	65.65782	60.03523	54.23648	48.71458	44.95946	43.24266
4	109.06259	105.38041	101.54946	97.55882	93.39521	89.04618	84.50312	79.76402	74.8376	69.75264	64.58247	59.50707	54.91901	51.3348	48.74925
5	112.37416	108.73511	104.96468	101.05006	96.97635	92.73267	88.3173	83.74208	79.03804	74.26504	69.52885	65.00326	60.92461	57.47398	54.56003
6	115.83841	112.25483	108.5645	104.74825	100.78501	96.66237	92.38331	87.9706	83.47111	78.96168	74.555	70.39761	66.63898	63.34867	60.40139
7	119.43485	115.91775	112.32919	108.63363	104.79544	100.79614	96.64068	92.35898	88.00748	83.67079	79.46124	75.51004	71.94085	68.81667	66.05103
8	123.13873	119.70098	116.24573	112.69789	108.99459	105.10857	101.04593	96.84137	92.55627	88.27805	84.11748	80.20108	76.65643	73.59061	71.05611
9	126.9183	123.5845	120.32133	116.95612	113.38973	109.59324	105.57752	101.38075	97.06574	92.71898	88.44757	84.37264	80.6209	77.3194	74.60466
10	130.725	127.57392	124.61901	121.46167	118.01117	114.26217	110.23479	105.96758	101.52019	96.97471	92.43168	88.00053	83.78614	79.8708	76.27394
11	134.48777	131.90792	129.32206	126.30349	122.90021	119.13637	115.03165	110.61447	105.93397	101.06536	96.10338	91.14531	86.26729	81.49081	76.71929
12	140.35526	137.39742	134.62536	131.5379	128.07591	124.22862	119.98664	115.34879	110.34259	105.03699	99.53018	93.91892	88.2655	82.56346	76.69453
13	146.61514	143.479	140.3871	137.10247	133.50338	129.52676	125.11342	120.20612	114.79256	108.94316	102.78339	96.43179	89.95911	83.36666	76.56474
14	152.82173	149.62861	146.3275	142.85387	139.09368	134.98227	130.41207	125.22761	119.33117	112.82173	105.90763	98.75387	91.45024	84.02563	76.44607
15	159.00864	155.76776	152.32245	148.64852	144.71742	140.48898	135.84638	130.46505	123.98876	116.65663	108.89401	100.90249	92.76644	84.54201	76.28048
16	165.19082	161.87768	158.263	154.36533	150.21035	145.82996	141.22595	136.0073	128.6777	120.29278	111.66512	102.86187	93.90277	84.85225	75.85163
17	171.38512	167.95805	164.12	159.91655	155.40978	150.67717	145.81466	140.837	132.50501	123.37798	114.12255	104.64007	94.89622	84.94451	74.96091
18	177.61997	174.02884	169.89114	165.27076	160.24723	154.88723	149.16637	142.69771	134.76768	125.79047	116.29312	106.33925	95.89662	84.99136	73.76869
19	183.94013	180.13267	175.60863	170.45478	164.77555	158.64765	152.06265	144.8159	136.74324	127.88891	118.37321	108.16627	97.17347	85.36863	72.84214
20	190.40842	186.33224	181.32507	175.51762	169.07025	162.12051	154.74205	146.93465	138.66841	129.91375	120.5605	110.35778	99.03895	86.5217	72.91991
21	197.10672	192.70482	187.09342	180.48816	173.14652	165.30059	157.13321	148.78156	140.33727	131.79185	122.90067	113.09086	101.7329	88.72176	74.49427
22	204.13989	199.33637	192.9447	185.34659	176.9454	168.075	159.01262	150.01825	141.34025	133.12771	125.16846	116.44082	105.3454	91.78669	77.20126
23	211.64729	206.30844	198.84633	189.99321	180.34391	170.29078	160.14725	150.26327	141.07951	133.07729	126.51256	120.33617	109.76291	94.76357	79.7884
24	219.83623	213.6379	204.58674	194.18825	183.16719	171.82391	160.3892	149.22142	138.92047	130.34538	124.48787	122.44264	112.54707	95.23935	80.70488
25	229.10932	220.92125	209.47941	197.47782	185.22161	172.66598	159.81666	146.91664	134.61196	124.02966	116.41446	111.35042	103.11831	90.91929	79.15249
26	240.5033	225.30488	212.07103	199.28108	186.39439	173.01656	158.86311	143.92623	128.72682	114.62944	103.89249	97.22097	91.36118	84.0563	75.9513
27	230.66127	222.67674	211.3806	199.35326	186.79246	173.31607	158.34213	141.47504	122.90374	103.72126	88.51012	83.38893	81.30078	77.74597	72.70373
28	223.59898	217.45618	208.49211	198.07067	186.69947	174.10396	159.2631	141.15235	119.98612	96.00851	68.24638	73.9677	75.27751	73.91517	70.72277
29	217.52518	212.17578	204.74641	195.91779	186.18076	175.54811	162.48676	143.78489	121.90587	99.46233	81.45797	76.20077	75.13383	73.41839	70.6396
30	212.04127	207.13209	200.66494	193.03395	184.68364	176.08687	168.37346	147.18916	126.20094	107.11071	92.32727	83.69744	79.07154	75.68203	72.33921

Nota: Red matricial del suelo RSI (SW-SM).

- Utilizando la red matricial se elaboran superficies de respuesta tridimensional y mapas de contornos de resistencia.

**Figura 62**

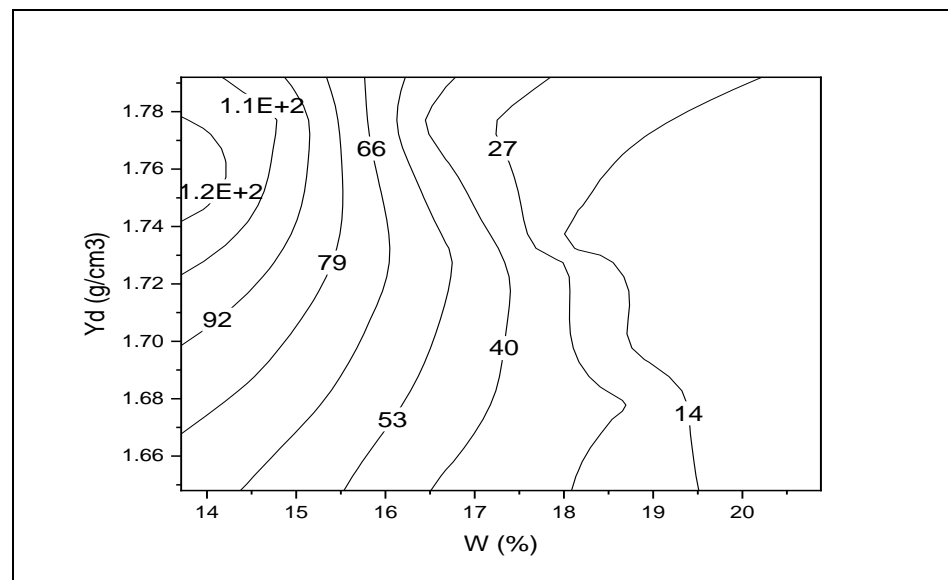
*Superficie de respuesta tridimensional del suelo: RS3*



Nota: Superficie de respuesta del suelo RS3 (ML).

**Figura 63**

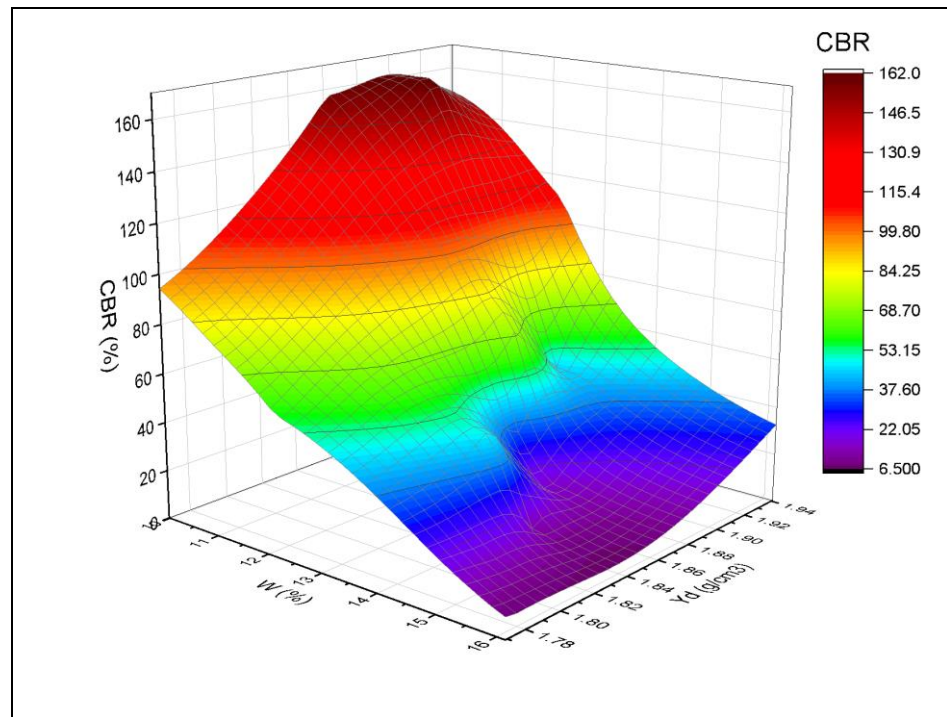
*Mapa de resistencia del suelo: RS3*



Nota: Mapa de resistencia del suelo RS3 (ML).

**Figura 64**

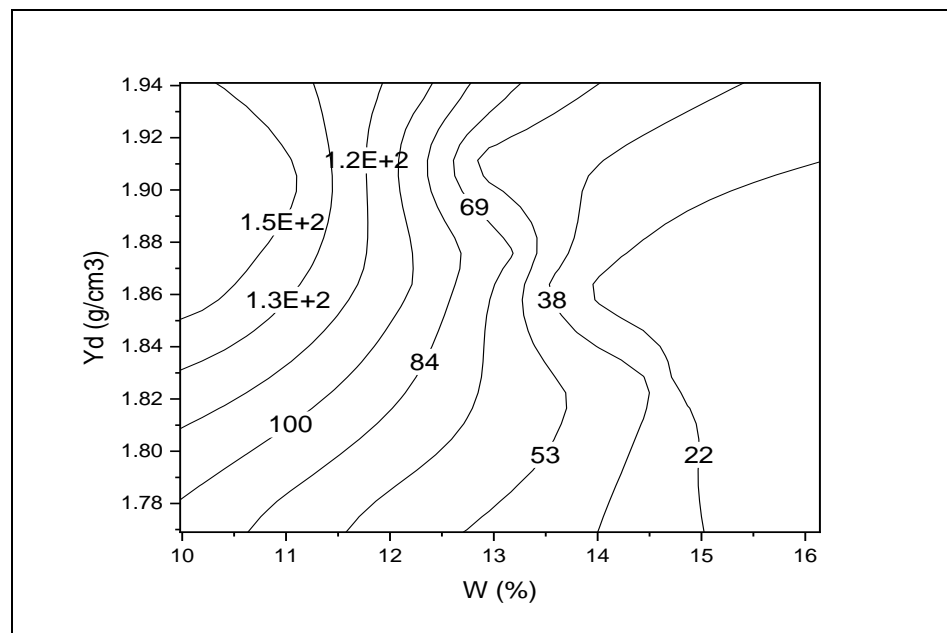
*Superficie de respuesta tridimensional del suelo: RS2*



Nota: Superficie de respuesta del suelo RS2 (SM).

**Figura 65**

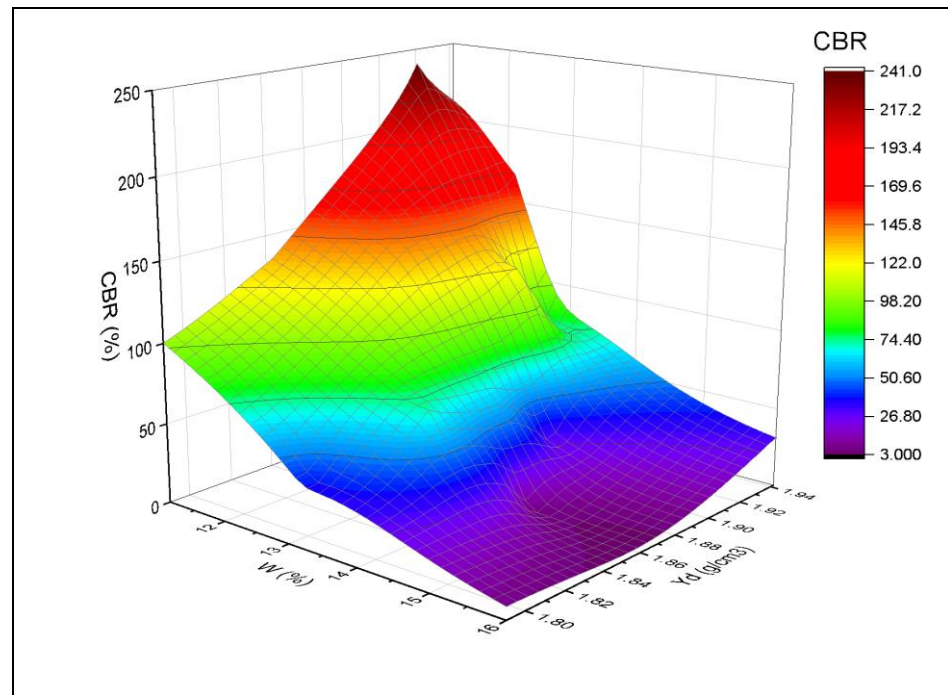
*Mapa de resistencia del suelo: RS2*



Nota: Mapa de resistencia del suelo RS2 (SM).

**Figura 66**

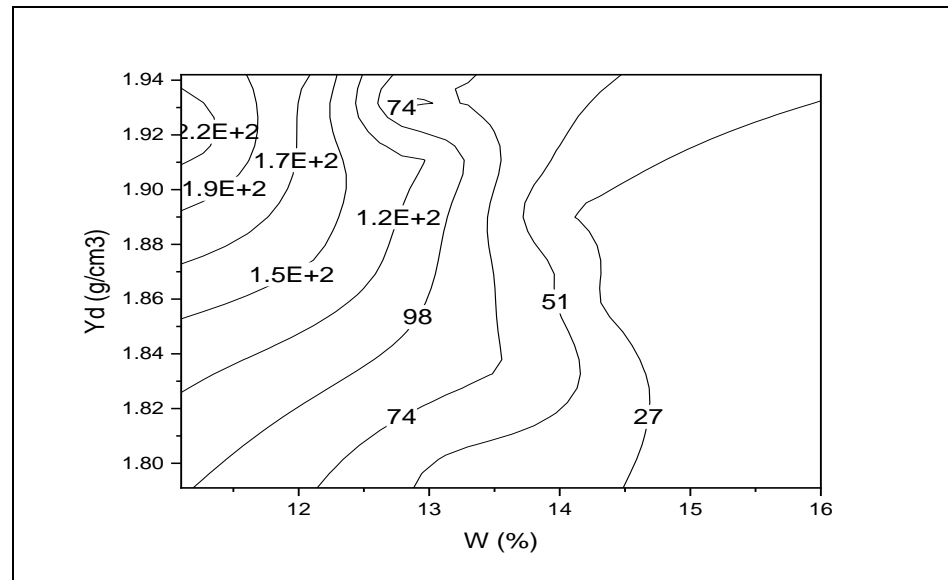
*Superficie de respuesta tridimensional del suelo: RS1*



Nota: Superficie de respuesta del suelo RS1 (SW-SM).

**Figura 67**

*Mapa de resistencia del suelo: RS1*



Nota: Mapa de resistencia del suelo RS1 (SW-SM).

- Se realizan hojas de cálculo en Excel, donde se ingresaron diferentes valores de contenido de agua, tal como se preparó para los ensayos



factoriales de los suelos: RS3 (ML), RS2 (SM), RS1 (SW-SM) con el fin de obtener las curvas de saturación. Mediante la siguiente ecuación:

$$\gamma_d = \frac{\gamma_w}{\frac{1}{G_s} + \frac{w}{S_r}}$$

Donde:

$\gamma_d$  = Densidad seca del suelo (g/cm<sup>3</sup>)

$\gamma_w$  = Densidad del agua (g/cm<sup>3</sup>)

$G_s$  = Gravedad específica de los sólidos

$w$  = humedad del suelo (%)

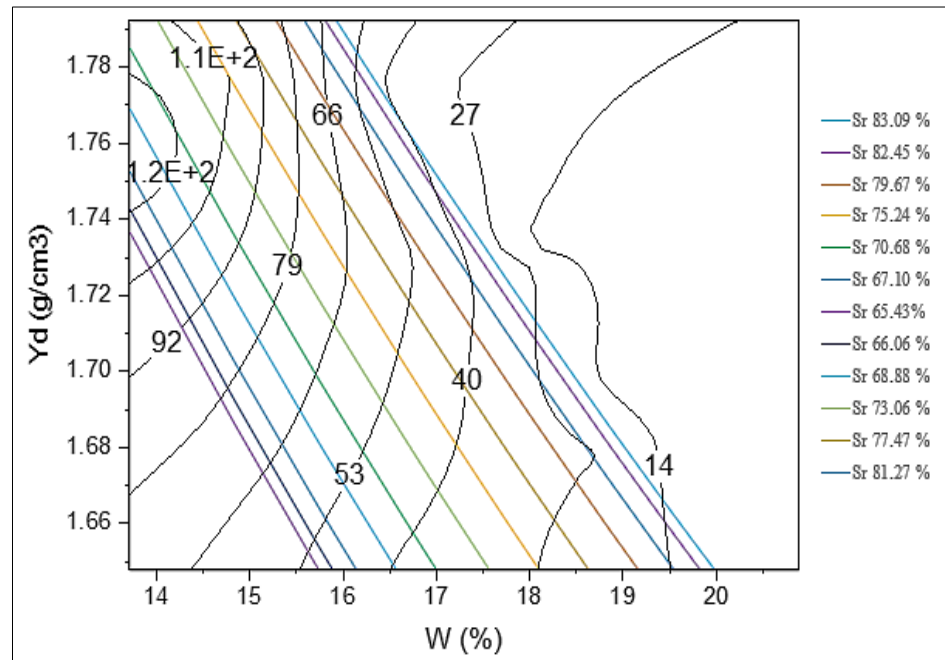
$S_r$  = Grado de saturación del suelo (%)

- Se añadieron al mapa de contornos de los suelos: RS3 (ML), RS2 (SM), RS1 (SW-SM), las curvas de saturación correspondiente a cada mes del año. Se observa a continuación (Anexo 12):



**Figura 68**

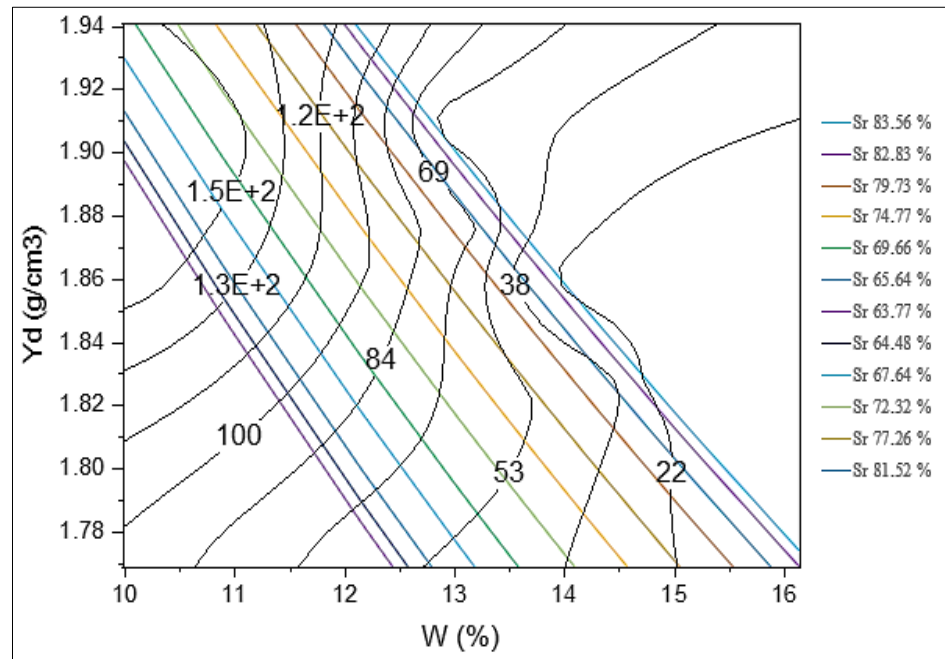
*Mapas de resistencia vs curvas de saturación: RS3*



Nota: Mapa de resistencia vs curvas de saturación del suelo RS3 (ML).

**Figura 69**

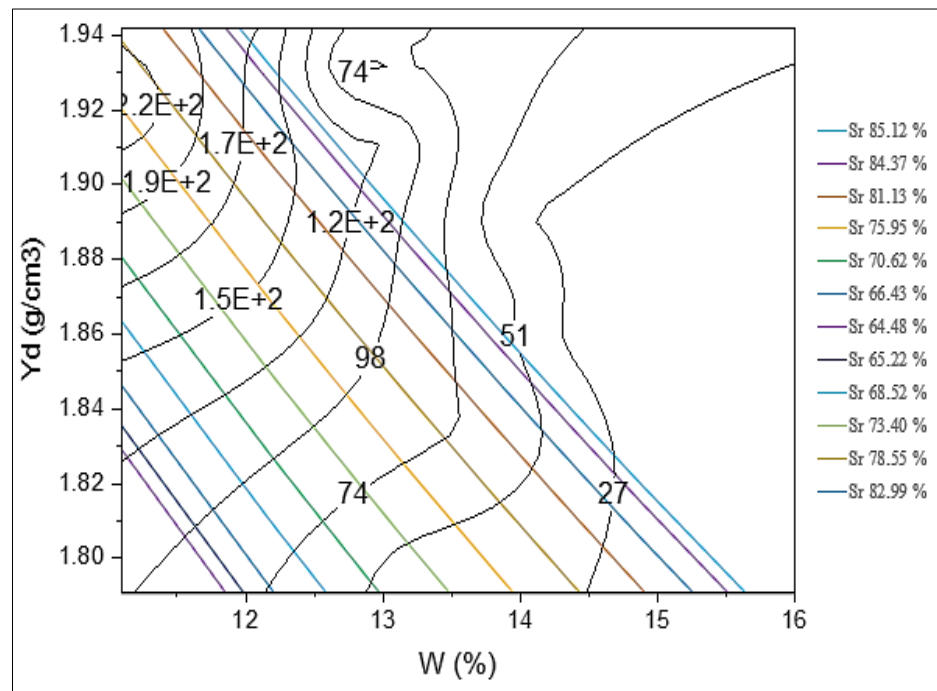
*Mapas de resistencia vs curvas de saturación: RS2*



Nota: Mapa de resistencia vs curvas de saturación del suelo RS2 (SM).

**Figura 70**

*Mapas de resistencia vs curvas de saturación: RS1*

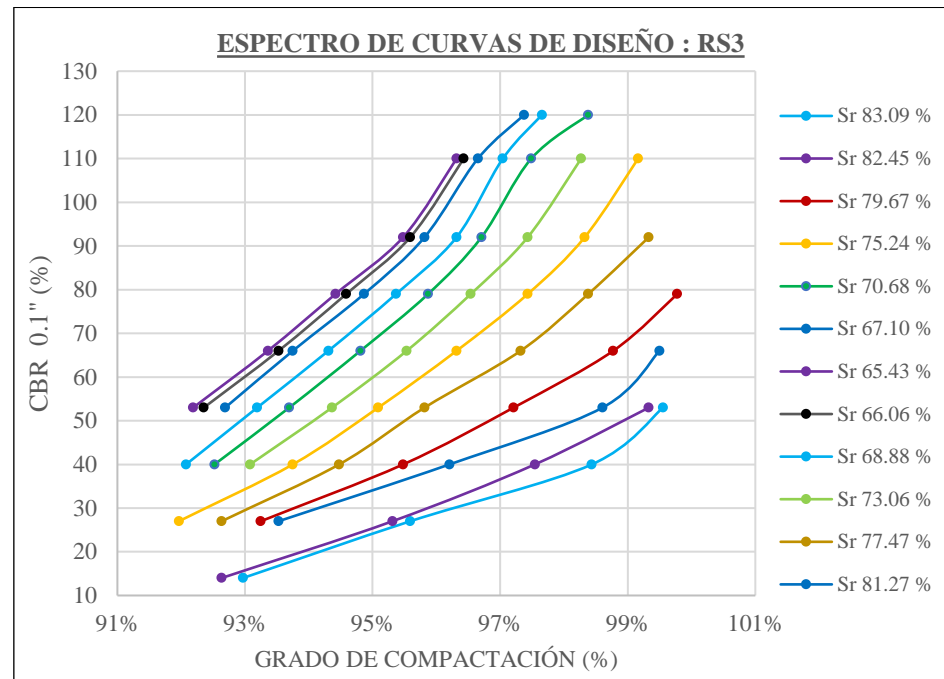


Nota: Mapa de resistencia vs curvas de saturación del suelo RS1 (SW-SM).

- Utilizando los datos consignados en la hoja de cálculo Excel, se elaboraron las curvas de diseño RAMCODES y se muestra a continuación (Anexo 13 y 14):

**Figura 71**

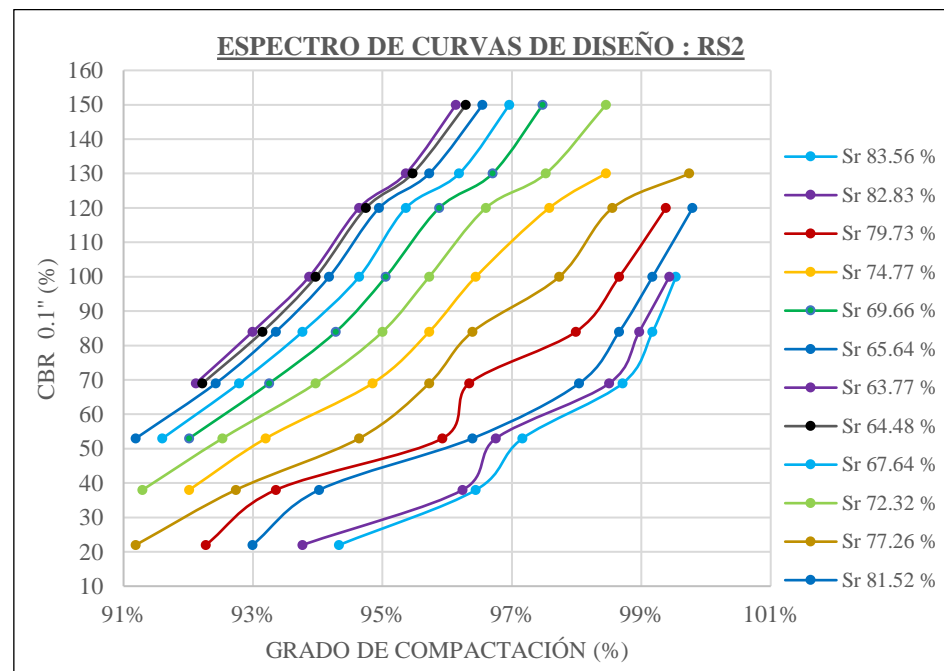
*Espectros de curvas de diseño: RS3*



Nota: Espectros de curvas de diseño del suelo RS3 (ML).

**Figura 72**

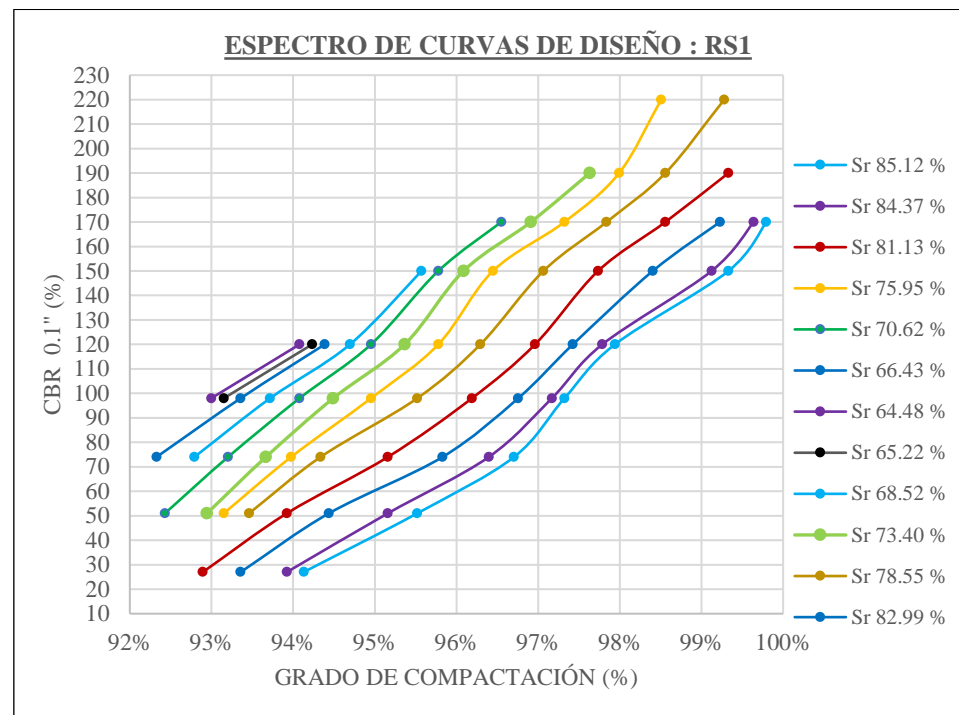
*Espectros de curvas de diseño: RS2*



Nota: Espectros de curvas de diseño del suelo RS2 (SM).

**Figura 73**

*Espectros de curvas de diseño: RS1*

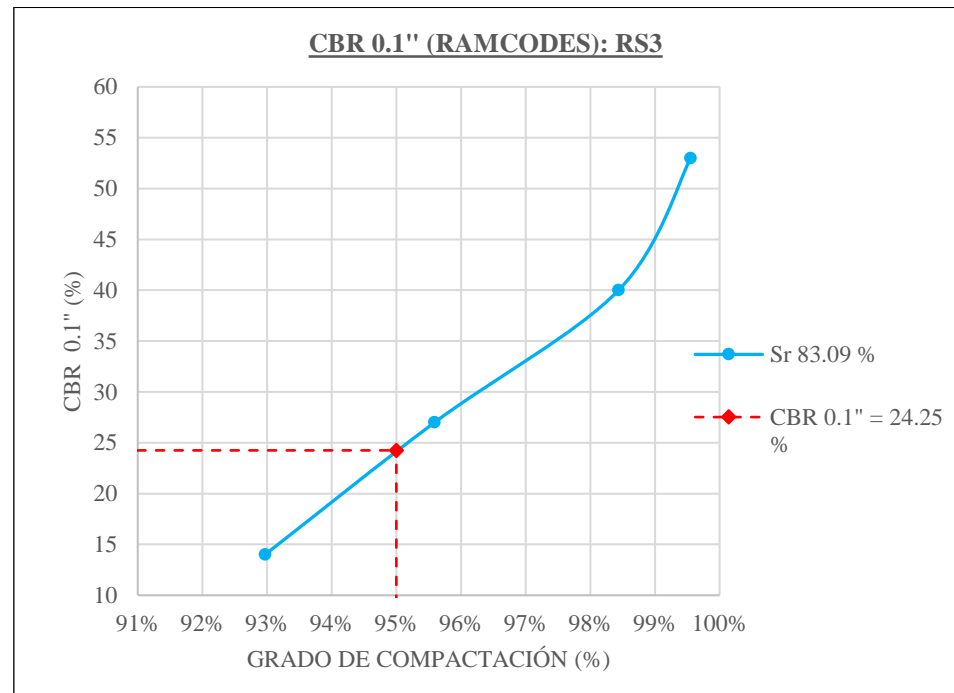


Nota: Espectros de curvas de diseño del suelo RS1 (SW-SM).

- A continuación, se muestra los CBR 0.1" al 95% de la máxima densidad seca, obtenidas por la metodología RAMCODES de los tipos de suelos estudiados: RS3 (ML), RS2 (SM), RS1 (SW-SM), según el % de saturación obtenida del suelo (Anexo 14):

**Figura 74**

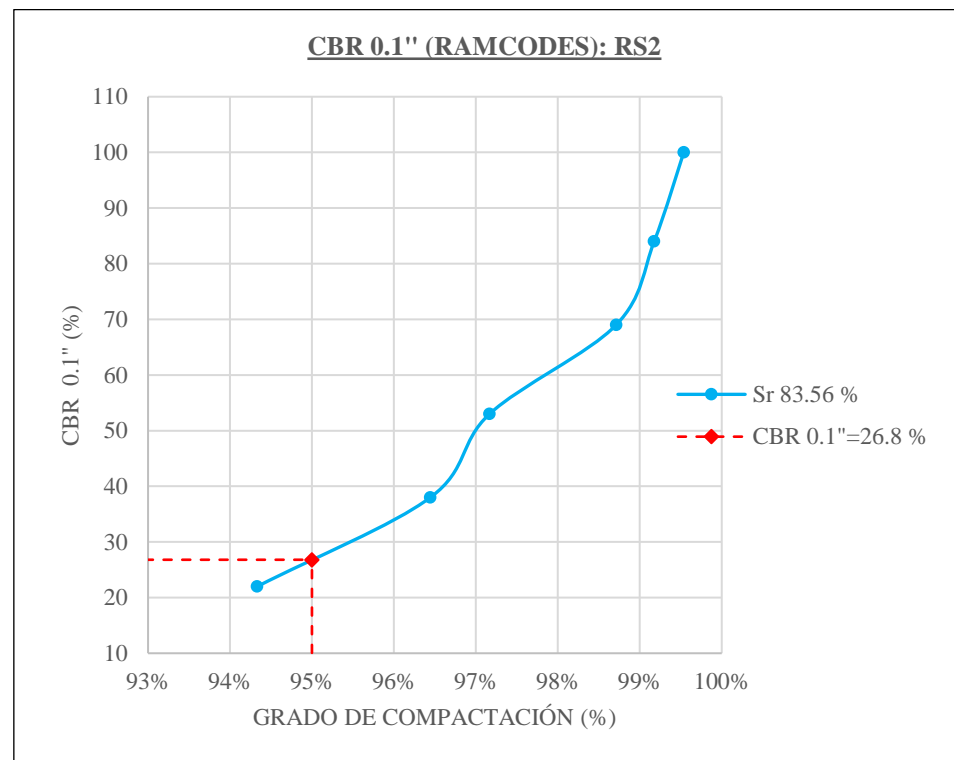
*CBR 0.1" (RAMCODES): RS3*



Nota: Obtención del CBR 0.1" a 83.09 % de saturación.

**Figura 75**

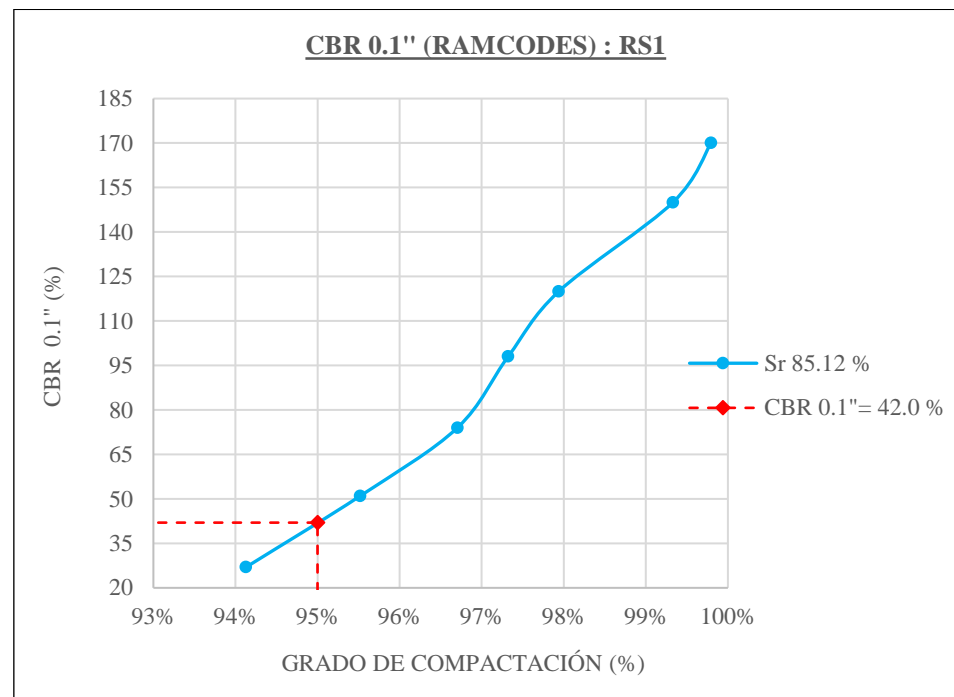
*CBR 0.1" (RAMCODES): RS2*



Nota: Obtención del CBR 0.1" a 83.56 % de saturación.

**Figura 76**

*CBR 0.1" (RAMCODES): RS1*



Nota: Obtención del CBR 0.1" a 85.12 % de saturación.

- Se obtienen los siguientes datos de CBR 0.1" al % de saturación calculada para cada suelo estudiado, mediante los espectros de curvas de diseño RAMCODES.

**Tabla 46**

*CBR 0.1": RAMCODES*

Calicata	Prog. (km)	Clasificación SUCS y RAMCODES		CBR al 95% de MDS A 0.1"
C-1; C-2	5+000	ML	RS3	24.25 %
	5+250			
C-3; C-4	7+000	SM	RS2	26.80 %
	7+500			
C-5; C-6	9+000	SW-SM	RS1	42.00 %
	9+500			

Nota: CBR 0.1", obtenido por el espectro de curvas de diseño RAMCODES.

### 3.2.5. Módulo resiliente con ensayos CBR convencional

El módulo resiliente con ensayos de CBR convencional se obtuvieron al 95 % de la (MDS), además se definió la categoría de subrasante según a los resultados de CBR a 0.1", obtenido de los suelos estudiados en la presente investigación.

**Tabla 47**

*Módulo resiliente convencional*

Clasificación SUCS y AASHTO	Prog. (km)	CBR 0.1" (%) convencional al 95% de MDS	Módulo resiliente convencional (psi)	Categoría de Sub rasante
ML; A-4 (4)	5+000	18.05	16275.6	S3: Subrasante buena
	5+250			
SM; A-2-4 (0)	7+000	22.8	18900.3	S4: Sub rasante muy buena
	7+500			
SW-SM; A-1-b (0)	9+000	38.6	26473.2	S5: Subrasante excelente
	9+500			

Nota: Obtención de resultados de módulo resiliente con ensayos de CBR convencional.

### 3.2.6. Módulo resiliente basado en curvas de diseño RAMCODES

El módulo resiliente basado en curvas de diseño RAMCODES, se obtuvieron al 95 % de la densidad máxima seca (D.M.S), el cual se obtuvo mediante los ensayos factoriales, además se definió la categoría de sub rasante según a los resultados de CBR a 0.1", obtenido de los suelos estudiados en la presente investigación.

**Tabla 48***Módulo resiliente RAMCODES*

Clasificación RAMCODES	Prog. (km)	CBR 0.1" (%) RAMCODES al 95% de DMS	Módulo resiliente con curvas de diseño RAMCODES (psi)	Categoría de Sub rasante
RS3	5+000	24.25	19661.0	S4: Sub rasante
	5+250			muy buena
RS2	7+000	26.8	20960.3	S4: Sub rasante
	7+500			muy buena
RS1	9+000	42.00	27942.8	S5: Sub rasante
	9+500			excelente

Nota: Obtención de resultados del módulo resiliente con el espectro de curvas de diseño RAMCODES.

**3.2.7. Parámetros de diseño AASHTO 93****A. Período de Diseño**

- Según la tabla 13, el intervalo de diseño que corresponde a la carretera pavimentada con bajo volumen cuyo periodo de análisis es 15-25 años.

$$\text{Periodo de diseño} = 20 \text{ años}$$

**B. Tránsito**

- MTC (2014) muestra que “el número de repeticiones acumuladas de ejes equivalentes de 8.2 ton, en el carril de diseño (cuadro 12.2)” (p. 129).

$$ESAL = 7'302,605.3 \text{ EE (ver anexo 15)}$$

- $T_{P8}$  (EE) debido a 7'302,605.3 EE (tráfico pesado expresado en EE)





### C. Factor de confiabilidad, R.

- MTC (2014) afirma que “para una etapa de diseño única (10 o 20 años), los valores sugeridos de confiabilidad basados en el rango de tráfico, de acuerdo con el cuadro 12.6” (p. 133).

$$R = 90 \%$$

### D. Desviación Estándar Normal (Zr)

- MTC (2014) “para un periodo de diseño único (10 o 20 años), el coeficiente estadístico de la desviación estándar normal (Zr), conforme al cuadro 12.8, se calcula en base al nivel de confiabilidad elegido y al rango de tráfico” (p. 135).

$$Z_r = - 1.282$$

### E. Desviación estándar combinada (So)

- MTC (2014) “recomienda adoptar “valores de So comprendidos entre 0.40 y 0.50” (p. 136).

$$S_o = 0.45$$

### F. Serviciabilidad inicial (Pi)

- MTC (2014) “se encuentra que “el índice de serviciabilidad inicial (Pi) según rango de tráfico (cuadro 12.10)” (p. 137).

$$P_i = 4.00$$



### G. Serviciabilidad final o terminal ( $P_t$ )

- MTC (2014) “se tiene que “el índice de serviciabilidad final ( $P_t$ ) según rango de tráfico (cuadro 12.11)” (p. 138).

$$P_t = 2.50$$

### H. Variación de serviciabilidad ( $\Delta PSI$ )

- MTC (2014) “se tiene que el diferencial de serviciabilidad ( $\Delta PSI$ ) según el tráfico (cuadro 12.12)” ( p. 139).

$$\Delta PSI = 4.00 - 2.50$$

$$\Delta PSI = 1.50$$

### I. Coeficiente de capa $a_i$

- El coeficiente estructural de las capas de la estructura del pavimento  $a_i$  corresponde:

- a) “Capa superficial con módulo elástico igual a 2,965 MPa (430,000 PSI) a 20 °C (68 °F)” (MTC, 2014, p. 140).

$$a_1 = 0.170 \text{ cm}$$

- b) “Base de CBR 80%, compactada al 100% de la MDS, para tráfico  $\leq 10'000,000$ ” (MTC, 2014, p. 140).

$$a_2 = 0.52 \text{ cm}$$

- c) “Subbase de CBR 40%, compactada al 100% de MDS” (MTC, 2014, p. 140).

$$a_3 = 0.047 \text{ cm}$$

## J. Coeficientes de drenaje

- “Para la definición de las secciones de estructuras de pavimento del presente manual, el coeficiente de drenaje para las, asumido fue de 1.00” (MTC, 2014, p. 142).

$$m_2 = 1.00 ; m_3 = 1.00$$

- “El espesor mínimo constructivo para las capas superficiales, que incluyen carpeta asfáltica en caliente, es de 40 mm, y el espesor mínimo constructivo para las capas es de 150 mm” (MTC, 2014, p.146).

Para el diseño se usó unas hojas de cálculo de Excel y mediante iteraciones se logra predimensionar las capas del pavimento por ambas metodologías (Anexo 16 y 17).

### 3.2.8. Parámetros de diseño mecanístico-empírico

1. **Tránsito:** de acuerdo al estudio de tráfico vial se tiene un número de ejes equivalentes:

$$ESAL = 7'302,605.3 EE$$

2. **Módulo elástico (E):**

- Carpeta asfáltica: según el MTC (2014) , para capa asfáltica a 20 °c, se tiene:

$$E = 430,000.00 PSI$$

- Base: según la figura 20, para una base granular con CBR de 80 %, se tiene:

$$E = 30,000.00 PSI$$

- Subbase: según la figura 23, para subbase granular con CBR DE 40 %, se tiene:

$$E = 17,000.00 PSI$$

- Sub rasante: según el CBR de subrasante se tiene:

$$E_1 = 23,015.00 \text{ PSI ( metodología RAMCODES)}$$

$$E_2 = 20,801.4 \text{ PSI ( metodología convencional)}$$

### 3. Coeficiente de Poisson ( $\nu$ ):

**Tabla 49**

*Coefficientes de Poisson*

Capas del pavimento	Relación de Poisson ( $\nu$ )
Carpeta asfáltica	0.35
Base	0.40
Sub base	0.40
Subrasante	0.45

Nota: Valores de Poisson por capas del pavimento. Fuente: (Minaya & Ordóñez, 2006).

4. **Espesores:** se evalúa los espesores del pavimento previamente obtenidos mediante el diseño AASHTO 93 de pavimentos flexibles.

**Tabla 50**

*Espesores de capa del pavimento flexible*

Capas del pavimento	Espesores (cm) RAMCODES	Espesores (cm) convencional
Carpeta asfáltica	6	6
Base	20	20
Sub base	25	29

Nota: Espesores previamente obtenidos por el método AASHTO 93.

5. **Esfuerzos y deformaciones admisibles:** son calculados a través del software “WinDepav” y se vuelve a establecer nuevos espesores de capa (Anexo 18).

## CAPÍTULO IV

### RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 4.1. RESULTADOS DE MÓDULO RESILIENTE RAMCODES

##### 4.1.1. Resultados de la clasificación RAMCODES

**Tabla 51**

*Resumen de la clasificación cuantitativa RAMCODES*

Calicata	Prog. (Km)	WL	F	G	FP	Tipo	Clasificación
C-1	5+000	0.273	0.5265	0.0100	0.6636	RS3	“Arenas limosas y arcillosas”
C-2	5+250	0.271	0.5297	0.0129	0.6647	RS3	“Arenas limosas y arcillosas”
C-3	7+000	0	0.2036	0.0061	0.2024	RS2	“Arenas limosas y arcillosas con grava”
C-4	7+500	0	0.2071	0.0577	0.1958	RS2	“Arenas limosas y arcillosas con grava”
C-5	9+000	0	0.0946	0.2083	0.0783	RS1	“Gravas limosas y arcillosas”
C-6	9+500	0	0.0770	0.1339	0.0689	RS1	“Gravas limosas y arcillosas”

Fuente: Elaboración propia

En la tabla se observa:

- En el artículo de Sánchez Leal (2019, p. 1636) el procedimiento RAMCODES se aplica para el diseño de suelos compactados, específicamente en suelos con resistencia propensa a la saturación, como aquellos que contienen partículas finas plásticas, GM, GC, GC-GM, SM, SC y SC-SM. De acuerdo a nuestro estudio con suelos de subrasante tales como ML, SM y SW-SM se encuentran dentro del rango de análisis y son

apropiados para uso en la construcción de la conformación de subrasante de proyectos viales.

#### 4.1.2. Resultados de la elaboración de experimentos factoriales

**Tabla 52**

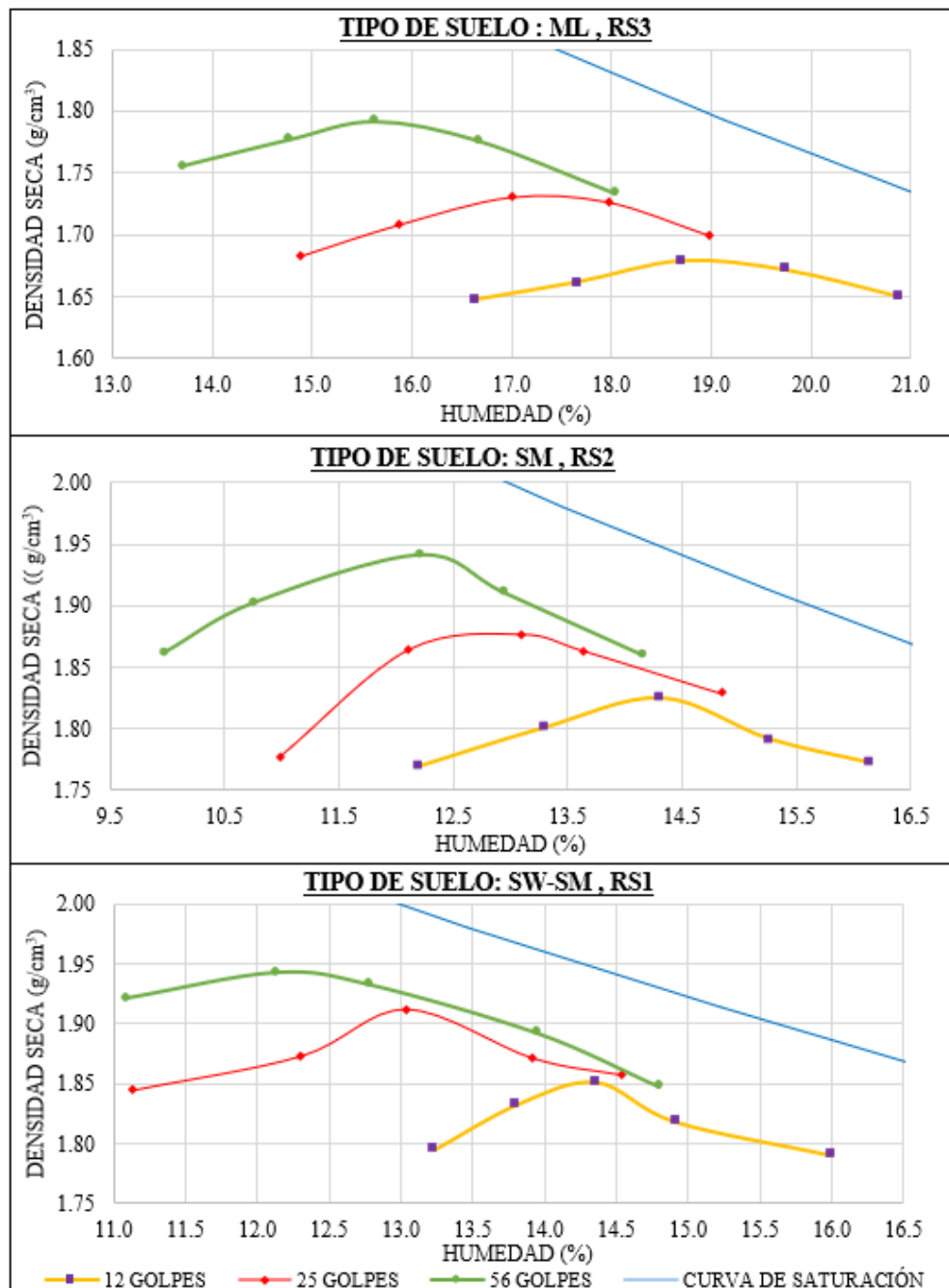
*Resumen de experimentos factoriales para suelo: RS3, RS2 y RS1*

Suelo	N° Golpes	Humedad (%)	Densidad seca (g/cm <sup>3</sup> )	CBR a 0.1'' (%)
RS3	56	13.71, 14.78, 15.63,	1.756, 1.777, 1.792,	132.56, 107.18, 69.95,
		16.67, 18.04	1.776, 1.734	29.30, 8.82
	25	14.88, 15.88, 17.00,	1.683, 1.708, 1.731,	73.61, 65.14, 49.07,
		17.97, 18.98	1.727, 1.700	30.58, 7.25
	12	16.63, 17.66, 18.71,	1.648, 1.662, 1.679,	37.93, 31.67, 28.16,
		19.75, 20.88	1.671, 1.650	8.62, 1.92
RS2	56	9.98, 10.77, 12.21,	1.862, 1.903, 1.941,	157.59, 163.28, 109.80,
		12.95, 14.15	1.910, 1.860	42.67, 14.51
	25	10.98, 12.11, 13.10,	1.777, 1.864, 1.876,	80.77, 103.90, 75.95,
		13.64, 14.85	1.863, 1.828	29.23, 12.94
	12	12.20, 13.29, 14.32,	1.769, 1.800, 1.825,	56.60, 57.43, 50.35,
		15.26, 16.14	1.791, 1.772	15.96, 7.54
RS1	56	11.10, 12.13, 12.79,	1.921, 1.942, 1.932,	241.22, 168.11, 65.42,
		13.95, 14.80	1.892, 1.847	26.10, 12.94
	25	11.13, 12.31, 13.04,	1.844, 1.873, 1.911,	134.32, 139.69, 124.16,
		13.92, 14.53	1.871, 1.857	54.05, 4.48
	12	13.23, 13.81, 14.36,	1.795, 1.832, 1.851,	36.69, 72.54, 35.27,
		14.91, 16.00	1.818, 1.791	20.08, 7.82

Fuente: Elaboración propia

**Figura 77**

*Resumen de las curvas de compactación con ensayos factoriales*

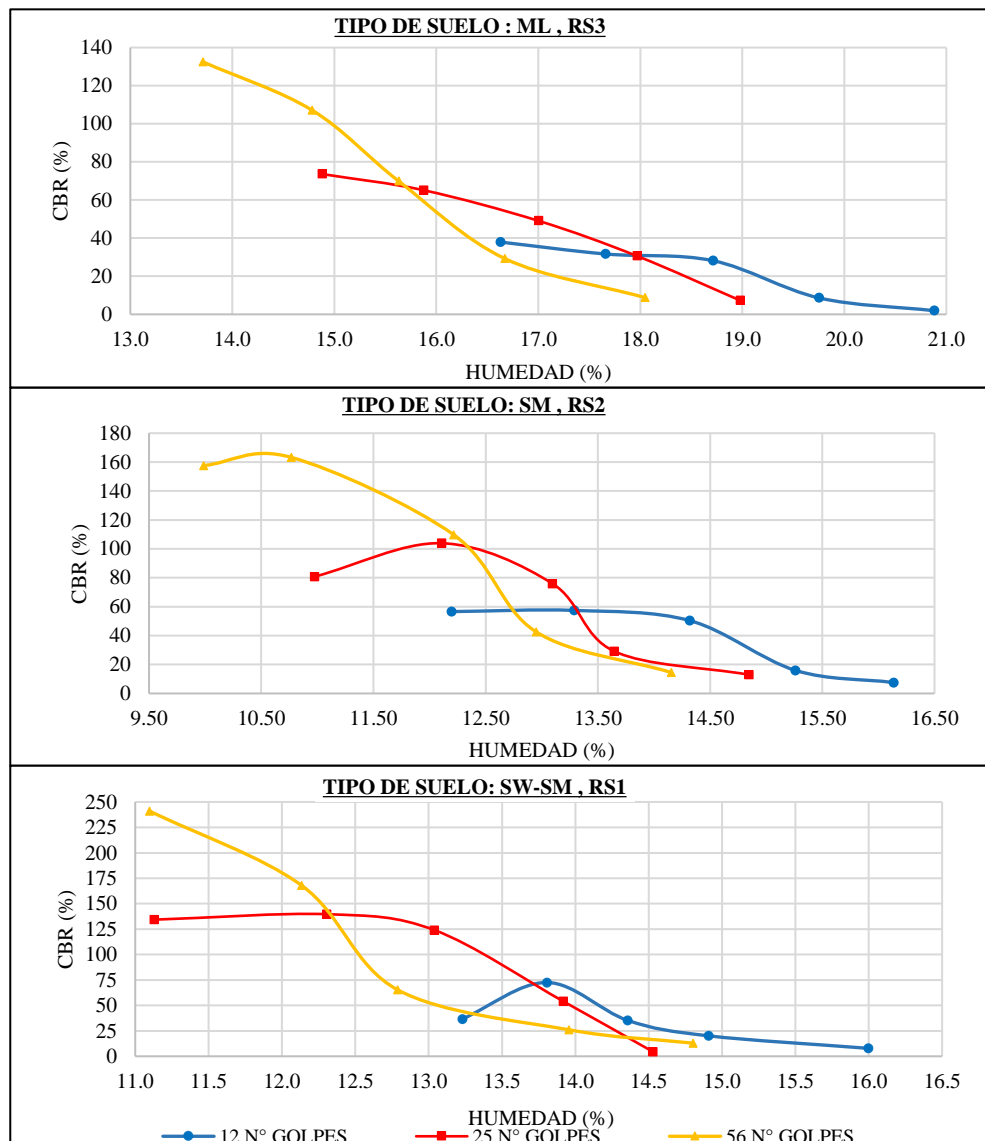


Fuente: Elaboración propia

- Conforme se incrementa el esfuerzo de compactación, el peso unitario seco máximo también se incrementa y el contenido óptimo de humedad se reduce en cierta medida. Esto verifica la correcta realización de los ensayos factoriales (Das, 2013, p. 87).

**Figura 78**

*Resumen de las curvas de resistencia CBR con ensayos factoriales*



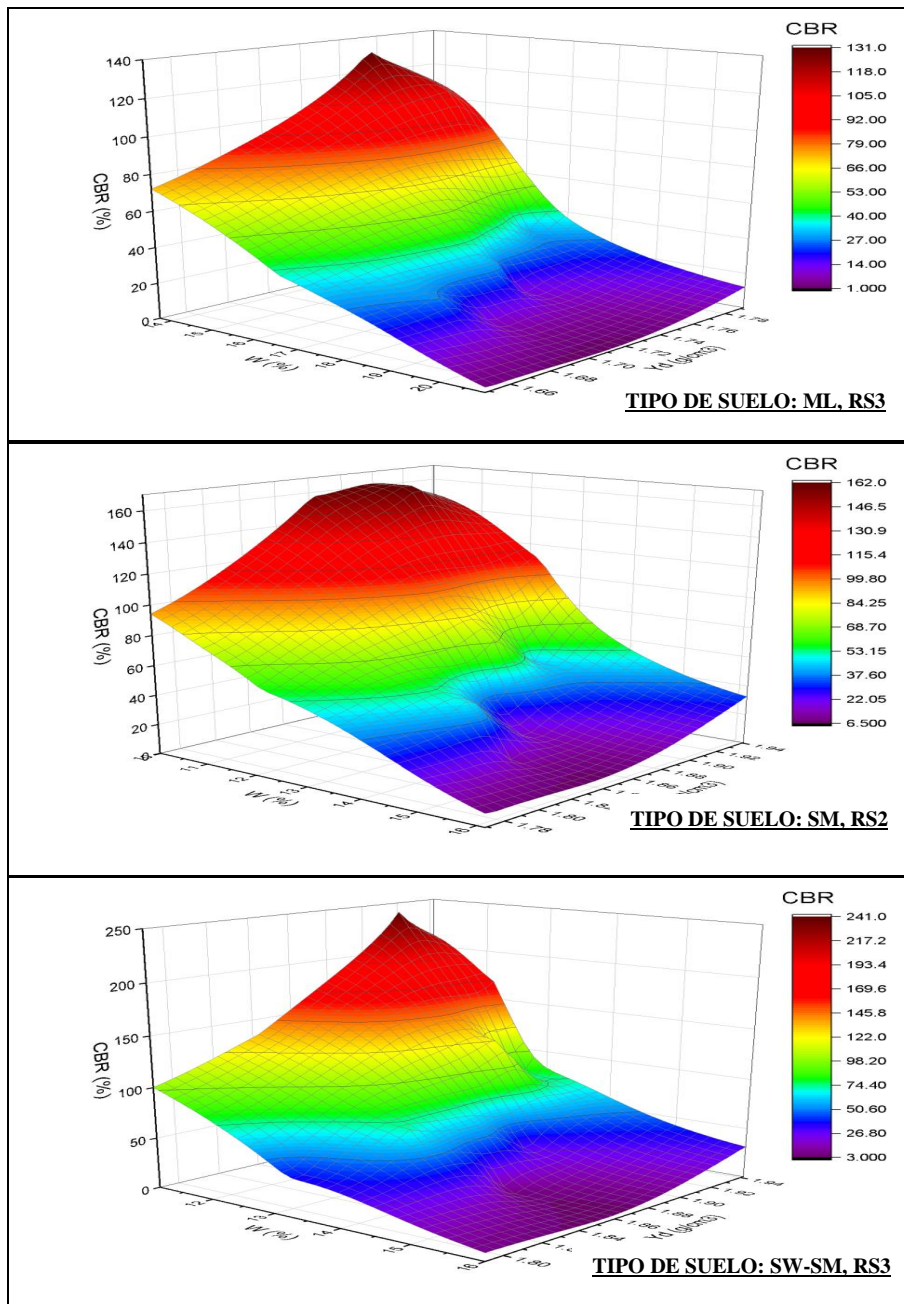
Fuente: Elaboración propia

- Las resistencias más altas no ocurren cuando el suelo tiene un peso unitario seco igual al máximo y un contenido de agua igual al óptimo, sino que se dan cuando el suelo tiene un contenido de agua inferior al óptimo; este comportamiento no es incorrecto, sino que sigue la tendencia de la arcilla de Vicksburg. (Sánchez Leal et al., 2002, p. 9)



**Figura 79**

*Resumen de superficies de respuestas tridimensionales*

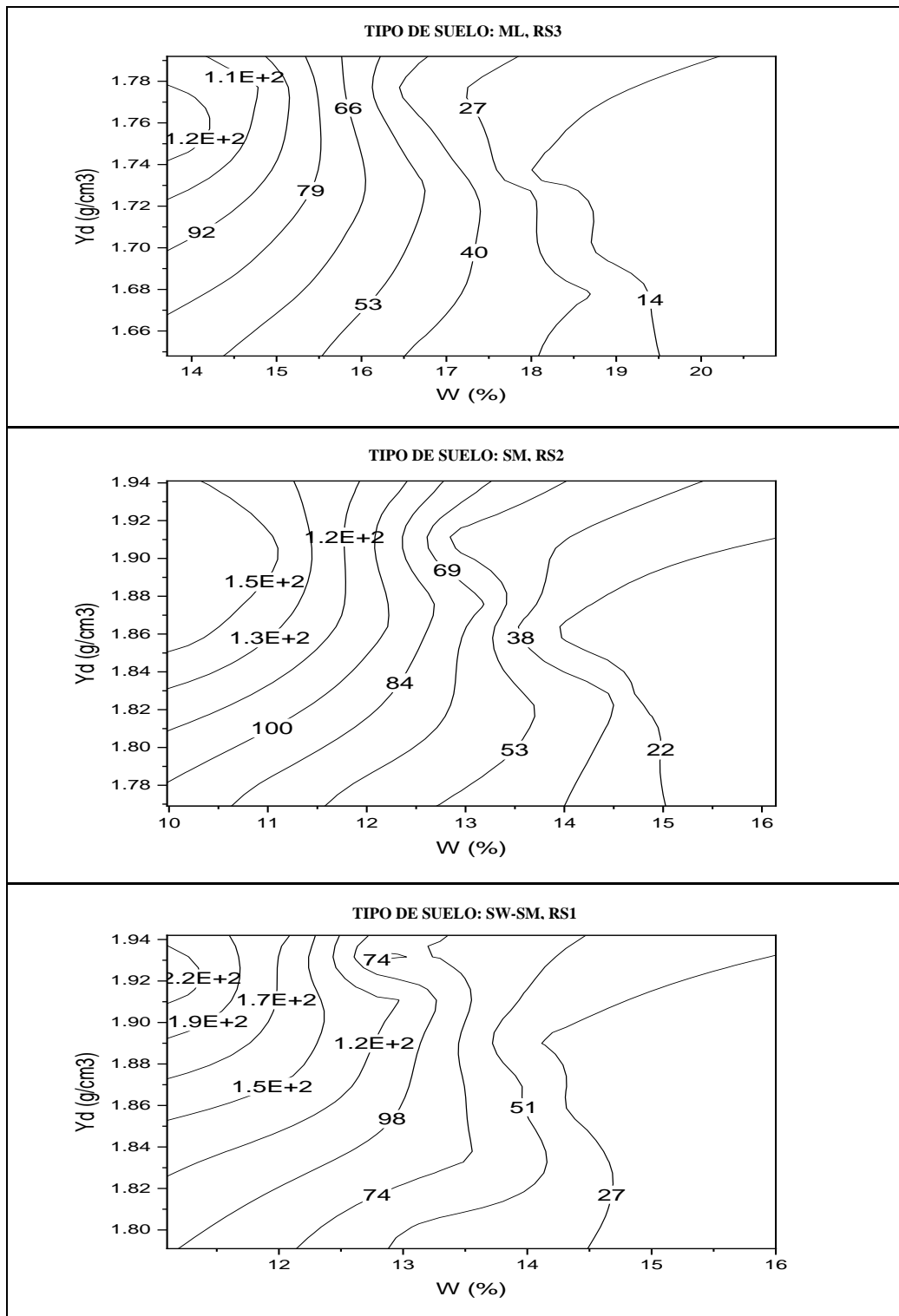


Fuente: Elaboración propia

- Las resistencias mínimas del suelo ocurren cuando tienen niveles altos de humedad, pero las resistencias máximas no ocurren cuando el suelo tiene mayor densidad. (Inga & Gutiérrez, 2022, p. 120)

**Figura 80**

*Resumen de mapas de resistencias de los suelos*



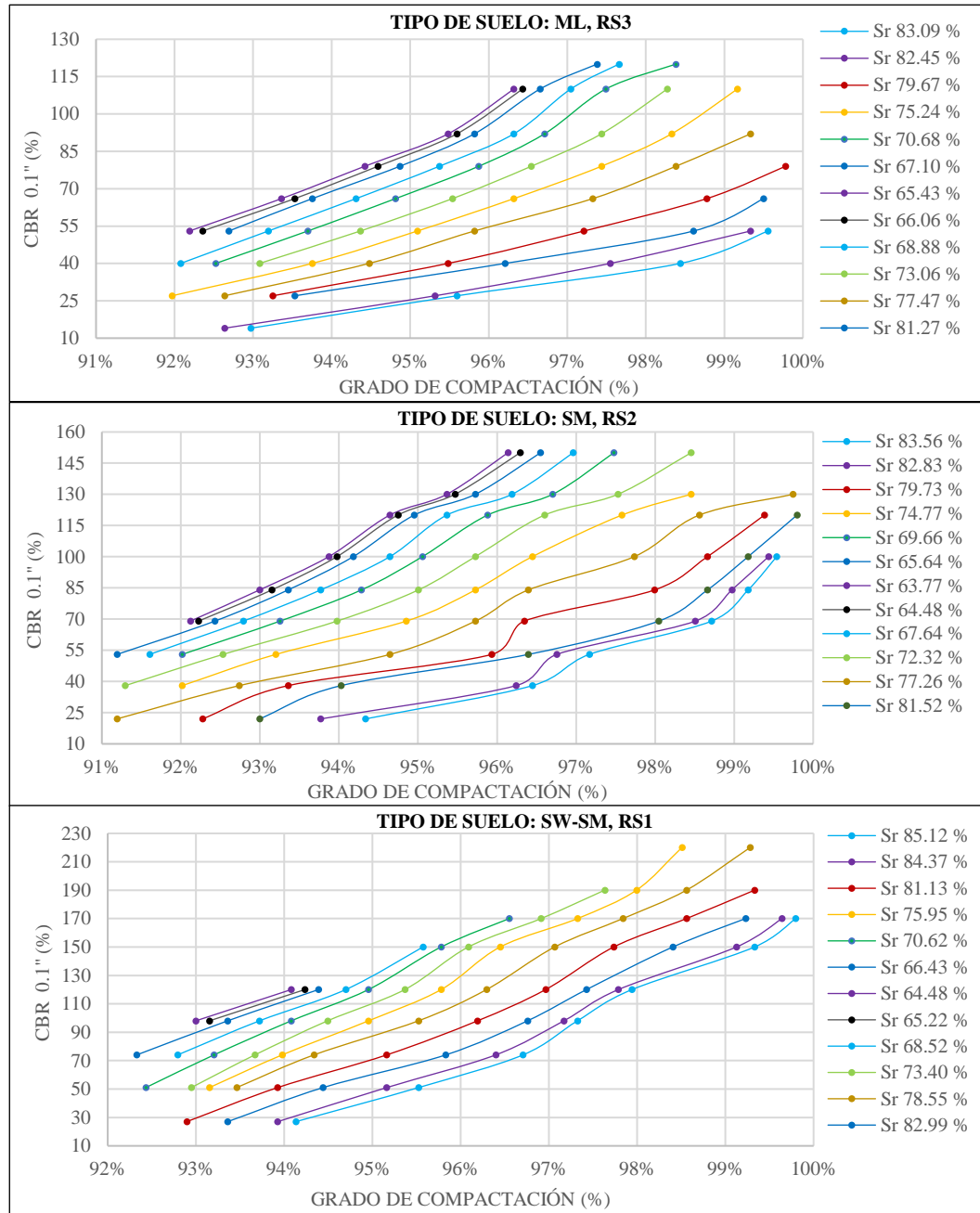
Fuente: Elaboración propia

- Las resistencias máximas de los tipos de suelos supera a las obtenidas de la arcilla de Vicksburg lo cual es correcto ya que el suelo en estudio es granular

y tienen mayor resistencia que los suelos finos (Sánchez Leal et al., 2002, p. 12).

**Figura 81**

*Resumen de espectros de curvas de diseño RAMCODES*



Fuente: Elaboración propia

- Se nota que el incremento de la resistencia del suelo está vinculado al incremento de su densidad, ya que esto incrementa el contacto entre

partículas, generando mayor fricción y, por consiguiente, mayor resistencia. Además, la disminución de la saturación del suelo también contribuye al aumento de la resistencia, explicado por las curvas características suelo-agua, que muestran una relación inversa entre la saturación y la succión del suelo: a menor saturación, mayor succión y por ende mayor resistencia (Inga & Gutiérrez, 2022, p. 120).

#### 4.1.3. Resultados de módulo resiliente basado en curvas de diseño

##### RAMCODES

**Tabla 53**

*Resumen de módulo resiliente RAMCODES correlacionado*

Calicata	Prog. (km)	Lado	Clasificación		CBR 0.1"	Módulo resiliente RAMCODES	
			SUCS	RAMCODES	AI 95% MDS	Módulo resiliente (PSI)	Módulo resiliente (kg/cm <sup>2</sup> )
C-1	5+000	Der.	ML	RS3	24.25	19661.04	1382.31
C-2	5+250	Der.					
C-3	7+000	Izq.	SM	RS2	26.80	20960.28	1473.65
C-4	7+500	Izq.					
C-5	9+000	Der.	SW-	RS1	42.00	27942.83	1964.58
C-6	9+500	Der.	SM				
<b>Promedio</b>					<b>31.02</b>	<b>23015.00</b>	<b>1618.09</b>

Fuente: Elaboración propia

En la siguiente tabla se puede observar:

- MTC (2014, p.12) los resultados de módulos resilientes para los tipos de suelos como: limo inorgánico es igual 19661.04 PSI, para arena limosa es igual a 20960.28 PSI y Arena bien graduada con limo es de 27942.83 PSI. Estos resultados se encuentran dentro de los límites establecidos por correlación de CBR.

## 4.2. RESULTADOS DE MÓDULO RESILIENTE CONVENCIONAL

### 4.2.1. Resultados de la caracterización física de la subrasante

**Tabla 54**

*Resumen de las características físicas del suelo de subrasante*

Calicata	Prog. (km)	Lado	Análisis granulométrico (%)			Límites de consistencia (%)			Clasificación de suelos	
			Grava	Arena	Finos	LL	LP	IP	SUCS	AASTHO
C-1	5+000	Der.	1.00	46.44	52.56	27.3	25.4	1.96	ML	A-4 (4)
C-2	5+250	Der.	1.29	45.75	52.97	27.1	24.9	2.3	ML	A-4 (4)
C-3	7+000	Izq.	0.61	79.03	20.36	NP	NP	NP	SM	A-2-4 (0)
C-4	7+500	Izq.	5.77	73.52	20.71	NP	NP	NP	SM	A-2-4 (0)
C-5	9+000	Der.	20.83	69.70	9.46	NP	NP	NP	SW-SM	A-1-b (0)
C-6	9+500	Der.	13.39	78.90	7.70	NP	NP	NP	SW-SM	A-1-b (0)

Fuente: Elaboración propia

se observa lo siguiente:

- Según SUCS, el suelo de subrasante del tramo en análisis se caracteriza por tres tipos de suelos, tales como: limo inorgánico (ML), arena limosa (SM) y arena bien gradada con limos (SW-SM).
- MTC (2014, p. 35) el suelo clasificado en AASTHO como A-4(4) con índice de grupo igual a 4 sería un suelo regular para su uso como subrasante, mientras que los suelos como A-2-4 (0) y A-1-b (0) con índice de grupo igual a 0, clasifica al suelo como suelo de subrasante muy bueno. Basándonos en estas premisas los tipos de suelos presentes en el tramo son apropiados para su empleo como subrasante.

#### 4.2.2. Resultados de la caracterización mecánica de la subrasante

**Tabla 55**

*Resumen de las características mecánicas del suelo de subrasante*

Calicata	prog. (km)	lado	Tipo de suelo	Gravedad específica (Gs)	Próctor modificado		CBR a 0.1" (%)	
					CHO (%)	MDS (g/cm <sup>3</sup> )	95% MDS	100% MDS
C-1 C-2	5+000	Der.	ML	2.73	17.38	1.750	18.05	25.18
	5+250	Der.						
C-3 C-4	7+000	Izq.	SM	2.70	14.55	1.852	22.80	48.35
	7+500	Izq.						
C-5 C-6	9+000	Der.	SW-SM	2.67	14.01	1.871	38.60	68.20
	9+500	Der.						

Fuente: Elaboración propia

De acuerdo a la tabla:

- Bowles (1981, p. 64) los valores típicos de gravedad específica para el tipo de suelo como: arena varían entre 2.65-2.67, arena limosa entre 2.67-2.70. Además, el MTC (2014, p. 88) establece un valor promedio de 2.725 para el limo inorgánico. Por lo tanto, los valores de gravedad específica de cada tipo de suelo de subrasante en nuestro estudio estarían dentro de los límites aceptables.
- Conforme al MTC (2014, p. 37) para el suelo limo inorgánico con CBR igual a 18.05% clasifica al suelo como subrasante buena, mientras que para los suelos como la arena limosa con CBR igual a 22.80% y la arena bien graduada con presencia de limos que tiene CBR de 38.6%; tendrían categorías de subrasante muy buena a excelente respectivamente. Además, los valores de CBR de estos 3 tipos de suelos estarían dentro de los rangos establecidos para las correlaciones típicas entre el tipo de suelo y el valor de la capacidad de soporte (CBR).

#### 4.2.3. Resultados del módulo resiliente con ensayos CBR convencional

**Tabla 56**

*Resumen de módulo resiliente convencional correlacionado*

Calicata	Prog. (km)	Lado	Clasificación		CBR a 0.1''	Módulo resiliente convencional	
			SUCS	AASHTO	Al 95 % DMS	Módulo resiliente (PSI)	Módulo resiliente (kg/cm <sup>2</sup> )
C-1	5+000	Der.	ML	A-4 (4)	18.05	16275.57	1144.29
C-2	5+250	Der.					
C-3	7+000	Izq.	SM	A-2-4 (0)	22.80	18900.32	1328.82
C-4	7+500	Izq.					
C-5	9+000	Der.	SW-SM	A-1-b (0)	38.26	26473.22	1861.25
C-6	9+500	Der.					
<b>Promedio</b>					<b>26.48</b>	<b>20801.40</b>	<b>1462.46</b>

Fuente: Elaboración propia

En la siguiente tabla se puede observar:

- De acuerdo al MTC (2014, p.37) los valores de módulos resilientes para los tipos de suelos como: limo inorgánico es igual 16275.57, para arena limosa es igual a 18900.32 y Arena bien graduada con limo es de 26473.22. Estos resultados se encuentran en concordancia con los límites establecidos para el módulo resiliente según la clasificación SUCS y AASHTO para cada tipo de suelo.

#### 4.3. CUMPLIMIENTO DE OBJETIVOS

- **Objetivo específico 1:** Determinar el módulo resiliente basado en curvas de diseño RAMCODES para el diseño de pavimentos flexibles de la carretera Calacota-Ilave, 2023, donde se tiene la siguiente tabla (Anexo 16):

**Tabla 57**

*Altura del pavimento respecto a módulo resiliente RAMCODES*

<b>Tipo de suelo</b>	<b>CBR (%)</b>	<b>Módulo resiliente (PSI)</b>	<b>Altura del pavimento (cm)</b>
ML, (RS3)	24.25	19661.04	53.00
SM, (RS2)	26.80	20960.28	53.00
SW-SM, (RS1)	42.00	27942.83	48.00
<b>Promedio</b>	31.02	23015.04	51.00

Nota: Elaboración propia

A partir de la observación de los resultados, se realiza una comparación en relación al tipo de suelo subrasante, identificado como limo inorgánico (ML), presentando:

- La altura del pavimento permanece constante cuando el suelo de subrasante pertenece a la categoría de arena limosa (SM).
- Cuando el suelo de subrasante es del tipo arena bien graduada con limo (SW-SM) la altura del pavimento disminuye en 9.43%.
- El valor promedio de la altura del pavimento en relación a los tipos de suelo del terreno se reduce en un 3.77%.



Este objetivo fue logrado al calcular el módulo resiliente a través del análisis de las curvas de diseño RAMCODES, y posteriormente evaluando este parámetro en el diseño del pavimento de la vía Calacota-Ilave.

- **Objetivo específico 2:** Evaluar el módulo resiliente basado en ensayos CBR convencional para el diseño de pavimentos flexibles de la carretera Calacota-Ilave,2023. Se tiene el siguiente cuadro (Anexo 17):

**Tabla 58**

*Altura del pavimento respecto a módulo resiliente convencional*

<b>Tipo de suelo</b>	<b>CBR (%)</b>	<b>Módulo resiliente (PSI)</b>	<b>Altura del pavimento (cm)</b>
ML, (RS3)	18.05	16275.6	58.00
SM, (RS2)	22.08	18900.3	57.00
SW-SM, (RS1)	38.60	26473.2	50.00
<b>Promedio</b>	26.48	20801.4	55.00

Nota: Elaboración propia

Respecto a la altura del pavimento del tipo de subrasante caracterizado como limo inorgánico (ML), se deduce:

- Cuando el suelo de subrasante tiene las características de arena limosa, se tiene una reducción del 1.27% en la altura del pavimento.
- Cuando el suelo de subrasante es del tipo arena bien graduada con limo la altura del pavimento se reduce en 13.79%.
- Finalmente, cuando se toma un promedio de CBR, la altura del pavimento se reduce en un 8.62%.

Se cumplió con el objetivo establecido al poder calcular el módulo resiliente utilizando ensayos CBR convencionales, lo que habilita su utilización en la evaluación del diseño del pavimento flexible.

- **Objetivo específico 3:** Explicar la diferencia de costo entre el diseño de pavimentos flexibles con las curvas de diseño RAMCODES y los ensayos CBR convencional.

Se presenta (Anexo 19):

**Tabla 59**

*Costo del diseño de pavimento flexible RAMCODES*

Ítem	Descripción	Unid	Metrado	Precio	Parcial	Subtotal	Total
<b>01</b>	<b>Pavimento flexible</b>						<b>444,906.00</b>
	Material						
01.01	seleccionado para subbase					175,266.00	
01.01.01	Extracción y apilamiento	m3	12,600.0	4.78	60,228.00		
01.01.02	Carguío	m3	12,600.0	2.07	26,082.00		
01.01.03	Transporte a la obra	m3	12,600.0	7.06	88,956.00		
01.02	Conformación de subbase					269,640.00	
01.02.01	Sub base	m2	42,000.0	6.42	269,640.00		

Nota: Presupuesto por subpartidas de subbase para diseño RAMCODES.

**Tabla 60***Costo del diseño de pavimento flexible convencional*

Ítem	Descripción	Unid	Metrado	Precio	Parcial	Subtotal	Total
<b>02</b>	<b>Pavimento flexible</b>						<b>506,968.56</b>
	Material						
02.01	seleccionado para subbase					203,308.56	
02.01.01	Extracción y apilamiento	m3	14,616.0	4.78	69,864.48		
02.01.02	Carguío	m3	14,616.0	2.07	30,255.12		
02.01.03	Transporte a la obra	m3	14,616.0	7.06	103,188.96		
02.02	Conformación de subbase					303,660.0	
02.02.01	Sub base	m2	42,000.0	7.23	303,660.0		

Nota: Presupuesto por subpartidas de subbase para diseño convencional.

Según la información proporcionada, se observa lo siguiente:

- En la partida: “material seleccionado para subbase”, la reducción de costo es 28,042.56 s/. y representa el 13.79 %.
- En la partida: “conformación de subbase”, la reducción de costo es 34,020.00 s/. y representa el 11.20%.
- La diferencia de costo en el diseño de pavimento flexible con módulos resilientes, obtenidos por CBR RAMCODES y CBR convencional es de 62,062.56 s/. y representa 12.24 %.
- El presupuesto, la lista de insumos y el análisis de costos unitarios se adjuntan en los anexos.

- **Objetivo general:** Comparar el módulo resiliente basado en curvas de diseño RAMCODES y ensayos CBR convencional para el diseño de pavimentos flexibles de la carretera Calacota-Ilave, 2023. Se muestran los siguientes cuadros (anexo 16,17 y 18):

**Tabla 61**

*Espesores del pavimento con curvas de diseño RAMCODES*

Estructura del pavimento	Espesores (cm)			
	Tipo de suelo de subrasante			
	ML, (RS3)	SM, (RS2)	SW-SM, (RS1)	Promedio
Carpeta asfáltica	7.00	6.00	5.00	6.00
Base	20.00	20.00	20.00	20.00
Subbase	26.00	27.00	23.00	25.00
Altura Total	53.00	53.00	48.00	51.00

Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 62**

*Espesores del pavimento con ensayos CBR convencional*

Estructura del pavimento	Espesores (cm)			
	Tipo de suelo de subrasante			
	ML, (RS3)	SM, (RS2)	SW-SM, (RS1)	Promedio
Carpeta asfáltica	7.00	6.00	5.00	6.00
Base	20.00	20.00	20.00	20.00
Subbase	31.00	31.00	25.00	29.00
Altura Total	58.00	57.00	50.00	55.00

Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 63***Verificación mecánica de pavimento con curvas de diseño RAMCODES*

Criterios de diseño mecánico	Espesores (cm)				Altura total (cm)
	Carpeta asfáltica	Base asfáltica	Base	Sub base	
Instituto del asfalto	10	12	20	25	67
Shell	6	12	20	25	63

Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 64***Verificación mecánica de pavimento con ensayos CBR convencional*

Criterios de diseño mecánico	Espesores (cm)				Altura total (cm)
	Carpeta asfáltica	Base asfáltica	Base	Sub base	
Instituto del asfalto	10	12	20	29	71
Shell	6	12	20	29	67

Fuente: Elaboración propia.

Se procede a comparar el diseño de pavimentos flexibles mediante las curvas de diseño RAMCODES y ensayos CBR convencionales, para cada categoría de suelo de subrasante, como se detalla en los cuadros precedentes, donde se tiene:

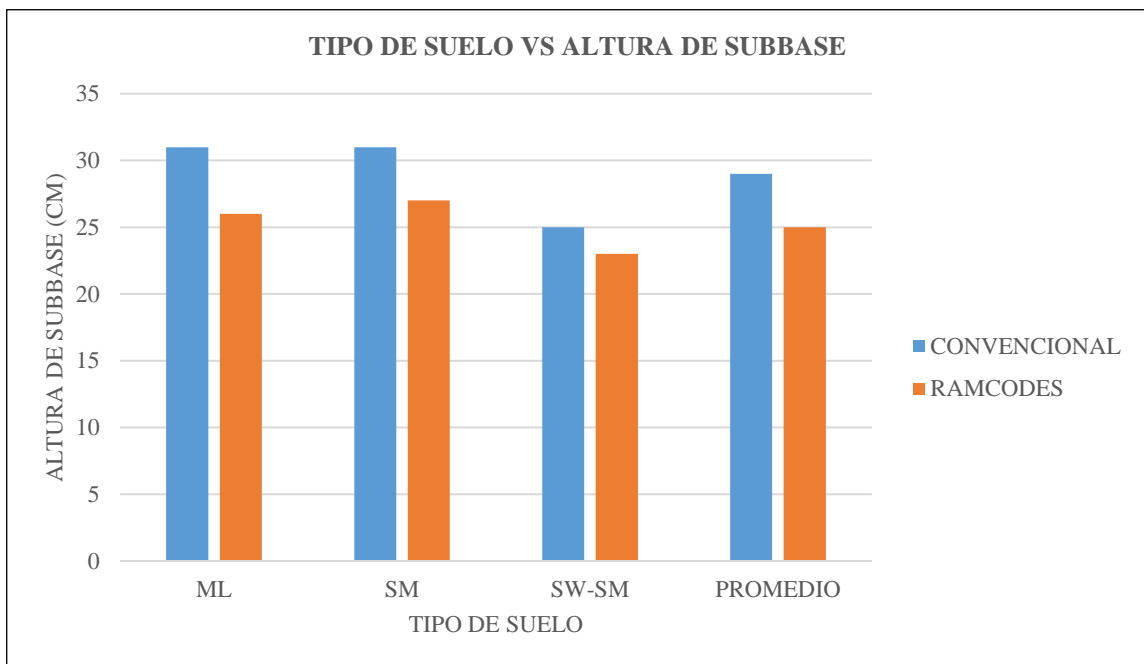
- En el caso de que el suelo de subrasante pertenezca al tipo limo inorgánico (ML), se experimenta una disminución en la altura de la subbase en 16.12%.
- La presencia de suelos de subrasante clasificado como arena limosa (SM), conlleva a una disminución en la altura de la subbase de aproximadamente 12.90%.
- Cuando el suelo de subrasante es del tipo arena bien graduada con limo (SW-SM) se observa que la altura de la subbase se reduce en 8.00%.
- Finalmente, se puede observar que, en promedio, la disminución de la subbase se reduce en un 13.79%.

De la verificación mecánica del diseño de pavimentos con las curvas de diseño RAMCODES y ensayos de CBR convencional, se tiene:

- Por el criterio del instituto del asfalto y Shell, luego de la evaluación por esfuerzos y deformación en las interfaces de las capas, se sugiere una carpeta asfáltica de 10 cm y 6 cm, base asfáltica de 12 cm , base de 20 cm en los dos criterios.
- Finalmente, en la capa de subbase, previa evaluación por los criterios mencionados, se obtiene un predimensionamiento igual al método AASHTO-93, manteniéndose los espesores de 25 cm y 29 cm.

**Figura 82**

*Altura de la subbase en el diseño estructural del pavimento*



Fuente: Elaboración propia

- La reducción en de la subbase durante el diseño de la estructura del pavimento se presenta de manera más destacada en la figura anterior. Se observa que el diseño estructural con RAMCODES reduce los espesores de subbase en comparación con el diseño convencional. Sin embargo, para el tipo de suelo de subrasante de arena bien graduada con limo la diferencia es mínima por lo que podemos decir que la saturación máxima propuesta en el diseño RAMCODES es cercana a la saturación de 4 días del suelo en el diseño convencional.
- También se efectúa un análisis de prueba de hipótesis de correlación, utilizando como variable independiente a las metodologías RAMCODES y CBR convencional y variable dependiente a la altura del pavimento flexible. (Anexo 20)

**Tabla 65**

*Correlaciones no paramétricas de variables*

CORRELACIONES			
		Metodologías	Espesor de subbase (cm)
Rho de Spearman	Metodologías	Coefficiente de correlación	1.000
		Sig.( bilateral )	.
		N	8
Espesor de subbase (cm)	Espesor de subbase (cm)	Coefficiente de correlación	- 0.315
		Sig. ( bilateral )	0.319
		N	8

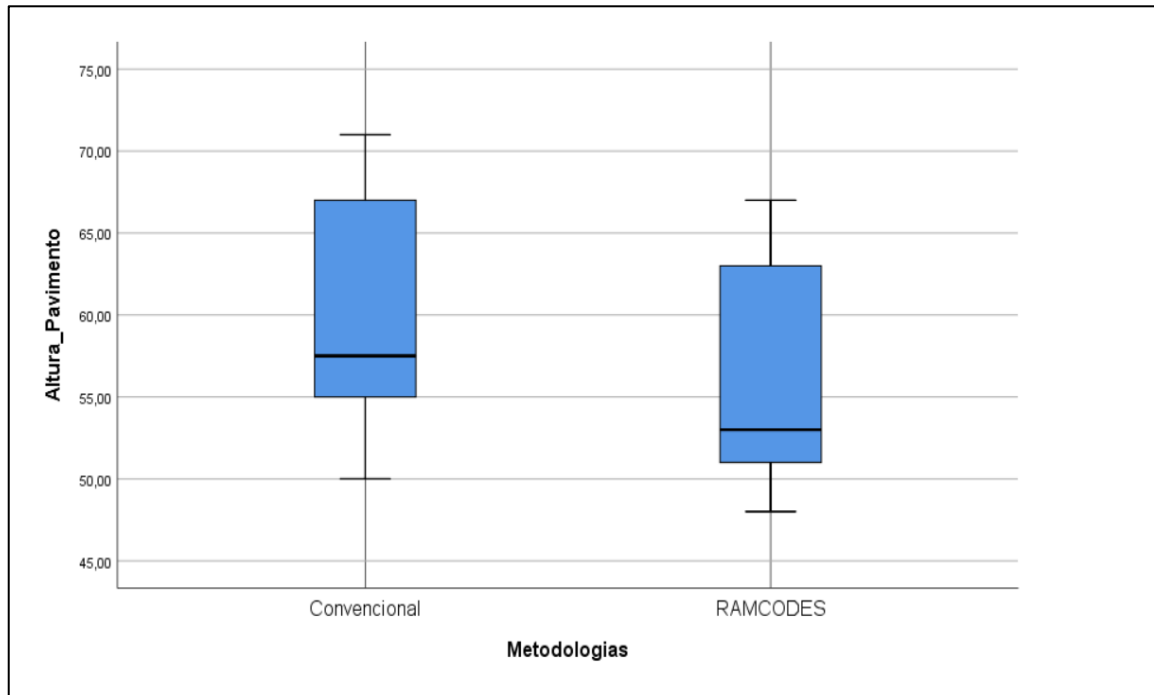
Nota: Elaboración propia

- El coeficiente de correlación entre variables es de -0.315, nos indica que primeramente es una relación negativa, entonces se tiene una relación inversa: es decir al evaluar el diseño del pavimento con ensayos CBR convencional la altura del pavimento es elevado, mientras que la altura del pavimento se reduce en cierta medida al evaluar el diseño del pavimento con las curvas de diseño RAMCODES, entonces se acepta la hipótesis: “El módulo resiliente basado en curvas de diseño RAMCODES

respecto a ensayos CBR convencional optimiza el diseño de pavimentos flexibles de la carretera Calacota-Ilave, 2023”.

### Figura 83

*Relación entre diseño de pavimentos Convencional y RAMCODES*



Nota: Elaboración propia

- De la figura, se evidencia que hay una línea de pendiente negativa decreciente, lo cual significa que los diseños de pavimentos flexibles utilizando la metodología convencional incrementa el espesor de la subbase, mientras que los diseños con la metodología RAMCODES disminuyen estos valores.





#### 4.4. DISCUSIÓN

Los resultados de los módulos resiliente basados en curvas de diseño RAMCODES y obtenidos a partir del (CBR), que son de 24.25%, 26.80%, y 42.00% para los suelos ML, SM y SW-SM, respectivamente, asumen un grado de compactación del 95% de la máxima densidad del ensayo proctor y un grado de saturación como la condición de servicio promedio o menos favorable del pavimento. Consideración que coincide con Oyola Guzmán & Oyola Morales (2019), que afirma que el porcentaje mínimo de compactación que aparece en las especificaciones de control de calidad es un valor propuesto desde la tradición y desde experiencias anteriores utilizado para inferir un rendimiento mecánico en términos de capacidad portante. En contra parte, el MTC (2016), indica que el valor de CBR se debe estimar considerando un grado de saturación del 100% que se obtiene con muestras empapadas durante 4 días y ensayadas bajo agua. Asimismo, Sánchez (2019), explica que el preestablecimiento de un grado de compactación del 95%, sin relacionarlo con la respuesta del suelo, es una práctica inaceptable, demostrando con la curva de diseño al 70 % del grado de saturación para una grava limosa. Siendo la resistencia requerida del proyecto de 25% de CBR, esta resistencia podría alcanzarse fácilmente compactando el suelo al 92% de la máxima densidad seca de proctor. Sin embargo, si se compacta al 95 % de Proctor, este suelo exhibiría un valor CBR del 130 por ciento, es decir 2,6 veces la resistencia requerida por el proyecto. También, Pariona (2014), deduce de la curva de diseño para una grava bien graduada, que la resistencia del suelo tiene relación inversa con la humedad del material y relación directa con una energía específica baja, siendo todo lo contrario para energías altas. Confirmando que la hidratación perjudica las condiciones estructurales del suelo. Luque & Ccolque (2016), sostiene que la metodología RAMCODES presenta mejoras en



el índice de calidad del suelo (CBR), registrando un incremento del 7.58% en comparación con la metodología AASHTO.

Basándonos en los resultados de la evaluación del módulo resiliente convencional a través del índice de capacidad de soporte (CBR) para diferentes tipos de suelos (ML, SM y SW-SM), con valores del 18,05%, 22,80% y 38,26%, respectivamente; se tuvo en consideración el contenido óptimo de humedad, la máxima densidad seca y un grado de compactación del 95% como parámetros para estimar el índice de resistencia del suelo (CBR), variables de consideración que coinciden con el ASTM D 1883-16 (2016), que sugiere determinar el valor de CBR al 95% de peso unitario seco máximo y al contenido óptimo de agua; sin embargo, Queiroz & Gutiérrez (2016), en su estudio, se evidencia que en la muestra de suelo caracterizada como limo de baja compresibilidad (ML), existe una relación inversa entre el índice de soporte de California (ISC) y el grado de saturación, lo que implica que el ISC más elevado no se logra necesariamente al alcanzar la humedad óptima de compactación. Asimismo; Oyola Guzmán & Oyola Morales (2019), en su estudio dio a conocer a través de mapas de resistencia que la resistencia máxima no está asociada con el peso unitario seco máximo medido en laboratorio, demostrando que para el material del tipo A-2-4(0), se alcanzó una resistencia a la compresión no confinada de 276.3 KPa, con un contenido óptimo de agua de 10.3% y la resistencia a la compresión libre máxima fue de 326,1 KPa que se obtuvo con un contenido de agua del 7.3% a 9%; por lo que sugiere que el porcentaje de compactación mínimo requerido se debe establecer utilizando la sección de curvas de diseño de la metodología RAMCODES. Pulecio et al. (2019), amplía los hallazgos anteriores al demostrar que al disminuir el contenido de humedad óptimo en un 0.5%, se produce un incremento del 31.61% y 24.46% en el valor de CBR para suelos no plásticos y arcillosos de baja plasticidad, respectivamente.



Los valores de la capacidad de carga (CBR) convencional de 18,05%, 22,80% y 38,26% para suelos ML, SM y SW-SM respectivamente, fueron determinados considerando un porcentaje mínimo de compactación del 95% de la máxima densidad seca obtenida del ensayo proctor modificado; además de una saturación de 4 días de inmersión, que representa la condición más desfavorable del suelo en el ensayo de CBR. Consideraciones que coinciden con el MTC (2014), que indica que los últimos 0.30 m de suelo debajo del nivel superior de la subrasante, deberán ser compactados al 95% de la máxima densidad seca obtenida del ensayo proctor modificado y la guía ASTM D 1883 (1999), aclara que el valor de CBR debe calcularse a los 4 días de inmersión en agua, para simular las peores condiciones del suelo utilizado en el diseño de pavimentos. Sin embargo, la norma ASTM D 1557-12 (2012), sugiere que el porcentaje de compactación requerido debe determinarse de acuerdo con experiencias y/o experimentaciones previas. Por otra parte, Oyola Guzmán & Oyola Morales (2018), en su análisis revela que el criterio del porcentaje mínimo de compactación no es adecuado para determinar el desempeño mecánico real del suelo, demostrando con las curvas de diseño para un suelo del tipo A-2-4(0) que para porcentajes de compactación iguales o superior al 95% (respecto al peso unitario seco máximo obtenido mediante la prueba Próctor modificada) y grados de saturación del 60% al 80%, el material muestra valores más altos que el CBR mínimo requerido. Sin embargo, con un porcentaje mínimo de compactación del 94% (respecto al peso unitario seco máximo obtenido con la prueba Próctor modificada) y un grado de saturación del 80% el material cumple con el CBR mínimo requerido del proyecto.

Los resultados de módulos resilientes para los tipos de suelos ML, SM y SW-SM, mediante las curvas de diseño RAMCODES muestran una mejora significativa respecto a los resultados obtenidos a través de los ensayos CBR convencional, con incrementos de



21%, 11% y 6%, respectivamente, mientras que se evidencia una disminución del espesor de las capas de subbase del pavimento del 16%, 13% y 8%, respectivamente. Estos resultados respaldan la afirmación planteada en el artículo de Inga & Gutiérrez (2022), donde sostienen que al considerar el comportamiento no saturado de la subrasante mediante el uso de las curvas de diseño RAMCODES en comparación con la metodología tradicional de caracterización de subrasantes, se optimiza el diseño del pavimento para el tipo de suelo SC-SM. Esto se traduce en un aumento del 29% en el módulo de resiliencia y una reducción del 25% en el espesor de las capas del pavimento, particularmente en lo que respecta al espesor de la capa de subbase. Por otra parte Ccarita (2024), valida las conclusiones anteriores al interpretar que al emplear la herramienta del espectro de curvas de diseño de la metodología RAMCODES, se alcanzó un Índice de Soporte California (CBR) del 27%, al incrementar el porcentaje de compactación al 96.5%. Este valor cumple con las especificaciones mínimas (CBR = 24%), a diferencia de la metodología tradicional que arrojó un CBR del 9% con un 95% de compactación según lo estipulado por la normativa. La discrepancia en los valores de CBR obtenidos mediante las diferentes metodologías, analizados mediante correlación, resultó en diferentes módulos de resiliencia aplicados en la ecuación de diseño del pavimento, lo que se tradujo en una diferencia de 5 cm en los espesores de la base, mientras que el espesor de la capa asfáltica permaneció inalterado.



## V. CONCLUSIONES

- PRIMERO:** En relación al objetivo general, se concluye que el módulo resiliente con las curvas de diseño RAMCODES, optimiza el diseño de pavimentos flexibles, ya que el módulo resiliente se incrementa en un 10.64 % respecto al convencional, lo que representa una reducción del 13.79% de espesor de subbase.
- SEGUNDO:** Se determinó el módulo resiliente a partir de las curvas de diseño RAMCODES utilizando los mapas de resistencia y la saturación máxima del suelo de subrasante para luego evaluarlos en el diseño de pavimento flexible. Se concluye que utilizando dicha metodología para los tipos de suelo: ML, SM y SW-SM del tramo en estudio se tiene valores de módulos resilientes de: 19,661.04 PSI, 20,960.28 PSI y 27942.83 PSI; en promedio 23,015.00 PSI.
- TERCERO:** Se evaluó el módulo resiliente basado en ensayos CBR convencional para el diseño de pavimentos flexible del tramo en estudio donde se concluye que utilizando este método convencional para los tipos de suelos: ML, SM y SW-SM del tramo en estudio caracterización de subrasante se tiene valores de módulos resilientes de: 16,275.57 PSI, 18,900.32 PSI y 26,473.22 PSI, en promedio 20,801.40 PSI.
- CUARTO:** En relación a la diferencia de costo del diseño de pavimentos flexibles con las curvas de diseño RAMCODES y ensayos CBR convencional, se concluye que existe una diferencia de costo de construcción de s/. 62,062.56 que representa un 12.24 % de diferencia.



## VI. RECOMENDACIONES

- PRIMERO:** Para determinar el CBR con los métodos RAMCODES y convencional de laboratorio, se recomienda usar bolsas herméticas para controlar las variaciones de humedad de los 15 especímenes del ensayo factorial y las 3 probetas sometidos a cuatro días de inmersión, ya que la humedad de preparación tiene un rol muy importante sobre la resistencia. Asimismo, se debe corregir las curvas de carga-penetración por concavidad hacia arriba.
- SEGUNDO:** Se recomienda usar las curvas de diseño RAMCODES para la estimación del módulo resiliente y control de compactación de las estructuras que componen el pavimento flexible, ya que esta metodología representa un beneficio con respecto a costo y genera diseños estructurales de pavimentos flexibles más racionales que reflejan las condiciones reales de saturación de subrasante en campo.
- TERCERO:** Se sugiere realizar investigaciones que comparen el módulo resiliente con las curvas de diseño RAMCODES y ensayos CBR convencional para distintos tipos de suelos susceptibles a humedecimiento como los suelos con finos plásticos y aptos para el uso como material de subrasante en carreteras con distintas condiciones ambientales de saturación y tránsito, a fin de obtener suficiente data y tener un mayor grado de confiabilidad en la selección de los módulos resilientes para el diseño estructural de pavimentos flexibles.



## VII. REFERENCIA

- AASHTO. (1993). *AASHTO GUIDE FOR Design of Pavement Structures*.  
AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND  
TRANSPORTATION OFFICIALS.
- Allende, T. C., & Mendoza, M. E. (2007). Análisis hidrometeorológico de las  
estaciones de la cuenca del lago de Cuitzeo. *Investigaciones Geográficas*,  
63, 56-76. <https://doi.org/10.14350/rig.29910>
- ASTM D 1557-12. (2012). *Métodos de ensayo normalizado para las  
características de compactación de suelos en laboratorio usando una  
energía modificada (56,000 Pie-lbf/Pie<sup>3</sup> (2,700 kN-m/m<sup>3</sup>))*.  
<https://doi.org/10.1520/D1557-12>.Edición
- ASTM D 1883-16. (2016). *Standard Test Method for California Bearing Ratio  
(CBR) of Laboratory - Compacted Soils*. ASTM INTERNATIONAL.  
<https://doi.org/10.1520/D1883-16>
- ASTM D 1883-99. (1999). *Standard Test Method for CBR (California Bearing  
Ratio) of Laboratory-Compacted Soils 1*. ASTM INTERNATIONAL.  
[www.astm.org](http://www.astm.org)
- ASTM D 2487-17. (2017). *Práctica estándar para la clasificación de suelos para  
fines de ingeniería (Sistema Unificado de Clasificación de Suelos*. ASTM  
INTERNATIONAL. <https://doi.org/10.1520/D2487-17>
- Bowles, J. E. (1981). *Manual de Laboratorio de Suelos en Ingeniería Civil*  
(primera edición). MCGRAW-HILL.  
<https://stehven.files.wordpress.com/2015/08/josephe-e-bowles-manual-de-laboratorio-de-suelos.pdf>
- Ccarita Mejia, F. E. (2024). *Influencia de la metodología RAMCODES en el diseño  
de pavimentos en carreteras urbano-rurales bajo un enfoque BIM - Caso  
de estudio: Carretera Chivay -Canacota* [Tesis de pregrado, Universidad  
Católica de Santa Maria]. <https://hdl.handle.net/20.500.12920/13595>
- Das, B. M. (2001). *Fundamentos de Ingeniería Geotécnica* (Primera edición).  
THOMSON LEARNING.
- Das, B. M. (2013). *Fundamentos de Ingeniería Geotécnica* (cuarta edición).  
CENGAGE Learning.



[https://www.academia.edu/37854899/Fundamentos\\_de\\_Ingenieria\\_Geotecnica\\_Braja\\_M\\_Das](https://www.academia.edu/37854899/Fundamentos_de_Ingenieria_Geotecnica_Braja_M_Das)

Espinoza Meléndrez, J. A., Tamari, S., & Aguilar Chávez, A. (2015). Simulación de la infiltración del agua a partir de un daño en la carpeta de pavimento.

*Tecnología y Ciencias del Agua*, XX(4), 77-95.

<https://www.revistatyca.org.mx/ojs/index.php/tyca/article/view/1018>

Gutiérrez Lázares, J. W. (2007). *Modelación Geotécnica de Pavimentos Flexibles con Fines de Análisis y Diseño en el Perú* [Tesis de maestría, Universidad Nacional de Ingeniería]. Repositorio

Institucional.<http://hdl.handle.net/20.500.14076/809>

Hedayati, M., & Hossain, S. (2015). Data based model to estimate subgrade moisture variation case study: Low volume pavement in North Texas.

*Transportation Geotechnics*, 3, 48-57.

<https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2015.03.001>

Hernández Sampieri, R., Fernández Collado, C., & del Pilar Baptista Lucio, M. (2010). *Metodología de la investigación* (Quinta Edición). Mc Graw Hill. [www.FreeLibros.com](http://www.FreeLibros.com)

Inga López, H. J., & Gutiérrez Lazares, J. W. (2022). Implementación del espectro de curvas de diseño RAMCODES de suelos no saturados de subrasantes en el diseño de pavimentos flexibles. *TECNIA*, 32(2), 112-126.

<https://doi.org/10.21754/tecnia.v32i2.1388>

Luque Ramirez, A. B., & Ccolque Mamani, C. E. (2016). *Comparación metodológica con experimentos factoriales de AASTHO y RAMCODES para compactación de suelos aplicado a pavimentos en la ciudad de Juliaca* [Tesis de Pregrado, Universidad Andina Néstor Cáceres Velásquez]. Repositorio Institucional.

<http://repositorio.uancv.edu.pe/handle/UANCV/629>

Maximiliano velasquez, E. J. (2016). *Implementación del modelo climático EICM con fines de diseño para pavimento de concreto asfáltico aplicando la metodología MEPDG* [Tesis de Pregrado, Universidad Nacional de Ingeniería]. Repositorio Institucional.

<http://hdl.handle.net/20.500.14076/5411>

Minaya González, S., & Ordóñez Huamán, A. (2006). *Diseño Moderno de Pavimentos Asfálticos* (Segunda Edición). ICG - Instituto de la





- Construcción y Gerencia.  
[www.construccion.org.pe](http://www.construccion.org.pe)/Email:icg@icg.org.pe/Telefax:421-7896
- MTC. (2014). *Manual de Carreteras Suelos Geología, Geotecnia y Pavimentos: Sección Suelos y Pavimentos* (abril de 2014).  
[https://portal.mtc.gob.pe/transportes/caminos/normas\\_carreteras/manuales.html](https://portal.mtc.gob.pe/transportes/caminos/normas_carreteras/manuales.html)
- MTC. (2016). *Manual de Ensayo de Materiales* (mayo de 2016).  
[https://portal.mtc.gob.pe/transportes/caminos/normas\\_carreteras/manuales.html](https://portal.mtc.gob.pe/transportes/caminos/normas_carreteras/manuales.html)
- Ñaupas Paitán, H., Mejía Mejía, E., Novoa Ramírez, E., & Villagómez Paucar, A. (2014). *Metodología de la investigación: Cuantitativa - Cualitativa y Redacción de la Tesis* (Cuarta Edición). Ediciones de la U.
- Oyola Guzmán, R. D., & Oyola Morales, R. (2018). Forensic Evaluation of Compacted Soils using RAMCODES. *Civil Engineering Journal*, 4(10), 2275-2283. <http://dx.doi.org/10.28991/cej-03091157>
- Oyola Guzmán, R. D., & Oyola Morales, R. (2019). Linking Soil Design and Quality Control of Compacted Soils Through an Improvement of the Acceptance Zone of the RAMCODES Methodology. *Indian Geotechnical Journal*, 49(5), 492-500. <https://doi.org/10.1007/s40098-018-0345-z>
- Pariona Quintana, L. (2014). *Estudio de la resistencia de la sub-base usando experimentos factoriales basado en el contenido de humedad, energía de compactación y la hidratación* [Tesis de Pregrado, Universidad Nacional del Centro del Perú]. Repositorio Institucional.  
<http://hdl.handle.net/20.500.12894/408>
- Pulecio Diaz, J. A., Pallares Muñoz, M. R., & Rodríguez Calderón, W. (2019). Performance evaluation of granular sub-base by maps of resistance using grapher™. Case study: Ibagué, Colombia. *Journal of Engineering and Applied Sciences*, 14(9). [www.arpnjournals.com](http://www.arpnjournals.com)
- Queiroz de Amorim, L., & Gutiérrez Góngora, I. A. (2016). Caracterização do solo laterítico de Brasília através da metodologia racional para a análise de densificação e resistência de geomateriais compactados “RAMCODES”. *Programa de Iniciação Científica - PIC/UniCEUB - Relatórios de Pesquisa*, 1(1). <https://doi.org/https://doi.org/10.5102/pic.n1.2015.5388>



- Sánchez Leal, F. J. (2009). Manual de aplicación RAMCODES. *Venezuela: Solestudios CA*, 1-207.
- Sánchez Leal, F. J. (2019). RAMCODES Method for Compacted Soil Design: Development and Applications. *Geotechnical Engineering in the XXI Century: Lessons learned and future challenges*, 17(20), 1635-1648.  
<https://ebooks.iospress.nl/doi/10.3233/STAL190216>
- Sánchez Leal, F. J., Garnica Anguas, P., Gómez López, J. A., & Pérez García, N. (2002). RAMCODES: Metodología Racional para el Análisis de Densificación y Resistencia de Geomateriales Compactados. *Publicación Técnica N° 200*, 1-55.  
<http://www.imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt200.pdf>
- SENAMHI. (2023). *Datos hidrometeorológicos a nivel nacional*.  
<https://www.senamhi.gob.pe/?&p=estaciones>
- Zapata, C. E. (2018). Empirical Approach for the Use of Unsaturated Soil Mechanics in Pavement Design. *Geotechnical Special Publication*, 2017(300), 149-173. <http://ascelibrary.org/doi/10.1061/9780784481677.008>



## ANEXOS

- ANEXO 1:** Constancia de laboratorio de suelos
- ANEXO 2:** Contenido de humedad
- ANEXO 3:** Análisis granulométrico
- ANEXO 4:** Límites de Atterberg
- ANEXO 5:** Clasificación de suelos
- ANEXO 6:** Gravedad específica
- ANEXO 7:** Proctor modificado
- ANEXO 8:** CBR convencional
- ANEXO 9:** Precipitación máxima diaria
- ANEXO 10:** Saturación máxima del suelo
- ANEXO 11:** Clasificación RAMCODES y potencial de densificación
- ANEXO 12:** CBR RAMCODES
- ANEXO 13:** Mapas de resistencia y Curvas de saturación
- ANEXO 14:** Espectro de curvas de diseño RAMCODES
- ANEXO 15:** Estudio de tráfico vial
- ANEXO 16:** Diseño AASHTO 93 RAMCODES
- ANEXO 17:** Diseño AASHTO 93 convencional
- ANEXO 18:** Diseño empírico-mecanístico
- ANEXO 19:** Costos y presupuestos del diseño convencional y RAMCODES
- ANEXO 20:** Prueba de hipótesis
- ANEXO 21:** Panel fotográfico



## DECLARACIÓN JURADA DE AUTENTICIDAD DE TESIS

Por el presente documento, Yo Jose Luis Condori Mamani  
identificado con DNI 70819588 en mi condición de egresado de:

Escuela Profesional,  Programa de Segunda Especialidad,  Programa de Maestría o Doctorado

informo que he elaborado el/la  Tesis o  Trabajo de Investigación denominada:  
" COMPARACIÓN DEL MÓDULO RESILIENTE BASADO EN CURVAS DE DISEÑO  
RANCODES Y ENSAYOS CBR CONVENCIONAL PARA EL DISEÑO DE PAVIMENTOS  
FLEXIBLES DE LA CARRETERA CALACOTA- ILAVE, 2023 "

Es un tema original.

Declaro que el presente trabajo de tesis es elaborado por mi persona y **no existe plagio/copia** de ninguna naturaleza, en especial de otro documento de investigación (tesis, revista, texto, congreso, o similar) presentado por persona natural o jurídica alguna ante instituciones académicas, profesionales, de investigación o similares, en el país o en el extranjero.

Dejo constancia que las citas de otros autores han sido debidamente identificadas en el trabajo de investigación, por lo que no asumiré como tuyas las opiniones vertidas por terceros, ya sea de fuentes encontradas en medios escritos, digitales o Internet.

Asimismo, ratifico que soy plenamente consciente de todo el contenido de la tesis y asumo la responsabilidad de cualquier error u omisión en el documento, así como de las connotaciones éticas y legales involucradas.

En caso de incumplimiento de esta declaración, me someto a las disposiciones legales vigentes y a las sanciones correspondientes de igual forma me someto a las sanciones establecidas en las Directivas y otras normas internas, así como las que me alcancen del Código Civil y Normas Legales conexas por el incumplimiento del presente compromiso

Puno 13 de JUNIO del 2024

  
FIRMA (obligatoria)



Huella



## DECLARACIÓN JURADA DE AUTENTICIDAD DE TESIS

Por el presente documento, Yo Julio Cesar Condori Mamani,  
identificado con DNI 71590604 en mi condición de egresado de:

Escuela Profesional,  Programa de Segunda Especialidad,  Programa de Maestría o Doctorado  
Ingeniería civil

informo que he elaborado el/la  Tesis o  Trabajo de Investigación denominada:

"COMPARACIÓN DEL MÓDULO RESILIENTE BASADO EN CURVAS DE DISEÑO  
RAMCODES Y ENSAYOS CBR CONVENCIONAL PARA EL DISEÑO DE  
PAVIMENTOS FLEXIBLES DE LA CARRETERA CALACOTA-TIAYE, 2023"

Es un tema original.

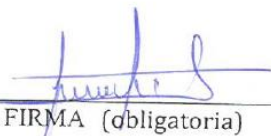
Declaro que el presente trabajo de tesis es elaborado por mi persona y **no existe plagio/copia** de ninguna naturaleza, en especial de otro documento de investigación (tesis, revista, texto, congreso, o similar) presentado por persona natural o jurídica alguna ante instituciones académicas, profesionales, de investigación o similares, en el país o en el extranjero.

Dejo constancia que las citas de otros autores han sido debidamente identificadas en el trabajo de investigación, por lo que no asumiré como tuyas las opiniones vertidas por terceros, ya sea de fuentes encontradas en medios escritos, digitales o Internet.

Asimismo, ratifico que soy plenamente consciente de todo el contenido de la tesis y asumo la responsabilidad de cualquier error u omisión en el documento, así como de las connotaciones éticas y legales involucradas.

En caso de incumplimiento de esta declaración, me someto a las disposiciones legales vigentes y a las sanciones correspondientes de igual forma me someto a las sanciones establecidas en las Directivas y otras normas internas, así como las que me alcancen del Código Civil y Normas Legales conexas por el incumplimiento del presente compromiso

Puno 13 de Junio del 2024

  
FIRMA (obligatoria)



Huella



## AUTORIZACIÓN PARA EL DEPÓSITO DE TESIS O TRABAJO DE INVESTIGACIÓN EN EL REPOSITORIO INSTITUCIONAL

Por el presente documento, Yo Jose Luis Condori Mamani  
identificado con DNI 70819588 en mi condición de egresado de:

Escuela Profesional,  Programa de Segunda Especialidad,  Programa de Maestría o Doctorado

informo que he elaborado el/la  Tesis o  Trabajo de Investigación denominada:

"COMPARACIÓN DEL MÓDULO RESILIENTE BASADO EN CURVAS DE DISEÑO RAMCODES Y ENSAYOS CBR CONVENCIONAL PARA EL DISEÑO DE PAVIMENTOS FLEXIBLES DE LA CARRETERA CALACOTA-ILAVE 2023"

para la obtención de  Grado,  Título Profesional o  Segunda Especialidad.

Por medio del presente documento, afirmo y garantizo ser el legítimo, único y exclusivo titular de todos los derechos de propiedad intelectual sobre los documentos arriba mencionados, las obras, los contenidos, los productos y/o las creaciones en general (en adelante, los "Contenidos") que serán incluidos en el repositorio institucional de la Universidad Nacional del Altiplano de Puno.

También, doy seguridad de que los contenidos entregados se encuentran libres de toda contraseña, restricción o medida tecnológica de protección, con la finalidad de permitir que se puedan leer, descargar, reproducir, distribuir, imprimir, buscar y enlazar los textos completos, sin limitación alguna.

Autorizo a la Universidad Nacional del Altiplano de Puno a publicar los Contenidos en el Repositorio Institucional y, en consecuencia, en el Repositorio Nacional Digital de Ciencia, Tecnología e Innovación de Acceso Abierto, sobre la base de lo establecido en la Ley N° 30035, sus normas reglamentarias, modificatorias, sustitutorias y conexas, y de acuerdo con las políticas de acceso abierto que la Universidad aplique en relación con sus Repositorios Institucionales. Autorizo expresamente toda consulta y uso de los Contenidos, por parte de cualquier persona, por el tiempo de duración de los derechos patrimoniales de autor y derechos conexos, a título gratuito y a nivel mundial.

En consecuencia, la Universidad tendrá la posibilidad de divulgar y difundir los Contenidos, de manera total o parcial, sin limitación alguna y sin derecho a pago de contraprestación, remuneración ni regalía alguna a favor mío; en los medios, canales y plataformas que la Universidad y/o el Estado de la República del Perú determinen, a nivel mundial, sin restricción geográfica alguna y de manera indefinida, pudiendo crear y/o extraer los metadatos sobre los Contenidos, e incluir los Contenidos en los índices y buscadores que estimen necesarios para promover su difusión.

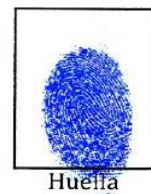
Autorizo que los Contenidos sean puestos a disposición del público a través de la siguiente licencia: Creative

Commons Reconocimiento-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional. Para ver una copia de esta licencia, visita: <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

En señal de conformidad, suscribo el presente documento.

Puno 13 de Junio del 2024

  
FIRMA (obligatoria)





## AUTORIZACIÓN PARA EL DEPÓSITO DE TESIS O TRABAJO DE INVESTIGACIÓN EN EL REPOSITORIO INSTITUCIONAL

Por el presente documento, Yo Julio Cesar Condori Mamani  
identificado con DNI 71590604 en mi condición de egresado de:

Escuela Profesional,  Programa de Segunda Especialidad,  Programa de Maestría o Doctorado  
Ingeniería Civil

informo que he elaborado el/la  Tesis o  Trabajo de Investigación denominada:  
"COMPARACIÓN DEL MÓDULO RESILIENTE BASADO EN CURVAS DE DISEÑO RAMCÓDES Y ENSAYOS CBR CONVENCIONAL PARA EL DISEÑO DE PAVIMENTOS FLEXIBLES DE LA CARRETERA CALACOTA-ILAVE, 2023."

para la obtención de  Grado,  Título Profesional o  Segunda Especialidad.

Por medio del presente documento, afirmo y garantizo ser el legítimo, único y exclusivo titular de todos los derechos de propiedad intelectual sobre los documentos arriba mencionados, las obras, los contenidos, los productos y/o las creaciones en general (en adelante, los "Contenidos") que serán incluidos en el repositorio institucional de la Universidad Nacional del Altiplano de Puno.

También, doy seguridad de que los contenidos entregados se encuentran libres de toda contraseña, restricción o medida tecnológica de protección, con la finalidad de permitir que se puedan leer, descargar, reproducir, distribuir, imprimir, buscar y enlazar los textos completos, sin limitación alguna.

Autorizo a la Universidad Nacional del Altiplano de Puno a publicar los Contenidos en el Repositorio Institucional y, en consecuencia, en el Repositorio Nacional Digital de Ciencia, Tecnología e Innovación de Acceso Abierto, sobre la base de lo establecido en la Ley N° 30035, sus normas reglamentarias, modificatorias, sustitutorias y conexas, y de acuerdo con las políticas de acceso abierto que la Universidad aplique en relación con sus Repositorios Institucionales. Autorizo expresamente toda consulta y uso de los Contenidos, por parte de cualquier persona, por el tiempo de duración de los derechos patrimoniales de autor y derechos conexos, a título gratuito y a nivel mundial.


En consecuencia, la Universidad tendrá la posibilidad de divulgar y difundir los Contenidos, de manera total o parcial, sin limitación alguna y sin derecho a pago de contraprestación, remuneración ni regalía alguna a favor mío; en los medios, canales y plataformas que la Universidad y/o el Estado de la República del Perú determinen, a nivel mundial, sin restricción geográfica alguna y de manera indefinida, pudiendo crear y/o extraer los metadatos sobre los Contenidos, e incluir los Contenidos en los índices y buscadores que estimen necesarios para promover su difusión.

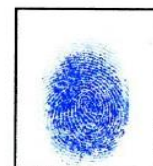
Autorizo que los Contenidos sean puestos a disposición del público a través de la siguiente licencia: Creative

Commons Reconocimiento-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional. Para ver una copia de esta licencia, visita: <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

En señal de conformidad, suscribo el presente documento.

Puno 13 de Junio del 2024

  
FIRMA (obligatoria)



Huella