



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA

SEDE CUENCA

CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

**CORRELACIÓN ENTRE LOS VALORES DE CBR DE LABORATORIO Y LOS
VALORES OBTENIDOS MEDIANTE EL ENSAYO DCP EN SUELOS DE LA
PARROQUIA EL VALLE, CANTÓN CUENCA**

Trabajo de titulación previo a la obtención del
título de Ingeniero Civil

AUTORES: ALEX HERNAN JIMÉNEZ JIMÉNEZ

LEONEL ALEJANDRO ARMIJOS SARANGO

TUTORA: ING. ÁNGELA ROCÍO VÁSQUEZ BRAVO

Cuenca - Ecuador

2026

CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Nosotros, Alex Hernán Jiménez Jiménez con documento de identificación N° 1950120103 y Leonel Alejandro Armijos Sarango con documento de identificación N° 1900803691; manifestamos que:

Somos los autores y responsables del presente trabajo; y, autorizamos a que sin fines de lucro la Universidad Politécnica Salesiana pueda usar, difundir, reproducir o publicar de manera total o parcial el presente trabajo de titulación.

Cuenca, 23 de febrero del 2026

Atentamente,



Alex Hernán Jiménez Jiménez

1950120103



Leonel Alejandro Armijos Sarango

1900803691

**CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE
TITULACIÓN A LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA**

Nosotros, Alex Hernán Jiménez Jiménez con documento de identificación N° 1950120103 y Leonel Alejandro Armijos Sarango con documento de identificación N° 1900803691, expresamos nuestra voluntad y por medio del presente documento cedemos a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que somos autores del Proyecto técnico: “Correlación entre los valores de CBR de laboratorio y los valores obtenidos mediante el ensayo DCP en suelos de la parroquia El Valle, cantón Cuenca”, el cual ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero Civil, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En concordancia con lo manifestado, suscribimos este documento en el momento que hacemos la entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, 23 de febrero del 2026

Atentamente,



Alex Hernán Jiménez Jiménez

1950120103



Leonel Alejandro Armijos Sarango

1900803691

CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Ángela Rocío Vásquez Bravo con documento de identificación N° 0106991482, docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: CORRELACIÓN ENTRE LOS VALORES DE CBR DE LABORATORIO Y LOS VALORES OBTENIDOS MEDIANTE EL ENSAYO DCP EN SUELOS DE LA PARROQUIA EL VALLE, CANTÓN CUENCA, realizado por Alex Hernán Jiménez Jiménez con documento de identificación N° 1950120103 y por Leonel Alejandro Armijos Sarango con documento de identificación N° 1900803691, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción Proyecto técnico que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, 23 de febrero del 2026

Atentamente,



Ing. Ángela Rocío Vásquez Bravo

0106991482

DEDICATORIA

El presente trabajo está dedicado a mis padres, cuyo apoyo incondicional, esfuerzo permanente y ejemplo de constancia han sido determinantes en mi formación académica y personal.

Asimismo, dedico esta tesis a mis hermanas, a mi hermano mayor y a mi sobrinita, por su acompañamiento, confianza y motivación constante a lo largo de este proceso.

Alex Hernán Jiménez Jiménez.

AGRADECIMIENTOS

Expreso mi sincero agradecimiento a mis padres, por su apoyo incondicional, esfuerzo constante y orientación permanente, que han sido fundamentales para el desarrollo de mi formación académica y personal. Su confianza y sacrificio han permitido la culminación de este trabajo.

Asimismo, agradezco a mis familiares y amigos, cuyo acompañamiento y motivación fueron un apoyo significativo durante este proceso académico.

Alex Hernán Jiménez Jiménez.

DEDICATORIA

Expreso mi más profundo y sincero agradecimiento a mis padres, por su apoyo incondicional, esfuerzo constante y orientación permanente a lo largo de mi vida académica. Su ejemplo, sacrificio y confianza han sido fundamentales para afrontar cada etapa de este proceso y alcanzar la culminación de este trabajo, constituyéndose en el principal pilar de mi formación personal y profesional.

Leonel Alejandro Armijos Sarango.

AGRADECIMIENTOS

Expreso mi profundo agradecimiento a mis padres, por su respaldo permanente, comprensión y dedicación, los cuales han sido pilares esenciales a lo largo de mi trayectoria académica. Su ejemplo y apoyo han sido determinantes para alcanzar este objetivo.

Leonel Alejandro Armijos Sarango.

Resumen

Esta investigación analiza la relación entre el California Bearing Ratio (CBR) obtenido en laboratorio y el índice de penetración medido en campo mediante el Penetrómetro de Cono Dinámico (DCP), con aplicación en suelos de la parroquia El Valle, cantón Cuenca. El estudio se desarrolló a partir de calicatas y una base consolidada de resultados que integra el CBR al 100 %, el índice DCPI a 15 golpes (mm/golpe) y la clasificación SUCS, con el propósito de determinar tendencias y proponer modelos de estimación indirecta.

La evaluación estadística se ejecutó mediante transformación logarítmica y ajuste por regresión, considerando que el comportamiento entre variables es predominantemente no lineal. Para mejorar la representatividad del ajuste, el análisis se segmentó por tipo de suelo. Los resultados evidenciaron que el desempeño del modelo varía según el material: para suelos CL se obtuvo un ajuste con $R^2=0,8879$, mientras que para suelos MH se alcanzó $R^2=0,9321$. En términos técnicos, se observó que la respuesta del CBR frente a cambios del DCPI es más marcada en los suelos CL y más estable en los suelos MH.

En conjunto, los hallazgos respaldan el uso del DCP como herramienta rápida de apoyo para estimar la capacidad portante, siempre que se aplique dentro del rango de datos analizado y se complemente con un incremento de muestras para fortalecer la validez del modelo en condiciones locales.

Palabras clave: CBR; DCP; DCPI15; correlación; SUCS; parroquia El Valle.

Abstract

This study examines the relationship between the laboratory California Bearing Ratio (CBR) and the in situ penetration index obtained with the Dynamic Cone Penetrometer (DCP), focusing on soils from El Valle parish, Cuenca canton. The research is based on test pits and a consolidated dataset including CBR at 100%, the 15-blow penetration index (DCPI, mm/blow), and SUCS classification, aiming to identify trends and support indirect CBR estimation.

A logarithmic transformation and regression-based fitting were applied to account for the predominantly non-linear response between variables. To improve model representativeness, data were analyzed by soil group. The results showed different fitting performance depending on soil type: for CL soils, the model achieved $R^2=0.8879$, whereas for MH soils, $R^2=0.9321$. From an engineering perspective, CL soils showed a more pronounced CBR response to DCPI variations, while MH soils exhibited a more stable behavior.

Overall, the findings support the DCP as a practical rapid-assessment tool for bearing capacity estimation, provided it is used within the evaluated data range and strengthened with additional sampling to enhance local validity.

Keywords: CBR; DCP; DCPI15; correlation; SUCS; El Valle.

INDICE DE CONTENIDOS

1	CAPÍTULO I.....	22
1.1	Antecedentes del problema.....	22
1.2	Importancia y alcances del problema.....	23
1.3	Delimitación del estudio.....	23
1.3.1	Delimitación geográfica:.....	23
1.3.2	Delimitación temática:.....	23
1.4	Planteamiento del problema.....	23
1.5	Formulación del problema:.....	24
1.6	Objetivos.....	24
1.6.1	Objetivo General.....	24
1.6.2	Objetivos Específicos.....	24
1.7	Justificación del estudio.....	25
2	CAPITULO II.....	26
2.1	Introducción a la mecánica de suelos.....	26
2.2	Propiedades índice y clasificación del suelo.....	26
2.3	Resistencia al corte del suelo.....	27
2.4	Cohesión.....	27
2.5	Ángulo de fricción interna.....	27
2.6	Plasticidad y límites de Atterberg.....	27
2.6.1	Límite líquido.....	28
2.6.2	Límite plástico.....	28
2.7	Índice de plasticidad.....	28
2.8	Densidad relativa y compactación.....	28
2.9	Energía de compactación.....	29

2.10	Humedad óptima	29
2.10.1	Influencia de la humedad en el comportamiento mecánico	29
2.10.2	Humedad natural.....	29
2.10.3	Efecto de la humedad en la resistencia.....	30
2.11	Capacidad portante del suelo.....	30
2.11.1	Influencia del nivel freático.....	30
2.12	Ensayo CBR	30
2.12.1	Fundamento teórico del CBR	31
2.13	Normas técnicas del ensayo	33
2.14	Control de humedad de compactación	33
2.15	Control de densidad seca.....	33
2.16	Procedimiento de remojo	34
2.16.1	Medición del esponjamiento.....	35
2.16.2	Velocidad de penetración del pistón.....	36
2.16.3	Análisis de la curva carga-penetración.....	36
2.17	Procedimiento de laboratorio	36
2.17.1	Preparación y tamizado del suelo	36
2.17.2	Determinación de la humedad óptima	37
2.17.3	Compactación en capas	37
2.17.4	Medición del hinchamiento	39
2.18	Ensayo de penetración.....	39
2.19	Cálculo del CBR.....	40
2.19.1	Ensayo de esponjamiento	40
2.19.2	Procedimiento del ensayo de esponjamiento.....	40
2.19.3	Importancia del esponjamiento en pavimentos	40

2.19.4	Curva carga-penetración.....	40
2.19.5	Obtención de la curva.....	41
2.20	Interpretación y corrección.....	42
2.21	Aplicaciones del CBR.....	43
2.21.1	Diseño de espesores de pavimento.....	43
2.21.2	Clasificación de subrasantes.....	44
2.21.3	Control de compactación en obra.....	44
2.21.4	Evaluación de estabilización del suelo.....	44
2.21.5	Factores que afectan el CBR.....	44
2.22	Ensayo DCP (Penetrómetro de Cono Dinámico).....	46
2.22.1	Principio de funcionamiento.....	46
2.22.2	Medición de la penetración.....	47
2.22.3	Índice de penetración (DCPI).....	47
2.22.4	Descripción del equipo.....	48
2.23	Normativa ASTM D6951.....	50
2.24	Ventajas, limitaciones y aplicaciones prácticas.....	50
2.25	Correlaciones entre CBR y DCP.....	51
2.26	Evolución histórica de las correlaciones CBR-DCP.....	51
2.27	Modelos clásicos más utilizados.....	52
2.28	Fundamentos estadísticos de las ecuaciones de correlación.....	53
2.29	Limitaciones de las correlaciones existentes.....	54
2.30	Necesidad de desarrollar correlaciones locales.....	54
2.31	Estado del Arte.....	55
2.32	Marco normativo.....	58
2.32.1	Normativa del MTOP (Ecuador).....	58

	14
2.32.2	Normativa ASTM.....58
2.32.3	Normativa AASHTO.....59
2.33	Importancia del cumplimiento normativo59
3	CAPÍTULO III59
3.1	Tipo y diseño de investigación59
3.2	Área de estudio60
3.2.1	Contexto geológico del área de estudio.....60
3.2.2	Puntos de muestreo y profundidad de extracción.....62
3.3	Materiales, equipos e instrumentos.....64
3.3.1	Materiales de Estudio65
3.3.2	Procedimientos de laboratorio67
3.3.3	Límites de Atterberg.....68
3.3.4	Humedad de las muestras69
3.3.5	Densidad seca y humedad óptima70
3.4	Clasificación SUCS y AASHTO71
3.4.1	Síntesis de Resultados de Calicatas72
3.4.2	Interpretación de resultados obtenidos74
3.5	Ensayo de Cono Dinámico de Penetración (DCP)75
3.5.1	Descripción del equipo DCP75
3.5.2	Materiales y equipos utilizados para el ensayo DCP.....76
3.5.3	Procedimiento de ejecución del ensayo DCP en campo77
3.5.4	Registro de datos de penetración del ensayo DCP78
3.6	Interpretación preliminar de los registros del ensayo DCP89
3.7	Determinación del índice de penetración DCPI90

3.8	Comparación De Resultados Obtenidos De Clasificación De Suelos Con Respecto A Los Proporcionados Por El Gobierno Provincial	91
3.9	Clasificación cualitativa de resistencia del suelo del índice DCP	93
3.10	Criterio de análisis hasta 15 golpes (DCPI_15)	94
3.10.1	Registro de datos y procesamiento del ensayo DCPI.....	95
3.10.2	Justificación del uso del índice DCPI15 (15 golpes).....	96
3.10.3	Cálculo del Índice de penetración DCP (DCPI).....	97
3.11	Metodología para la correlación entre CBR y DCPI.....	98
3.12	Base de datos integrada para el desarrollo del modelo de correlación CBR–DCP.....	98
3.12.1	Selección de variables para la correlación.....	100
3.12.2	Tratamiento estadístico de los datos.....	100
3.13	Desarrollo de regresión y correlación estadística.....	101
3.13.1	Justificación del modelo log–log.....	101
3.13.2	Segmentación por tipo de suelo (criterio aplicado)	102
3.14	Resultados obtenidos de la regresión y correlación estadística.....	103
4	CAPITULO IV	108
4.1	Análisis de Resultados	108
4.1.1	Justificación del uso del modelo log–log en la correlación.....	108
4.1.2	Segmentación por tipo de suelo: criterio y beneficio estadístico	109
4.2	Análisis De Resultados – Suelo Cl (Arcilloso).....	109
4.2.1	Interpretación del coeficiente R en suelo CL	110
4.2.2	Interpretación del coeficiente R ² en suelo CL	110
4.2.3	Interpretación del parámetro b en suelo CL (sensibilidad del modelo).....	110
4.2.4	Interpretación del comportamiento en la gráfica CL.....	111
4.3	Análisis De Resultados – Suelo MH (Limo De Alta Plasticidad)	112

4.3.1	Interpretación del coeficiente R en suelo MH	113
4.3.2	Interpretación del coeficiente R ² en suelo MH.....	113
4.3.3	Interpretación del parámetro b en suelo MH (baja sensibilidad).....	113
4.3.4	Interpretación del comportamiento en la gráfica MH	114
4.4	Análisis de resultado de CBR agrupando Calicatas por tipo de suelo (SUCS)	115
4.4.1	Para Suelo CL.....	116
4.4.2	Para Suelo MH	117
4.4.3	Para suelo CH.....	119
5	CAPITULO IV	121
5.1	Conclusiones	121
5.2	Recomendaciones	122
6	Bibliografía.....	124
7	Anexos	132
7.1	Datos obtenidos calicata C3.....	132
7.2	Datos obtenidos calicata C4.....	135
7.3	Datos obtenidos calicata C5.....	138
7.4	Datos obtenidos calicata C8.....	142
7.5	Datos obtenidos calicata C9.....	145
7.6	Datos obtenidos calicata C10.....	148
7.7	Datos obtenidos calicata C12.....	151
7.8	Datos obtenidos calicata C13.....	154
7.9	Datos obtenidos calicata C14.....	157
7.10	Datos obtenidos calicata C22	160
7.11	Registro fotográfico de excavación y ensayo DCP en campo.	164
7.12	Registro fotográfico de ensayos de laboratorio.....	167

INDICE DE TABLAS

Tabla 1 <i>Clasificación SUCS y características geotécnicas.</i>	26
Tabla 2 <i>Parámetros principales del ensayo CBR.</i>	32
Tabla 3 <i>Aplicación del CBR según tipo de suelo</i>	43
Tabla 4 <i>Interpretación típica de valores DCPI</i>	47
Tabla 5 <i>Correlaciones empíricas CBR–DCPI.</i>	53
Tabla 6 <i>Resumen de resultados de correlación</i>	55
Tabla 7 <i>Ubicación en Coordenadas GPS de calicatas.</i>	64
Tabla 8 <i>Porcentaje de Finos.</i>	68
Tabla 9 <i>Límites de Atterberg</i>	69
Tabla 10 <i>Humedad natural de las muestras</i>	70
Tabla 11 <i>Densidad Seca y Humedad Optima</i>	71
Tabla 12 <i>Clasificación SUCS y AASHTO</i>	72
Tabla 13 <i>Cuadro Resumen de resultados proporcionados por el Gobierno Provincial.</i>	73
Tabla 14 <i>Resumen de Granulometría CBR</i>	74
Tabla 15 <i>Registro DCP-C3 (golpes acumulados y profundidad).</i>	80
Tabla 16 <i>Registro DCP-C4 (golpes acumulados y profundidad).</i>	81
Tabla 17 <i>Registro DCP-C5 (golpes acumulados y profundidad).</i>	82
Tabla 18 <i>Registro DCP-C8 (golpes acumulados y profundidad).</i>	83
Tabla 19 <i>Registro DCP-C9 (golpes acumulados y profundidad).</i>	84
Tabla 20 <i>Registro DCP – C10 (golpes acumulados y profundidad).</i>	85
Tabla 21 <i>Registro DCP-C12 (golpes acumulados y profundidad).</i>	86
Tabla 22 <i>Registro DCP-C13 (golpes acumulados y profundidad).</i>	87
Tabla 23 <i>Registro DCP-C14 (golpes acumulados y profundidad).</i>	88
Tabla 24 <i>Registro DCP-C22 (golpes acumulados y profundidad).</i>	89
Tabla 25 <i>Penetración Total y golpes totales por calicata.</i>	91
Tabla 26 <i>Cuadro de resultados obtenidos.</i>	92
Tabla 27 <i>Cuadro comparativo.</i>	92
Tabla 28 <i>Clasificación cualitativa de la resistencia del suelo.</i>	94
Tabla 29 <i>Clasificación cualitativa de la resistencia del suelo por calicata según el índice DCPI 15.</i>	95

Tabla 30	<i>Cálculo de DCPI a 15 Golpes</i>	97
Tabla 31	<i>Matriz base CBR y DCP para el análisis correlacional.</i>	99
Tabla 32	<i>Resultados De Regresión Log–Log Cbr Vs Dcpi — Suelo CL.</i>	104
Tabla 33	<i>Variables obtenidas para la formulación de la ecuación para suelos CL</i>	104
Tabla 34	<i>Resultados De Regresión Log–Log Cbr Vs Dcpi — Suelo MH.</i>	106
Tabla 35	<i>Variables obtenidas para la formulación de la ecuación para suelos MH</i>	106
Tabla 36	<i>CBR Ajustado con valores de correlación obtenida para suelos CL</i>	111
Tabla 37	<i>CBR Ajustado con valores de correlación obtenida para suelos MH</i>	114
Tabla 38	<i>Resumen de resultados por tipo de suelo (SUCS)</i>	116
Tabla 39	<i>Resultados para suelo CL según (SUCS)</i>	116
Tabla 40	<i>Resumen de resultados por tipo de suelo (SUCS)</i>	118
Tabla 41	<i>Resumen de resultados por tipo de suelo (SUCS)</i>	119
Tabla 39	<i>Granulometría correspondiente a la calicata C3.</i>	132
Tabla 40	<i>Límite líquido correspondiente a la calicata C3.</i>	132
Tabla 41	<i>Límite plástico correspondiente a la calicata C3.</i>	133
Tabla 42	<i>Clasificación SUCS Y AASHTO correspondiente a la calicata C3.</i>	133
Tabla 43	<i>Datos DCP correspondientes a la calicata C3.</i>	134
Tabla 44	<i>Granulometría correspondiente a la calicata C4.</i>	135
Tabla 45	<i>Límite líquido correspondiente a la calicata C4.</i>	136
Tabla 46	<i>Límite plástico correspondiente a la calicata C4.</i>	136
Tabla 47	<i>Clasificación SUCS Y AASHTO correspondiente a la calicata C4.</i>	136
Tabla 48	<i>Datos DCP correspondientes a la calicata C4.</i>	137
Tabla 49	<i>Granulometría correspondiente a la calicata C5.</i>	138
Tabla 50	<i>Límite líquido correspondiente a la calicata C5.</i>	139
Tabla 51	<i>Límite plástico correspondiente a la calicata C4.</i>	139
Tabla 52	<i>Clasificación SUCS Y AASHTO correspondiente a la calicata C5.</i>	139
Tabla 53	<i>Datos DCP correspondientes a la calicata C5.</i>	141
Tabla 54	<i>Granulometría correspondiente a la calicata C8.</i>	142
Tabla 55	<i>Límite líquido correspondiente a la calicata C8.</i>	142
Tabla 56	<i>Límite plástico correspondiente a la calicata C8.</i>	143
Tabla 57	<i>Clasificación SUCS Y AASHTO correspondiente a la calicata C8.</i>	143

Tabla 58 Datos DCP correspondientes a la calicata C8.	144
Tabla 59 Granulometría correspondiente a la calicata C9.	145
Tabla 60 Límite líquido correspondiente a la calicata C9.	146
Tabla 61 Límite plástico correspondiente a la calicata C9.	146
Tabla 62 Clasificación SUCS Y AASHTO correspondiente a la calicata C9.	146
Tabla 63 Datos DCP correspondientes a la calicata C9.	147
Tabla 64 Granulometría correspondiente a la calicata C10.	148
Tabla 65 Límite líquido correspondiente a la calicata C10.	149
Tabla 66 Límite plástico correspondiente a la calicata C10.	149
Tabla 67 Clasificación SUCS Y AASHTO correspondiente a la calicata C10.	149
Tabla 68 Datos DCP correspondientes a la calicata C10.	150
Tabla 69 Granulometría correspondiente a la calicata C12.	151
Tabla 70 Límite líquido correspondiente a la calicata C12.	152
Tabla 71 Límite plástico correspondiente a la calicata C12.	152
Tabla 72 Clasificación SUCS Y AASHTO correspondiente a la calicata C12.	152
Tabla 73 Datos DCP correspondientes a la calicata C12.	153
Tabla 74 Granulometría correspondiente a la calicata C13.	154
Tabla 75 Límite líquido correspondiente a la calicata C13.	155
Tabla 76 Límite plástico correspondiente a la calicata C13.	155
Tabla 77 Clasificación SUCS Y AASHTO correspondiente a la calicata C13.	155
Tabla 78 Datos DCP correspondientes a la calicata C13.	156
Tabla 79 Granulometría correspondiente a la calicata C14.	157
Tabla 80 Límite líquido correspondiente a la calicata C14.	158
Tabla 81 Límite plástico correspondiente a la calicata C14.	158
Tabla 82 Clasificación SUCS Y AASHTO correspondiente a la calicata C14.	158
Tabla 83 Datos DCP correspondientes a la calicata C14.	159
Tabla 84 Granulometría correspondiente a la calicata C22.	160
Tabla 85 Límite líquido correspondiente a la calicata C22.	161
Tabla 86 Límite plástico correspondiente a la calicata C22.	161
Tabla 87 Clasificación SUCS Y AASHTO correspondiente a la calicata C22.	162
Tabla 88 Datos DCP correspondientes a la calicata C22.	163

INDICE DE FIGURAS

Figura 1 <i>Esquema del principio del ensayo California Bearing Ratio (CBR).</i>	31
Figura 2 <i>Curva de compactación Proctor y determinación de la humedad óptima.</i>	33
Figura 3 <i>Control de la densidad seca y grado de compactación del suelo.</i>	34
Figura 4 <i>Procedimiento de remojo de la muestra en el ensayo California Bearing Ratio (CBR).</i>	35
Figura 5 <i>Medición del esponjamiento de la muestra durante el ensayo California Bearing Ratio (CBR).</i>	35
Figura 6 <i>Preparación y tamizado del suelo previo a los ensayos de laboratorio.</i>	36
Figura 7 <i>Procedimiento de determinación del contenido de humedad del suelo en laboratorio.</i>	37
Figura 8 <i>Compactación del suelo en molde Proctor durante el ensayo de laboratorio.</i>	38
Figura 9 <i>Remojo continuo de muestras CBR en laboratorio.</i>	38
Figura 10 <i>Ejecución del ensayo California Bearing Ratio (CBR) en laboratorio</i>	39
Figura 11 <i>Curva carga-penetración, ensayo California Bearing Ratio (CBR) y corrección de la curva</i>	42
Figura 12 <i>Cono del penetrómetro dinámico de cono (DCP)</i>	48
Figura 13 <i>Varillas y guía del penetrómetro dinámico alineadas verticalmente durante el ensayo DCP</i>	49
Figura 14 <i>Equipo Completo para la realización del ensayo DCP</i>	50
Figura 15 <i>Mapa geológico del área de estudio (Hoja 73 – Azogues)</i>	61
Figura 16 <i>Mapa geológico del área de estudio (Hoja 53 – Cuenca)</i>	62
Figura 17 <i>Ubicación de los puntos de muestreo de calicatas de CBR</i>	63
Figura 18 <i>Trabajo de campo - Ensayo DCP</i>	79
Figura 19 <i>Correlación CBR vs DCP - Suelo CL</i>	105
Figura 20 <i>Correlación CBR vs DCP - Suelo MH</i>	107
Figura 21 <i>Curva ajustada para suelos CL.</i>	112
Figura 22 <i>Curva ajustada para suelos MH.</i>	115
Figura 23 <i>Relación CBR-DCP para suelos CL</i>	117
Figura 24 <i>Relación CBR-DCP para suelos MH</i>	118
Figura 25 <i>Relación CBR-DCP para suelos CH</i>	119

Figura 26 <i>Curva granulométrica correspondiente a la calicata C3.</i>	134
Figura 27 <i>Gráfica golpes vs penetración correspondiente a la calicata C3.</i>	135
Figura 28 <i>Curva granulométrica correspondiente a la calicata C4.</i>	137
Figura 29 <i>Gráfica golpes vs penetración correspondiente a la calicata C4.</i>	138
Figura 30 <i>Curva granulométrica correspondiente a la calicata C5.</i>	140
Figura 31 <i>Gráfica golpes vs penetración correspondiente a la calicata C5.</i>	141
Figura 32 <i>Curva granulométrica correspondiente a la calicata C8.</i>	144
Figura 33 <i>Gráfica golpes vs penetración correspondiente a la calicata C8.</i>	145
Figura 34 <i>Curva granulométrica correspondiente a la calicata C9.</i>	147
Figura 35 <i>Gráfica golpes vs penetración correspondiente a la calicata C9.</i>	148
Figura 36 <i>Curva granulométrica correspondiente a la calicata C10.</i>	150
Figura 37 <i>Gráfica golpes vs penetración correspondiente a la calicata C10.</i>	151
Figura 38 <i>Curva granulométrica correspondiente a la calicata C12.</i>	153
Figura 39 <i>Gráfica golpes vs penetración correspondiente a la calicata C12.</i>	154
Figura 40 <i>Curva granulométrica correspondiente a la calicata C13.</i>	156
Figura 41 <i>Gráfica golpes vs penetración correspondiente a la calicata C13.</i>	157
Figura 42 <i>Curva granulométrica correspondiente a la calicata C14.</i>	159
Figura 43 <i>Gráfica golpes vs penetración correspondiente a la calicata C14.</i>	160
Figura 44 <i>Curva granulométrica correspondiente a la calicata C22.</i>	162
Figura 45 <i>Gráfica golpes vs penetración correspondiente a la calicata C22.</i>	163

1 CAPÍTULO I

1.1 Antecedentes del problema

En la ingeniería civil el comportamiento del suelo es determinante para garantizar la estabilidad de pavimentos, cimentaciones y otras obras. La necesidad de conocer su capacidad portante llevó al desarrollo de métodos como el CBR, creado por el Departamento de Carreteras de California y ampliamente difundido en la literatura técnica (Bowles, 1997). Este ensayo ha sido utilizado por décadas debido a su fiabilidad y a la posibilidad de comparar la resistencia del suelo con materiales estándar.

Sin embargo, su procedimiento para obtener el valor del CBR requiere laboratorio, equipo especializado y personal capacitado, lo que incrementa tiempos y costos. Frente a esta limitación, el ensayo Dynamic Cone Penetrometer (DCP, por sus siglas en inglés), que en español puede interpretarse como ensayo de “Penetrómetro de cono dinámico ha ganado importancia por ofrecer mediciones rápidas directamente en campo. Este método, regulado por la norma ASTM D6951, permite estimar la resistencia del suelo a través de la penetración dinámica de un cono metálico, obteniéndose como resultado el índice de penetración del cono dinámico (DCPI) (ASTM International, 2018).

Diversos estudios internacionales han demostrado la utilidad de correlacionar los valores del DCPI con el CBR. Investigaciones en Sudáfrica, Israel y Estados Unidos evidencian que existe una relación inversa entre el índice de penetración y la resistencia del suelo según Kleyn (1982). En Ecuador se han obtenido resultados similares, como los reportados en Cuenca por Torres Delgado (2019), donde se encontraron correlaciones significativas.

Sin embargo, en la parroquia El Valle, perteneciente al cantón Cuenca, aún no se dispone de un estudio sistemático que establezca una correlación confiable entre los valores de CBR y DCPI. Esta carencia de información técnica limita la precisión en el diseño de infraestructuras y genera dependencia de datos referenciales externos, que no siempre representan las condiciones geotécnicas del lugar.

1.2 Importancia y alcances del problema

Contar con información geotécnica propia del sector es indispensable para un diseño adecuado. Cuando no se conoce la resistencia real del terreno, existe el riesgo de sobredimensionar o subdimensionar las obras. El establecimiento de una correlación entre CBR y DCPI permitiría estimar la capacidad portante de manera más rápida y económica, especialmente en proyectos donde los plazos de ejecución son ajustados.

El alcance de este estudio se concentra en analizar los suelos de El Valle, obtener mediciones mediante ambos métodos y ajustar una ecuación empírica adaptada a las condiciones locales, lo cual coincide con las recomendaciones de investigación aplicada en suelos residuales y aluviales (Lee, Park, & Kim, 2019).

1.3 Delimitación del estudio

1.3.1 Delimitación geográfica:

El área de estudio corresponde a la parroquia El Valle, ubicada al sur de Cuenca, en una zona donde predominan suelos residuales y depósitos aluviales, según una visita e inspección en campo que se confirmó al momento de realizar los ensayos en los puntos determinados. Inicialmente se indica que este tipo de materiales suele presentar variaciones importantes en función de la altitud y del grado de meteorización (Budhu, 2010).

1.3.2 Delimitación temática:

La investigación se enfoca únicamente en la comparación los valores del CBR y del DCPI. No se incluyen análisis estructurales, diseño de pavimentos ni estudios que no estén directamente relacionados con dicha correlación.

1.4 Planteamiento del problema

En El Valle no existen correlaciones locales que permitan interpretar el DCPI de forma confiable. Aunque el CBR sigue siendo una referencia sólida (ASTM International, 2021), su ejecución demanda recursos que no siempre están disponibles. Por su parte el DCPI es más práctico, sin embargo, su utilidad depende de una correlación ajustada a las condiciones de la zona.

Ante esta situación, surge la necesidad de establecer una correlación específica que relacione ambos métodos y permita determinar la capacidad portante de los suelos de El Valle de manera eficiente y precisa.

1.5 Formulación del problema:

¿Cuál es la relación estadísticamente significativa entre los valores de CBR determinados en laboratorio y los resultados obtenidos mediante el ensayo DCP en los suelos de la parroquia El Valle, cantón Cuenca?

1.6 Objetivos

1.6.1 Objetivo General

Establecer una relación confiable entre los valores de CBR determinados en laboratorio y los obtenidos mediante el ensayo DCP en los suelos de la parroquia El Valle, ubicada en el cantón Cuenca, con el propósito de estimar la capacidad portante del terreno de forma más rápida y económica.

1.6.2 Objetivos Específicos

- Identificar y clasificar los tipos de suelo predominantes en las zonas seleccionadas del área de estudio, considerando sus características físicas y mecánicas.
- Recopilar y analizar información sobre los valores de CBR de laboratorio, ya sea a partir de estudios previos o de ensayos realizados directamente en campo.
- Aplicar el ensayo del Penetrómetro de Cono Dinámico (DCP) en los puntos definidos del sector, para obtener mediciones representativas de resistencia del suelo.
- Comparar y relacionar los resultados de ambos métodos, utilizando herramientas estadísticas que permitan determinar el grado de correlación entre el % de CBR y DCPI.
- Proponer una ecuación de correlación local, por grupos de suelo y analizar su desempeño, para futuros proyectos de infraestructura.
- Formular conclusiones y recomendaciones sobre la aplicabilidad del DCP como herramienta de estimación rápida de la capacidad portante del suelo en condiciones locales.

1.7 Justificación del estudio

El presente estudio reviste una importancia técnica, económica y social de considerable alcance, ya que no solo contribuye al fortalecimiento del conocimiento geotécnico local, sino que además ofrece una herramienta práctica para optimizar los procesos de evaluación de suelos.

La investigación aporta información muy útil para mejorar la caracterización geotécnica de la parroquia El Valle. El empleo del DCP como método complementario es coherente con prácticas recomendadas por normas internacionales, especialmente para zonas rurales o proyectos donde la disponibilidad de laboratorio es limitada (AASHTO, 1993).

Además, el estudio se alinea con las directrices del MTOP, que promueven el uso de métodos prácticos para evaluar la subrasante y mejorar la planificación vial (Ministerio de Transporte y Obras Públicas del Ecuador, 2022).

2 CAPITULO II

2.1 Introducción a la mecánica de suelos

La mecánica de suelos es una rama fundamental de la ingeniería civil que estudia el comportamiento físico, mecánico e hidrológico de los suelos, desde su origen con los aportes de Karl Terzaghi en 1925, la disciplina ha evolucionado hacia un campo fusionado donde convergen conceptos de geología, mineralogía, hidráulica y resistencia de materiales (Budhu, 2010).

Su aplicación en ingeniería vial es determinante, debido a que los pavimentos descansan sobre una subrasante cuya capacidad estructural depende del tipo de suelo, de la densidad alcanzada en obra y de los cambios estacionales de humedad. La evaluación rigurosa del suelo es una actividad obligatoria para garantizar la durabilidad de la infraestructura.

2.2 Propiedades índice y clasificación del suelo

La clasificación SUCS y los límites de Atterberg son herramientas ampliamente utilizadas para describir el comportamiento del suelo tal cual indican (Holtz et al., 2011), estos parámetros permiten identificar plasticidad, cohesión y susceptibilidad al agua.

Tabla 1

Clasificación SUCS y características geotécnicas.

Clasificación	Descripción	IP (%)	LL (%)	Comportamiento
CH	Arcilla alta plasticidad	>35	>50	Alta compresibilidad y baja capacidad portante
CL	Arcilla baja plasticidad	10–34	30–50	Moderada resistencia, sensible a humedad
ML	Limo de baja plasticidad	<10	25–40	Estructura inestable, baja capacidad portante
SW–SP	Arenas bien/mal gradadas	0	—	Excelente capacidad portante

Nota. Resumen adaptado de (Das y Sobhan, 2018).

2.3 Resistencia al corte del suelo

El criterio de Mohr-Coulomb establece que la resistencia del suelo depende de la cohesión y de la fricción interna (Das y Sobhan, 2018). En suelos arcillosos, la cohesión puede variar según la humedad y el grado de saturación.

2.4 Cohesión

La cohesión aparente puede incrementarse en condiciones parcialmente saturadas debido a la succión matricial; sin embargo, disminuye de manera considerable cuando el suelo se satura, reduciendo su estabilidad estructural (Holtz, Kovacs, & Sheahan, 2011). Por esta razón, los suelos con alta cohesión pueden ser resistentes en estado natural, pero críticos en diferentes condiciones de saturación, lo cual afecta directamente los valores del CBR.

2.5 Ángulo de fricción interna

El ángulo de fricción interna expresa la resistencia derivada del interbloqueo y fricción entre partículas. Los suelos granulares, como arenas y gravas, presentan valores elevados, porque sus partículas se encuentran en contacto directo y ofrecen resistencia mecánica al deslizamiento. En contraste, los suelos finos presentan valores menores, ya que su estructura depende más de fuerzas de atracción que de fricción física entre partículas. La magnitud de ϕ está relacionada con la forma, angularidad y distribución granulométrica del suelo, factores que condicionan directamente la capacidad portante y el desempeño de pavimentos según criterios del autor Budhu (2010).

2.6 Plasticidad y límites de Atterberg

La plasticidad es una característica fundamental de los suelos finos, ya que refleja su capacidad para deformarse sin fracturarse dentro de un rango específico de humedad. Este comportamiento se evalúa mediante los límites de Atterberg, los cuales permiten clasificar al suelo según su consistencia y su potencial de expansión, contracción y deformación como indican los autores (Holtz, Kovacs, & Sheahan, 2011).

2.6.1 Límite líquido

El límite líquido define el contenido de humedad a partir del cual un suelo fino, generalmente arcilloso pierde gran parte de su resistencia al corte y empieza a comportarse como un fluido viscoso. Este valor permite conocer cuánta agua puede absorber el material antes de perder su estabilidad estructural.

Un límite líquido elevado suele asociarse con arcillas de alta actividad, en especial aquellas con minerales expansivos como la montmorillonita. Estos suelos son propensos a cambios volumétricos importantes cuando varía la humedad, lo cual puede generar levantamientos, asentamientos diferenciales y pérdida de capacidad portante en la subrasante, sobre todo cuando el terreno se satura.

2.6.2 Límite plástico

El límite plástico corresponde al contenido de humedad mínimo en el cual un suelo puede moldearse sin fragmentarse. Este parámetro es útil para identificar el rango de humedad en el cual el material mantiene cierta cohesión.

Un límite plástico bajo indica que el suelo pasa rápidamente de un estado semisólido a uno frágil, lo que puede provocar fisuras o agrietamientos durante procesos de compactación. Por otro lado, un límite plástico alto sugiere que el material puede deformarse dentro de un rango mayor de humedad, aunque esa ductilidad no siempre implica una buena resistencia mecánica

2.7 Índice de plasticidad

El índice de plasticidad mide el intervalo de humedad en el cual el suelo presenta un comportamiento plástico. Es uno de los parámetros más utilizados para diferenciar suelos limosos de arcillosos y para estimar la compresibilidad del terreno (Das & Sobhan, 2018).

2.8 Densidad relativa y compactación

La compactación busca reducir el volumen de vacíos con el fin de aumentar la resistencia y mejorar la estabilidad del suelo.

El ensayo Proctor según la norma (ASTM International, 2007) permite obtener:

- Densidad seca máxima,
- Humedad óptima,

parámetros que aseguran un comportamiento adecuado de la subrasante. Si un suelo se compacta fuera de este rango, puede presentar asentamientos o baja resistencia.

2.9 Energía de compactación.

La energía de compactación corresponde al trabajo mecánico aplicado para reducir el volumen de vacíos del suelo. En los ensayos Proctor estándar y Proctor modificado, esta energía se controla mediante un martillo de peso y altura de caída definidos. Suelos de alta plasticidad requieren mayor energía para alcanzar una densidad adecuada, mientras que materiales granulares responden con mayor facilidad al esfuerzo de compactación.

2.10 Humedad óptima

La humedad óptima es el contenido de agua que permite al suelo alcanzar su densidad seca máxima. Trabajar por encima o por debajo de esta humedad puede generar densidades deficientes y reducir significativamente la resistencia del suelo. En suelos arcillosos, incluso desviaciones pequeñas de la humedad óptima pueden ocasionar disminuciones importantes en los valores de CBR.

2.10.1 Influencia de la humedad en el comportamiento mecánico

La humedad afecta la rigidez y resistencia del suelo de forma notable. Los suelos arcillosos, por ejemplo, pueden endurecerse en condiciones secas debido a la succión interna, pero cuando se saturan pierden cohesión y resistencia (Budhu, 2010).

Por ello, los ensayos que caracterizan subrasantes, como el CBR, suelen realizarse en condiciones remojadas para simular escenarios críticos.

2.10.2 Humedad natural

La humedad natural es el contenido de agua presente en el suelo tal como se encuentra en campo. Esta varía en función del clima, la época del año, la profundidad y la cercanía al nivel freático. Cuando esta humedad sube o baja, también cambian la rigidez y el comportamiento del

suelo, por ello, en los ensayos de laboratorio se procura considerar tanto la condición natural como la condición remojada, que podría darse en situaciones reales.

2.10.3 Efecto de la humedad en la resistencia

Cuando un suelo arcilloso empieza a absorber mayor cantidad de agua, las partículas tienden a separarse y el material pierde fricción interna. En la práctica, esto significa una menor resistencia al corte y valores de CBR más bajos, sobre todo si el suelo está casi saturado. Si la subrasante trabaja mucho tiempo con alta humedad, es más probable que se deforme o falle antes de lo previsto.

2.11 Capacidad portante del suelo

La capacidad portante determina la carga máxima que el terreno puede soportar antes de fallar. En pavimentos, este parámetro condiciona el espesor requerido para las capas estructurales. El CBR es uno de los índices más utilizados en el mundo para evaluar esta capacidad portante del terreno natural (ASTM International, 2021).

2.11.1 Influencia del nivel freático

El nivel freático altera la tensión efectiva en el suelo, reduciendo la resistencia y modificando el comportamiento reduciendo su resistencia y modificando su comportamiento mecánico. A medida que el agua se aproxima a la superficie, el suelo pierde su rigidez y presenta deformaciones excesivas, lo que afecta directamente los valores y resultados del CBR.

2.12 Ensayo CBR

El ensayo CBR (California Bearing Ratio) es uno de los métodos más utilizados para evaluar la capacidad portante de un suelo. Su aplicación se ha extendido mundialmente debido a que ofrece una forma sencilla y estandarizada de comparar la resistencia de un suelo con la de un material de referencia. Esto lo convierte en una herramienta fundamental para diseñar espesores de pavimento (AASHTO, 1993).

El CBR permite estimar el desempeño del suelo ante cargas repetitivas aplicadas por el tránsito vehicular. Debido a que la resistencia de los suelos, especialmente los cohesivos, disminuye considerablemente bajo condiciones de saturación, el ensayo se realiza tanto en

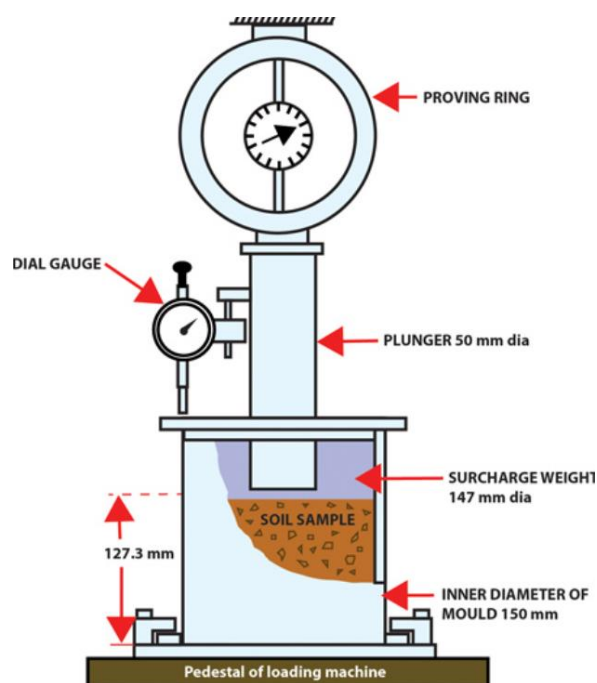
condición seca como en remojo. Esta comparación ayuda a identificar si el material puede mantener su integridad estructural bajo situaciones reales de humedad (Das & Sobhan, 2018).

2.12.1 Fundamento teórico del CBR

El principio del ensayo consiste en medir la carga necesaria para que un pistón estándar penetre 2.54 mm (0.1 in) y 5.08 mm (0.2 in) dentro de una muestra compactada. Posteriormente, esta carga se compara con una curva patrón de referencia obtenida de un material granular de alta calidad.

Figura 1

Esquema del principio del ensayo California Bearing Ratio (CBR).



Nota. La figura muestra la aplicación de carga mediante un pistón estándar de 50 mm de diámetro sobre una muestra de suelo compactada, así como la medición de la carga y la penetración tomado de ASTM International (2021)

Tabla 2*Parámetros principales del ensayo CBR*

Parámetro	Valor	Norma
Velocidad del pistón	1.27 mm/min	ASTM D1883
Penetraciones	2.54 y 5.08 mm	ASTM D1883
Tiempo de remojo	96 h	ASTM D1883
Esponjamiento	% expansión vertical	ASTM D1883

Nota. Parámetros fundamentales tomado de ASTM International (2021)

El resultado, expresado como porcentaje, refleja la capacidad del suelo para resistir deformaciones. Valores bajos se asocian a suelos cohesivos de alta plasticidad, mientras que valores altos corresponden a materiales granulares de buena calidad estructural (ASTM International, 2021).

Durante el ensayo CBR, la relación entre la carga aplicada y la penetración del pistón se representa mediante una curva carga–penetración. En determinados casos, la porción inicial de dicha curva puede presentar irregularidades asociadas a imperfecciones superficiales o a un contacto inicial no uniforme entre el pistón y la muestra. Por este motivo, la norma ASTM D1883 establece un procedimiento de corrección de la curva, desplazando el origen para obtener una respuesta representativa del comportamiento real del suelo.

Las curvas carga-penetración, incluyendo los casos sin corrección y las curvas corregidas para penetraciones de 0,1 in (2,54 mm) y 0,2 in (5,08 mm), así como las correcciones por irregularidades superficiales o concavidad inicial, se emplearon para obtener la carga ajustada en los puntos de referencia y, con ello, determinar el valor CBR representativo de cada espécimen conforme al procedimiento del ensayo. Estas correcciones permiten una determinación más precisa del índice CBR, asegurando la validez de los resultados obtenidos.

2.13 Normas técnicas del ensayo

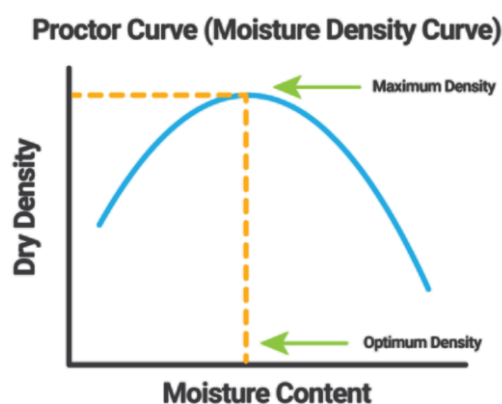
Las normas ASTM D1883 y AASHTO T193 establecen el procedimiento estandarizado para la realización del ensayo CBR. Ambas normativas garantizan uniformidad en los resultados, independientemente del laboratorio o país donde se ejecute el ensayo.

2.14 Control de humedad de compactación

La humedad de compactación es un parámetro crítico, ya que afecta la densidad del suelo y, por ende, el valor del CBR. Las normas establecen que la muestra debe compactarse a la humedad óptima obtenida mediante el ensayo Proctor. Una compactación fuera de esta humedad produce resultados que no reflejan el comportamiento real del material en obra.

Figura 2

Curva de compactación Proctor y determinación de la humedad óptima.



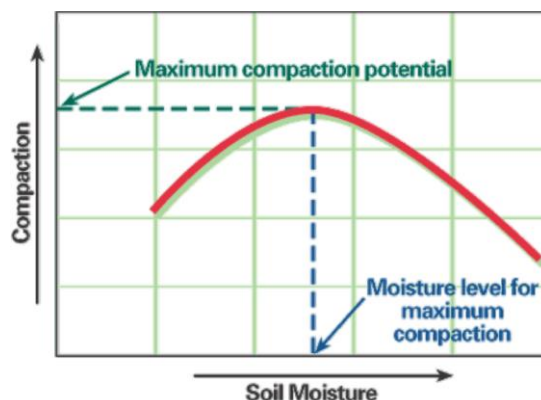
Nota. Relación entre el contenido de humedad y la densidad seca del suelo, utilizada para definir la humedad óptima de compactación según la ASTM International (2021)

2.15 Control de densidad seca

La densidad seca obtenida en el ensayo Proctor determina el grado de compactación requerido para la muestra del CBR. Una densidad insuficiente reduce la resistencia y deriva en valores artificialmente bajos del ensayo CBR; en cambio, densidades excesivamente altas pueden fracturar partículas o alterar la estructura natural del suelo.

Figura 3

Control de la densidad seca y grado de compactación del suelo.



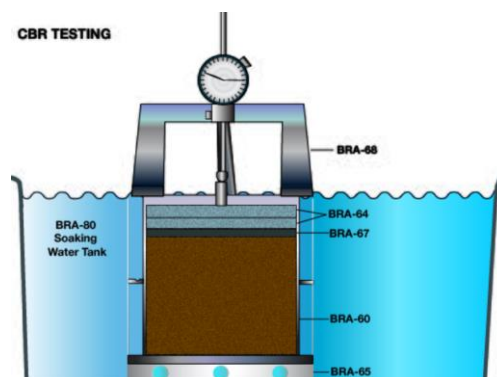
Nota. Relación entre la densidad seca alcanzada y el grado de compactación, determinante en la resistencia del suelo y en el valor del CBR, tomado de ASTM International (2021)

2.16 Procedimiento de remojo

Las normas especifican que el suelo debe ser sometido a un remojo continuo durante 96 horas para simular la saturación que ocurre en campo durante la época de lluvias. Este procedimiento permite identificar la condición crítica del suelo, ya que muchos suelos cohesivos pierden resistencia al saturarse.

Figura 4

Procedimiento de remojo de la muestra en el ensayo California Bearing Ratio (CBR).



Nota. La muestra compactada se somete a remojo continuo durante 96 horas para simular condiciones de saturación conforme a la ASTM International (2021)

2.16.1 Medición del esponjamiento

El esponjamiento corresponde al aumento volumétrico que experimenta la muestra durante el remojo. Su medición se realiza mediante un reloj comparador y es un indicador importante para suelos expansivos. Un esponjamiento elevado afecta directamente la estabilidad del pavimento.

Figura 5

Medición del esponjamiento de la muestra durante el ensayo California Bearing Ratio (CBR).



Nota. El esponjamiento se determina midiendo la expansión vertical, conforme a la ASTM International (2021)

2.16.2 Velocidad de penetración del pistón

La velocidad de penetración establecida por la normativa es de 1.27 mm/min. Esta velocidad constante permite obtener una curva carga–penetración confiable y comparable entre laboratorios. Una velocidad inadecuada introduce errores en la resistencia registrada.

2.16.3 Análisis de la curva carga-penetración

La curva carga-penetración constituye la base para la interpretación del ensayo. Permite corregir hundimientos iniciales, identificar zonas inestables y seleccionar el valor representativo de CBR entre las dos penetraciones estándar.

2.17 Procedimiento de laboratorio

El procedimiento de laboratorio se desarrolla en una secuencia sistemática que garantiza la reproducibilidad y confiabilidad de los resultados.

2.17.1 Preparación y tamizado del suelo

El suelo se seca al aire o en horno a baja temperatura y se tamiza para separar las fracciones gruesas que puedan interferir con la compactación. La norma exige que el material pase por el tamiz N° 4 para asegurar homogeneidad granulométrica.

Figura 6

Preparación y tamizado del suelo previo a los ensayos de laboratorio.



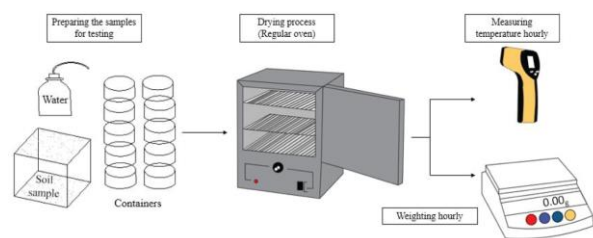
Nota. El suelo se seca, desagrega y tamiza mediante tamices normalizados para obtener una fracción representativa del material a ensayar.

2.17.2 Determinación de la humedad óptima

La humedad óptima se obtiene mediante el ensayo Proctor. Este valor corresponde al contenido de agua que permite alcanzar la densidad seca máxima. Ensayar el CBR fuera de este valor produce resultados que no reflejan las condiciones esperadas en una subrasante compactada adecuadamente.

Figura 7

Procedimiento de determinación del contenido de humedad del suelo en laboratorio.



Nota. Esquema del proceso de preparación de la muestra, secado en estufa, control de temperatura y pesaje para la determinación del contenido de humedad del suelo, conforme a la ASTM International (2021)

2.17.3 Compactación en capas

La muestra se compacta en un molde cilíndrico aplicando una energía de compactación estándar o modificada, según el requerimiento del proyecto. Cada capa debe ser compactada uniformemente para evitar zonas débiles. La calidad de esta etapa determina en gran medida la credibilidad del valor final de CBR.

Figura 8

Compactación del suelo en molde Proctor durante el ensayo de laboratorio.



Nota. Proceso de compactación del suelo mediante golpes controlados con martillo Proctor, conforme a la ASTM International (2021)

2.17.3.1 Remojo por 96 horas

El remojo permite que la muestra alcance saturación completa. Durante este tiempo, el suelo puede experimentar expansión volumétrica, lo cual se registra como esponjamiento.

El remojo reproduce condiciones climáticas reales de servicio, por lo que su realización es fundamental para obtener resultados de CBR confiables.

Figura 9

Remojo continuo de muestras CBR en laboratorio.



Nota. Las muestras permanecen sumergidas durante 96 horas para alcanzar la condición de saturación, conforme a la ASTM International (2021)

2.17.4 Medición del hinchamiento

La medición del hinchamiento se realiza mediante un reloj comparador. Este parámetro indica la susceptibilidad del suelo a cambios volumétricos, característica típica de suelos arcillosos expansivos. Valores elevados de esponjamiento se asocian con valores bajos de CBR en condición remojada.

2.18 Ensayo de penetración

Una vez finalizado el remojo, se procede al ensayo de penetración, el pistón se introduce en la muestra a velocidad constante mientras se registra la carga aplicada. Esta etapa es crítica porque refleja el comportamiento mecánico del suelo frente a esfuerzos de compresión y corte.

Figura 10

Ejecución del ensayo California Bearing Ratio (CBR) en laboratorio



Nota. El operador aplica la carga mediante el pistón estándar y registra la penetración y la carga durante el desarrollo del ensayo, conforme a la ASTM International (2021)

2.19 Cálculo del CBR

El CBR se calcula comparando la carga medida con los valores patrón correspondientes a penetraciones de 2.54 mm y 5.08 mm. La norma establece que se debe seleccionar el valor más conservador o representativo.

2.19.1 Ensayo de esponjamiento

El ensayo de esponjamiento evalúa el aumento volumétrico que experimenta la muestra durante el remojo. Su determinación es esencial para identificar suelos con comportamiento expansivo y para anticipar posibles deformaciones verticales que puedan afectar la estabilidad del pavimento (Holtz, Kovacs, & Sheahan, 2011).

2.19.2 Procedimiento del ensayo de esponjamiento

El procedimiento consiste en registrar la altura inicial de la muestra compactada y monitorear el incremento de altura durante las 96 horas de remojo.

La diferencia entre ambas alturas permite calcular el porcentaje de esponjamiento, el cual nos indicará cual será el comportamiento volumétrico del suelo bajo condiciones de saturación.

2.19.3 Importancia del esponjamiento en pavimentos

Los suelos que presentan altos valores de esponjamiento suelen perder resistencia cuando se saturan y pueden causar levantamientos o deformaciones irregulares en la superficie del pavimento. Este comportamiento implica que, si el material va a utilizarse como subrasante, es necesario considerar técnicas de estabilización o mejorar las condiciones de drenaje para evitar fallas prematuras.

2.19.4 Curva carga-penetración

Según la ASTM International (2021), la curva carga-penetración muestra cómo responde la muestra cuando el pistón avanza dentro del suelo compactado. Esta gráfica permite identificar la rigidez del material y comprobar si la compactación fue adecuada.

Al inicio suele presentarse un pequeño asentamiento por el acomodo de las partículas. Después, la curva toma una pendiente más estable que refleja la resistencia real del suelo: una pendiente pronunciada indica un material firme, mientras que una pendiente baja revela un suelo más blando.

Revisar esta curva es importante porque permite detectar irregularidades como cambios bruscos o disminuciones de carga, los cuales pueden deberse a una preparación inadecuada de la muestra. Por ello su análisis es un paso previo esencial antes de obtener el valor final del CBR.

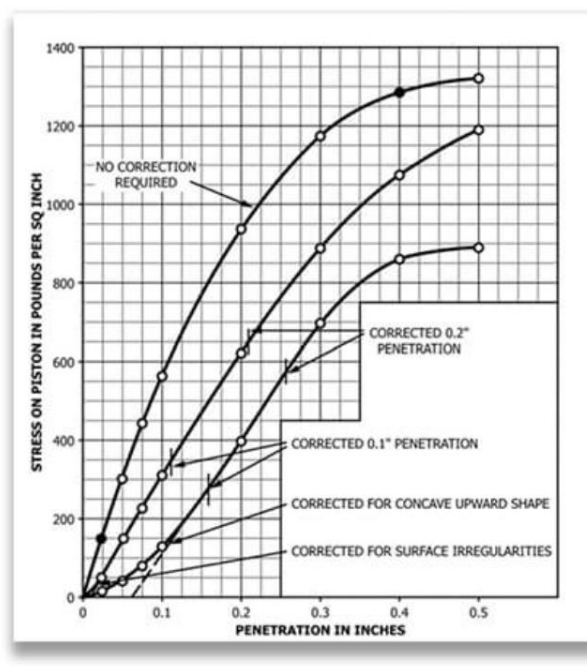
2.19.5 Obtención de la curva

Según la (ASTM International, 2021) la curva carga–penetración se obtiene registrando la fuerza que ejerce el pistón mientras avanza dentro de la muestra compactada. El pistón se mueve a una velocidad constante para asegurar que los datos sean comparables entre diferentes ensayos. Durante el proceso se anotan las cargas correspondientes a penetraciones específicas, en especial en los puntos de 2.54 mm y 5.08 mm, que son los valores base para calcular el CBR.

Una vez reunidos los datos, se construye la gráfica que relaciona carga y penetración. En suelos granulares la curva suele mostrar una pendiente más pronunciada debido a su mayor rigidez. En cambio, en suelos cohesivos, sobre todo cuando están húmedos, la pendiente suele ser más suave lo que indica baja capacidad de soporte.

Figura 11

Curva carga-penetración, ensayo California Bearing Ratio (CBR) y corrección de la curva



Nota. Curvas sin corrección y corregidas para penetraciones de 0.1 in y 0.2 in, conforme la ASTM International (2021)

2.20 Interpretación y corrección

Es común que al inicio del ensayo se presente un pequeño asentamiento debido al acomodo natural de las partículas o a irregularidades en la superficie. Este asentamiento puede generar una parte inicial de la curva que no representa la resistencia real del suelo. Para evitar errores, se corrige la curva extendiendo la pendiente principal hasta el origen según lo indicado en la ASTM International (2021).

Este ajuste permite que el CBR se calcule únicamente a partir de la resistencia efectiva del suelo. Una interpretación correcta evita sobreestimaciones y asegura que el valor obtenido sea representativo del comportamiento del material en condiciones de campo. Esta revisión es importante porque sirve como base para decisiones de diseño.

2.21 Aplicaciones del CBR

El CBR es uno de los parámetros más usados en ingeniería vial porque permite estimar de manera sencilla la resistencia relativa del suelo frente a cargas de tránsito. Con este valor se clasifican subrasantes, se definen espesores de pavimento y se comparan alternativas de mejoramiento del terreno. Además, el CBR es útil durante la construcción ya que permite verificar el grado de compactación alcanzado y evaluar si el suelo responde de acuerdo con lo previsto.

Tabla 3

Aplicación del CBR según tipo de suelo

Tipo de suelo	CBR (%)	Recomendación
Arcillas plásticas	<3	Requiere estabilización o reemplazo
Limos	3–7	Mejoramiento moderado
Arenas finas	7–15	Aceptable como subrasante
Gravas	>20	Excelente capacidad portante

Nota. Valores adaptados de la ASTM International (2021)

Según Budhu (2010), el CBR es una herramienta muy útil porque ayuda a tomar decisiones tanto en diseño como en control de calidad y en procesos de estabilización del suelo. Su valor es fácil de interpretar y puede aplicarse tanto en suelos granulares como en suelos cohesivos, siempre que se cumplan los procedimientos de preparación y compactación. Por ello el CBR se usa desde la fase de diseño estructural hasta el diagnóstico de fallas en pavimentos existentes.

2.21.1 Diseño de espesores de pavimento

Una de las aplicaciones más comunes del CBR es definir los espesores de las capas del pavimento. Métodos como AASHTO 1993, los enfoques empírico-mecanicistas y las especificaciones del Ministerio de Transporte y Obras Públicas del Ecuador (2022), parten del valor de CBR para conocer la capacidad de soporte de la subrasante. Cuando el CBR es bajo, se requieren capas más gruesas de subbase y/o base granular y/o incluso estabilizar el suelo antes

de construir. Suelos con valores reducidos suelen deformarse con facilidad, por ello necesitan mayor refuerzo para distribuir las cargas del tránsito.

2.21.2 Clasificación de subrasantes

El CBR también se utiliza para clasificar la calidad de la subrasante porque entrega un valor mecánico que complementa los sistemas SUCS y AASHTO. Por ejemplo, cuando un suelo tiene CBR menor al 3 % se considera de muy baja calidad y normalmente requiere intervención inmediata. En cambio, valores superiores al 10 % indican que el suelo puede funcionar en pavimentos convencionales, sin necesidad de grandes mejoras. Esta clasificación facilita decidir si se sustituye el material, se estabiliza o se refuerza la estructura del pavimento.

2.21.3 Control de compactación en obra

Durante la construcción el CBR sirve como verificación de que la compactación realizada en campo cumple con lo especificado en el diseño. Para esto se toman muestras del terreno compactado y se ensayan en laboratorio. Si los valores de CBR obtenidos son menores a los requeridos, es necesario corregir mediante recompactación, ajuste de humedad o incorporación de material granular. Este control evita fallas prematuras y asegura que la subrasante brinde el soporte esperado.

2.21.4 Evaluación de estabilización del suelo

El CBR permite evaluar si un proceso de estabilización con cal, cemento, polímeros u otros aditivos ha sido efectivo. Comparar los valores antes y después del tratamiento ayuda a determinar cuánto aumentó la resistencia del suelo y si el resultado cumple con los criterios del proyecto. Esto es especialmente útil en suelos arcillosos de alta plasticidad que suelen presentar problemas de deformaciones. Cuando la estabilización incrementa el CBR es posible reducir espesores de capas superiores y optimizar costos.

2.21.5 Factores que afectan el CBR

Según Das y Sobhan (2018), el CBR depende de varios factores relacionados tanto con las propiedades del suelo como con las condiciones del ensayo. Elementos como la humedad, la densidad seca lograda, la mineralogía, la estructura interna y el contenido de finos influyen

directamente en la resistencia medida. Por ello es importante controlar cada etapa del proceso para evitar resultados poco representativos o inconsistentes.

2.21.5.1 Influencia de la humedad

La humedad es uno de los factores que más afecta el CBR, especialmente en suelos cohesivos. Cuando aumenta el contenido de agua disminuye la succión matricial y los enlaces entre partículas se debilitan, lo que reduce notablemente la resistencia. Este comportamiento explica por qué el CBR remojado suele ser mucho menor que el obtenido en condición natural. Debido a esta reducción varios métodos de diseño utilizan únicamente el CBR remojado como la condición crítica del suelo.

2.21.5.2 Densidad seca lograda

La densidad seca alcanzada durante la compactación determina la estructura interna del suelo y su capacidad para resistir cargas. Suelos compactados cercanos a su densidad máxima presentan mayor resistencia y, por ende, valores más altos de CBR. Por el contrario, cuando la compactación es insuficiente o no uniforme, se generan zonas débiles que reducen la capacidad portante del material. El control de la compactación es esencial para obtener valores representativos.

2.21.5.3 Mineralogía del suelo

La composición mineralógica influye directamente en el comportamiento mecánico del suelo. Suelos con minerales expansivos, como aquellos que contienen esmectitas, tienden a absorber agua y perder resistencia al estar saturados, mostrando valores bajos de CBR. En cambio, suelos con predominancia de minerales menos activos, como la caolinita, suelen presentar comportamientos más estables tanto en seco como en saturado.

2.21.5.4 Estructura del suelo y contenido de finos

La estructura interna, la plasticidad y el porcentaje de finos afectan considerablemente la resistencia del suelo. Un contenido excesivo de finos incrementa la cohesión aparente, pero reduce la fricción interna, lo que se refleja en valores de CBR más bajos. Suelos bien gradados, con estructura granular estable, ofrecen una resistencia superior en comparación con aquellos con granulometría deficiente o con alta plasticidad.

2.22 Ensayo DCP (Penetrómetro de Cono Dinámico)

El ensayo DCP (Dynamic Cone Penetrometer) es un método de evaluación in situ ampliamente utilizado en ingeniería vial para determinar la resistencia relativa de suelos y materiales granulares mediante la medición de la penetración producida por impactos controlados.

Según la (ASTM International, 2018) una de las mayores ventajas del DCP es que permite obtener información rápida y continua con profundidad. Su portabilidad facilita su uso en proyectos de construcción, mantenimiento vial y evaluación de subrasantes, ya que ofrece una alternativa más simple y económica frente a otros métodos de penetración que requieren equipos complejos. Debido a esta eficiencia el DCP se ha convertido en una herramienta útil en estudios preliminares y en la verificación de capas compactadas en obra.

El equipo puede generar datos confiables en suelos granulares, limos y arcillas de baja a media plasticidad. Los resultados se expresan mediante el índice de penetración por golpe (DCPI en mm/golpe)) que luego puede correlacionarse con el CBR, el módulo resiliente u otras propiedades geotécnicas. Esta capacidad de relacionar parámetros lo hace especialmente valioso en trabajos donde se necesita una evaluación rápida del estado del terreno.

2.22.1 Principio de funcionamiento

El funcionamiento del DCP se basa en la penetración de un cono metálico impulsado por un martillo que cae desde una altura fija. Cada golpe genera un avance medible del cono y ese avance acumulado permite conocer cómo responde el suelo frente a la energía aplicada. El índice DCPI representa la penetración promedio por golpe. Cuando el DCPI es bajo el suelo suele ser denso o rígido. En cambio, un DCPI alto indica materiales blandos o con poca capacidad de soporte.

El método permite obtener un perfil continuo de resistencia en profundidad. Esto ayuda a identificar capas débiles, variaciones estratigráficas o zonas con problemas de compactación y humedad. Como los datos se registran directamente en campo, el DCP facilita decisiones inmediatas durante obras viales o investigaciones preliminares.

2.22.2 Medición de la penetración

La medición se realiza registrando el avance del cono después de cada golpe o después de un conjunto de golpes. El cono, se introduce en el suelo por la energía transmitida por el martillo. Con la profundidad acumulada y el número total de golpes, se calcula el DCPI, que es el parámetro principal del ensayo.

Es importante medir con precisión, ya que errores en la lectura pueden llevar a conclusiones equivocadas sobre la resistencia del suelo. Por ello se recomienda trabajar con equipos calibrados, barras guía bien alineadas y personal capacitado que asegure registros confiables.

2.22.3 Índice de penetración (DCPI)

El índice de penetración por golpe se expresa en milímetros por golpe y resume la resistencia relativa del suelo. Un DCPI bajo indica un terreno firme o bien compactado, mientras que valores altos suelen relacionarse con suelos húmedos, blandos o poco compactados.

El DCPI es importante porque sirve como base para generar correlaciones con el CBR u otros parámetros de capacidad portante. De esta forma, es posible estimar propiedades geotécnicas sin realizar ensayos más complejos o sin extraer muestras de laboratorio, lo que reduce tiempo y costos durante la etapa de evaluación.

Tabla 4

Interpretación típica de valores DCPI

Tipo de suelo	DCPI (mm/golpe)	Interpretación
Arcilla	20–35	Baja resistencia
Limo	12–20	Media
Arena	5–12	Alta resistencia

Nota. Adaptado de ASTM International (2018).

2.2.2.4 Descripción del equipo

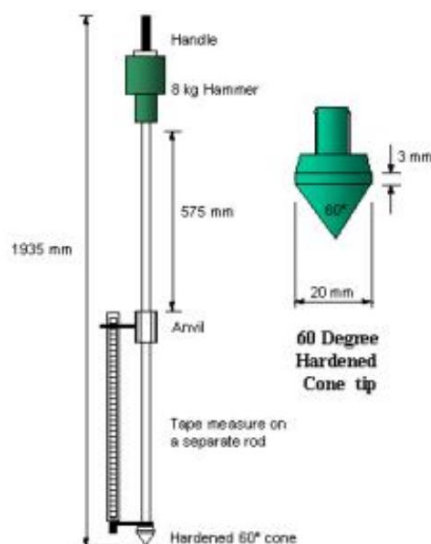
Según la ASTM International (2018), el DCPI está formado por un conjunto de piezas metálicas diseñadas para transmitir golpes de manera uniforme al suelo. Su estructura es resistente y fácil de manipular, por lo que puede utilizarse en diferentes condiciones de campo. El equipo es compacto y ligero, lo que facilita su transporte y lo convierte en una herramienta útil en proyectos de cualquier escala.

2.2.2.4.1 Cono

El cono suele fabricarse en acero endurecido, ya que debe resistir impactos repetidos durante el ensayo. Su geometría está estandarizada con un ángulo cercano a 60° y un diámetro definido, para asegurar que la penetración sea uniforme entre distintos ensayos. Esta forma permite trabajar en suelos granulares y en arcillas de resistencia moderada.

Figura 12

Cono del penetrómetro dinámico de cono (DCP)



Nota. Cono de acero con ángulo de 60° empleado para la medición de la resistencia a la penetración del suelo in situ.

2.2.2.4.2 Varillas y guía

Las varillas conectan el cono con el resto del equipo y permiten medir el avance producido en cada golpe. La guía mantiene el martillo alineado de forma vertical para que la

energía llegue correctamente al cono. Esta alineación evita desviaciones que podrían alterar la lectura del DCPI o generar errores por fricción lateral.

Figura 13

Varillas y guía del penetrómetro dinámico alineadas verticalmente durante el ensayo DCP



Nota. El sistema de guía asegura la correcta alineación del equipo

2.22.4.3 Martillo y sistema de caída

El martillo es el elemento que aporta la energía durante el ensayo. Su masa y la altura de caída están definidas por la norma ASTM D6951, lo que garantiza que cada golpe transmita la misma energía. El sistema de caída libre asegura que el operador no interfiera en la aplicación de los impactos y que el proceso sea repetible.

Figura 14

Equipo Completo para la realización del ensayo DCP



Nota. Martillo de acero de masa normalizada utilizado para generar la energía de impacto

2.22.4.4 Regla o medidor de profundidad

La regla o medidor permite registrar la penetración acumulada del cono con precisión. Este instrumento es clave para obtener un perfil confiable de resistencia en función de la profundidad. Lecturas exactas garantizan que el DCPI refleje realmente el comportamiento del suelo.

2.23 Normativa ASTM D6951

La norma ASTM D6951 regula el uso del DCPI e incluye especificaciones sobre el equipo, el procedimiento y la interpretación de los resultados. La norma establece requisitos para la calibración del dispositivo, la secuencia de golpes y el registro de la penetración. También, indica las condiciones necesarias para correlacionar el DCPI con parámetros como el CBR. Asimismo, define limitaciones en suelos demasiado blandos o demasiado duros donde el ensayo puede no ser representativo.

2.24 Ventajas, limitaciones y aplicaciones prácticas

El DCPI ofrece ventajas importantes como rapidez, bajo costo y facilidad de operación. No requiere extraer muestras ni utilizar equipos pesados, por lo que es útil en zonas de difícil

acceso. Su capacidad para generar un perfil continuo de resistencia permite identificar cambios estratigráficos y detectar capas débiles.

En ciertos suelos el método presenta limitaciones. En terrenos muy duros o con gravas gruesas el cono puede dañarse o avanzar muy poco lo que dificulta la interpretación. En suelos muy blandos, la penetración excesiva también puede generar datos poco confiables. Por esas razones, el DCP suele complementarse con otros ensayos cuando las condiciones del terreno son extremas.

En la práctica, el DCPI se utiliza para verificar la compactación de capas granulares, evaluar subbases y diagnosticar fallas en pavimentos. También es común en estudios preliminares de carreteras, porque permite identificar rápidamente zonas que requieren mejoramiento.

2.25 Correlaciones entre CBR y DCP

Según (Livneh, 1985) las correlaciones entre el CBR y el DCP se desarrollaron para estimar la capacidad portante del suelo con mediciones rápidas obtenidas en campo. La relación entre ambos ensayos se basa en que la penetración del DCP refleja la resistencia del suelo de manera similar a lo medido con el CBR, aunque cada método utiliza una técnica distinta. A lo largo de los años, varios investigadores han propuesto ecuaciones empíricas que permiten estimar el CBR a partir del Índice de Penetración del Cono Dinámico (DCPI). Aun así, estas ecuaciones deben aplicarse con criterio, ya que dependen de factores como la humedad, la compactación y la mineralogía del suelo.

La razón para correlacionar ambos ensayos es práctica. El CBR requiere tiempo y preparación en laboratorio, mientras que el DCP permite obtener resultados en el lugar de trabajo con equipo sencillo. Por eso las correlaciones se utilizan con frecuencia en estudios preliminares, controles de obra y diagnósticos rápidos en pavimentos.

2.26 Evolución histórica de las correlaciones CBR-DCP

El desarrollo de correlaciones entre CBR y DCP inició en Sudáfrica durante la década de 1970, cuando (Kleyn, 1982) realizó uno de los primeros estudios sistemáticos sobre el uso del DCP en pavimentos. Su trabajo demostró que existía una relación significativa entre el índice

de penetración y la resistencia del suelo medida con el CBR. Posteriormente, se desarrollaron nuevas ecuaciones en Estados Unidos, Israel, Australia y otros países, donde se adaptaron las correlaciones a diferentes suelos y condiciones climáticas (Webster, Brown, & Porter, 1992).

En las décadas siguientes, diversos investigadores refinaron estas ecuaciones mediante análisis estadísticos más robustos, ampliación de bases de datos y aplicación de métodos de regresión avanzada. Entre ellos destacan (Livneh, 1985), quien validó la correlación en suelos de textura fina y media, y (Webster, Brown, & Porter, 1992), quienes desarrollaron correlaciones ampliamente utilizadas por el Cuerpo de Ingenieros de Estados Unidos.

Según (Lee, Park, & Kim, 2019) los estudios más recientes han incorporado técnicas modernas de análisis de datos para mejorar la relación entre el CBR y el DCPI. Estos autores han utilizado modelos no lineales y procesos de calibración local con el objetivo de obtener estimaciones más confiables en diferentes tipos de suelo. Este enfoque permite ajustar las ecuaciones empíricas a las condiciones específicas de cada región.

2.27 Modelos clásicos más utilizados

Con el paso del tiempo se han propuesto varias ecuaciones empíricas que relacionan el CBR y el DCPI. Aunque cada modelo tiene su propia estructura matemática, todos buscan explicar cómo la penetración medida con el DCPI puede anticipar la resistencia estimada mediante el CBR. Entre los modelos más conocidos destacan los siguientes:

(Kleyn, 1982): Desarrolló una ecuación donde el CBR disminuye conforme aumenta el DCPI. Su propuesta es una de las más utilizadas a nivel internacional porque funciona adecuadamente en suelos granulares y en materiales cohesivos de resistencia media. A pesar de su antigüedad, sigue siendo una referencia básica en muchos estudios de pavimentos.

(Livneh, 1985): Analizó suelos con distintas texturas y demostró que la relación entre el CBR y el DCPI puede expresarse mediante funciones exponenciales o de potencia. Su trabajo permitió evidenciar que no existe una ecuación universal para todos los suelos y que la respuesta depende en gran medida del material analizado. Este aporte abrió el camino para desarrollar correlaciones más específicas.

(Webster, Brown, & Porter, 1992): Desarrollaron correlaciones basadas en datos de campo obtenidos en proyectos del ejército estadounidense. Sus ecuaciones presentan un buen ajuste para suelos granulares y para capas compactadas en pavimentos militares o de alta carga.

Tabla 5

Correlaciones empíricas CBR–DCPI

Autor	Ecuación	Aplicación	Observación
Kleyn (1975)	$CBR = 292/DCPI^2$	Granulares	Adecuada para suelos gruesos
Livneh (1989)	$\log(CBR) = 2.81 - 1.32 \log(DCPI)$	Finos	Precisa para arcillas
Webster et al. (1994)	$CBR = a \cdot DCPI^b$	Mixtos	Requiere calibración local

Nota. Adaptado de la norma ASTM International (2018).

Modelos recientes de los autores Lee et al., (2019), incorporan modelos estadísticos avanzados y análisis de grandes bases de datos. Estos estudios modernos ofrecen mejores ajustes para suelos tropicales, residuales y arcillosos, destacando la importancia de calibraciones locales para mejorar la precisión.

Estas correlaciones muestran un patrón general: a mayor DCPI, menor CBR, reflejando que suelos más blandos presentan mayor penetración y menor capacidad portante. Sin embargo, la dispersión observada en muchos estudios justifica la necesidad de desarrollar correlaciones específicas para cada región.

2.28 Fundamentos estadísticos de las ecuaciones de correlación

El desarrollo de correlaciones entre CBR y DCPI requiere un análisis estadístico riguroso para garantizar que los modelos obtenidos sean confiables. Generalmente, las ecuaciones se derivan mediante regresiones no lineales, logarítmicas, exponenciales o de potencia, dependiendo del patrón observado en los datos. Los coeficientes de determinación (R^2) permiten evaluar la fuerza de la relación entre ambos parámetros, mientras que los análisis de error y validación cruzada sirven para verificar la consistencia del modelo.

2.29 Limitaciones de las correlaciones existentes

A pesar de su utilidad, las correlaciones entre CBR y DCP presentan limitaciones que deben ser consideradas antes de su aplicación. En primer lugar, la variabilidad de los suelos hace que ninguna ecuación sea universal. Factores como la textura, la plasticidad, el contenido de finos, la mineralogía y la humedad influyen directamente en la resistencia medida y pueden generar desviaciones importantes en la predicción del CBR. Además, suelos altamente expansivos o saturados tienden a mostrar comportamientos atípicos en comparación con los suelos granulares para los cuales se desarrollaron muchas de las correlaciones originales (Livneh, 1985).

Otra limitación importante es que el DCP mide una resistencia dinámica, mientras que el CBR representa un comportamiento bajo carga estática. Esta diferencia conceptual puede generar discrepancias en ciertos tipos de suelos, especialmente en arcillas blandas o limos sensibles. Asimismo, las condiciones in situ, como variaciones de humedad, raíces, gravas o elementos intrusivos, pueden alterar las lecturas del DCP, comprometiendo la confiabilidad del DCPI y, por ende, de la correlación obtenida.

2.30 Necesidad de desarrollar correlaciones locales

Como señalan varios investigadores, la geología y el clima de cada región influyen directamente en la respuesta del suelo. Por esta razón, las correlaciones generales no siempre ofrecen valores confiables de CBR para todas las zonas. En muchos casos resulta necesario formular ecuaciones locales que se ajusten a las características específicas del material. Este enfoque es especialmente importante en suelos tropicales, residuales o volcánicos, donde las propiedades particulares pueden generar comportamientos que no coinciden con los modelos tradicionales.

El desarrollo de una correlación local requiere recopilar datos de ensayos CBR y DCP realizados en suelos representativos del área de estudio. Con esa información se construye una base de datos que luego se analiza estadísticamente para identificar el modelo que mejor describe el comportamiento del material. Este proceso asegura que la ecuación obtenida refleje las condiciones reales del terreno, lo cual es fundamental para el diseño vial y la toma de decisiones en campo.

2.31 Estado del Arte

La evaluación de la capacidad portante de los suelos de subrasante es un aspecto clave en el diseño y análisis de pavimentos, ya que condiciona el desempeño estructural de las vías. El ensayo CBR ha sido tradicionalmente utilizado para este fin; no obstante, su aplicación requiere tiempos prolongados y condiciones controladas de laboratorio. Ante ello, el penetrómetro dinámico de cono (DCP) se presenta como una alternativa práctica para la estimación rápida de la resistencia del suelo directamente en campo.

Diversos estudios han analizado la relación entre los resultados obtenidos mediante los ensayos CBR y DCP, proponiendo modelos de correlación que permiten estimar la capacidad portante del suelo con distintos niveles de precisión. La literatura revisada evidencia que dichas correlaciones están influenciadas por factores como el tipo de suelo, la granulometría, la plasticidad, la humedad y el grado de compactación, lo que genera variaciones significativas entre regiones y condiciones geotécnicas.

En investigaciones desarrolladas en Ecuador y otros países de la región andina, se reportan correlaciones que van desde moderadas hasta muy altas, dependiendo de la homogeneidad del suelo y de las condiciones de ensayo. En este sentido, el estado del arte destaca la necesidad de establecer correlaciones ajustadas al contexto local, que permitan un uso confiable del ensayo DCP como herramienta complementaria en el diseño de pavimentos.

Tabla 6

Resumen de resultados de correlación

Nro.	Autor	Tema (tesis / artículo)	Tipo de suelos	Resultados de correlación
1	(Angamarca Solano, 2013)	Determinación del CBR de laboratorio y natural en suelos finos y su correlación con el ensayo DCP en Quito	Suelos finos de subrasante en Quito	$R^2 \approx 0.95$, indica una relación muy fuerte entre DCP y CBR, permitiendo estimaciones confiables.
2	(Manotoa Santana, 2016)	Estudio de la correlación entre los ensayos DCP y CBR en los diferentes tipos de suelos	Varios tipos de suelos de Ambato (subrasantes)	$R^2 \geq 0.90$, demuestra una correlación consistente y estable en todos los modelos evaluados.

3	(Borja Ortiz, 2021)	Correlación entre CBR, DCP y propiedades índice y mecánicas de suelos granulares en Píllaro	Suelos granulares de subrasante	$R^2 = 0.911$ y 0.930 , evidencia alta precisión predictiva en suelos variables.
4	(Gallegos, 2022)	Análisis de la correlación entre CBR, DCP y propiedades índices en suelos de Ambato, Quero, Tisaleo, Mocha y Cevallos	Suelos granulares de varios cantones de Tungurahua	$R^2 = 0.9877$, una de las correlaciones más fuertes reportadas, casi perfecta.
5	(Portilla Yandún, 2022)	Correlación entre CBR, DCP y propiedades mecánicas en suelos granulares	Suelos granulares de subrasante (Sierra centro de Ecuador)	$R^2 = 0.80-0.92$, los modelos muestran buena capacidad predictiva, especialmente en suelos compactados.
6	(Gordillo Granda, 2019)	Determinación del CBR estimado a partir del índice DCP en Bellavista – Mesa de los Pobres, Cuenca	Subrasante de suelos granulares/finos de vía rural en Cuenca	$R^2 \approx 0.74$, correlación aceptable influenciada por la variabilidad de suelos volcánicos.
7	(Arévalo Herrera & Cabrera Durán, 2022)	Correlación del CBR de laboratorio, CBR in situ y DCP para subrasantes naturales de Cuenca	Subrasantes naturales en Cuenca	$R^2 \approx 0.56$, correlación moderada por alta dispersión de datos.
8	(León Calderón & Zeas Cárdenas, 2022)	Determinación de la correlación entre los índices DCP in situ y CBR de laboratorio en la ciudad de Cuenca	Suelos de subrasante del cantón Cuenca	$R^2 = 0.60-0.80$, niveles medios debido a heterogeneidad granulométrica.
9	(Barreno Proaño, 2021)	Correlación entre CBR y DCP para vías rurales de la parroquia Pacto – Quito	Suelos de vías rurales (subrasantes)	$R^2 < 0.70$, indica una correlación limitada, influenciada por humedad y variabilidad del material.
10	(Castillo Morejón, 2019)	Correlación entre el penetrómetro dinámico de cono (DCP) y el CBR en campo: caso vía Portoviejo–Manta	Subrasante de vía Portoviejo–Manta	Correlación moderada, afectada por plasticidad y alta sensibilidad a humedad.
11	(Holguín Menéndez, 2024)	Correlación CBR–DCP para diseño de pavimentos en Cuenca	Subrasante de tramo vial en Cuenca	R^2 altos en modelos logarítmicos, apropiados para suelos

				con respuesta no lineal.
12	(Mamani Mantilla & Silvestre Mamani, 2021)	Estudio de correlación geotécnica del CBR y DCP en suelos de subrasante	Suelos de subrasante de ruta en Bolivia	$R^2 > 0.80$, relación fuerte afectada ligeramente por compactación urbana.
13	(Paucara Romero & Quispe Mamani, 2020)	Correlación entre CBR de laboratorio y DCP in situ en suelos del campus Cota Cota	Suelos del campus Cota Cota (La Paz)	$R^2 \approx 0.965$, altísima correlación típica de suelos homogéneos.
14	(Gálvez Idrogo, 2019)	Estudio comparativo CBR vs DCP en vía de evitamiento alterna de Cajamarca	Subrasante de vía de evitamiento en Cajamarca	$R^2 = 0.943$, fuerte correlación útil para diseño de pavimentos.
15	(Llanos Sánchez & Reyes Pérez, 2017)	Estudio comparativo de los ensayos CBR y PDC en la localidad de Picsi	Suelos de subrasante en Picsi (Lambayeque)	$R^2 \approx 0.943$, buena predictibilidad incluso en suelos de alta plasticidad.
16	(Injante, 2013)	Resistencia in situ de subrasantes mediante penetrómetro dinámico de cono en Ica	Subrasante en Ica (Perú)	$R^2 = 0.9591$, correlación muy estable en suelos uniformes.
17	(Bazán Galarreta, 2018)	Correlación entre CBR y PDC en suelos de Moche – Trujillo	Suelos de subrasante en Moche	$R^2 = 0.89-0.94$, adecuada para aplicaciones de ingeniería en climas húmedos.
18	(Contreras Ávila & García García, 2019)	Correlación del PDC con CBR en suelos de Engativá	Suelos finos y granulares de Engativá (Bogotá)	$R^2 \approx 0.603$, correlación moderada limitada por cohesión elevada.
19	(Osorio Martínez & Casas Gerena, 2011)	Correlación PDC–CBR para suelos de la localidad de Suba	Suelos de Suba (Bogotá)	$R^2 = 0.958$, modelos confiables incluso en suelos altamente plásticos.
20	(Flórez, Rodríguez, & Durán, 2017)	Estimación del valor CBR usando penetrómetro de cono dinámico	Suelos finos saturados (Arauca, Colombia)	$R^2 \approx 0.827$, buena correlación considerando la variabilidad local.

Nota. Elaboración propia

2.32 Marco normativo

2.32.1 Normativa del MTOP (Ecuador)

El (Ministerio de Transporte y Obras Públicas del Ecuador, 2022) establece lineamientos técnicos para evaluar suelos destinados a obras viales. Las Especificaciones Generales para la Construcción de Caminos y Puentes del mismo regulan procesos como la toma de muestras, la compactación y los requisitos mínimos de CBR según el tipo de vía. Estas disposiciones son obligatorias en proyectos públicos y sirven como referencia para determinar si un suelo puede funcionar como subrasante.

El Ministerio de Transporte y Obras Públicas del Ecuador también establece procedimientos para el control de compactación y define parámetros mínimos para las capas estructurales. En pavimentos se considera el CBR remojado como el valor de referencia, porque representa la condición más crítica del terreno durante temporadas de lluvia. Asimismo, reconoce el uso del DCPI como una herramienta útil durante el control de obra gracias a su rapidez y facilidad de aplicación en capas compactadas.

2.32.2 Normativa ASTM

ASTM International es una de las organizaciones más utilizadas en ingeniería geotécnica. El ensayo CBR está regulado por la norma ASTM D1883 que describe de manera detallada la preparación de la muestra, la compactación, el remojo y la interpretación de la curva carga–penetración. También establece parámetros como la humedad óptima, la densidad mínima aceptable y la velocidad del pistón durante la penetración.

El Índice de Penetración del Cono Dinámico (DCPI), se regula mediante la norma ASTM D6951 que describe las características del equipo, la geometría del cono, el peso del martillo y el sistema de caída. También define la forma correcta de registrar la penetración y las condiciones en que los resultados pueden correlacionarse con valores de CBR. Esta estandarización permite que los ensayos realizados en campo sean consistentes y comparables.

2.32.3 Normativa AASHTO

La Asociación Americana de Oficinas Estatales de Carreteras y Transporte (AASHTO, 1993) proporciona lineamientos ampliamente utilizados en proyectos viales. El ensayo CBR está descrito en AASHTO T193 que es equivalente a la norma ASTM D1883. Esta normativa regula la preparación de la muestra, el remojo, la penetración del pistón y la forma de analizar la resistencia del material.

La (AASHTO, 1993) también presenta métodos de diseño estructural en su guía, donde el CBR es un parámetro básico e importante para determinar la capacidad de soporte de la subrasante para estudios de pavimentos. Gran parte de las correlaciones entre resistencia y propiedades mecánicas del suelo se basan en estos procedimientos, lo que refuerza la importancia de esta institución en la ingeniería de pavimentos.

2.33 Importancia del cumplimiento normativo

El cumplimiento de las normas garantiza que los resultados de los ensayos sean confiables y aplicables en proyectos reales. Las disposiciones técnicas aseguran que los procedimientos se realicen bajo condiciones controladas, evitando errores que puedan generar valores no representativos. Esto es fundamental para la validez de las conclusiones y para la toma de decisiones en el diseño del pavimento.

La observancia normativa también es esencial cuando se correlacionan ensayos como el CBR y el DCP. Ambos dependen de factores como la humedad, la compactación y la preparación de las muestras, por lo que cualquier desviación puede afectar la relación entre los parámetros medidos. Un estudio riguroso debe basarse en normas reconocidas internacionalmente y en las exigencias locales para obtener resultados óptimos.

3 CAPÍTULO III

3.1 Tipo y diseño de investigación

El presente estudio se desarrolló bajo un enfoque cuantitativo, basado en el análisis de datos numéricos provenientes de ensayos de laboratorio previamente ejecutados por el Gobierno Provincial del Azuay, como parte de sus procesos de evaluación geotécnica para proyectos

viales. Esta información institucional constituye una base confiable y estandarizada que permite caracterizar el comportamiento mecánico del suelo y establecer correlaciones entre el CBR de laboratorio y el obtenido a partir del índice de penetración derivado del ensayo DCPI.

La investigación busca también generar resultados que contribuyan directamente a la mejora de los procesos de evaluación de subrasantes para obras viales en la parroquia El Valle. Su alcance es correlacional, ya que no se manipulan las variables, sino que se analiza la relación existente entre los valores obtenidos mediante CBR y los parámetros derivados del DCP. El diseño metodológico es no experimental porque los datos se evaluaron tal como fueron proporcionados por el Gobierno Provincial del Azuay, sin intervenir en la ejecución original de los ensayos. Además, el estudio es transversal, dado que la información analizada corresponde a un único periodo de toma de datos, por lo que no se puede evaluar el efecto de la temporalidad en los resultados.

3.2 Área de estudio

El estudio se llevó a cabo en la parroquia El Valle, ubicada en la zona sureste del cantón Cuenca. Esta área presenta una combinación de zonas urbanizadas en expansión y sectores rurales donde las condiciones del terreno requieren evaluaciones constantes para la adecuada planificación vial. El Gobierno Provincial del Azuay fue la entidad encargada de realizar las calicatas a cielo abierto y los ensayos geotécnicos utilizados en esta investigación, garantizando que los datos provengan de procedimientos técnicos y normativos institucionales.

Las muestras analizadas corresponden a calicatas ubicadas en sectores representativos como San Miguel, Santa Teresita, Limas y San Juan Loma, lo que permite obtener una caracterización del suelo que refleja adecuadamente las condiciones geotécnicas predominantes en la parroquia.

3.2.1 Contexto geológico del área de estudio

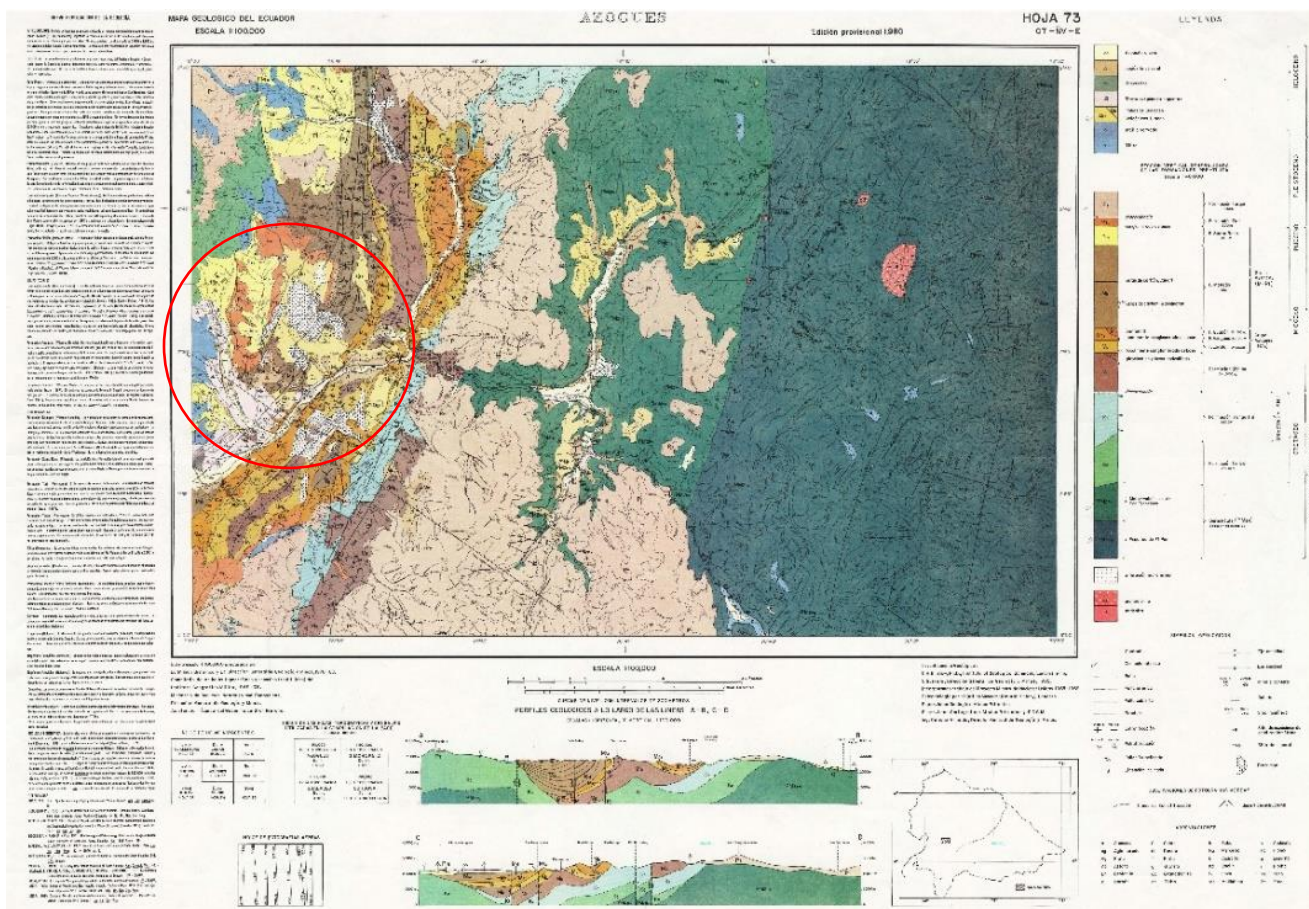
De acuerdo con el Instituto Geográfico Militar del Ecuador (1980), la zona donde se ubica la parroquia El Valle está conformada principalmente por depósitos coluviales (Qc), aluviales recientes (Qal) y materiales volcánicos alterados derivados de tobas y lavas. Estas unidades geológicas originan suelos finos altamente plásticos, lo que coincide con los resultados

de laboratorio proporcionados por el Gobierno Provincial, donde predominan suelos A-7 según la clasificación AASHTO y unidades CH, MH y CL según SUCS.

Los depósitos coluviales presentes en el sector aportan arcillas de estructura débil y comportamiento variable frente a la humedad, mientras que los depósitos aluviales se caracterizan por materiales más heterogéneos que incluyen arenas limosas, limos y arcillas. Asimismo, la intensa alteración de materiales volcánicos contribuye a la formación de arcillas con altos índices de plasticidad, lo que explica la clasificación predominante A-7 y los valores de Atterberg registrados.

Figura 15

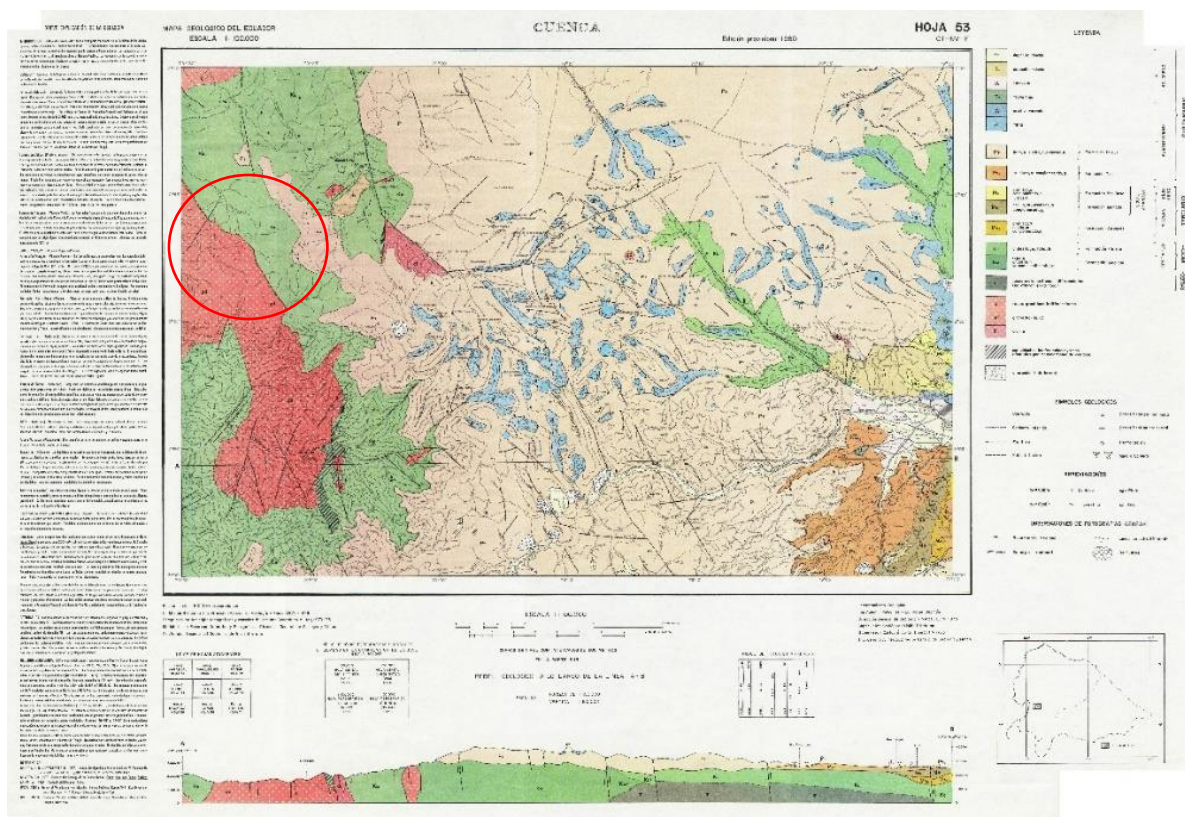
Mapa geológico del área de estudio (Hoja 73 – Azogues)



Nota. Adaptado de Instituto Geográfico Militar del Ecuador (1980)

Figura 16

Mapa geológico del área de estudio (Hoja 53 – Cuenca)



Nota. Adaptado de Instituto Geográfico Militar del Ecuador (1980)

3.2.2 Puntos de muestreo y profundidad de extracción

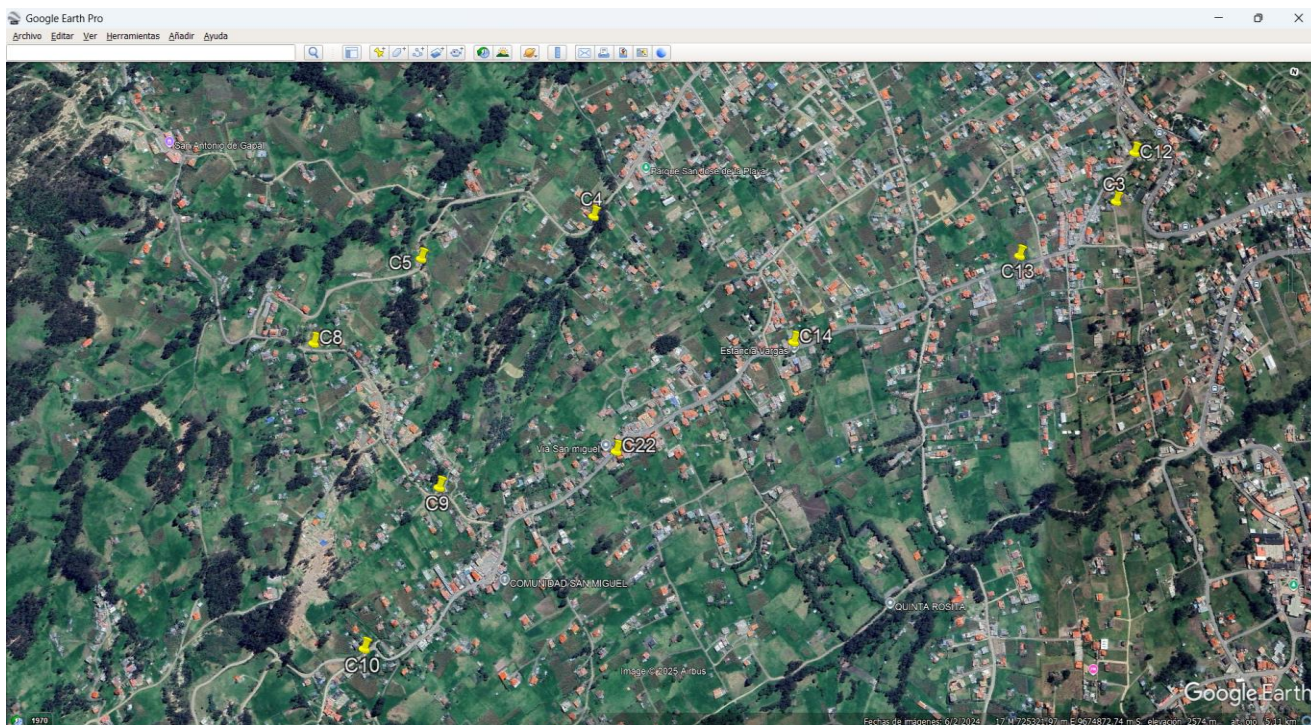
Las calicatas se excavaron entre 1.40 m y 1.60 m de profundidad, garantizando la recolección de muestras del estrato natural que realmente actúa como subrasante. Todas las ubicaciones fueron georreferenciadas mediante la herramienta Google Earth, asegurando la trazabilidad del muestreo.

Las calicatas fueron excavadas hasta profundidades comprendidas entre 1.40 m y 1.60 m, margen que permitió alcanzar de manera confiable el horizonte natural de apoyo, es decir, el estrato de suelo que efectivamente funciona como subrasante y sobre el cual se evalúan los parámetros geotécnicos del proyecto. Cada punto de excavación fue georreferenciado mediante la herramienta Google Earth, lo que asegura una trazabilidad precisa del proceso de muestreo,

facilita la verificación posterior de la ubicación real de los ensayos y contribuye a la correcta interpretación espacial de las características del terreno evaluado.

Figura 17

Ubicación de los puntos de muestreo de calicatas de CBR



Nota. Imagen satelital de Google Earth.

La distribución de calicatas muestra una cobertura estratégica de la zona de estudio, abarcando diferentes condiciones topográficas y geológicas. Las profundidades seleccionadas permiten obtener muestras representativas del estrato natural de subrasante.

Tabla 7*Ubicación en Coordenadas GPS de calicatas*

Calicata	Coordenadas UTM			Profundidad (m)
	Zona	Este	Norte	
C3	17 M	725535.00 m E	9675791.00 m S	1.60
C4	17 M	724380.00 m E	9675600.00 m S	1.50
C5	17 M	724018.00 m E	9675444.00 m S	1.50
C8	17 M	723827.00 m E	9675225.00 m S	1.50
C9	17 M	724150.00 m E	9674968.00 m S	1.50
C10	17 M	724053.00 m E	9674627.00 m S	1.50
C12	17 M	725566.00 m E	9675906.00 m S	1.40
C13	17 M	725334.00 m E	9675641.00 m S	1.40
C14	17 M	724860.00 m E	9675380.00 m S	1.50
C22	17 M	724512.00 m E	9675096.00 m S	1.60

Nota. Imagen satelital de Google Earth.

3.3 Materiales, equipos e instrumentos

Las muestras utilizadas en esta investigación fueron obtenidas previamente por el Gobierno Provincial del Azuay mediante excavación en campo y trasladadas a su laboratorio geotécnico para la realización de los ensayos granulométricos, de plasticidad, humedad natural, compactación Proctor Modificado y CBR. Posteriormente, los resultados oficiales fueron proporcionados al autor para su sistematización, clasificación y análisis dentro del presente estudio.

3.3.1 Materiales de Estudio

Los materiales de estudio corresponden a las muestras de suelo obtenidas en las calicatas descritas previamente en el área de la parroquia El Valle. Estas muestras fueron:

- Extraídas del estrato natural de subrasante entre 1.40 m y 1.60 m de profundidad.
- Almacenadas en sacos o bolsas debidamente identificadas con el código de calicata (C3, C4, C5, C8, C9, C10, C12, C13, C14 y C22).
- Trasladas al laboratorio en condiciones que eviten su alteración, procurando mantener su estado de humedad lo más cercano posible al de campo para los ensayos que lo requerían.

Estas muestras constituyen el material base para la ejecución de los ensayos granulométricos, de plasticidad, humedad natural, compactación Proctor Modificado y CBR de laboratorio, y posteriormente se utilizarán como referencia para la correlación con los resultados del ensayo DCP.

3.3.1.1 Equipos e instrumentos de laboratorio

Los equipos empleados en el laboratorio fueron seleccionados por estar aprobados y calibrados de acuerdo con los procedimientos internos del laboratorio y las normas ASTM y AASHTO. Entre los principales se incluyen:

Juego de tamices normalizados ASTM, con abertura de malla adecuada para la determinación del porcentaje de finos (incluyendo la malla N° 200), utilizados en el ensayo granulométrico.

Balanza digital de precisión, con capacidad y sensibilidad suficiente para registrar masas con la exactitud que exigen las normas de ensayo.

Estufa de secado, empleada para la determinación de humedad natural y para el secado de muestras según ASTM D2216.

Cápsulas metálicas y recipientes de ensayo, utilizados para contener y pesar las porciones de suelo durante la ejecución de los ensayos de humedad y límites de Atterberg.

Aparato de Casagrande, utilizado para la determinación del límite líquido mediante el conteo de golpes estandarizados sobre la muestra de suelo.

Vidrios de reloj, espátulas y rodillos, empleados en la determinación del límite plástico, para el amasado y conformado de hilos de suelo hasta diámetros normalizados.

Moldes Proctor y martillo modificado, según AASHTO T180, utilizados para la elaboración de probetas compactadas en el ensayo Proctor Modificado, mediante la aplicación de energía de compactación controlada.

Máquina de carga para ensayo CBR, equipada con anillo de carga y deformímetro calibrado, empleada para medir la resistencia a la penetración del pistón sobre las probetas compactadas.

Dispositivos de medición de deformación y carga, asociados al equipo CBR, que permiten registrar la relación carga–penetración y obtener el valor de CBR de cada muestra.

Todos estos equipos forman parte del equipamiento habitual de un laboratorio de mecánica de suelos y se utilizaron cumpliendo los protocolos internos de calibración y verificación, lo que permite considerar sus resultados como técnicamente confiables.

3.3.1.2 Equipos e instrumentos de campo

Además de los equipos empleados en laboratorio, para la fase de campo se utilizaron instrumentos que permiten ubicar y registrar adecuadamente los puntos de muestreo y, en etapas posteriores, aplicar el ensayo DCP. Entre ellos se consideran:

Dispositivo GPS o georreferenciación mediante Google Earth, utilizado para registrar las coordenadas de cada calicata y elaborar la tabla de coordenadas y las figuras de ubicación.

Herramientas manuales de excavación, como palas, picos y barretones, necesarias para la apertura de las calicatas hasta la profundidad requerida.

Recipientes y bolsas plásticas resistentes, empleados para almacenar las muestras de suelo extraídas, evitando pérdidas de material o contaminación.

Etiquetas, marcadores y formularios de campo, utilizados para el correcto rotulado de las muestras y el registro ordenado de la información asociada a cada calicata.

Equipo DCP (Dynamic Cone Penetrometer), que se utilizará en la etapa práctica para la obtención de los índices de penetración en campo y su correlación posterior con el CBR de laboratorio.

El uso combinado de estos materiales y equipos, todos aprobados por el laboratorio y adecuados para la naturaleza de la investigación, asegura que los datos obtenidos cumplan con las exigencias de calidad necesarias para el análisis correlacional que se desarrollará en capítulos posteriores.

3.3.2 Procedimientos de laboratorio

Los procedimientos de laboratorio utilizados en esta investigación corresponden a los ensayos previamente realizados por el Gobierno Provincial del Azuay, los cuales fueron ejecutados bajo normas técnicas ASTM y AASHTO. Estos procedimientos permiten obtener parámetros fundamentales para describir el comportamiento mecánico y físico del suelo, indispensables para la caracterización de la subrasante. En esta investigación, el rol principal consistió en recopilar, depurar, ordenar e interpretar los resultados proporcionados, asegurando que cada valor se asocie correctamente a su calicata correspondiente.

Además, se verificó la consistencia interna de los datos, contrastando los valores con rangos típicos para suelos de la zona. Este proceso permitió identificar patrones, relaciones y coherencia entre parámetros como humedad natural, límites de Atterberg, compactación y clasificación geotécnica. La sistematización también incluyó la revisión comparativa de los valores entre calicatas, con el fin de determinar tendencias y variabilidad espacial dentro del área estudiada. Con ello se construyó una base sólida y ordenada que sirve de soporte para el análisis e interpretación que se desarrolla posteriormente.

3.3.2.1 Porcentaje de Finos

El análisis muestra una predominancia de suelos finos, lo que refleja condiciones típicas de zonas con depósitos coluviales y materiales volcánicos alterados. Esta característica sugiere

que la subrasante posee una textura fina, que puede ser sensible a cambios de humedad y presentar una capacidad portante limitada frente a cargas repetitivas.

La alta proporción de finos también implica que el suelo puede exhibir problemas de drenaje, retención de agua y comportamientos de expansión o contracción dependiendo de su plasticidad. Esto es particularmente relevante para obras viales, ya que incrementa el riesgo de deformaciones y asentamientos si no se adoptan medidas de estabilización o control adecuado de humedad durante la construcción.

Tabla 8

Porcentaje de Finos

Calicata	% Finos
C3	83.20
C4	81.20
C5	62.65
C8	51.02
C9	63.40
C10	69.17
C12	72.56
C13	82.20
C14	84.40
C22	81.60

Nota. Ensayo realizado según ASTM D422. **Fuente:** Gobierno Provincial del Azuay

3.3.3 Límites de Atterberg

Los valores de límite líquido y plástico confirman que las muestras presentan plasticidad media a alta. Esto significa que los suelos pueden experimentar cambios volumétricos significativos cuando se humedecen, afectando su resistencia a la compresión y al corte. Esta condición es crítica para obras viales, porque sugiere la necesidad de controlar la humedad

durante la construcción y considerar posibles tratamientos de estabilización en zonas con índice de plasticidad (IP) alto.

Tabla 9

Límites de Atterberg

Calicata	LL	LP	IP
C3	55.39	27.32	28.07
C4	73.31	40.43	32.88
C5	48.53	19.80	28.73
C8	45.64	16.83	28.81
C9	63.13	30.12	33.01
C10	40.39	21.17	19.21
C12	43.55	20.61	22.95
C13	59.48	32.29	27.19
C14	67.67	34.47	33.20
C22	65.69	34.26	31.43

Nota. Ensayo realizado según ASTM D422. **Fuente:** Gobierno Provincial del Azuay

3.3.4 Humedad de las muestras

Los rangos de humedad natural evidencian diferencias importantes entre calicatas, lo cual sugiere variaciones en el drenaje superficial, la exposición ambiental y el contenido de finos. Suelos con mayor humedad tienden a mostrar menor resistencia inicial, especialmente si son arcillosos, mientras que los de humedad más baja indican zonas más secas o con mejor drenaje natural. Esta información es fundamental para interpretar el comportamiento del suelo en su estado inalterado.

Tabla 10*Humedad natural de las muestras*

Calicata	Humedad (%)
C3	24.49
C4	25.83
C5	20.52
C8	12.52
C9	22.74
C10	15.80
C12	15.71
C13	19.18
C14	21.47
C22	21.23

Nota. Ensayo realizado según ASTM D422. **Fuente:** Gobierno Provincial del Azuay

3.3.5 Densidad seca y humedad óptima

Los resultados muestran que los suelos más plásticos requieren mayor humedad para alcanzar una compactación eficiente. Esto se debe a la estructura de las arcillas, donde el agua funciona como lubricante entre las partículas, permitiendo una mejor acomodación bajo energía de compactación. Las densidades secas relativamente bajas confirman la naturaleza blanda y altamente compresible del suelo predominante.

Tabla 11*Densidad Seca y Humedad Optima*

Calicata	Yd máx (g/cm³)	W óptima (%)
C3	1.502	23.49
C4	1.292	26.15
C5	1.735	19.60
C8	1.765	17.20
C9	1.388	21.50
C10	1.625	17.20
C12	1.510	19.00
C13	1.320	23.60
C14	1.307	24.85
C22	1.375	24.10

Nota. Ensayo realizado según ASTM D422. **Fuente:** Gobierno Provincial de Azuay

3.4 Clasificación SUCS y AASHTO

La clasificación confirma una subrasante con predominio de arcillas de plasticidad media y alta, así como limos compresibles. El sistema AASHTO ubica la mayoría de las muestras en el grupo A-7, asociado a suelos de mala calidad para soporte de pavimentos. Los índices de grupo (IG) refuerzan esta condición, mostrando valores elevados que anticipan una subrasante débil.

Tabla 12*Clasificación SUCS y AASHTO*

Calicata	SUCS	AASHTO	IG
C3	CH	A-7-6	16
C4	MH	A-7-5	11
C5	CH	A-7-6	15
C8	CL	A-7-6	9
C9	CL	A-7-6	9
C10	CL	A-7-6	11
C12	CL	A-7-6	13
C13	MH	A-7-5	19
C14	MH	A-7-5	20
C22	MH	A-7-5	20

Nota. Ensayo realizado según ASTM D422.

3.4.1 Síntesis de Resultados de Calicatas

El conjunto de parámetros muestra que la subrasante de la parroquia El Valle presenta condiciones limitantes para soportar cargas sin tratamiento. El predominio de suelos finos, la alta plasticidad y las densidades secas relativamente bajas sugieren que el terreno posee baja resistencia y una marcada sensibilidad a cambios de humedad. Estas características pueden generar asentamientos diferenciales, deformaciones plásticas y pérdida de capacidad estructural en obras viales si no se aplican medidas de estabilización o un diseño adecuado del pavimento.

La siguiente tabla resume todos los resultados de los estudios de suelos de las calicatas.

Tabla 13

Cuadro Resumen de resultados proporcionados por el Gobierno Provincial.

Calicata	%F	LL	LP	IP	γ_d máx (g/cm³)	CBR 100%	SUCS	AASHTO
C3	83.20	55.39	27.32	28.07	1.502	2,84	CH	A-7-6
C4	81.20	73.31	40.43	32.88	1.292	4,07	MH	A-7-5
C5	62.65	48.53	19.80	28.73	1.735	4,69	CH	A-7-6
C8	51.02	45.64	16.83	28.81	1.765	5,50	CL	A-7-6
C9	63.40	63.13	30.12	33.01	1.388	5,68	CL	A-7-6
C10	69.17	40.39	21.17	19.21	1.625	4,59	CL	A-7-6
C12	72.56	43.55	20.61	22.95	1.510	2,49	CL	A-7-6
C13	82.20	59.48	32.29	27.19	1.320	2,67	MH	A-7-5
C14	84.40	67.67	34.47	33.20	1.307	2,42	MH	A-7-5
C22	81.60	65.69	34.26	31.43	1.375	2,84	MH	A-7-5

Nota. Ensayo realizado según ASTM D422.

Tabla 14*Resumen de Granulometría CBR*

Muestra	% Pasa No.4	% Pasa No.10	% Pasa No.20	% Pasa No.40	% Pasa No.60	% Pasa No.140	% Pasa No.200
C10	95,74	91,51	87,05	81,89	77,32	69,48	66,03
C12	98,27	97,65	96,3	93,35	85,61	70,13	66,12
C13	99,97	99,92	99,48	97,97	95,89	92,2	90,56
C14	96,41	94,16	92,84	92,16	91,46	84,96	75,95
C3	95,21	94,66	91,99	83,08	72,89	71,18	67,1
C4	97,56	96,68	94,78	90,76	85,07	81,92	76,25
C5	99,79	98,81	84,93	73,89	69,62	60,55	57,68
C8	100	99,93	99,65	98,6	91,88	64,28	56,38
C9	99,59	95,64	87,78	78,14	72,04	63,9	59,45

Fuente. Elaborado por los autores en base a la información proporcionada por el Gobierno Provincial de Azuay.

3.4.2 Interpretación de resultados obtenidos

En general, los resultados permiten ver que los suelos de la parroquia El Valle están formados, en su mayoría, por materiales finos como arcillas y limos. Esto se nota en los altos porcentajes de finos y en los límites de Atterberg, que muestran valores elevados de plasticidad. Además, las clasificaciones SUCS y AASHTO coinciden al ubicar casi todas las muestras en grupos que representan suelos de baja calidad para soportar cargas, como CH, MH y A-7. Estos comportamientos son comunes en suelos de origen coluvial o volcánico alterado, que tienden a hincharse o deformarse cuando aumenta su humedad. También, se observa que las densidades

obtenidas en el Proctor modificado no son muy altas, lo cual es típico en suelos con partículas muy finas y que no se compactan con facilidad.

Tomando en cuenta todos estos parámetros, se puede concluir que la subrasante del área estudiada no posee buenas condiciones para soportar cargas viales sin algún tipo de tratamiento. La combinación de alta plasticidad, baja densidad y elevado contenido de finos hace que estos suelos sean sensibles a la humedad y pierdan resistencia con facilidad. Por eso, si se quiere garantizar un buen desempeño en futuras obras civiles o viales, será necesario considerar mejoras como estabilización del material, mayor espesor estructural o un buen manejo del drenaje. Estos resultados permiten tener una visión clara del estado actual del suelo y sirven como base para los análisis y decisiones que se desarrollarán en los siguientes capítulos.

3.5 Ensayo de Cono Dinámico de Penetración (DCP)

El ensayo de Cono Dinámico de Penetración (DCP, por sus siglas en inglés Dynamic Cone Penetrometer) es un método de exploración geotécnica rápido, económico y de fácil aplicación en campo, utilizado para evaluar de manera indirecta la resistencia de suelos que conforman la subrasante y capas granulares. El principio del ensayo se basa en medir la penetración vertical de un cono metálico bajo la acción de golpes repetidos de un martillo de masa constante, lo que permite estimar la capacidad portante del suelo a través del índice de penetración DCP.

En la presente investigación, el ensayo DCP se empleó como método de campo para obtener un parámetro mecánico comparable con el valor de CBR de laboratorio, con el objetivo de establecer una correlación representativa para los suelos de la parroquia El Valle, cantón Cuenca.

3.5.1 Descripción del equipo DCP

El equipo de Cono Dinámico de Penetración está conformado por un conjunto de elementos metálicos diseñados para transmitir energía de impacto al suelo de forma repetitiva y controlada. Los componentes principales del equipo utilizado en este estudio son los siguientes:

Cono de penetración, fabricado en acero endurecido, con un ángulo estándar (generalmente 60°) y diámetro normalizado, el cual es el elemento que entra en contacto directo con el suelo y permite la penetración progresiva en el estrato evaluado.

Varilla de acero, que conecta el cono con el sistema de impacto y transmite la energía generada por el martillo hacia el cono de penetración.

Martillo de impacto, de masa constante, que se deja caer libremente desde una altura fija y conocida, generando una energía de impacto repetitiva y uniforme en cada golpe.

Guía de deslizamiento, que asegura que el martillo caiga de manera vertical y sin desviaciones, garantizando la repetitividad del ensayo.

Regla graduada o cinta métrica, utilizada para medir la profundidad acumulada de penetración del cono después de un determinado número de golpes.

El diseño del equipo permite que la energía aplicada al suelo sea constante, de tal manera que la variación en la penetración por golpe dependa exclusivamente de la resistencia del material ensayado, lo que hace posible comparar resultados entre diferentes puntos de ensayo.

3.5.2 Materiales y equipos utilizados para el ensayo DCP

Para la ejecución del ensayo DCP en campo, se emplearon los siguientes materiales y equipos:

Equipo completo de Cono Dinámico de Penetración (DCP), compuesto por cono, varilla, martillo y guía de deslizamiento.

Regla metálica graduada o cinta métrica, para la medición precisa de la profundidad de penetración.

Martillo auxiliar o herramientas manuales, para facilitar la colocación inicial del equipo en el fondo de la calicata.

Libreta de campo o planillas de registro, para anotar el número de golpes y la profundidad correspondiente.

Elementos de seguridad personal, tales como casco, guantes y botas, para garantizar condiciones seguras durante la ejecución del ensayo.

3.5.3 Procedimiento de ejecución del ensayo DCP en campo

El procedimiento de ejecución del ensayo DCP se desarrolló siguiendo un orden sistemático, con el fin de asegurar la confiabilidad y repetitividad de los resultados obtenidos. Las etapas del procedimiento fueron las siguientes:

Preparación del punto de ensayo: El ensayo se realizó directamente en el fondo de cada calicata, una vez alcanzada la profundidad definida para el muestreo. Previamente se verificó que la superficie del suelo estuviera limpia, libre de material suelto y representativa del estrato natural de subrasante.

Colocación inicial del equipo: El cono del DCP se posicionó verticalmente sobre el suelo, asegurando que la varilla se encuentre perfectamente alineada para evitar penetraciones inclinadas que puedan afectar la medición. En esta etapa se aplicó una ligera presión manual para estabilizar el equipo antes de iniciar el ensayo.

Inicio del ensayo y aplicación de golpes: El martillo se elevó hasta la altura estándar del equipo y se dejó caer libremente, aplicando golpes consecutivos sobre la varilla. La caída libre del martillo garantiza que cada golpe tenga la misma energía de impacto.

Registro de datos de penetración: Después de un número determinado de golpes, se midió la profundidad acumulada de penetración del cono con respecto a la superficie inicial del suelo. Estos datos fueron registrados cuidadosamente en la planilla de campo, consignando el número de golpes acumulados y la profundidad correspondiente.

Continuación del ensayo: El procedimiento de aplicación de golpes y medición de penetración se repitió de manera secuencial hasta alcanzar la profundidad límite definida por el equipo, la presencia de un material de alta resistencia o el criterio técnico establecido para el ensayo.

Finalización del ensayo: Una vez concluido el registro de datos, el equipo fue retirado cuidadosamente del suelo y se procedió a verificar la consistencia de los registros obtenidos antes de continuar con el siguiente punto de ensayo.

3.5.4 Registro de datos de penetración del ensayo DCP

El ensayo se ejecutó directamente en el fondo de cada calicata, garantizando contacto con el estrato de la subrasante. Se aplicaron golpes consecutivos y se registró la profundidad acumulada a intervalos de golpes constantes, hasta alcanzar el límite definido por el equipo o por el criterio de campo.

Los resultados obtenidos del ensayo de Cono Dinámico de Penetración (DCP) evidencian una respuesta mecánica variable del suelo frente a la aplicación de cargas dinámicas, característica propia de subrasantes en zonas urbano–rurales como la parroquia El Valle. La relación entre el número de golpes aplicados y la profundidad de penetración alcanzada permite evaluar de manera indirecta la resistencia y rigidez del suelo, mostrando diferencias apreciables entre las calicatas analizadas.

De forma general, se identifican registros con pendientes suaves en la relación golpes-penetración, asociados a suelos de mayor resistencia relativa, y otros con incrementos pronunciados de profundidad con pocos golpes, representativos de materiales de menor capacidad portante. Esta variabilidad pone en evidencia la heterogeneidad espacial del suelo dentro del área de estudio, aspecto relevante para la caracterización geotécnica de la subrasante.

Figura 18*Trabajo de campo - Ensayo DCP*

Nota. Inicio de la realización del ensayo DCP

Asimismo, en algunos puntos se observa una variación de la resistencia con la profundidad, lo que puede relacionarse con cambios en el contenido de humedad, grado de compactación natural o composición del suelo. Al tratarse de un ensayo ejecutado directamente en campo, los registros DCP reflejan el comportamiento real del material bajo condiciones naturales, incorporando efectos que no siempre son reproducibles en ensayos de laboratorio.

Los datos de penetración obtenidos en cada calicata constituyen la base primaria para el cálculo del índice DCP (mm/golpe), el cual será utilizado posteriormente como variable independiente en el análisis correlacional con el valor de CBR de laboratorio. De esta manera, los registros presentados en este apartado permiten estructurar la matriz de datos necesaria para evaluar la relación entre ambos parámetros y desarrollar, en el capítulo siguiente, la correlación CBR–DCP propuesta para los suelos de la parroquia El Valle.

Tabla 15

Registro DCP-C3 (golpes acumulados y profundidad).

Golpes acumulados	Profundidad Acumulada (cm)
0	14,9
5	30,0
10	42,0
15	53,0
20	62,30

Nota. Datos de campo del ensayo DCP en la calicata C3. Fuente: Elaborado por los autores.

En la calicata C3 se observa un incremento progresivo y relativamente uniforme de la penetración conforme aumenta el número de golpes. Este comportamiento indica un suelo con resistencia moderada, sin cambios abruptos de rigidez a lo largo del tramo ensayado. La pendiente golpes–profundidad sugiere un material relativamente homogéneo, lo que permite considerar el índice DCP obtenido como representativo del estrato de subrasante evaluado.

Tabla 16

Registro DCP-C4 (golpes acumulados y profundidad).

Golpes acumulados	Profundidad Acumulada (cm)
0	9,6
5	20,5
10	31,5
15	41,5
20	49,7
25	59
30	67,8

Nota. Datos de campo del ensayo DCP en la calicata C4. Fuente: Elaborado por los autores.

Los resultados de la calicata C4 muestran una penetración creciente y sostenida, con una respuesta ligeramente más resistente en los primeros golpes y una penetración más marcada a partir de golpes intermedios. Este comportamiento puede asociarse a la presencia de un suelo inicialmente más denso o ligeramente cementado en superficie, seguido de un material de menor resistencia en profundidad. La respuesta global indica un suelo de resistencia media a baja.

Tabla 17

Registro DCP-C5 (golpes acumulados y profundidad).

Golpes acumulados	Profundidad Acumulada (cm)
0	11
5	17,4
10	21,9
15	37,3
20	47,2
25	53,7
30	61,4

Nota. Datos de campo del ensayo DCP en la calicata C5. Fuente: Elaborado por los autores.

En la calicata C5 se evidencia una penetración reducida incluso con incrementos significativos de golpes, especialmente en los tramos intermedios del ensayo. Este comportamiento es indicativo de un suelo con mayor rigidez relativa, posiblemente asociado a un mayor contenido de finos cohesivos o a un estado de compactación más elevado. El bajo incremento de profundidad por golpe sugiere una capacidad portante superior respecto a otras calicatas.

Tabla 18

Registro DCP-C8 (golpes acumulados y profundidad).

Golpes acumulados	Profundidad Acumulada (cm)
0	9,00
5	21,60
10	31,00
15	36,30
20	41,50
25	47,00
30	52,00
35	66,00

Nota. Datos de campo del ensayo DCP en la calicata C8. Fuente: Elaborado por los autores.

La calicata C8 presenta un comportamiento diferenciado, con una penetración moderada en los primeros golpes y un incremento más pronunciado en los tramos finales. Este patrón sugiere una variación de resistencia con la profundidad, lo que podría estar relacionado con cambios en la estructura del suelo o en su contenido de humedad. La presencia de un tramo final con mayor penetración indica un material de menor resistencia en profundidad.

Tabla 19

Registro DCP-C9 (golpes acumulados y profundidad).

Golpes acumulados	Profundidad (cm)
0	11,4
5	26,6
10	41,2
15	53,6
20	67,0
25	73,5

Nota. Datos de campo del ensayo DCP en la calicata C9. Fuente: Elaborado por los autores.

Los resultados de la calicata C9 muestran una penetración significativa desde los primeros golpes, manteniendo una tendencia relativamente constante a lo largo del ensayo. Este comportamiento es característico de un suelo de baja a media resistencia, con escasa variación de rigidez en el tramo ensayado. La regularidad del incremento de profundidad permite una determinación confiable del índice DCP promedio.

Tabla 20

Registro DCP – C10 (golpes acumulados y profundidad).

Golpes acumulados	Profundidad (cm)
0	8,0
5	9,0
10	11,7
15	15,2
20	23,3
25	33,5
30	49,8

Nota. Datos de campo del ensayo DCP en la calicata C10. Fuente: Elaborado por los autores.

En la calicata C10 se observa una penetración inicial reducida, seguida de un incremento notable de profundidad a partir de golpes intermedios. Este comportamiento puede interpretarse como la presencia de una capa superficial más resistente, posiblemente producto de compactación natural o antrópica, sobre un material subyacente de menor resistencia. Esta transición es relevante para el análisis de la variabilidad vertical del suelo.

Tabla 21

Registro DCP-C12 (golpes acumulados y profundidad).

Golpes acumulados	Profundidad (cm)
0	9
5	18,4
10	24,6
15	37,3
20	48,7
25	66,1
30	70,3

Nota. Datos de campo del ensayo DCP en la calicata C12. Fuente: Elaborado por los autores.

Los registros de la calicata C12 evidencian una penetración limitada a lo largo de todo el ensayo, incluso con el aumento del número de golpes. Este comportamiento sugiere un suelo de alta resistencia relativa, probablemente asociado a un material cohesivo de mayor consistencia o a una estructura más densa. El bajo índice de penetración obtenido respalda esta interpretación.

Tabla 22

Registro DCP-C13 (golpes acumulados y profundidad).

Golpes acumulados	Profundidad (cm)
0	15,0
5	37,0
10	54,5
15	69,4
20	83,0
25	96,1

Nota. Datos de campo del ensayo DCP en la calicata C13. Fuente: Elaborado por los autores.

La calicata C13 presenta una penetración elevada y progresiva, alcanzando profundidades considerables con un número moderado de golpes. Este patrón es indicativo de un suelo de baja resistencia, posiblemente influenciado por un mayor contenido de humedad o una estructura menos compacta. La marcada pendiente golpes–penetración convierte a esta calicata en un caso representativo de baja capacidad portante dentro del área de estudio.

Tabla 23

Registro DCP-C14 (golpes acumulados y profundidad).

Golpes acumulados	Profundidad (cm)
0	13,0
5	19,0
10	23,5
15	27,2
20	30,3

Nota. Datos de campo del ensayo DCP en la calicata C14. Fuente: Elaborado por los autores.

En la calicata C14 se observa una penetración relativamente baja en los primeros golpes, con un incremento moderado posterior. El número limitado de registros sugiere que el ensayo alcanzó rápidamente el criterio de finalización, lo que puede estar asociado a un material de resistencia media, sin variaciones significativas dentro del tramo evaluado.

Tabla 24

Registro DCP-C22 (golpes acumulados y profundidad).

Golpes acumulados	Profundidad (cm)
0	13,1
5	37,8
10	63,6
15	91,6

Nota. Datos de campo del ensayo DCP en la calicata C22. Fuente: Elaborado por los autores.

Los resultados de la calicata C22 muestran una penetración moderada con tendencia creciente, aunque con incrementos de profundidad relativamente controlados. Este comportamiento indica un suelo con resistencia intermedia, sin evidencias de capas extremadamente blandas o muy rígidas. La respuesta observada es coherente con un material de subrasante típico de la zona.

3.6 Interpretación preliminar de los registros del ensayo DCP

En conjunto, los registros obtenidos a partir del ensayo de Cono Dinámico de Penetración (DCP) evidencian una variabilidad espacial significativa en la resistencia del suelo dentro de la parroquia El Valle, reflejando la heterogeneidad propia de los materiales que conforman la subrasante en la zona de estudio. Las diferencias observadas en la relación entre el número de golpes aplicados y la profundidad de penetración alcanzada indican que la

capacidad portante del suelo no es uniforme, incluso entre calicatas ubicadas en sectores relativamente cercanos, lo que resulta relevante para la caracterización geotécnica del área.

Esta variabilidad justifica la necesidad de correlacionar los valores derivados del ensayo DCP con los resultados del CBR de laboratorio, con el fin de contrastar un parámetro obtenido directamente en campo con un índice ampliamente utilizado en el diseño de pavimentos. En este contexto, los registros DCP constituyen la base para la determinación del índice de penetración que será empleado posteriormente como variable independiente en el análisis correlacional, permitiendo evaluar la representatividad del DCP como herramienta indirecta para la estimación de la capacidad portante de la subrasante en la parroquia El Valle, cantón Cuenca.

3.7 Determinación del índice de penetración DCPI

El índice de penetración DCPI se determinó a partir del análisis de los registros de golpes y penetración obtenidos en cada calicata. Para ello, se evaluaron los tramos homogéneos del ensayo y se calculó la penetración total asociada al número total de golpes aplicados. El DPI promedio, expresado en milímetros por golpe (mm/golpe), se obtuvo como la razón entre ambos valores, adoptándose este parámetro como representativo de la resistencia del suelo en cada punto de muestreo para el posterior análisis correlacional con el CBR de laboratorio.

Tabla 25*Penetración Total y golpes totales por calicata*

Calicata	Nº de tramos analizados	Penetración total (mm)	Golpes totales
C3	4	623	20
C4	6	678	30
C5	6	614	30
C8	7	660	35
C9	5	735	25
C10	6	696	30
C12	6	703	30
C13	5	961	25
C14	4	303	20
C22	3	916	15

Nota. Resumen total de profundidad y golpes realizados. Fuente: Realizado por los autores.

3.8 Comparación De Resultados Obtenidos De Clasificación De Suelos Con Respecto A Los Proporcionados Por El Gobierno Provincial

Tabla 26*Cuadro de resultados obtenidos.*

Calicata	%F	LL	LP	IP	SUCS	AASHTO
C3	67.10	52.11	26.72	25.39	CH	A-7-6
C4	76.25	69.47	37.61	31.86	MH	A-7-5
C5	57.68	50.07	26.57	23.5	CH	A-7-6
C8	56.38	49.56	25.34	24.22	CL	A-7-6
C9	59.45	49.97	26.99	22.98	CL	A-7-6
C10	66.02	45.16	24.53	20.63	CL	A-7-6
C12	66.12	47.20	21.37	25.82	CL	A-7-6
C13	90.56	57.89	32.45	25.45	MH	A-7-6
C14	75.93	64.03	33.59	30.44	MH	A-7-5
C22	87.16	61.80	38.44	23.36	MH	A-7-5

Fuente: Elaborado por los autores.

Tabla 27*Cuadro comparativo.*

Clasificación de suelos Por el método ASSHTO	Resultados desarrollados	Resultados gobierno provincial
C3	CH	CH
C4	MH	MH

C5	CH	CH
C8	CL	CL
C9	CL	CL
C10	CL	CL
C12	CL	CL
C13	MH	MH
C14	MH	MH
C22	MH	MH

Nota. En la tabla se pueden observar los resultados desarrollados y los del Gobierno Provincial. Fuente: Elaborado por los autores.

3.9 Clasificación cualitativa de resistencia del suelo del índice DCP

La clasificación cualitativa de la resistencia del suelo se plantea como un complemento metodológico al análisis del índice de penetración DCP obtenido en cada calicata, con el propósito de contextualizar la respuesta mecánica del suelo que posteriormente será relacionada con el valor de CBR de laboratorio. Este enfoque permite interpretar de manera general el comportamiento de la subrasante a partir de la información obtenida directamente en campo, sin sustituir los parámetros cuantitativos utilizados en el análisis correlacional.

Esta clasificación adoptada distingue diferentes niveles de resistencia del suelo en función del índice DCP y se presenta de forma resumida en la tabla que se muestra a continuación, la cual establece categorías cualitativas de comportamiento. Esta información sirve como apoyo para comparar las condiciones geotécnicas entre calicatas y facilitar la interpretación de los resultados del ensayo DCP, constituyendo un insumo previo para el desarrollo de la correlación entre el CBR de laboratorio y el índice DCP, abordada en el capítulo siguiente.

Tabla 28

Clasificación cualitativa de la resistencia del suelo.

Índice DCP (mm/golpe)	Clasificación cualitativa de la resistencia	Descripción del comportamiento del suelo
< 10	Alta resistencia	Suelo de baja penetración por golpe, comportamiento rígido, asociado a mayor capacidad portante de la subrasante.
10 – 20	Resistencia media	Suelo con penetración moderada, comportamiento intermedio, típico de subrasantes con condiciones variables de compactación y humedad.
> 20	Baja resistencia	Suelo de alta penetración por golpe, comportamiento blando, asociado a menor capacidad portante y mayor deformabilidad.

Nota. La clasificación cualitativa se establece con fines interpretativos y metodológicos.

3.10 Criterio de análisis hasta 15 golpes (DCPI_15)

En el presente estudio, el índice de penetración dinámica (DCPI) se determinó considerando únicamente los primeros 15 golpes del ensayo DCP, debido a que este tramo representa el comportamiento resistente de la capa superficial del suelo, la cual es la más relevante para efectos de soporte inmediato y comparación con el material evaluado en laboratorio. Este enfoque permite trabajar con un rango uniforme de medición, evitando que variaciones de resistencia en estratos más profundos influyan en el valor promedio.

Por tanto, el parámetro adoptado corresponde al DCPI promedio hasta 15 golpes (DCPI 15), calculado como la penetración acumulada en dicho intervalo dividida entre el número de golpes aplicados. De esta manera, el valor obtenido refleja una condición representativa del

terreno en el sector evaluado y facilita la interpretación cualitativa de resistencia por calicata en función del índice expresado en mm/golpe.

Tabla 29

Clasificación cualitativa de la resistencia del suelo por calicata según el índice DCPI 15.

Calicata	Profundidad (cm)	Profundidad (mm)	Golpes (mm/golpe)	DCPI 15 promedio (mm/golpe)	Clasificación cualitativa de la resistencia
C3	38,10	381,00	15,00	25,40	Baja resistencia
C4	31,90	319,00	15,00	21,27	Baja resistencia
C5	26,30	263,00	15,00	17,53	Resistencia media
C8	27,30	273,00	15,00	18,20	Resistencia media
C9	42,20	422,00	15,00	28,13	Baja resistencia
C10	41,40	414,00	15,00	27,60	Baja resistencia
C12	28,30	283,00	15,00	18,87	Resistencia media
C13	54,40	544,00	15,00	36,27	Baja resistencia
C14	14,20	142,00	15,00	9,47	Alta Resistencia
C22	78,50	785,00	15,00	52,33	Baja resistencia

Nota. La clasificación cualitativa se asignó de acuerdo con los rangos del índice DCPI 15. Fuente: Elaborado por los autores.

3.10.1 Registro de datos y procesamiento del ensayo DCPI

Durante la ejecución del ensayo DCP, se registró de manera sistemática la penetración acumulada del cono y el número de golpes aplicados, organizando la información en tablas por cada calicata evaluada. El registro se realizó en incrementos regulares de golpes, permitiendo identificar cambios en la pendiente de penetración que reflejan variaciones en la rigidez del suelo con la profundidad.

Posteriormente, los datos obtenidos fueron procesados para determinar el índice de penetración dinámico (DCPI), definido como la relación entre el incremento de penetración y el número de golpes correspondientes. Este indicador constituye la variable fundamental del ensayo DCP y se expresa comúnmente en unidades de mm/golpe (ASTM International, 2023).

3.10.2 Justificación del uso del índice DCPI15 (15 golpes)

En el presente estudio se adoptó el DCPI calculado a partir de 15 golpes (DCPI15) como índice representativo del comportamiento del suelo para cada punto de análisis. Esta decisión se fundamenta en criterios técnicos y bibliográficos ampliamente aceptados.

De acuerdo con ASTM International (2023), el procesamiento del DCP debe realizarse sobre intervalos suficientes de golpes para reducir la influencia de variaciones puntuales y mejorar la representatividad del índice de penetración. En esta línea, el Minnesota Department of Transportation (2003), recomienda el uso de tramos de entre 10 y 20 golpes para obtener valores promedio de DCPI que reflejen de manera más confiable la resistencia global del suelo evaluado.

Asimismo, Tingle y Jersey (2014) señalan que el uso de intervalos cortos (por ejemplo, menos de 5 golpes) puede inducir errores significativos en correlaciones empíricas, mientras que intervalos moderados permiten estabilizar la pendiente de penetración y facilitar comparaciones entre diferentes puntos de ensayo.

En el caso específico de este estudio, el uso de 15 golpes se justifica por las siguientes razones técnicas:

Permite suavizar irregularidades locales asociadas a partículas gruesas, vacíos o pequeños cambios de estrato.

Representa un compromiso adecuado entre resolución vertical y estabilidad estadística del índice DCPI.

Facilita la comparación homogénea entre las 10 calicatas, evitando sesgos por tramos demasiado cortos o excesivamente largos.

Por estas razones, el DCPI15 fue adoptado como la variable independiente principal para el desarrollo del análisis correlacional con el CBR de laboratorio.

3.10.3 Cálculo del Índice de penetración DCP (DCPI)

El índice DCPI se calcula mediante la expresión:

$$DCPI = \frac{\Delta d}{\Delta N}$$

donde:

Δd = incremento de penetración (mm)

ΔN = número de golpes aplicados

Los cálculos los presentamos en la siguiente tabla:

Tabla 30

Cálculo de DCPI a 15 Golpes

CALICATA	Profundidad (cm)	Profundidad (mm)	DCPI15(mm/golpe)	DCPI15(mm/golpe)	Clasificación de Suelo
C3	38,1	381,00	15,00	25,40	CH
C5	26,3	263,00	15,00	17,53	CH
C8	27,3	273,00	15,00	18,20	CL
C9	42,2	422,00	15,00	28,13	CL
C10	41,4	414,00	15,00	27,60	CL
C12	28,3	283,00	15,00	18,87	CL
C4	31,9	319,00	15,00	21,27	MH
C13	54,4	544,00	15,00	36,27	MH
C14	14,2	142,00	15,00	9,47	MH
C22	78,5	785,00	15,00	52,33	MH

Nota. Se agruparon los puntos según clasificación de suelo. Fuente: Elaborado por los autores.

Según Livneh (1989), este índice resume el comportamiento promedio del suelo frente a impactos dinámicos y puede emplearse como variable independiente en correlaciones empíricas con el CBR, siempre que se definan criterios consistentes para su cálculo.

No obstante, diversos autores coinciden en que el DCPI puede presentar alta variabilidad cuando se calcula sobre tramos muy cortos (pocos golpes), debido a irregularidades locales del suelo, presencia de partículas gruesas o errores operativos. Por esta razón, resulta necesario definir un intervalo representativo de golpes que permita suavizar dichas variaciones y obtener un valor más estable del índice de penetración.

3.11 Metodología para la correlación entre CBR y DCPI

El análisis correlacional entre los valores de Relación de Soporte California (CBR) obtenidos en laboratorio y el índice de penetración derivado del ensayo de Cono Dinámico de Penetración (DCP) se plantea como una herramienta para evaluar la correspondencia entre un parámetro determinado bajo condiciones controladas y un índice obtenido directamente en campo, ambos representativos del comportamiento mecánico del suelo. La metodología adoptada permite estructurar de manera sistemática la información proveniente de los ensayos realizados y establecer criterios técnicos que faciliten la interpretación de la resistencia del suelo en la parroquia El Valle, cantón Cuenca.

Este enfoque metodológico busca analizar la relación existente entre ambos parámetros con el fin de evaluar la aplicabilidad del ensayo DCP como una alternativa indirecta para la estimación del CBR, considerando las características geotécnicas propias de los suelos de la zona de estudio y sin restringir su aplicación a un uso específico.

3.12 Base de datos integrada para el desarrollo del modelo de correlación CBR–DCP

Se consolida la información principal obtenida de las 10 calicatas analizadas, integrando en una sola matriz los resultados de los ensayos DCP y CBR de laboratorio, junto con variables derivadas necesarias para el análisis estadístico. Las variables consideradas son:

- Identificación de la calicata
- Índice de penetración DCPI15 (mm/golpe)
- CBR de laboratorio al 100 % de compactación.

- Logaritmo decimal de DCPI15 (LOG(DCPI))
- Logaritmo decimal de CBR (LOG(CBR))
- Clasificación del suelo según el sistema SUCS (CH, CL, MH)

Con el objetivo de evaluar la relación funcional entre el índice de penetración dinámica y la capacidad portante del suelo, se aplicó una transformación logarítmica decimal a las variables DCPI15 y CBR. Dicha transformación se realizó mediante las siguientes expresiones:

$$LOGDCPI = \log_{10} (DCPI15)$$

$$LOGCBR = \log_{10} (CBR)$$

Este procedimiento permite ajustar un modelo potencial tipo log–log mediante regresión lineal, lo cual es consistente con correlaciones reportadas en literatura técnica para CBR–DCP.

Como etapa previa al análisis estadístico, se construyó una matriz base de datos que integra, para cada calicata, el valor promedio del índice DCP y los parámetros geotécnicos determinados en laboratorio. Esta matriz incluye el CBR de laboratorio como variable dependiente, el índice DCP como variable independiente y los parámetros de control que permiten contextualizar los resultados obtenidos.

Tabla 31

Matriz base CBR y DCP para el análisis correlacional.

CALICATA	DCPI15(mm/golpe)	CBR100%	LOGDCPI	LOGCBR	Clasificación de Suelo
C3	25,40	2,84	1,49345805	0,45331834	CH
C5	17,53	4,07	1,31090563	0,60959441	CH
C8	18,20	4,69	1,26007139	0,67117284	CL
C9	28,13	5,5	1,44922119	0,74036269	CL
C10	27,60	5,68	1,43870053	0,75434834	CL

C12	18,87	4,59	1,30963017	0,66181269	CL
C4	21,27	2,49	1,32769942	0,39619935	MH
C13	36,27	2,67	1,55950764	0,42651126	MH
C14	9,47	2,42	0,97619709	0,38381537	MH
C22	52,33	2,72	1,7187784	0,4345689	MH

Nota. Elaboración propia. Fuente: Elaborado por los autores.

3.12.1 Selección de variables para la correlación

Para el desarrollo de la correlación CBR–DCP se definieron las siguientes variables principales:

Variable dependiente: CBR de laboratorio (%), proporcionado por el Gobierno Provincial del Azuay.

Variable independiente: Índice de penetración DCPI15 (mm/golpe), obtenido a partir del ensayo DCP ejecutado en campo por los tesisas.

Variables de control: Clasificación del suelo según el sistema SUCS (CH, CL y MH).

Esta selección responde a lo señalado por Livneh (1989), quien indica que el DCPI constituye un parámetro adecuado para estimar índices empíricos de soporte, siempre que se consideren las características del suelo y se limite el rango de aplicación del modelo.

3.12.2 Tratamiento estadístico de los datos

Para establecer la relación entre los valores de CBR y el índice DCPI se empleará un análisis de regresión, con el propósito de obtener una expresión matemática que represente el comportamiento conjunto de ambas variables. Inicialmente se evaluará la relación directa entre los valores de CBR y DCPI, considerando la dispersión de los datos y la tendencia general observada en el conjunto de calicatas analizadas.

Dado que diversos estudios indican que la relación entre ambos parámetros puede presentar un comportamiento no lineal, se analizarán diferentes formas funcionales, incluyendo transformaciones logarítmicas del tipo $\log(\text{CBR})$ en función de $\log(\text{DCPI})$, con el objetivo de mejorar el ajuste del modelo.

La selección del modelo más representativo se realizará en función del coeficiente de determinación (R^2), el análisis de la distribución de los residuales y la coherencia técnica del comportamiento obtenido. Este procedimiento permitirá identificar la expresión que describa de mejor manera la correlación entre CBR y DCPI para los suelos de la parroquia El Valle.

3.13 Desarrollo de regresión y correlación estadística

3.13.1 Justificación del modelo log–log

La relación entre el California Bearing Ratio (CBR) y el índice de penetración obtenido mediante el ensayo DCP (DCPI) presenta un comportamiento no lineal e inversamente proporcional, es decir, a mayores valores de penetración corresponde una menor capacidad portante del suelo. Debido a esta característica, se adoptó un modelo de regresión log–log, expresado mediante la siguiente ecuación:

$$\log(\text{CBR}) = a + b \cdot \log(\text{DCPI})$$

Este tipo de formulación permite linearizar relaciones de tipo potencial, facilitando el ajuste estadístico y la interpretación de los parámetros del modelo. El coeficiente “b” representa la sensibilidad del CBR frente a variaciones del DCPI, mientras que el término “a” corresponde al intercepto del modelo en el dominio logarítmico.

Diversos estudios reportados en la literatura técnica indican que el modelo log–log describe de manera más consistente la correlación CBR–penetración en comparación con modelos lineales o inversos simples. En particular, registros técnicos compilados en el Transportation Research Board (TRB) señalan que la transformación logarítmica permite reducir la dispersión de los datos experimentales y mejorar el coeficiente de determinación R^2 , especialmente en suelos finos y cohesivos. Adicionalmente el uso del modelo log–log contribuye a:

- Reducir la influencia de valores extremos de penetración.
- Homogeneizar la variabilidad entre muestras.
- Facilitar comparaciones con correlaciones empíricas previamente reportadas.
- Obtener ecuaciones más estables para fines de interpretación ingenieril.

Por estas razones, el modelo log-log fue considerado el más adecuado desde el punto de vista estadístico y geotécnico para el análisis desarrollado en la presente investigación.

3.13.2 Segmentación por tipo de suelo (criterio aplicado)

Con el objetivo de mejorar la representatividad estadística del análisis y reducir la dispersión inherente a la variabilidad natural de los suelos, se realizó una segmentación de los datos en función de la clasificación SUCS. Este criterio permite agrupar muestras con comportamiento mecánico similar y obtener correlaciones más coherentes desde el punto de vista físico-geotécnico.

En el archivo de trabajo se desarrollaron regresiones independientes para los siguientes grupos:

- Suelos tipo CL (arcillas de baja plasticidad): $n \approx 4$
- Suelos tipo MH (limos de alta plasticidad): $n \approx 4$

Para ambos grupos, el número de muestras resulta limitado, pero estadísticamente aceptable para un análisis exploratorio, permitiendo estimar tendencias, coeficientes de correlación y evaluar el ajuste del modelo log-log. La separación por tipo de suelo mostró una mejora relativa en los valores de R y R^2 en comparación con el ajuste global, lo que confirma la conveniencia de este criterio de segmentación.

En el caso de los suelos tipo CH (arcillas de alta plasticidad), únicamente se dispone de dos puntos experimentales. Desde el punto de vista estadístico, este número de datos no permite realizar un ajuste regresivo confiable, ya que:

- No es posible evaluar adecuadamente la dispersión.
- El coeficiente de determinación carece de significado estadístico.

- El modelo resultante sería altamente sensible a errores experimentales.

Por esta razón, para el grupo CH no se ajustó una ecuación de regresión propia. El análisis se enfocó en una comparación cualitativa y discusión técnica, contrastando sus valores de CBR y DCPI con los obtenidos para los otros grupos y con correlaciones reportadas en la literatura. Este enfoque permite contextualizar el comportamiento del suelo sin incurrir en conclusiones estadísticamente no justificadas. En conjunto la segmentación por tipo de suelo permitió:

- Mejorar la coherencia física del análisis.
- Reducir la dispersión de los datos.
- Evitar extrapolaciones no justificadas.
- Fortalecer la validez técnica de los resultados obtenidos.

3.14 Resultados obtenidos de la regresión y correlación estadística

Una vez organizada la base de datos final y aplicadas las transformaciones logarítmicas correspondientes, se desarrolló la regresión estadística mediante el modelo log-log, para establecer la relación entre el índice de penetración DCPI y el CBR. Como resultado del ajuste, se determinaron los parámetros del modelo a y b, obteniéndose la ecuación representativa para cada tipo de suelo analizado.

Asimismo, se calcularon los indicadores estadísticos de validación del ajuste, obteniéndose el coeficiente de correlación (R) y el coeficiente de determinación (R^2), los cuales permiten evaluar la intensidad de la relación y el nivel de explicación del modelo. Adicionalmente, se generaron los valores estimados del CBR a partir del modelo y se elaboraron las gráficas correspondientes de dispersión con la curva ajustada, permitiendo visualizar el comportamiento de cada grupo de suelo y su tendencia general.

A continuación, se presentan las tablas resumen y las gráficas finales obtenidas, incluyendo las ecuaciones ajustadas, los valores de R y R^2 . Iniciamos para el Suelo CL:

Tabla 32

Resultados De Regresión Log–Log Cbr Vs Dcpi — Suelo Cl.

Calicata	DCPI (mm/golpe)	CBR (%)	log10(DCPI)	log10(CBR)
C8	18,20	4,69	1,26	0,67
C9	28,13	5,50	1,45	0,74
C10	27,60	5,68	1,44	0,75
C12	18,87	4,59	1,27	0,66

Fuente: Elaborado por los autores.

Tabla 33

Variables obtenidas para la formulación de la ecuación para suelos CL

Variable	Valor
a (intercepto)	0,062
b (pendiente)	0,472
R (CORREL)	0,94
R ²	0,89

Fuente: Elaborado por los autores.

Obteniendo la siguiente Ecuación de Correlación para el suelo CL (Arcilloso)

Ecuación (log–log):

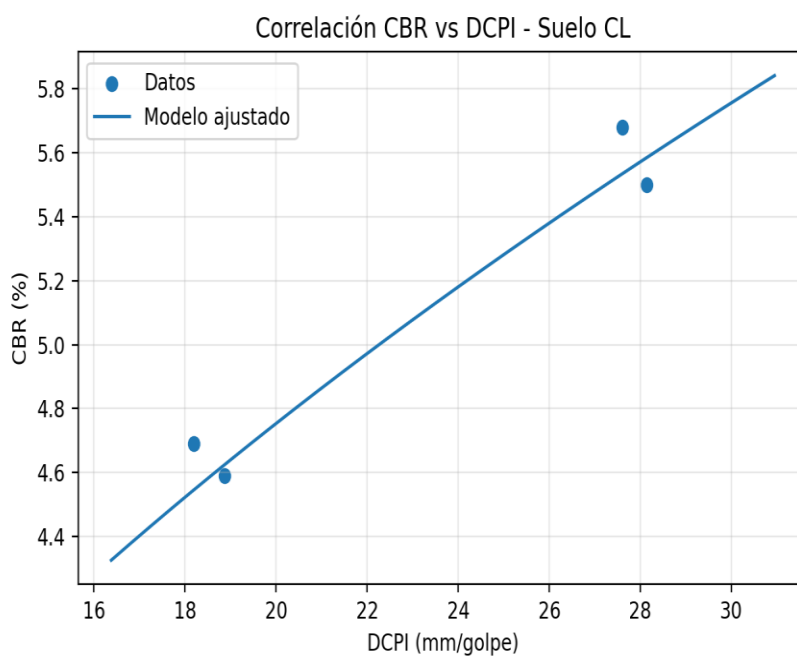
$$\log_{10}(\text{CBR}) = 0,062 + 0,472 \cdot \log_{10}(\text{DCPI})$$

Ecuación (original):

$$\text{CBR} = 1,155 \times \text{DCPI}^{0.472}$$

Figura 19

Correlación CBR vs DCP - Suelo CL



Nota. Nube de puntos suelo Arcilloso (CL)

La gráfica muestra la relación entre el CBR (%) y el índice de penetración DCPI (mm/golpe) para el suelo tipo CL. Se observa una tendencia definida donde los puntos experimentales se ajustan adecuadamente al modelo propuesto, evidenciando una relación consistente entre ambas variables. La curva del modelo ajustado representa de forma aceptable el comportamiento del suelo, lo que indica que el DCPI puede utilizarse como un parámetro representativo para estimar el CBR en este tipo de material dentro del rango de datos analizado.

Ahora procedemos a presentar los resultados obtenidos con el suelo Limoso (MH)

Tabla 34

Resultados De Regresión Log–Log Cbr Vs Dcpi — Suelo MH.

Calicata	DCPI (mm/golpe)	CBR (%)	log10(DCPI)	log10(CBR)
C4	21,27	2,49	1,33	0,40
C13	36,27	2,67	1,56	0,43
C14	9,47	2,42	0,98	0,38
C22	52,33	2,72	1,72	0,43

Nota. Elaboración propia

Tabla 35

Variables obtenidas para la formulación de la ecuación para suelos MH

Variable	Valor
a (intercepto)	0,309
b (pendiente)	0,072
R (CORREL)	0,96
R ²	0,93

Nota. Elaboración propia

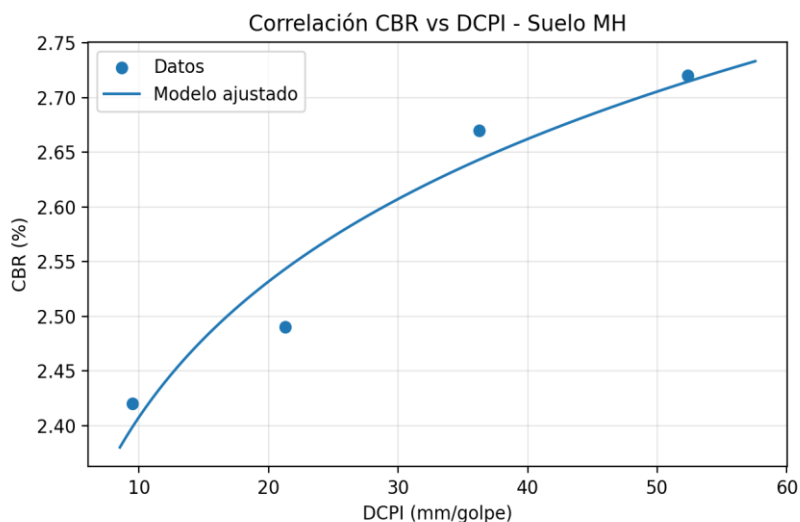
Obteniendo la siguiente Ecuación de Correlación para el suelo MH (Limoso)

Ecuación (log–log):

$$\log_{10}(\text{CBR}) = 0,309 + 0,072 \cdot \log_{10}(\text{DCPI})$$

Ecuación (original):

$$\text{CBR} = 2,038 \times \text{DCPI}^{0.072}$$

Figura 20*Correlación CBR vs DCP - Suelo MH*

Nota. Nube de puntos suelo Arcilloso (MH)

La gráfica presenta la relación entre el CBR (%) y el índice de penetración DCPI (mm/golpe) para el suelo tipo MH. Los puntos experimentales muestran una tendencia definida que es representada por el modelo ajustado, evidenciando un comportamiento consistente dentro del rango analizado. En general, el ajuste permite describir la variación del CBR en función del DCPI, siendo útil para interpretar la capacidad portante del suelo a partir del ensayo DCP.

4 CAPITULO IV

4.1 Análisis de Resultados

En la presente investigación se evaluó la relación existente entre el California Bearing Ratio (CBR), obtenido mediante ensayo de laboratorio, y el índice de penetración del ensayo DCP (DCPI, mm/golpe), obtenido en campo. Esta correlación es relevante porque permite explorar la posibilidad de estimar parámetros de capacidad portante (CBR) a partir de resultados de penetración dinámica, lo cual resulta útil para trabajos de caracterización geotécnica rápida y comparación entre zonas.

Con el objetivo de representar adecuadamente el comportamiento experimental observado, se trabajó con un modelo de regresión log–log, debido a que la relación entre variables geotécnicas comúnmente responde a patrones no lineales. Para ello, se realizó una transformación logarítmica de ambas variables con base 10, ajustando el modelo:

$$\log(CBR) = a + b \cdot \log(DCPI)$$

Posteriormente, la ecuación se transformó a su forma potencial original:

$$CBR = 10^a \times DCPI^b$$

4.1.1 Justificación del uso del modelo log–log en la correlación

El uso de un modelo log–log se justifica porque permite describir relaciones potenciales entre parámetros geotécnicos, principalmente cuando existe variación no uniforme entre valores. En este caso, el ensayo DCP mide resistencia a penetración mediante golpes, mientras que el CBR representa resistencia al corte y rigidez asociada a condiciones de compactación y humedad. Al aplicar logaritmos a ambas variables se logra:

- Linearizar el comportamiento no lineal.
- Reducir el efecto de valores extremos dentro del conjunto de datos.
- Mejorar la estabilidad del ajuste estadístico y la interpretación de los parámetros del modelo.
- Obtener una ecuación potencial aplicable dentro del rango estudiado.

Además, el modelo entrega un parámetro clave: la pendiente “b”, que representa el grado de sensibilidad del CBR ante cambios del DCPI para un tipo de suelo específico.

4.1.2 Segmentación por tipo de suelo: criterio y beneficio estadístico

El suelo es un material naturalmente variable, por lo que correlacionar todos los puntos sin distinguir su clasificación genera alta dispersión, ya que cada material responde de forma diferente a la penetración y a la deformación. Por esta razón, el análisis fue segmentado de acuerdo con la clasificación SUCS, considerando los siguientes grupos de suelo:

- CL: Arcillas de baja plasticidad
- MH: Limos de alta plasticidad

Esta segmentación permite que cada correlación se enfoque en suelos con comportamiento mecánico relativamente homogéneo, evitando mezclar fenómenos propios de cada material (plasticidad, cohesión, sensibilidad a humedad, estructura interna y compactación).

En este contexto, el análisis por grupos mejora la consistencia del modelo, al representar con mayor fidelidad el comportamiento real observado para cada tipo de suelo dentro del rango evaluado.

4.2 Análisis De Resultados – Suelo CI (Arcilloso)

Para el suelo tipo CL (n = 4) se obtuvo la siguiente correlación:

Ecuación (log–log):

$$\log_{10}(\text{CBR}) = 0,062 + 0,472 \cdot \log_{10}(\text{DCPI})$$

Ecuación (original):

$$\text{CBR} = 1,155 \times \text{DCPI}^{0.472}$$

Indicadores estadísticos:

$$R = 0.94$$

$$R^2 = 0.89$$

Estos valores reflejan un ajuste alto, lo cual significa que la ecuación representa de forma consistente el comportamiento del grupo CL dentro del rango de datos analizados.

4.2.1 Interpretación del coeficiente R en suelo CL

El coeficiente de correlación $R = 0.94$ muestra que existe una relación muy fuerte entre las variables consideradas en escala logarítmica. Esto indica que los valores de $\log_{10}(\text{CBR})$ cambian de manera ordenada frente a los valores de $\log_{10}(\text{DCPI})$, lo que evidencia consistencia en el comportamiento del grupo.

Desde el punto de vista estadístico, un valor de R cercano a 1 confirma que los datos presentan una tendencia bien definida, minimizando la aleatoriedad dentro del grupo.

4.2.2 Interpretación del coeficiente R^2 en suelo CL

El coeficiente de determinación $R^2 = 0.89$ indica que aproximadamente el 88.79% de la variación observada en el CBR puede ser explicada por el DCPI mediante el modelo ajustado. Esto significa que el índice de penetración DCP, para este conjunto de datos CL, es un buen predictor del valor de CBR en condiciones similares.

El porcentaje restante (~11.21%) podría ser atribuido a factores no incorporados en el modelo, tales como:

- Variación de humedad entre puntos,
- Grado de compactación real del suelo,
- Heterogeneidad del material,
- Errores operativos del ensayo en campo,
- Variabilidad natural propia de muestras arcillosas.

4.2.3 Interpretación del parámetro b en suelo CL (sensibilidad del modelo)

La pendiente obtenida fue:

$$b = 0.472$$

Este valor representa una sensibilidad moderada del modelo, indicando que cambios en DCPI generan cambios relativamente notables en el CBR estimado. En términos prácticos, el modelo no es “plano”; por el contrario, responde con variación observable ante cambios del ensayo de penetración.

Esto resulta coherente con suelos arcillosos CL, ya que su capacidad portante puede variar dependiendo de:

- Estructura Del Suelo,
- Contenido De Humedad,
- Grado de Compactación.
- Nivel de Distribución Del Material.

En resumen, el suelo CL mostró un modelo con buena capacidad explicativa y sensibilidad moderada, siendo potencialmente útil para estimación dentro del rango evaluado.

4.2.4 Interpretación del comportamiento en la gráfica CL

En la gráfica de dispersión para el suelo CL se observa que los puntos experimentales se distribuyen alrededor de la curva ajustada sin desviaciones extremas. Esto confirma que el modelo no solo “encaja” numéricamente, sino que describe correctamente el patrón visual del grupo.

Tabla 36

CBR Ajustado con valores de correlación obtenida para suelos CL

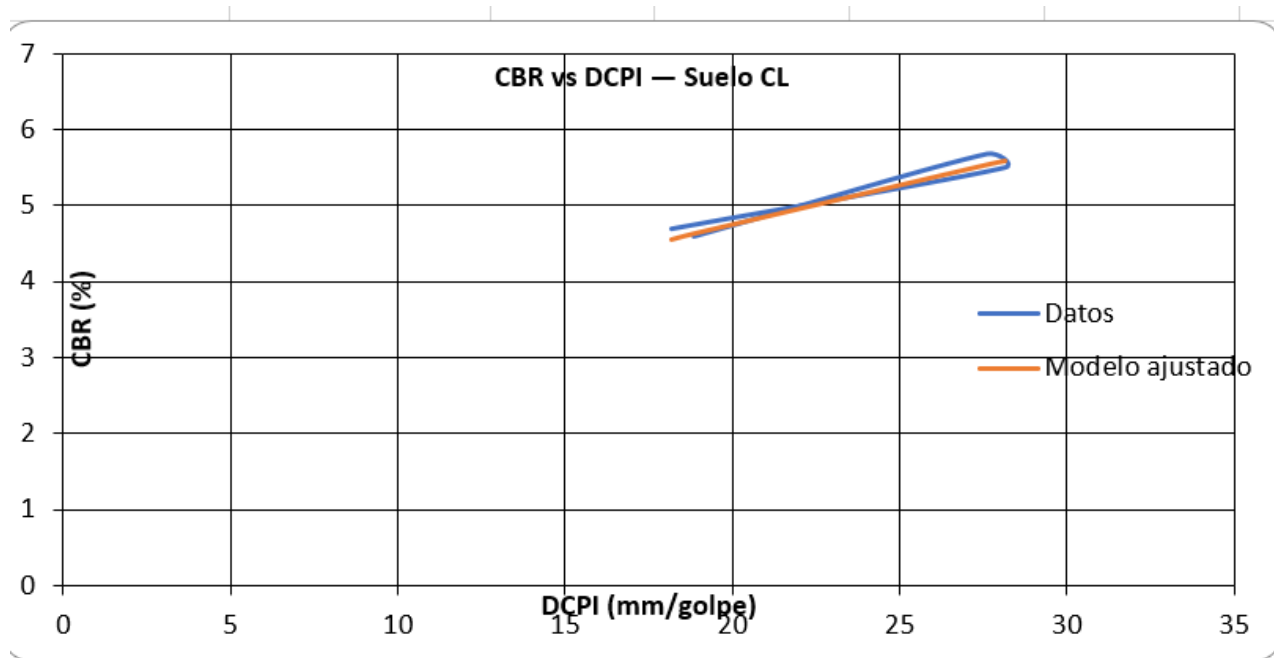
Calicata	CBR ajustado	Residuo
C8	4,55	0,14
C9	5,58	-0,08
C10	5,52	0,16
C12	4,80	-0,21

Nota. Valores reemplazados en la ecuación original de CBR

La curva ajustada refleja una tendencia creciente dentro del rango de datos, representando de forma estable el comportamiento del CBR para los valores de DCPI medidos.

Figura 21

Curva ajustada para suelos CL.



Nota. Elaboración Propia

4.3 Análisis De Resultados – Suelo MH (Limo De Alta Plasticidad)

Para el suelo tipo MH (n = 4) se obtuvo el siguiente modelo:

Ecuación (log–log):

$$\log_{10}(\text{CBR}) = 0,309 + 0,072 \cdot \log_{10}(\text{DCPI})$$

Ecuación (original):

$$\text{CBR} = 2,038 \times \text{DCPI}^{0.072}$$

Indicadores estadísticos:

$$R = 0.96$$

$$R^2 = 0.93$$

Los valores estadísticos reflejan un ajuste muy alto, superior al observado en el grupo CL.

4.3.1 Interpretación del coeficiente R en suelo MH

El valor de correlación $R = 0.96$ muestra una relación muy fuerte entre las variables transformadas logarítmicamente. Este resultado indica que la dispersión del grupo MH es baja, es decir, los datos siguen un patrón más uniforme en comparación con otros suelos.

Estadísticamente, esto sugiere que los valores experimentales dentro de MH se comportan de manera más coherente respecto al ajuste propuesto.

4.3.2 Interpretación del coeficiente R^2 en suelo MH

El coeficiente de determinación $R^2 = 0.93$ implica que el 93.21% de la variación del CBR queda explicada por el DCPI a través del modelo obtenido. Este valor representa un ajuste excelente dentro del conjunto de datos disponible.

En términos prácticos, este resultado señala que, dentro del rango analizado, el DCPI tiene una relación estable con el CBR para suelos MH, ofreciendo una ecuación con alta capacidad explicativa.

4.3.3 Interpretación del parámetro b en suelo MH (baja sensibilidad)

En el suelo MH se obtuvo:

$$b = 0.072$$

Este valor es pequeño, lo que significa que el modelo es poco sensible: incluso si el DCPI cambia, el valor estimado de CBR varía ligeramente. Este comportamiento puede interpretarse de dos formas:

Desde el punto de vista estadístico: La tendencia existe y es clara (por eso R y R^2 son altos), pero el cambio “real” del CBR dentro del grupo MH no es muy grande.

Desde el punto de vista geotécnico: Los suelos MH, al ser limos plásticos, pueden presentar resistencia más controlada por el estado de humedad y la microestructura, generando variaciones de penetración sin que necesariamente existan cambios proporcionales en el CBR.

4.3.4 Interpretación del comportamiento en la gráfica MH

La gráfica MH muestra una curva potencial suave, con puntos relativamente cercanos al ajuste. Se observa que, para DCPI bajos y altos, el CBR permanece dentro de un rango reducido, lo cual coincide con la pendiente pequeña del modelo.

Tabla 37

CBR Ajustado con valores de correlación obtenida para suelos MH.

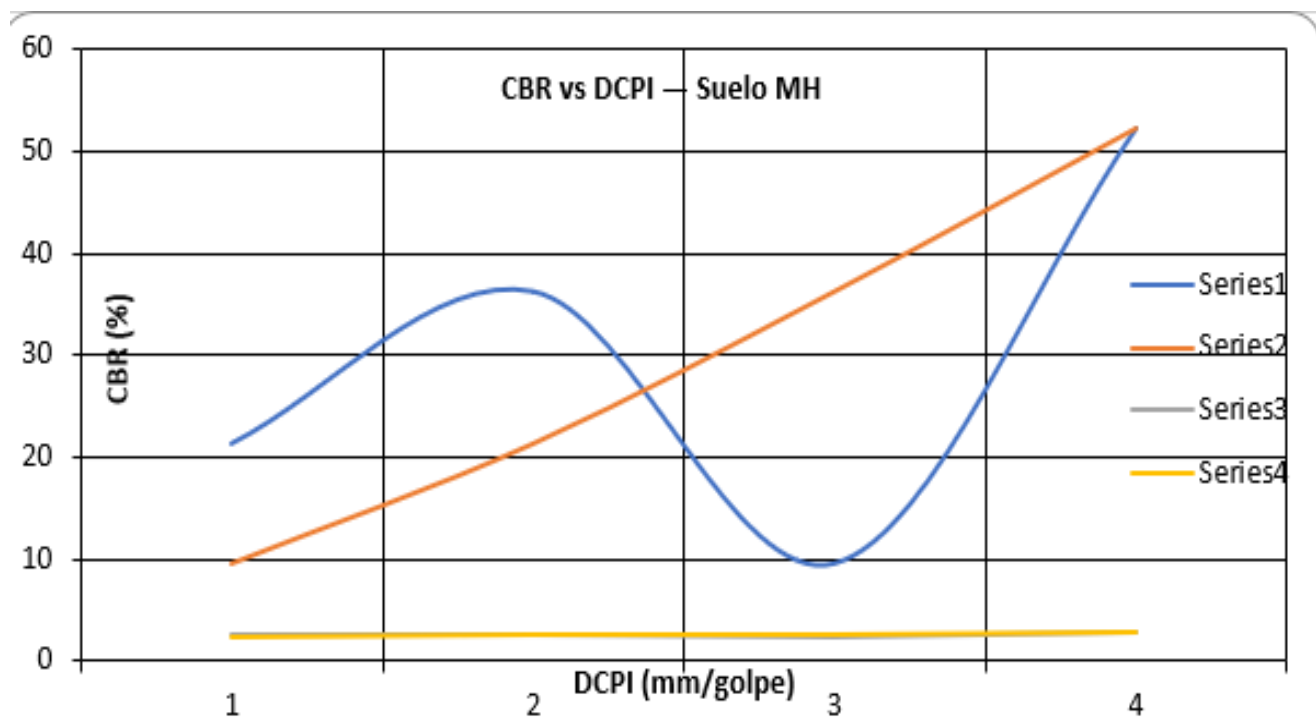
Calicata	CBR ajustado	Residuo
C4	2,54	-0,05
C13	2,64	0,03
C14	2,40	0,02
C22	2,71	0,006

Nota: Valores reemplazados en la ecuación original de CBR

Esto evidencia que el modelo representa adecuadamente la tendencia observada, aunque su uso debe considerar que el CBR no cambia bruscamente frente a variaciones de DCPI en este grupo.

Figura 22

Curva ajustada para suelos MH.



Fuente: Elaboración Propia

4.4 Análisis de resultado de CBR agrupando Calicatas por tipo de suelo (SUCS)

A continuación, se presenta una tabla resumen con la distribución de la base de datos por tipo de suelo según la clasificación SUCS (CL, MH y CH). En ella se sintetizan el número de muestras (10) que son el total de las CALICATAS en estudio y los estadísticos básicos del CBR al 100% obtenido en laboratorio, con el propósito de caracterizar la variabilidad de los resultados dentro de cada grupo y establecer una referencia para la interpretación de las correlaciones CBR-DCP desarrolladas.

Tabla 38*Resumen de resultados por tipo de suelo (SUCS)*

CALICATA	CBR100%	CBR(DCPI)	TIPO SUELO
C3	2,84	1,48	CH
C5	4,07	2,21	CH
C8	4,69	31,08	CL
C9	5,5	4,84	CL
C10	5,68	4,23	CL
C12	4,59	4,67	CL
C4	2,49	10,99	MH
C13	2,67	6,63	MH
C14	2,42	27,66	MH
C22	2,72	3,36	MH

Fuente: Elaboración Propia.**4.4.1 Para Suelo CL**

En el grupo CL, los valores de CBR 100% de laboratorio se mantienen dentro de un intervalo estrecho, lo que sugiere un comportamiento relativamente uniforme del material bajo las condiciones ensayadas. La relación con el parámetro del DCP se describe mediante una ecuación de tipo potencia, la cual permite estimar el CBR dentro del rango observado. En términos generales, la tendencia del ajuste es suave, coherente con la baja variabilidad del CBR en este tipo de suelo.

Tabla 39*Resultados para suelo CL según (SUCS)*

CALICATA	CBR100%	CBR(DCP)	TIPO SUELO
C8	4,69	31,08	CL
C9	5,5	4,84	CL
C10	5,68	4,23	CL
C12	4,59	4,67	CL

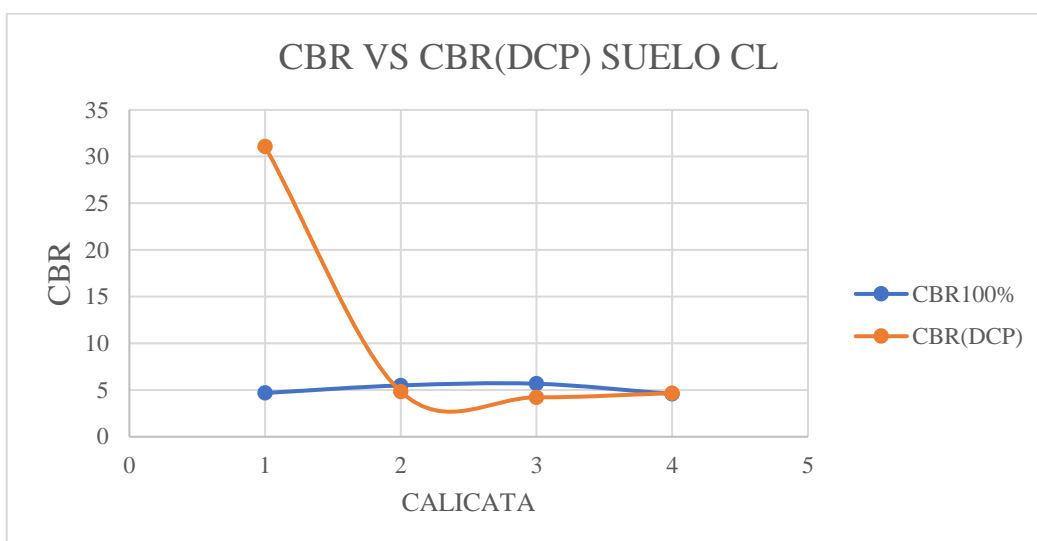
Fuente: Elaboración Propia.

Según los autores Reyes Lizcano y Rondón Quintana (2022), nos presentan relaciones y ecuaciones según tipo de suelo. Por lo que para el suelo CL, se utilizó la siguiente ecuación para la obtención de los resultados de CBR.

$$CBR = \frac{1}{(0.017019 * DCP)^2}$$

Figura 23

Relación CBR-DCP para suelos CL



Fuente: Elaboración Propia.

4.4.2 Para Suelo MH

Para el grupo MH, los resultados de CBR 100% presentan una dispersión reducida, mientras que el parámetro del DCP muestra mayor amplitud, lo cual es típico cuando el ensayo in situ captura cambios de estado del suelo (por ejemplo, variaciones de estructura o humedad). La ecuación específica del grupo reproduce de manera cercana el comportamiento observado, por lo que la segmentación por SUCS mejora la coherencia del análisis y la interpretación de la correlación.

Tabla 40

Resultados para suelo MH según (SUCS)

CALICATA	CBR100%	CBR(DCP)	TIPO SUELO
C4	2,49	10,99	MH
C13	2,67	6,63	MH
C14	2,42	27,66	MH
C22	2,72	3,36	MH

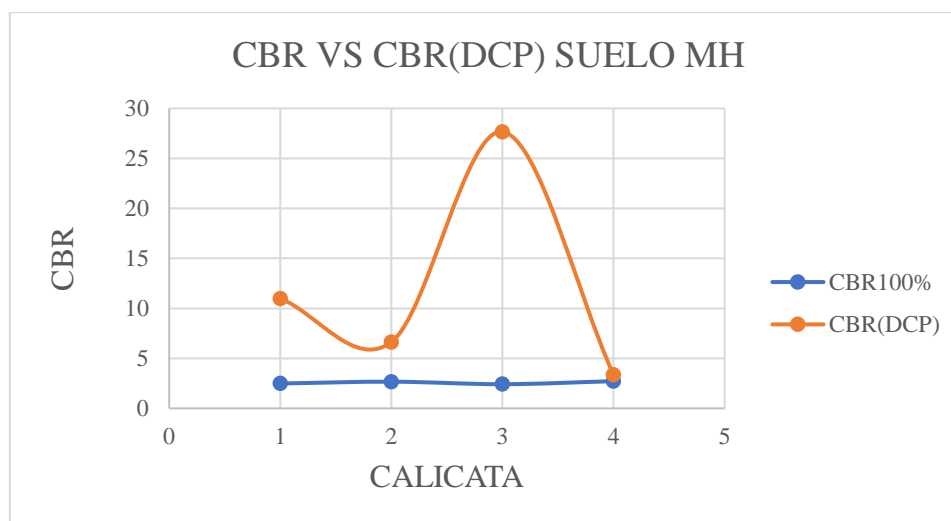
Fuente: Elaboración Propia.

Según los autores Reyes Lizcano y Rondón Quintana (2022), nos presentan relaciones y ecuaciones según tipo de suelo. Por lo que para el suelo MH, se utilizó la siguiente ecuación para la obtención de los resultados de CBR.

$$CBR = \frac{292}{(DCP)^{1.12}}$$

Figura 24

Relación CBR-DCP para suelos MH



Fuente: Elaboración Propia.

4.4.3 Para suelo CH

En CH, la interpretación debe realizarse con cautela debido al tamaño muestral limitado. Aunque la gráfica evidencia una tendencia entre el CBR de laboratorio y el parámetro del DCP, se requiere incrementar el número de ensayos para reducir la sensibilidad del ajuste y obtener una ecuación con representatividad estadística.

Tabla 41

Resultados para suelo CH según (SUCS)

CALICATA	CBR100%	CBR(DCP)	TIPO SUELO
C3	2,84	1,48	CH
C5	4,07	2,21	CH

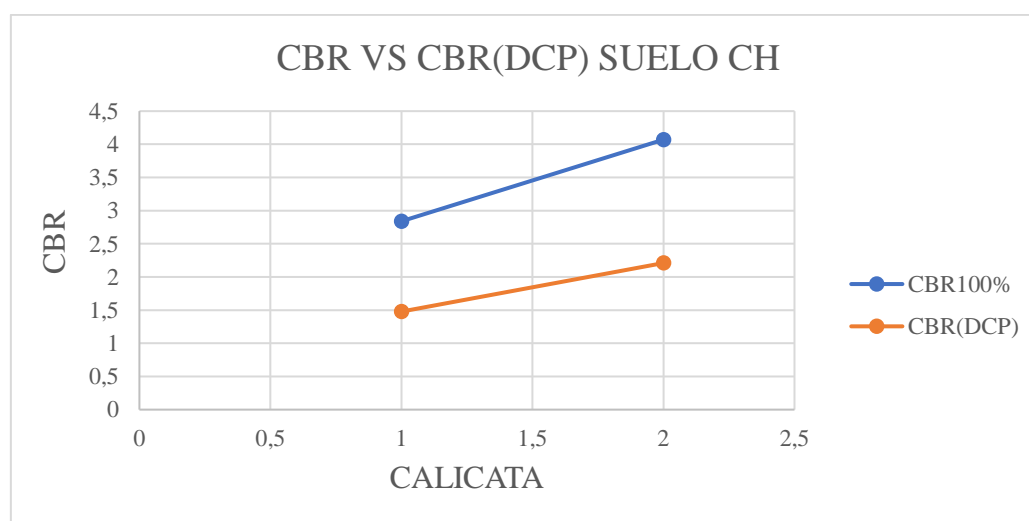
Fuente: Elaboración Propia.

Según los autores Reyes Lizcano y Rondón Quintana (2022), nos presentan relaciones y ecuaciones según tipo de suelo. Por lo que para el suelo CH, se utilizó la siguiente ecuación para la obtención de los resultados de CBR.

$$CBR = \frac{1}{0.02871 * DCP}$$

Figura 25

Relación CBR-DCP para suelos CH



Fuente: Elaboración Propia.

Según los autores Reyes Lizcano y Rondón Quintana (2022), nos presentan relaciones y ecuaciones según tipo de suelo. Por lo que para el suelo CH, se utilizó la siguiente ecuación para la obtención de los resultados de CBR.

$$CBR = \frac{1}{0.02871 * DCP}$$

El análisis segmentado por tipo de suelo (CL, MH y CH) permite abordar la relación CBR-DCP de manera más sólida que mediante un ajuste único, dado que cada clasificación SUCS concentra materiales con propiedades físicas y índices de plasticidad particulares, las cuales condicionan su respuesta mecánica. Cuando se emplea una sola ecuación para todos los datos, se combinan suelos con comportamientos distintos, lo que tiende a aumentar la dispersión de los puntos y a disminuir la capacidad explicativa del modelo. En cambio, la separación por grupos SUCS favorece la lectura de tendencias en rangos más homogéneos y mejora la consistencia de la interpretación.

Dentro del intervalo evaluado, los suelos CL y MH muestran una variación reducida de los valores de CBR, lo que respalda el uso de ecuaciones específicas por material como aproximación del CBR a partir del DCP, siempre que su aplicación se limite al rango de datos analizado. Para el caso de CH, la información disponible debe considerarse preliminar debido al número limitado de observaciones, por lo que no es posible sustentar con suficiente respaldo estadístico una ecuación representativa.

5 CAPITULO IV

5.1 Conclusiones

En este trabajo se logró cumplir el objetivo principal, que fue realizar la correlación entre el CBR (%) obtenido en laboratorio y el índice de penetración DCPI (mm/golpe) medido con el ensayo DCP en campo. Para esto se organizó la información en una base de datos final y se trabajó con un método estadístico que permitió encontrar una relación matemática entre ambas variables.

Durante el análisis se utilizó el modelo de regresión log-log, ya que la relación entre CBR y DCPI no se comporta de manera lineal. Con la transformación logarítmica se pudo ajustar una ecuación que representa el comportamiento general de los datos y, además, se obtuvieron los indicadores estadísticos R y R^2 , los cuales mostraron que el ajuste alcanzado es aceptable dentro del rango evaluado.

También se observó que separar los resultados por tipo de suelo, de acuerdo a la clasificación SUCS, constituye un criterio metodológico relevante, porque no todos los suelos se comportan igual. Por esa razón, al trabajar por grupos (CL y MH), se obtuvo una correlación más ordenada y con mejores resultados que si se analizaba todo en conjunto.

En conclusión, sí se logró establecer la correlación CBR-DCPI para los suelos evaluados, obteniéndose ecuaciones ajustadas con sus respectivas gráficas y tablas de respaldo. Sin embargo, se debe considerar que los resultados dependen del número de muestras disponibles y de las condiciones del lugar de estudio, por lo que estas ecuaciones deben utilizarse principalmente como referencia para suelos similares y dentro del mismo rango de valores analizados.

5.2 Recomendaciones

Incrementar la cantidad de muestras por tipo de suelo.

Con el fin de elevar la confiabilidad de las ecuaciones generadas, se sugiere ejecutar un mayor número de ensayos DCP y CBR en distintos puntos del área de estudio, procurando que cada grupo de suelo cuente con más registros. De esta manera, las correlaciones obtenidas serán más consistente y representativa.

Conservar el enfoque de análisis por clasificación SUCS.

Se recomienda mantener la separación de los datos según el tipo de suelo (CL, MH, CH), dado que en esta investigación los modelos ajustados por grupo SUCS mostraron un comportamiento más consistente dentro de cada conjunto analizado. No obstante, el desempeño de un ajuste global sin segmentación no fue evaluado en el presente estudio; por ello, no es posible concluir de forma directa sobre su validez o invalidez. Se sugiere abordar esta comparación en investigaciones posteriores.

Evitar aplicar las ecuaciones fuera del intervalo evaluado.

Las expresiones obtenidas deben utilizarse únicamente dentro del rango de valores de DCPI analizados en la investigación, ya que estimaciones fuera de ese límite pueden conducir a resultados poco precisos o no confiables.

Mejorar el control de humedad y compactación durante los ensayos.

Es aconsejable registrar la humedad natural del suelo al momento del ensayo DCP y contrastarla con la humedad óptima determinada mediante Proctor. Esto permitirá interpretar mejor las variaciones observadas en el CBR y disminuir diferencias entre puntos de muestreo.

Incorporar variables adicionales para fortalecer el modelo.

Para estudios posteriores, sería conveniente integrar parámetros como densidad seca, límite líquido, límite plástico e índice de plasticidad. Con esta información, incluso podría aplicarse una regresión múltiple, logrando ecuaciones de predicción más precisas.

Aprovechar el DCP como método rápido, complementado con ensayos de laboratorio.

Debido a su facilidad y rapidez en campo, el DCP es útil como herramienta preliminar de estimación. Sin embargo, para el diseño definitivo se recomienda validar los resultados con pruebas de laboratorio, como CBR y análisis granulométrico.

Reforzar el análisis del suelo tipo CH mediante más datos.

En caso de obtener un mayor número de resultados para suelos clasificados como CH, se sugiere desarrollar una regresión específica para ese grupo, ya que con una cantidad mínima de puntos no es posible construir un modelo estadísticamente fiable.

6 Bibliografía

- AASHTO. (1993). *Guide for Design of Pavement Structures*. AASHTO. Obtenido de <http://ingenieriadeseguridadvial.blogspot.com/2013/05/aashto.html>
- Abdul, M., Paiva, S., Tripathi, G., & Feroz, N. (2020). Tecnologías facilitadoras y ciudades inteligentes sostenibles. doi:10.1016/j.scs.2020.102301
- Aguilar Romero, S., & Guamán Romero, J. (2025). Diseño de sistema de gestión de infraestructura vial para el tramo Bibin - Octavio Cordero Palacios. Obtenido de <https://dspace.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/46726>
- Al-Sabaeei, A., Souliman, M., & Jagadeesh, A. (2024). Aplicaciones para teléfonos inteligentes para el monitoreo del estado del pavimento: una revisión. doi:10.1016/j.conbuildmat.2023.134207
- Angamarca Solano, A. (2013). *Determinación del CBR de laboratorio y natural en suelos finos y su correlación con el ensayo DCP en Quito*. Universidad Central del Ecuador. Obtenido de <https://www.dspace.uce.edu.ec/handle/25000/969>
- Apostolidis, G., & Hadjileontiadis, L. (2017). Swarm decomposition: A novel signal analysis using swarm intelligence. *Signal Processing*. doi:<https://doi.org/10.1016/j.sigpro.2016.09.004>
- Arévalo Herrera, J. J., & Cabrera Durán, A. (2022). *Correlación del CBR de laboratorio, CBR in situ y DCP para subrasantes naturales de Cuenca*. Universidad Católica de Cuenca. Obtenido de <https://dspace.ucacue.edu.ec/bitstream/ucacue/12741/1/TESIS.pdf>
- ASTM International. (2007). *ASTM D698 – Test Method for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort (12,400 ft-lbf/ft³)*.
- ASTM International. (2018). *ASTM D6951/D6951M-18: Standard Test Method for Use of the Dynamic Cone Penetrometer in Shallow Pavement Applications*. Obtenido de https://www.astm.org/d6951_d6951m-18.html

- ASTM International. (2021). *ASTM D1883-21: Standard Test Method for CBR (California Bearing Ratio)*. Obtenido de <https://www.astm.org/d1883-21.html>
- Barreno Proaño, J. D. (2021). *Correlación entre CBR y DCP para vías rurales de la parroquia Pacto – Quito*. Universidad San Francisco de Quito. Obtenido de <http://repositorio.usfq.edu.ec/handle/23000/10326>
- Bazán Galarreta, M. (2018). *Correlación entre CBR y PDC en suelos de Moche – Trujillo*. Obtenido de <https://es.scribd.com/document/914750651/Bazan-GAM-Prado-HKS-SD-ejemplo-2>
- Borja Ortiz, C. A. (2021). *Correlación entre CBR, DCP y propiedades índice y mecánicas de suelos granulares en Píllaro*. Universidad Técnica de Ambato. Obtenido de <https://repositorio.uta.edu.ec/jspui/handle/123456789/33519>
- Bowles, J. E. (1997). *Foundation Analysis and Design* (5 ed.). McGraw-Hill.
- Budhu, M. (2010). *Soil Mechanics and Foundations* (3 ed.). John Wiley & Sons.
- Cai, X., Wang, D., & Yu, J. (2020). Evaluación del desempeño funcional de materiales de pavimentación con base en el analizador de pavimentos de ruedas motrices. doi:10.3390/app10072410
- Castillo Morejón, J. A. (2019). *Correlación entre el penetrómetro dinámico de cono (DCP) y el CBR en campo: caso vía Portoviejo–Manta*. Universidad Politécnica Salesiana. Obtenido de <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/17728/1/UPS%20-%20ST004313.pdf>
- Colana Coayla, R. A. (2021). *Diseño del Pavimento Flexible Utilizando los Métodos AASHTO 93 en el Instituto del Asfalto en la Av. Santa Fortunata – Moquegua, 2021*. Moquegua: Repositoria Universidad César Vallejo. Recuperado el 2022
- Colquehuanca, E., & Espinal, G. (2023). *En el desarrollo de esta investigación, se tomará como referencia la norma ASTM D6433, la cual establecerá el procedimiento técnico para evaluar el estado funcional del pavimento a través del cálculo del Índice de Condición*

del Pavimento (PCI). Esta norma. Obtenido de <https://repositorio.umsa.bo/bitstream/handle/123456789/34897/PG-8721.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Condori Apaza, N., & Goyzueta Masías, S. P. (2019). *Propuesta de estrategias de intervención del pavimento flexible, aplicando las metodologías PCI, VIZIR y PSI, en el tramo paradero grifo Mobil-Ciencias de la salud de la Univerisdad Andina de la ciudad del Cusco-2018*. Cusco: Repositorio de la Universidad Andina del Cusco.

Contreras Ávila, J. F., & García García, A. E. (2019). *Correlación del PDC con CBR en suelos de Engativá*. Universidad Católica de Colombia. Obtenido de <https://repository.ucatolica.edu.co/bitstream/10983/23933/1/TESIS%20V01..pdf>

Coy Pineda, O. M. (2017). Evaluación superficial de un pavimento flexible de la call 134 entre carreras 54A a 53C comparando los métodos ZIVIR y PCI. Bogotá, Colombia: Repositorio de la unidad de especialización en Ingeniería de Pavimentos de la Universidad Militar Nueva Granada.

Das, B. M., & Sobhan, K. (2018). *Principles of Geotechnical Engineering* (9 ed.). Cengage Learning.

Ferrari, A., Lombardi, S., & Signoroni, A. (2017). Bacterial colony counting with convolutional neural networks in digital microbiology imaging. *Pattern Recognition*. doi:<https://doi.org/10.1016/j.patcog.2016.07.016>

Flórez, G. C., Rodríguez, M. A., & Durán, L. (2017). Estimación del valor CBR usando penetrómetro de cono dinámico. *Revista Ingenio UFPS*, 1-10. Obtenido de <https://www.ingeo.com.co/wp-content/uploads/2017/07/ESTIMATION-OF-CBR-VALUE-USING-DYNAMIC-CONE-PENETROMETER.pdf>

Gallegos, G. (2022). *Análisis de la correlación entre CBR, DCP y propiedades índice en suelos de Ambato, Quero, Tisaleo, Mocha y Cevallos*. Universidad Técnica de Ambato. Obtenido de <https://repositorio.uta.edu.ec/jspui/handle/123456789/35948>

- Gálvez Idrogo, D. (2019). *Estudio comparativo CBR vs DCP en vía de evitamiento alterna de Cajamarca*. Universidad Nacional de Cajamarca. Obtenido de https://repositorio.unc.edu.pe/bitstream/handle/20.500.14074/4510/1.-%20TESIS_DILSER%20G%C3%81LVEZ%20IDROGO.pdf
- Gordillo Granda, L. M. (2019). *Determinación del CBR estimado a partir del índice DCP en Bellavista – Mesa de los Pobres, Cuenca*. Universidad del Azuay. Obtenido de <https://dspace.uazuay.edu.ec/bitstream/datos/14311/1/14311.pdf>
- Han, S., Chung, I., Jiang, Y., & Uwakweh, B. (2023). Evaluación de las imágenes aéreas y la tecnología de aprendizaje profundo en la evaluación del estado del pavimento. doi:10.3390/geographies3010008
- Holguín Menéndez, J. (2024). *Correlación CBR–DCP para diseño de pavimentos en Cuenca*. Universidad Politécnica Salesiana. Obtenido de <https://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/25758>
- Holtz, R. D., Kovacs, W., & Sheahan, T. (2011). *An Introduction to Geotechnical Engineering*. Prentice Hall.
- Injante, H. E. (2013). *Resistencia in situ de subrasantes mediante penetrómetro dinámico de cono en Ica*. Universidad Nacional de Ingeniería – Perú. Obtenido de <https://repositorio.unc.edu.pe/bitstream/handle/20.500.14074/4510>
- INVIAS. (2007). *INVIAS - Manual de Diseño de Pavimentos Asfálticos para Vías Con Bajos Volúmenes de Tránsito 2007*. Obtenido de <https://es.scribd.com/document/235372911/INVIAS-Manual-de-Diseno-de-Pavimentos-Asfalticos-Para-Vias-Con-Bajos-Volumenes-de-Transito-2007?>
- Kleyn, E. G. (1982). *The Use of the Dynamic Cone Penetrometer for Road Design in South Africa*.
- Kumar, A. (2024). Pavement surface condition assessment: A-state-of-the-art research review and future perspective. *Innovative Infrastructure Solutions*. doi:<https://doi.org/10.1007/s41062-024-01755-4>

- Lee, S. J., Park, S., & Kim, Y. (2019). Estimation of CBR of subgrade soils using dynamic cone penetrometer and regression models. *International Journal of Pavement Engineering*, 20(5), 517-526.
- Leguizamo M., P. M. (2007). *Instructivo para la inspección visual y la evaluación de los deterioros de los pavimentos asfálticos de carreteras*. Bogotá: Instituto Nacional de Vías.
- León Calderón, J. F., & Zeas Cárdenas, R. B. (2022). *Determinación de la correlación entre los índices DCP in situ y CBR de laboratorio en la ciudad de Cuenca*. Universidad de Cuenca. Obtenido de <https://dspace.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/29403>
- Livneh, M. (1985). An empirical correlation between CBR and DCP. *Transportation Research Record*.
- Llanos Sánchez, A. H., & Reyes Pérez, S. K. (2017). *Estudio comparativo de los ensayos CBR y PDC en la localidad de Picsi*. Universidad Señor de Sipán – Perú. Obtenido de <https://repositorio.uss.edu.pe/handle/20.500.12802/5443>
- Mamani Mantilla, J. L., & Silvestre Mamani, I. J. (2021). *Estudio de correlación geotécnica del CBR y DCP en suelos de subrasante*. Universidad Mayor de San Andrés. Obtenido de <https://repositorio.umsa.bo/handle/123456789/41472>
- Manotoa Santana, A. O. (2016). *Estudio de la correlación entre los ensayos DCP y CBR en los diferentes tipos de suelos*. Universidad Técnica de Ambato. Obtenido de <https://repositorio.uta.edu.ec/bitstream/123456789/23638/1/Tesis%201037%20-%20Manotoa%20Santana.pdf>
- Marcomini, J., Luiz, M., Sereni, J., & Grégio, C. (2020). *Evaluación del índice de condición del pavimento por diferentes métodos: Estudio de caso de Maringá, Brasil*. Perspectivas interdisciplinarias de la investigación del transporte. doi:10.1016/j.trip.2020.100100
- Ministerio de Transporte y Obras Públicas del Ecuador. (2022). *Guía Técnica para el Diseño de Pavimentos Flexibles*.

- Morales Colca, R. L. (Junio de 2019). Comparación de los métodos PCI y VIZIR en la evaluación de fallas del pavimento flexible de la avenida Aviación de la ciudad de Juliaca. Juliaca, Perú: Repositorio de la Universidad Peruana Unión.
- Osorio Martínez, J. F., & Casas Gerena, A. (2011). *Correlación PDC–CBR para suelos de la localidad de Suba*. Universidad Militar Nueva Granada – Colombia. Obtenido de <https://core.ac.uk/download/pdf/143448544.pdf>
- Paucara Romero, L., & Quispe Mamani, M. (2020). *Correlación entre CBR de laboratorio y DCP in situ en suelos del campus Cota Cota*. Obtenido de <https://repositorio.umsa.bo/handle/123456789/24318>
- Pavani, N., & Papoorna, B. (2020). Sistemas y tecnologías de gestión de activos de pavimentos: una revisión. doi:10.1016/j.autcon.2020.103336
- Portilla Yandún, F. P. (2022). Correlación entre CBR, DCP y propiedades mecánicas en suelos granulares. *Conciencia Digital*, 90-105. Obtenido de <https://cienciadigital.org/revistacienciadigital2/index.php/ConcienciaDigital/article/view/2396/5904>
- Radwan, M., Mousa, A., & Zahran, E. (2024). Enhancing pavement sustainability: Prediction of the pavement condition index in arid urban climates using the international roughness index. *Sustainability*. doi:<https://doi.org/10.3390/su16083158>
- Reyes Ortiz, O., Mejia, M., & Useche Castelblan. (2019). Revista EIA. doi:<https://doi.org/10.24050/reia.v16i31.1215>
- Rifai, M., Setyawan, A., Sri, F., & Dipla, A. (2023). Evaluation of functional and structural conditions on flexible pavements using pavement condition index (PCI) and international roughness index (IRI) methods. Obtenido de https://www.e3s-conferences.org/articles/e3sconf/pdf/2023/66/e3sconf_iccim2023_05011.pdf
- Riyaz, N., & Vasantha, S. (2023). Uso de técnicas avanzadas para la evaluación funcional de pavimentos: una revisión y un estudio piloto. Obtenido de https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-981-99-2556-8_12

- Sayers, M., & Karamihas, S. (1998). *The little book of profiling: Basic information about measuring and interpreting road profiles*. University of Michigan Transportation Research Institute.
- Shatayat, A., Obaidat, M., Al-Mistarehi, B., Bader, A., Moridpour, S., & Alhmad, S. (2025). Optimización de la evaluación del pavimento de carreteras mediante técnicas avanzadas de procesamiento de imágenes. doi:10.3390/su17062473
- Sholevar, N., Golroo, A., & Roghani, S. (2022). Técnicas de aprendizaje automático para la evaluación del estado del pavimento. *Automatización en la construcción*. Obtenido de <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0926580522000632>
- Subramayan, B., Aravind, S., & Prasanna, R. (2017). Functional and structural evaluation of a road pavement. Obtenido de https://www.researchgate.net/publication/319943595_Functional_and_structural_evaluation_of_a_road_pavement
- Torres Delgado, M. (2019). *Modelos de correlación CBR–DCP aplicados en la vía Portoviejo–Manta*.
- Vásquez Varela, L. R. (2002). *Pavement Condition Index (PCI)*. Manizales: Ingepav Ingeniería de pavimentos.
- Wasiq, S., & Golroo, A. (2024). Smartphone-based cost-effective pavement performance model development using a machine learning technique with limited data. doi:<https://doi.org/10.3390/infrastructures9010009>
- Webster, S. L., Brown, R., & Porter, J. (1992). *Use of the Dynamic Cone Penetrometer in Pavement Evaluation*.
- Yu, Q., Fang, Y., & Wix, R. (2022). Estimación del índice de rugosidad del pavimento y detección de anomalías mediante teléfonos inteligentes. Obtenido de <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0926580522002825>

- Yusuf, M., Nandi, A., Kumar, A., Saha, S., Nandi, S., & Chakraborty, S. (2020). Crowdsourcing de la gente real: creación de perfiles viales independientes del dispositivo, el vehículo, la superficie de la carretera y la conducción a partir de sensores de teléfonos inteligentes. *Computación omnipresente y móvil*. Obtenido de <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1574119219304687>
- Zhang, G., Zeng, Z., Zhang, S., Zhang, Y., & Wu, W. (2017). SIFT matching with CNN evidences for particular object retrieval. *Neurocomputing*. doi:<https://doi.org/10.1016/j.neucom.2017.01.081>

7 Anexos

7.1 Datos obtenidos calicata C3

Tabla 42

Granulometría correspondiente a la calicata C3.

GRANULOMETRÍA							
TAMIZ		Ws+TAMIZ.(gr.)	W TAMIZ(gr.)	P.RET. PARC.(gr.)	P.RET. ACUM.(gr.)	% RET.	% PASA
U.S	MM						
3/4"	19,050	504,1	464,9	39,2	39,2	3,96%	96,04%
3/8"	9,525	452,1	450	2,1	41,3	4,17%	95,83%
4	4,750	497,2	491	6,2	47,5	4,79%	95,21%
10	2,000	464,8	459,4	5,4	52,9	5,34%	94,66%
20	0,850	487,9	461,4	26,5	79,4	8,01%	91,99%
40	0,425	449,2	361	88,2	167,6	16,92%	83,08%
60	0,250	508,3	407,3	101	268,6	27,11%	72,89%
140	0,106	304,3	287,4	16,9	285,5	28,82%	71,18%
200	0,075	309,5	269	40,5	326	32,90%	67,10%
	Fondo	394,4	244	664,8			
			Sumatoria	990,8	gr.		

Fuente: Realizado por los autores.

Tabla 43

Límite líquido correspondiente a la calicata C3.

LIMITE LIQUIDO METODO CASA GRANDE							
#MUESTRA	GOLPES	PESO RECIPIENTE (gr)	PESO HUMEDO MATERIAL+ RECIPIENTE(gr)	PESO SECO MATERIAL + RECIPIENTE(gr)	PESO HUMEDO(gr)	PESO SECO(gr)	%HUMEDAD
1	17	17,46	33,12	27,78	15,66	10,32	51,74
2	26	17,28	26,42	23,28	9,14	6	52,33
3	27	17,62	27,17	23,88	9,55	6,26	52,56
4	37	17,34	25,35	22,5	8,01	5,16	55,23
					Limite liquido	LL=	52,11

Fuente: Realizado por los autores.

Tabla 44

Límite plástico correspondiente a la calicata C3.

LIMITE PLASTICO					
PESO RECIPIENTE (gr.)	PESO HUMEDO MATERIAL+ RECIPIENTE (gr.)	PESO SECO MATERIAL + RECIPIENTE(g r.)	PESO HUMEDO (gr.)	PESO SECO (gr.)	%HUMEDAD
17,81	19,25	18,95	1,44	1,14	26,32
17,41	19,57	19,1	2,16	1,69	27,81
17,67	19,8	19,36	2,13	1,69	26,04
				LP	26,72
				IP=	25,39

Fuente: Realizado por los autores.

Tabla 45

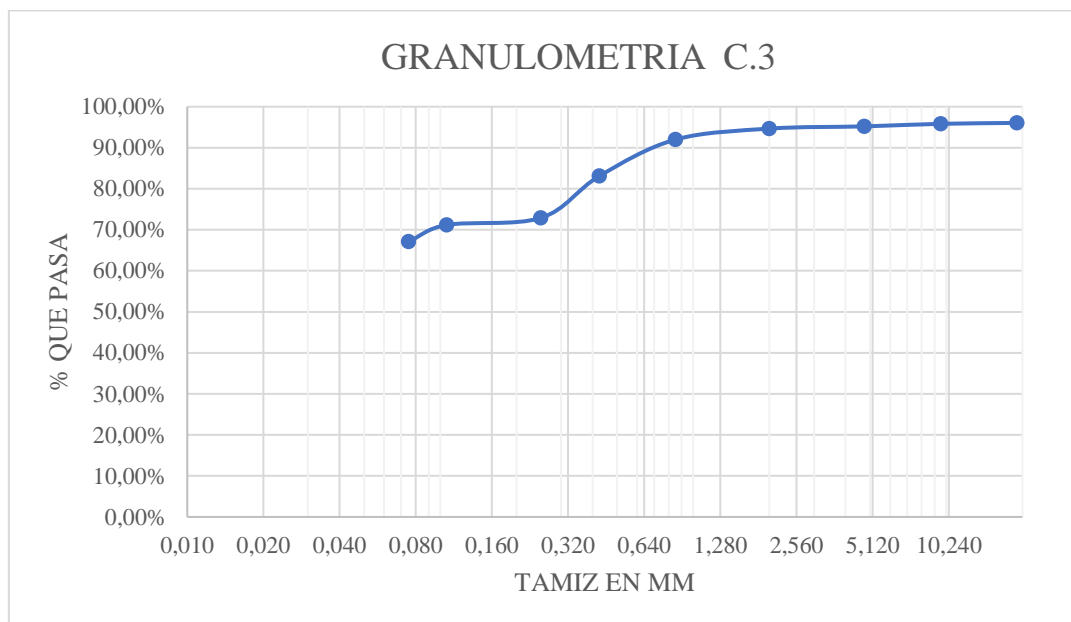
Clasificación SUCS Y AASHTO correspondiente a la calicata C3.

CLASIFICACION	
SUCS	CH
AASHO	A-7-6
IG (índice de grupo)	17

Fuente: Realizado por los autores.

Figura 26

Curva granulométrica correspondiente a la calicata C3.



Fuente: Realizado por los autores.

Tabla 46

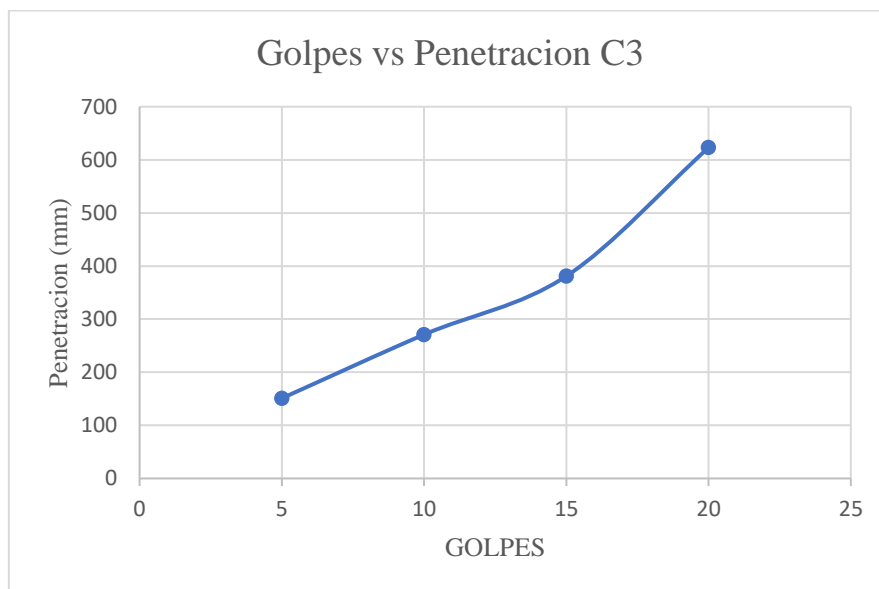
Datos DCP correspondientes a la calicata C3.

DATOS DCP CALICATA 3					
Numero de golpes	Golpes Acumulados	Penetracion Acumulada	Penetracion entre lectura	Penetracion por golpes	Indice DCP mm/Golpe
5	5	151	151	30,2	30,2
5	10	271	120	24	27,1
5	15	381	110	22	25,4
5	20	623	242	48,4	31,15

Fuente: Realizado por los autores.

Figura 27

Gráfica golpes vs penetración correspondiente a la calicata C3.



Fuente: Realizado por los autores.

7.2 Datos obtenidos calicata C4

Tabla 47

Granulometría correspondiente a la calicata C4.

GRANULOMETRÍA							
TAMIZ		Ws+TAMIZ.(gr.)	W TAMIZ(gr.)	P.RET. PARC.(gr.)	P.RET. ACUM.(gr.)	% RET.	% PASA
U.S	MM						
3/4"	19,050	464,9	464,9	0	0	0,00%	100,00%
3/8"	9,525	459,8	450	9,8	9,8	1,46%	98,54%
4	4,750	497,5	491	6,5	16,3	2,44%	97,56%
10	2,000	465,3	459,4	5,9	22,2	3,32%	96,68%
20	0,850	474,1	461,4	12,7	34,9	5,22%	94,78%
40	0,425	387,9	361	26,9	61,8	9,24%	90,76%
60	0,250	445,4	407,3	38,1	99,9	14,93%	85,07%
140	0,106	308,5	287,4	21,1	121	18,08%	81,92%
200	0,075	306,9	269	37,9	158,9	23,75%	76,25%
	Fondo	251	244	510,2			
			Sumatoria	669,1	gr.		

Fuente: Realizado por los autores.

Tabla 48*Límite líquido correspondiente a la calicata C4.*

LIMITE LIQUIDO METODO CONO DE PENETRACION								
#MUESTRA	PENETRACION	#RECIPIENTE	PESO RECIPIENTE	PESO HUMEDO MATERIAL+ RECIPIENTE(gr.)	PESO SECO MATERIAL + RECIPIENTE(gr.)	PESO HUMEDO (gr.)	PESO SECO (gr.)	%HUMEDAD
1	20	93	17,37	53,8	38,73	36,43	21,36	70,55
		98	17,03	49,13	36,02	32,1	18,99	69,04
		36	17,55	80,1	54,6	62,55	37,05	68,83
					Limite liquido	LL=	69,47	

Fuente: Realizado por los autores.

Tabla 49*Límite plástico correspondiente a la calicata C4.*

LIMITE PLASTICO						
#RECIPIENTE	PESO RECIPIENTE (gr.)	PESO HUMEDO MATERIAL+ RECIPIENTE (gr.)	PESO SECO MATERIAL + RECIPIENTE(g r.)	PESO HUMEDO (gr.)	PESO SECO (gr.)	%HUMEDAD
E	9,96	14,3	13,13	4,34	3,17	36,91
156	9,82	14,13	12,92	4,31	3,1	39,03
166	10,18	14,04	13	3,86	2,82	36,88
					LP	37,61
					IP=	31,86

Fuente: Realizado por los autores.

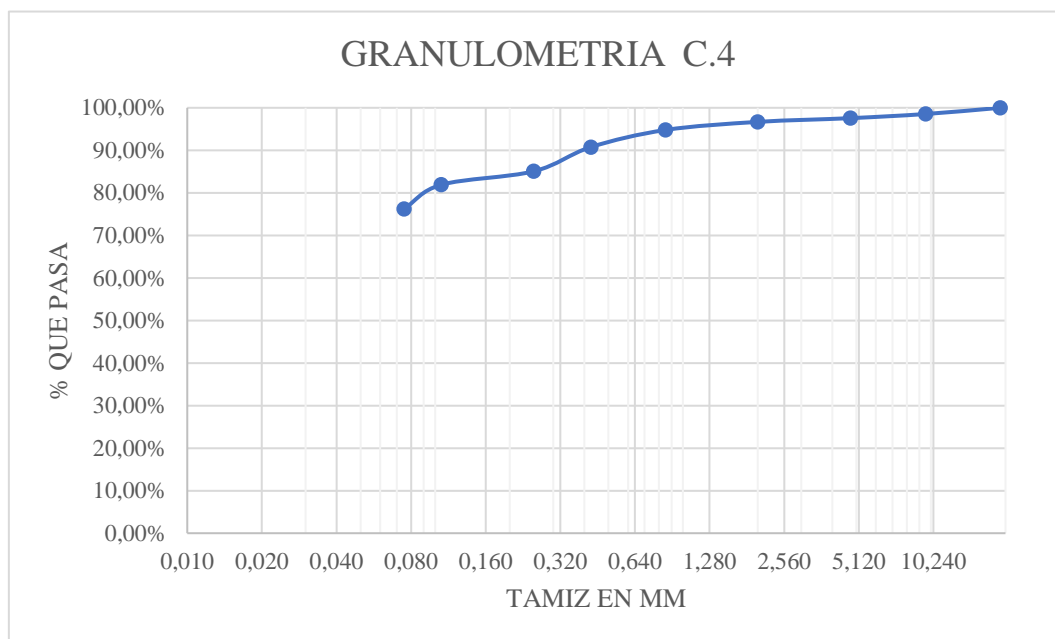
Tabla 50*Clasificación SUCS Y AASHO correspondiente a la calicata C4.*

CLASIFICACION	
SUCS	MH (limo de alta plasticidad)
AASHO	A-7-5
IG (índice de grupo)	28

Fuente: Realizado por los autores.

Figura 28

Curva granulométrica correspondiente a la calicata C4.



Fuente: Realizado por los autores.

Tabla 51

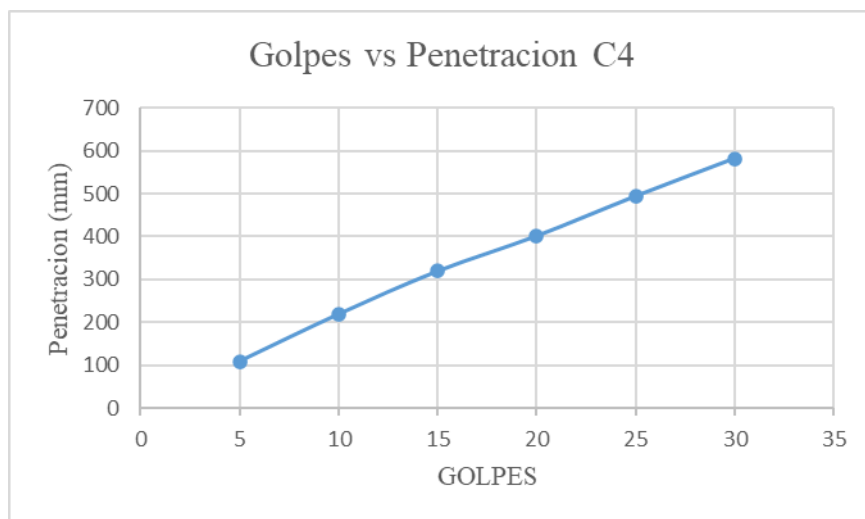
Datos DCP correspondientes a la calicata C4.

DATOS DCP CALICATA 4					
Numero de golpes	Golpes Acumulados	Penetracion Acumulada	Penetracion entre lectura	Penetracion por golpes	Indice DCP mm/golpes
5	5	109	109	21,8	21,80
5	10	219	110	22	21,90
5	15	319	100	20	21,27
5	20	401	82	16,4	20,05
5	25	494	93	18,6	19,76
5	30	582	88	17,6	19,40

Fuente: Realizado por los autores.

Figura 29

Gráfica golpes vs penetración correspondiente a la calicata C4.



Fuente: Realizado por los autores.

7.3 Datos obtenidos calicata C5

Tabla 52

Granulometría correspondiente a la calicata C5.

GRANULOMETRÍA							
TAMIZ		Ws+TAMIZ.(gr.)	W TAMIZ(gr.)	P.RET. PARC.(gr.)	P.RET. ACUM.(gr.)	% RET.	% PASA
U.S	MM						
3/4"	19,050	464,9	464,9	0	0	0,00%	100,00%
3/8"	9,525	450	450	0	0	0,00%	100,00%
4	4,750	494,1	491	3,1	3,1	0,21%	99,79%
10	2,000	473,6	459,4	14,2	17,3	1,19%	98,81%
20	0,850	662,7	461,4	201,3	218,6	15,07%	84,93%
40	0,425	521,1	361	160,1	378,7	26,11%	73,89%
60	0,250	469,2	407,3	61,9	440,6	30,38%	69,62%
140	0,106	419	287,4	131,6	572,2	39,45%	60,55%
200	0,075	310,6	269	41,6	613,8	42,32%	57,68%
	Fondo	580,6	244	836,5			
			Sumatoria	1450,3	gr.		

Fuente: Realizado por los autores.

Tabla 53*Límite líquido correspondiente a la calicata C5.*

LIMITE LIQUIDO METODO CONO DE PENETRACION								
#MUESTRA	PENETRACION	#RECIPIENTE	PESO RECIPIENTE	PESO HUMEDO MATERIAL+ RECIPIENTE(gr.)	PESO SECO MATERIAL + RECIPIENTE(gr.)	PESO HUMEDO (gr.)	PESO SECO (gr.)	%HUMEDAD
1	20	161	17,28	56,92	43,85	39,64	26,57	49,19
		26	17,34	49,84	39,07	32,5	21,73	49,56
		168	17,18	66,78	49,93	49,6	32,75	51,45
						Limite liquido	LL=	50,07

Fuente: Realizado por los autores.

Tabla 54*Límite plástico correspondiente a la calicata C4.*

LIMITE PLASTICO						
#RECIPIENTE	PESO RECIPIENTE (gr.)	PESO HUMEDO MATERIAL+ RECIPIENTE (gr.)	PESO SECO MATERIAL+ RECIPIENTE(g r.)	PESO HUMEDO (gr.)	PESO SECO (gr.)	%HUMEDAD
69	9,87	14,12	13,29	4,25	3,42	24,27
140	10	15,26	14,12	5,26	4,12	27,67
75	9,69	14,89	13,76	5,2	4,07	27,76
					LP	26,57
					IP=	23,50

Fuente: Realizado por los autores.

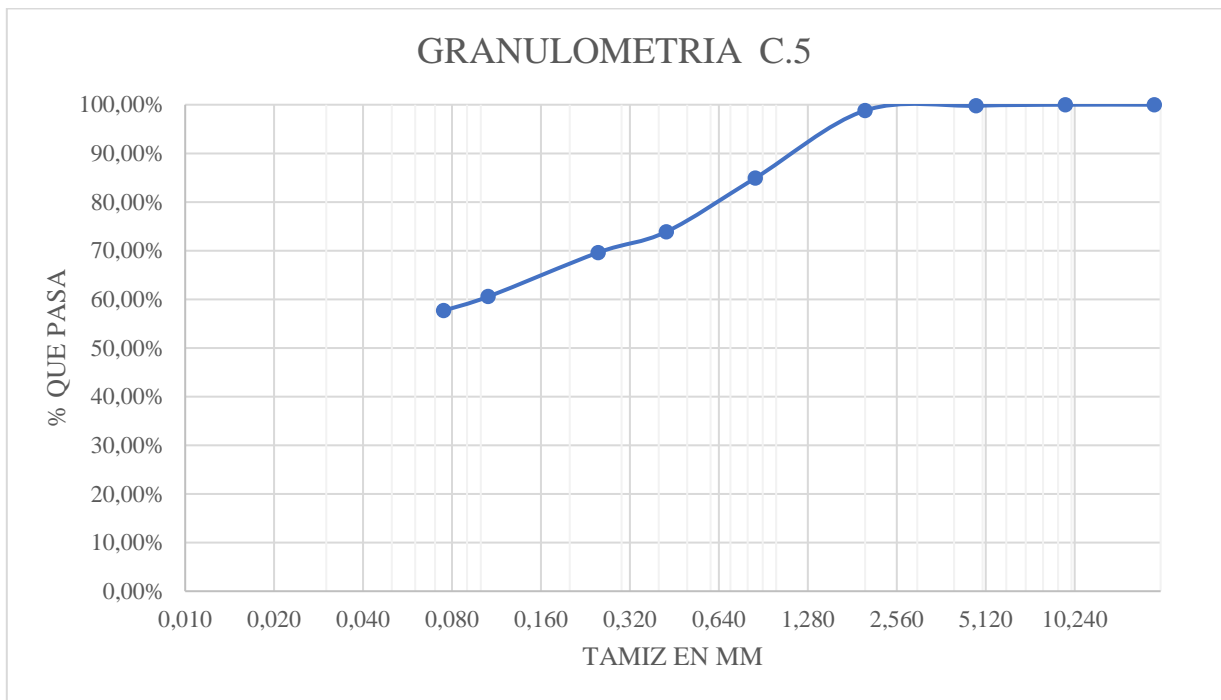
Tabla 55*Clasificación SUCS Y AASHTO correspondiente a la calicata C5.*

CLASIFICACION	
SUCS	CH (arcilla de alta plasticidad)
AASHTO	A-7-6
IG(índice de gr	12

Fuente: Realizado por los autores.

Figura 30

Curva granulométrica correspondiente a la calicata C5.



Fuente: Realizado por los autores.

Tabla 56

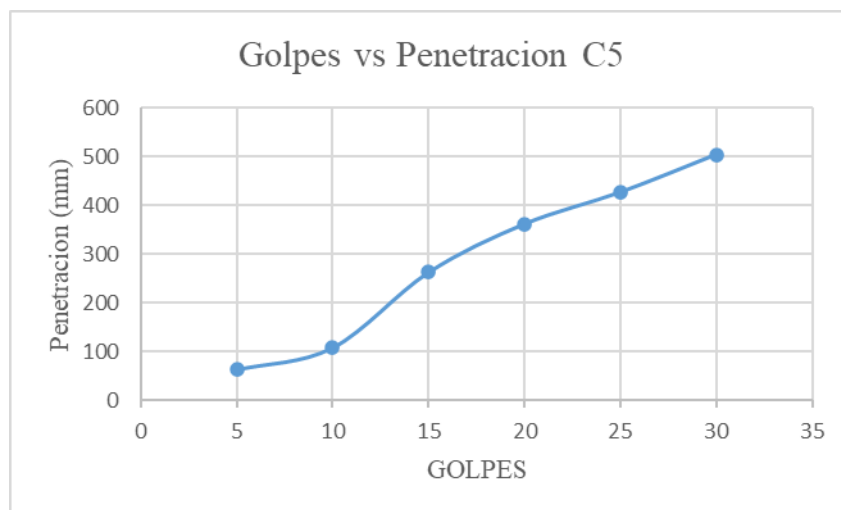
Datos DCP correspondientes a la calicata C5.

DATOS DCP CALICATA 5					
Numero de golpes	Golpes Acumulados	Penetracion Acumulada	Penetracion entre lectura	Penetracion por golpes	Indice DCP mm/golpes
5	5	64	64	12,80	12,80
5	10	109	45	9,00	10,90
5	15	263	154	30,80	17,53
5	20	362	99	19,80	18,10
5	25	427	65	13,00	17,08
5	30	504	77	15,40	16,80

Fuente: Realizado por los autores.

Figura 31

Gráfica golpes vs penetración correspondiente a la calicata C5.



Fuente: Realizado por los autores.

7.4 Datos obtenidos calicata C8

Tabla 57

Granulometría correspondiente a la calicata C8.

GRANULOMETRÍA							
TAMIZ		Ws+TAMIZ.(gr.)	W TAMIZ(gr.)	P.RET. PARC.(gr.)	P.RET. ACUM.(gr.)	% RET.	% PASA
U.S	MM						
3/4"	19,050	464,9	464,9	0	0	0,00%	100,00%
3/8"	9,525	450	450	0	0	0,00%	100,00%
4	4,750	491	491	0	0	0,00%	100,00%
10	2,000	459,8	459,4	0,4	0,4	0,07%	99,93%
20	0,850	463,1	461,4	1,7	2,1	0,35%	99,65%
40	0,425	367,4	361	6,4	8,5	1,40%	98,60%
60	0,250	447,9	407,3	40,6	49,1	8,12%	91,88%
140	0,106	454,4	287,4	167	216,1	35,72%	64,28%
200	0,075	316,8	269	47,8	263,9	43,62%	56,38%
	Fondo	254,8	244	341,1			
			Sumatoria	605	gr.		

Fuente: Realizado por los autores.

Tabla 58

Límite líquido correspondiente a la calicata C8.

LIMITE LIQUIDO METODO CONO DE PENETRACION								
#MUESTRA	PENETRACION	#RECIPIENTE	PESO RECIPIENTE	PESO HUMEDO MATERIAL+ RECIPIENTE(gr.)	PESO SECO MATERIAL + RECIPIENTE(gr.)	PESO HUMEDO (gr.)	PESO SECO (gr.)	%HUMEDAD
1	20	30	17,28	65,53	49,65	48,25	32,37	49,06
		100	17,54	54,35	42,19	36,81	24,65	49,33
		153	17,35	54,92	42,35	37,57	25	50,28
					Limite liquido	LL=	49,56	

Fuente: Realizado por los autores.

Tabla 59

Límite plástico correspondiente a la calicata C8.

#RECIPIENTE	LIMITE PLASTICO					
	PESO RECIPIENTE (gr.)	PESO HUMEDO MATERIAL+ RECIPIENTE (gr.)	PESO SECO MATERIAL + RECIPIENTE(g r.)	PESO HUMEDO (gr.)	PESO SECO (gr.)	%HUMEDAD
164	9,72	13,35	12,63	3,63	2,91	24,74
167	10	14,24	13,37	4,24	3,37	25,82
Z	9,89	14,03	13,19	4,14	3,3	25,45
					LP	25,34
					IP=	24,22

Fuente: Realizado por los autores.

Tabla 60

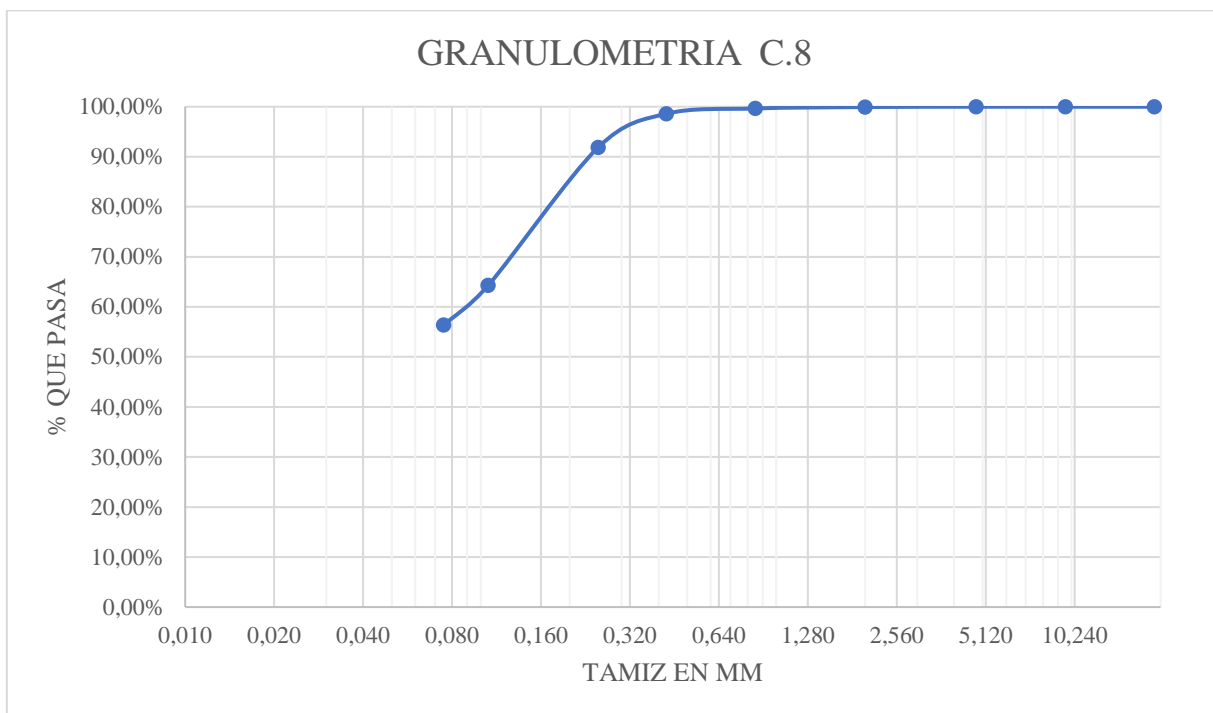
Clasificación SUCS Y AASHO correspondiente a la calicata C8.

CLASIFICACION	
SUCS	CL
AASHO	A-7-6
IG (índice de grupo)	12

Fuente: Realizado por los autores.

Figura 32

Curva granulométrica correspondiente a la calicata C8.



Fuente: Realizado por los autores.

Tabla 61

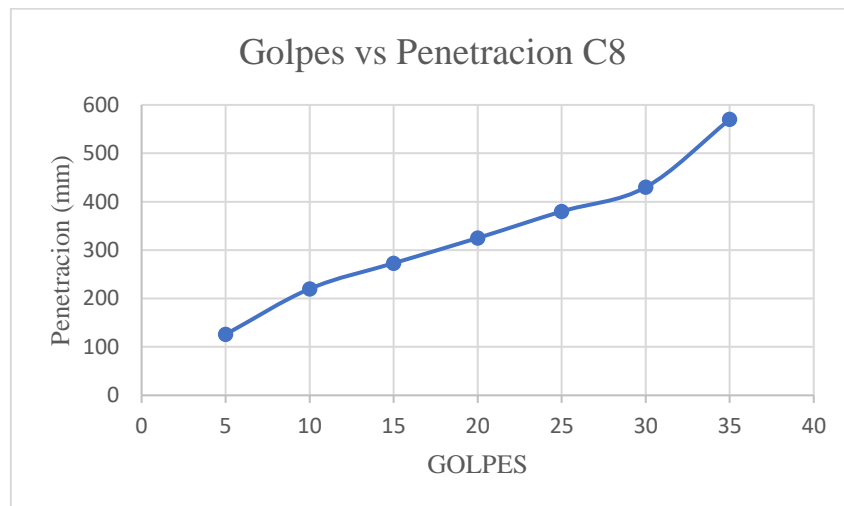
Datos DCP correspondientes a la calicata C8.

DATOS DCP CALICATA 8					
Numero de golpes	Golpes Acumulados	Penetracion Acumulada	Penetracion entre lectura	Penetracion por golpes	Indice DCP mm/golpes
5	5	126	126	25,20	25,20
5	10	220	94	18,80	22,00
5	15	273	53	10,60	18,20
5	20	325	52	10,40	16,25
5	25	380	55	11,00	15,20
5	30	430	50	10,00	14,33
5	35	570	140	28,00	16,29

Fuente: Realizado por los autores.

Figura 33

Gráfica golpes vs penetración correspondiente a la calicata C8.



Fuente: Realizado por los autores.

7.5 Datos obtenidos calicata C9

Tabla 62

Granulometría correspondiente a la calicata C9.

TAMIZ		GRANULOMETRÍA					
U.S	MM	W _s +TAMIZ.(gr.)	W TAMIZ(gr.)	P.RET. PARC.(gr.)	P.RET. ACUM.(gr.)	% RET.	% PASA
3/4"	19,050	464,9	464,9	0	0	0,00%	100,00%
3/8"	9,525	450	450	0	0	0,00%	100,00%
4	4,750	493,5	491	2,5	2,5	0,41%	99,59%
10	2,000	483,8	459,4	24,4	26,9	4,36%	95,64%
20	0,850	509,8	461,4	48,4	75,3	12,22%	87,78%
40	0,425	420,4	361	59,4	134,7	21,86%	78,14%
60	0,250	444,9	407,3	37,6	172,3	27,96%	72,04%
140	0,106	337,6	287,4	50,2	222,5	36,10%	63,90%
200	0,075	296,4	269	27,4	249,9	40,55%	59,45%
	Fondo	250,2	244	366,4			
			Sumatoria	616,3	gr.		

Fuente: Realizado por los autores.

Tabla 63*Límite líquido correspondiente a la calicata C9.*

LIMITE LIQUIDO METODO CONO DE PENETRACION								
#MUESTRA	PENETRACION	#RECIPIENTE	PESO RECIPIENTE	PESO HUMEDO MATERIAL+ RECIPIENTE(gr.)	PESO SECO MATERIAL + RECIPIENTE(gr.)	PESO HUMEDO (gr.)	PESO SECO (gr.)	%HUMEDAD
1	20	106	17,22	53,41	41,54	36,19	24,32	48,81
		155	17,27	65,79	49,45	48,52	32,18	50,78
		119	17,05	48,74	38,13	31,69	21,08	50,33
						Limite liquido LL=	49,97	

Fuente: Realizado por los autores.

Tabla 64*Límite plástico correspondiente a la calicata C9.*

LIMITE PLASTICO						
#RECIPIENTE	PESO RECIPIENTE (gr.)	PESO HUMEDO MATERIAL+ RECIPIENTE (gr.)	PESO SECO MATERIAL+ RECIPIENTE(g r.)	PESO HUMEDO (gr.)	PESO SECO (gr.)	%HUMEDAD
5	10	14,47	13,54	4,47	3,54	26,27
122	9,9	13,53	12,78	3,63	2,88	26,04
158	9,83	14,41	13,39	4,58	3,56	28,65
					LP	26,99
					IP=	22,98

Fuente: Realizado por los autores.

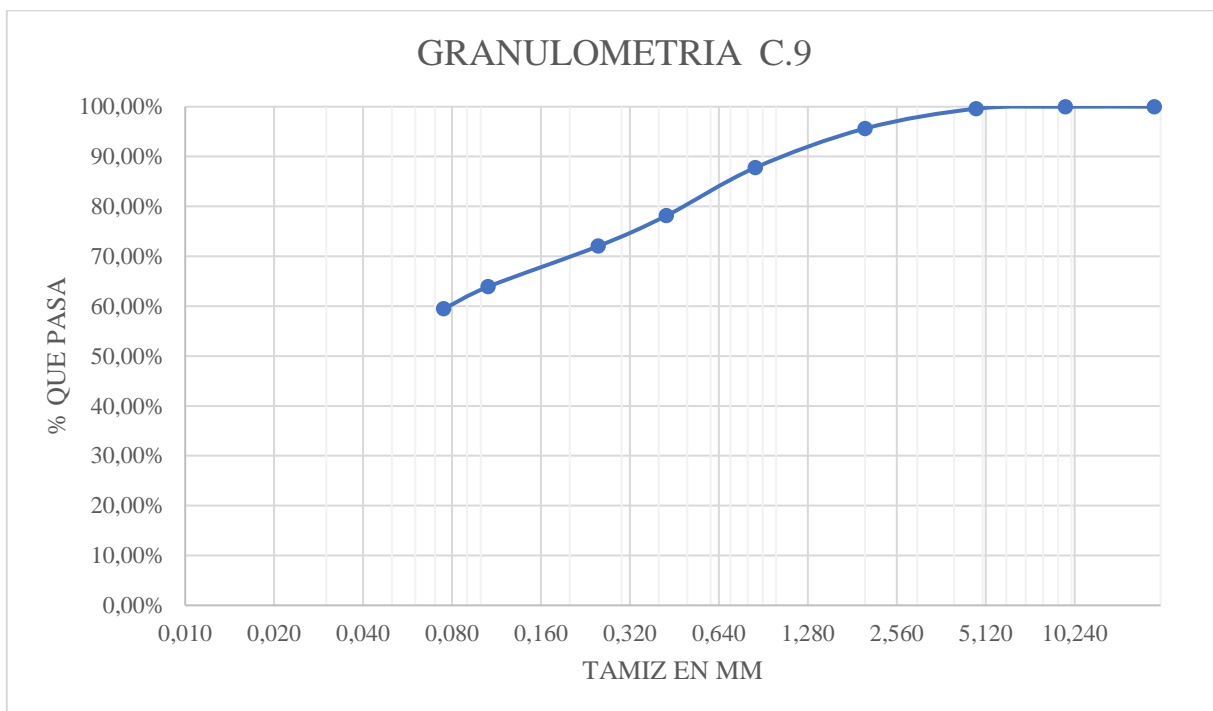
Tabla 65*Clasificación SUCS Y AASHTO correspondiente a la calicata C9.*

CLASIFICACION	
SUCS	CL
AASHTO	A-7-6
IG (índice de grupo)	12

Fuente: Realizado por los autores.

Figura 34

Curva granulométrica correspondiente a la calicata C9.



Fuente: Realizado por los autores.

Tabla 66

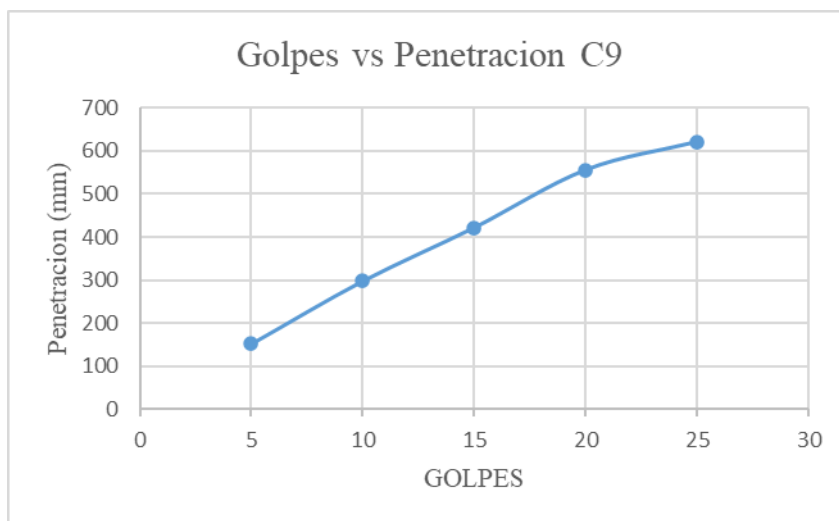
Datos DCP correspondientes a la calicata C9.

DATOS DCP CALICATA 9					
Numero de golpes	Golpes Acumulados	Penetracion Acumulada	Penetracion entre lectura	Penetracion por golpes	Indice DCP mm/golpes
5	5	152	152	30,40	30,40
5	10	298	146	29,20	29,80
5	15	422	124	24,80	28,13
5	20	556	134	26,80	27,80
5	25	621	65	13,00	24,84

Fuente: Realizado por los autores.

Figura 35

Gráfica golpes vs penetración correspondiente a la calicata C9.



Fuente: Realizado por los autores.

7.6 Datos obtenidos calicata C10

Tabla 67

Granulometría correspondiente a la calicata C10.

GRANULOMETRÍA							
TAMIZ		Ws+TAMIZ.(gr.)	W TAMIZ.(gr.)	P.RET. PARC.(gr.)	P.RET. ACUM.(gr.)	% RET.	% PASA
U.S	MM						
3/4"	19,050	501,6	464,9	36,7	36,7	3,40%	96,60%
3/8"	9,525	498,7	450	48,7	85,4	7,91%	92,09%
4	4,750	517	491	26	111,4	10,32%	89,68%
10	2,000	505	459,4	45,6	157	14,54%	85,46%
20	0,850	509,9	461,4	48,5	205,5	19,03%	80,97%
40	0,425	397,7	361	36,7	242,2	22,43%	77,57%
60	0,250	446,6	407,3	39,3	281,5	26,07%	73,93%
140	0,106	332,6	287,4	45,2	326,7	30,26%	69,74%
200	0,075	309,2	269	40,2	366,9	33,98%	66,02%
	Fondo	248,8	244	712,7			
			Sumatoria	1079,6	gr.		

Fuente: Realizado por los autores.

Tabla 68*Límite líquido correspondiente a la calicata C10.*

LIMITE LIQUIDO METODO CONO DE PENETRACION								
#MUESTRA	PENETRACION	#RECIPIENTE	PESO RECIPIENTE	PESO HUMEDO MATERIAL+ RECIPIENTE(gr.)	PESO SECO MATERIAL + RECIPIENTE(gr.)	PESO HUMEDO (gr.)	PESO SECO (gr.)	%HUMEDAD
1	20	113	17,3	51,27	41,4	33,97	24,1	40,95
		26	17,34	59,17	45,6	41,83	28,26	48,02
		93	17,34	61,25	47,31	43,91	29,97	46,51
						Limite liquido	LL=	45,16

Fuente: Realizado por los autores.

Tabla 69*Límite plástico correspondiente a la calicata C10.*

#RECIPIENTE	LIMITE PLASTICO					
	PESO RECIPIENTE (gr.)	PESO HUMEDO MATERIAL+ RECIPIENTE (gr.)	PESO SECO MATERIAL + RECIPIENTE(g r.)	PESO HUMEDO (gr.)	PESO SECO (gr.)	%HUMEDAD
141	10,05	13,41	12,74	3,36	2,69	24,91
155	10,14	14,35	13,39	4,21	3,25	29,54
82	9,79	13,15	12,61	3,36	2,82	19,15
					LP	24,53
					IP=	20,63

Fuente: Realizado por los autores.

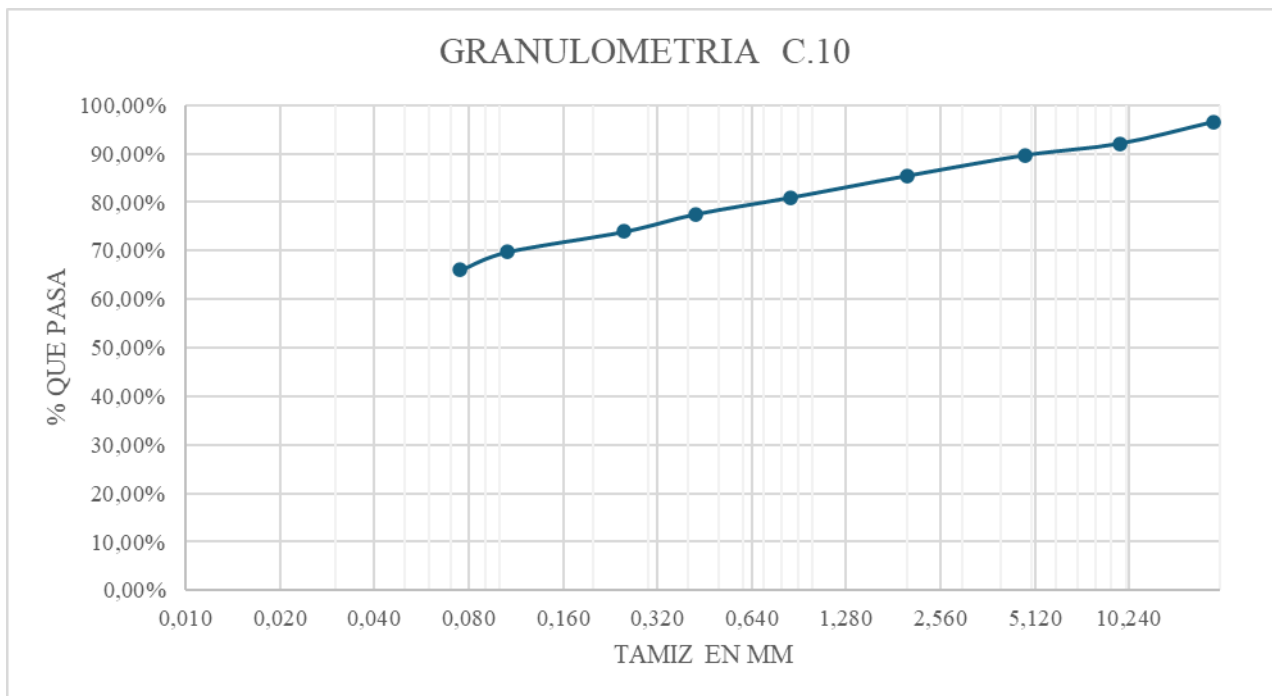
Tabla 70*Clasificación SUCS Y AASHTO correspondiente a la calicata C10.*

CLASIFICACION	
SUCS	CL
AASHTO	A-7-6
IG (índice de grupo)	12

Fuente: Realizado por los autores.

Figura 36

Curva granulométrica correspondiente a la calicata C10.



Fuente: Realizado por los autores.

Tabla 71

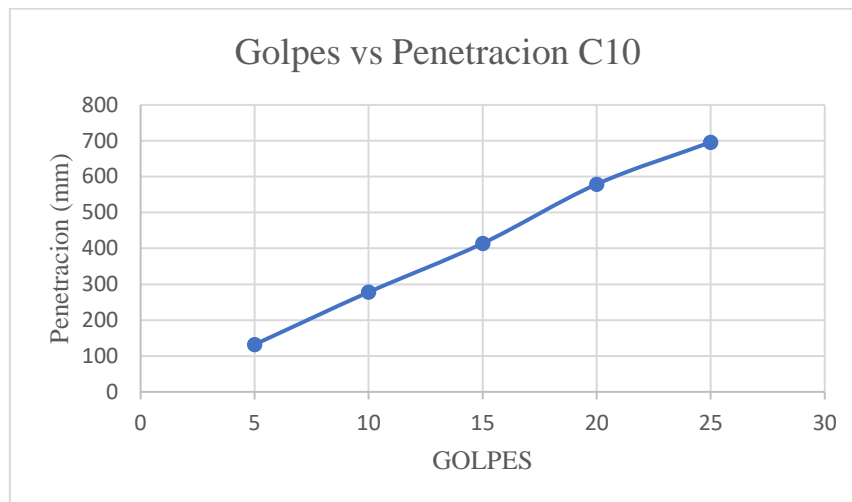
Datos DCP correspondientes a la calicata C10.

DATOS DCP CALICATA 10					
Numero de golpes	Golpes Acumulados	Penetracion Acumulada	Penetracion entre lectura	Penetracion por golpes	Indice DCP mm/golpes
5	5	132	132	26,40	26,40
5	10	278	146	29,20	27,80
5	15	414	136	27,20	27,60
5	20	579	165	33,00	28,95
5	25	696	117	23,40	27,84

Fuente: Realizado por los autores.

Figura 37

Gráfica golpes vs penetración correspondiente a la calicata C10.



Fuente: Realizado por los autores.

7.7 Datos obtenidos calicata C12

Tabla 72

Granulometría correspondiente a la calicata C12.

TAMIZ		GRANULOMETRÍA					
U.S	MM	Ws+TAMIZ.(gr.)	W TAMIZ(gr.)	P.RET. PARC.(gr.)	P.RET. ACUM.(gr.)	% RET.	% PASA
3/4"	19,050	464,9	464,9	0	0	0,00%	100,00%
3/8"	9,525	459,8	450	9,8	9,8	1,04%	98,96%
4	4,750	497,5	491	6,5	16,3	1,73%	98,27%
10	2,000	465,3	459,4	5,9	22,2	2,35%	97,65%
20	0,850	474,1	461,4	12,7	34,9	3,70%	96,30%
40	0,425	388,9	361	27,9	62,8	6,65%	93,35%
60	0,250	480,4	407,3	73,1	135,9	14,39%	85,61%
140	0,106	433,5	287,4	146,1	282	29,87%	70,13%
200	0,075	306,9	269	37,9	319,9	33,88%	66,12%
	Fondo	251,7	244	624,3			
			Sumatoria	944,2	gr.		

Fuente: Realizado por los autores.

Tabla 73*Límite líquido correspondiente a la calicata C12.*

LIMITE LIQUIDO METODO CASA GRANDE							
#MUESTRA	GOLPES	PESO RECIPIENTE (gr)	PESO HUMEDO MATERIAL+ RECIPIENTE(gr)	PESO SECO MATERIAL + RECIPIENTE(gr)	PESO HUMEDO(gr)	PESO SECO(gr)	%HUMEDAD
1	13	17,63	28,71	25,25	11,08	7,62	45,41
2	21	17,92	29,47	25,83	11,55	7,91	46,02
3	26	17,66	29,12	25,43	11,46	7,77	47,49
4	30	17,81	30,13	26,01	12,32	8,2	50,24
					Limite liquido	LL=	47,20

Fuente: Realizado por los autores.

Tabla 74*Límite plástico correspondiente a la calicata C12.*

LIMITE PLASTICO					
PESO RECIPIENTE (gr.)	PESO HUMEDO MATERIAL+ RECIPIENTE (gr.)	PESO SECO MATERIAL + RECIPIENTE(g r.)	PESO HUMEDO (gr.)	PESO SECO (gr.)	%HUMEDAD
17,58	20,14	19,67	2,56	2,09	22,49
17,89	20,34	19,91	2,45	2,02	21,29
17,81	19,88	19,53	2,07	1,72	20,35
				LP	21,37
				IP=	25,82

Fuente: Realizado por los autores.

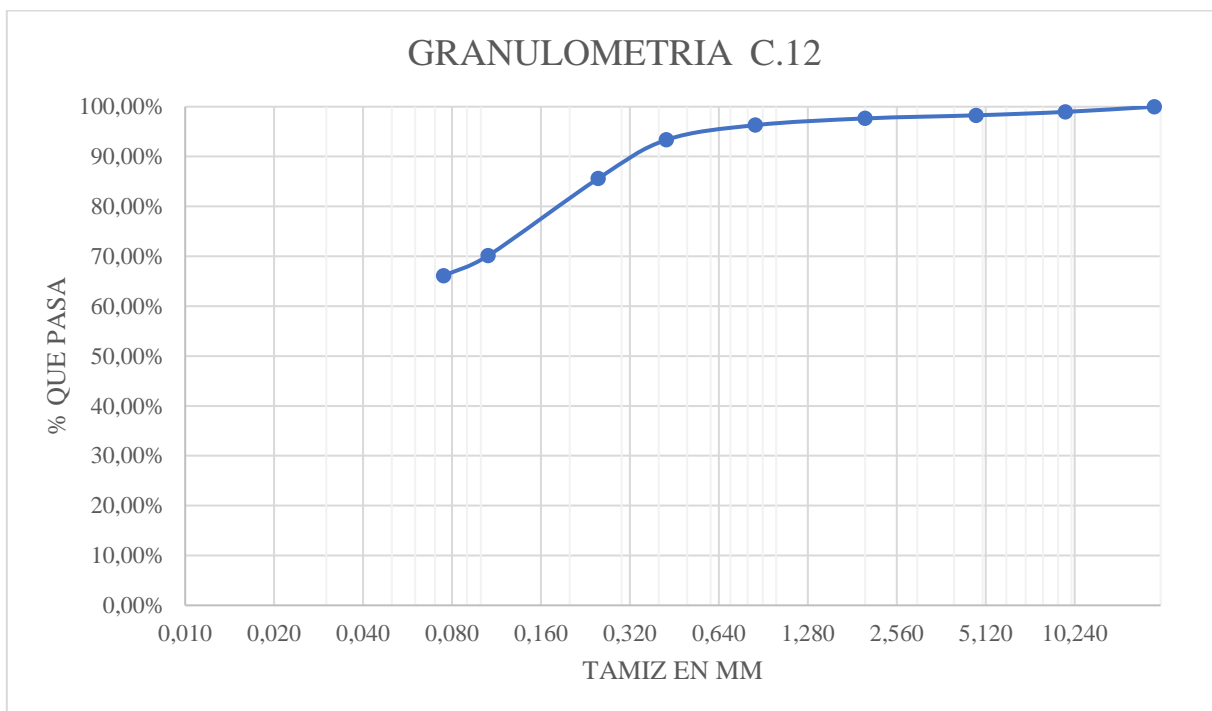
Tabla 75*Clasificación SUCS Y AASHTO correspondiente a la calicata C12.*

CLASIFICACION	
SUCS	CL (arcilla de baja plasticidad)
AASHO	A-7-6
IG (índice de grupo)	15

Fuente: Realizado por los autores.

Figura 38

Curva granulométrica correspondiente a la calicata C12.



Fuente: Realizado por los autores.

Tabla 76

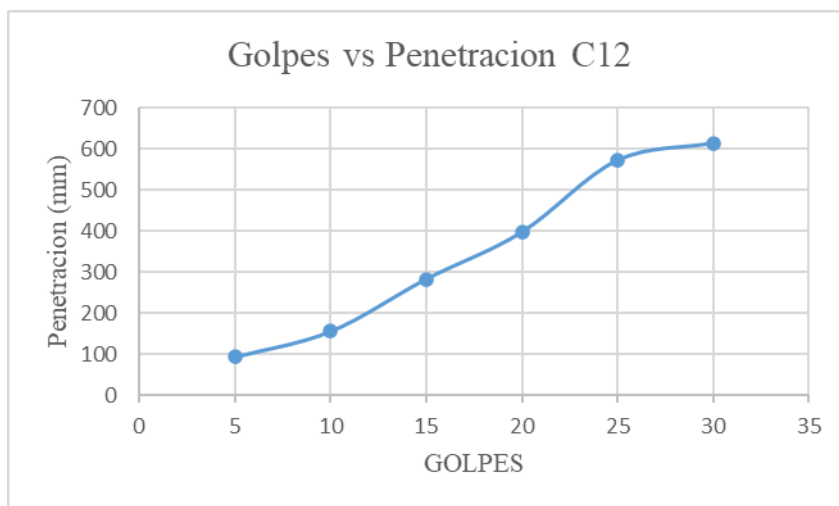
Datos DCP correspondientes a la calicata C12.

DATOS DCP CALICATA 12					
Numero de golpes	Golpes Acumulados	Penetracion Acumulada	Penetracion entre lectura	Penetracion por golpes	Indice DCP mm/golpes
5	5	94	94	18,80	18,80
5	10	156	62	12,40	15,60
5	15	283	127	25,40	18,87
5	20	397	114	22,80	19,85
5	25	571	174	34,80	22,84
5	30	613	42	8,40	20,43

Fuente: Realizado por los autores.

Figura 39

Gráfica golpes vs penetración correspondiente a la calicata C12.



Fuente: Realizado por los autores.

7.8 Datos obtenidos calicata C13

Tabla 77

Granulometría correspondiente a la calicata C13.

TAMIZ		GRANULOMETRÍA					
U.S	MM	Ws+TAMIZ.(gr.)	W TAMIZ(gr.)	P.RET. PARC.(gr.)	P.RET. ACUM.(gr.)	% RET.	% PASA
3/4"	19,050	464,9	464,9	0	0	0,00%	100,00%
3/8"	9,525	450	450	0	0	0,00%	100,00%
4	4,750	491,3	491	0,3	0,3	0,03%	99,97%
10	2,000	460	459,4	0,6	0,9	0,08%	99,92%
20	0,850	466,4	461,4	5	5,9	0,52%	99,48%
40	0,425	377,9	361	16,9	22,8	2,03%	97,97%
60	0,250	430,8	407,3	23,5	46,3	4,11%	95,89%
140	0,106	328,9	287,4	41,5	87,8	7,80%	92,20%
200	0,075	287,5	269	18,5	106,3	9,44%	90,56%
	Fondo	245,5	244	1019,4			
			Sumatoria	1125,7	gr.		

Fuente: Realizado por los autores.

Tabla 78*Límite líquido correspondiente a la calicata C13.*

LIMITE LIQUIDO METODO CASA GRANDE							
#MUESTRA	GOLPES	PESO RECIPIENTE (gr)	PESO HUMEDO MATERIAL+ RECIPIENTE(gr)	PESO SECO MATERIAL + RECIPIENTE(gr)	PESO HUMEDO(gr)	PESO SECO(gr)	%HUMEDAD
1	19	17,67	24,06	21,81	6,39	4,14	54,35
2	23	17,4	28,17	24,23	10,77	6,83	57,69
3	26	17,74	25,15	22,43	7,41	4,69	58,00
4	33	17,3	27,96	24,13	10,66	6,83	56,08
					Limite liquido	LL=	57,89

Fuente: Realizado por los autores.

Tabla 79*Límite plástico correspondiente a la calicata C13.*

LIMITE PLASTICO					
PESO RECIPIENTE (gr.)	PESO HUMEDO MATERIAL+ RECIPIENTE (gr.)	PESO SECO MATERIAL + RECIPIENTE(g r.)	PESO HUMEDO (gr.)	PESO SECO (gr.)	%HUMEDAD
17,76	19,32	18,95	1,56	1,19	31,09
17,62	18,59	18,34	0,97	0,72	34,72
17,85	20,27	19,69	2,42	1,84	31,52
				LP	32,45
				IP=	25,45

Fuente: Realizado por los autores.

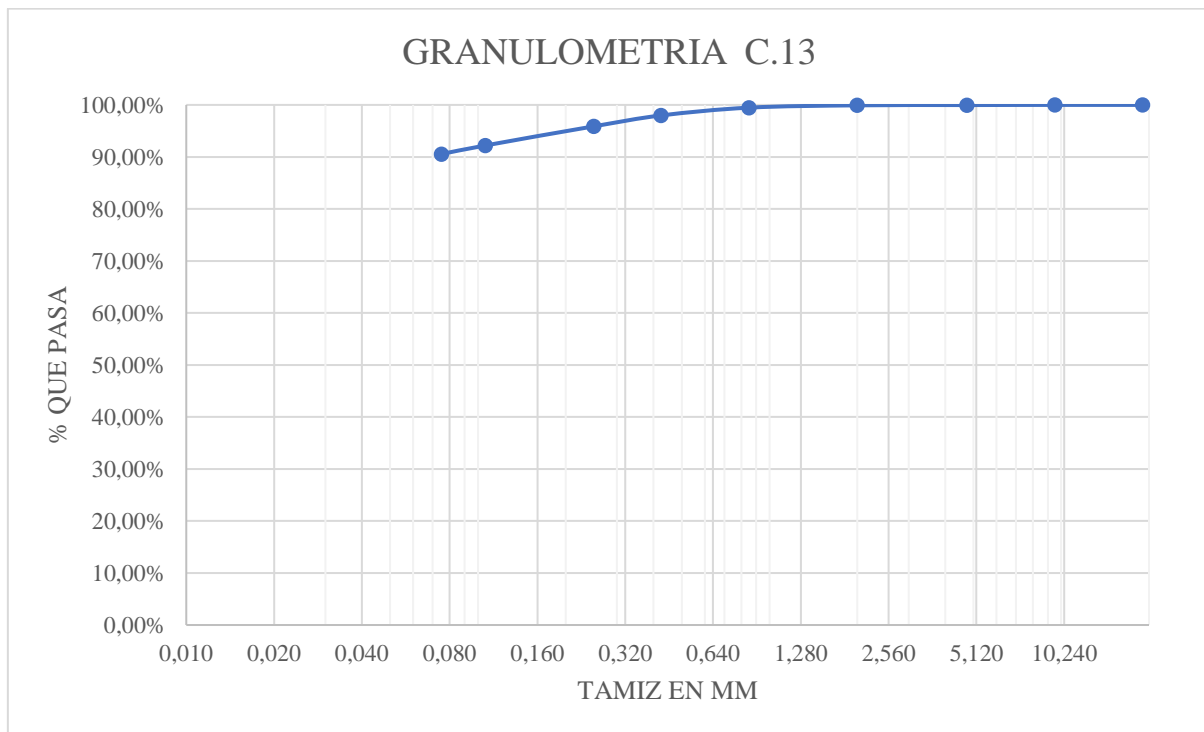
Tabla 80*Clasificación SUCS Y AASHTO correspondiente a la calicata C13.*

CLASIFICACION	
SUCS	MH
AASHTO	A-7-6
IG(indice de gr	23

Fuente: Realizado por los autores.

Figura 40

Curva granulométrica correspondiente a la calicata C13.



Fuente: Realizado por los autores.

Tabla 81

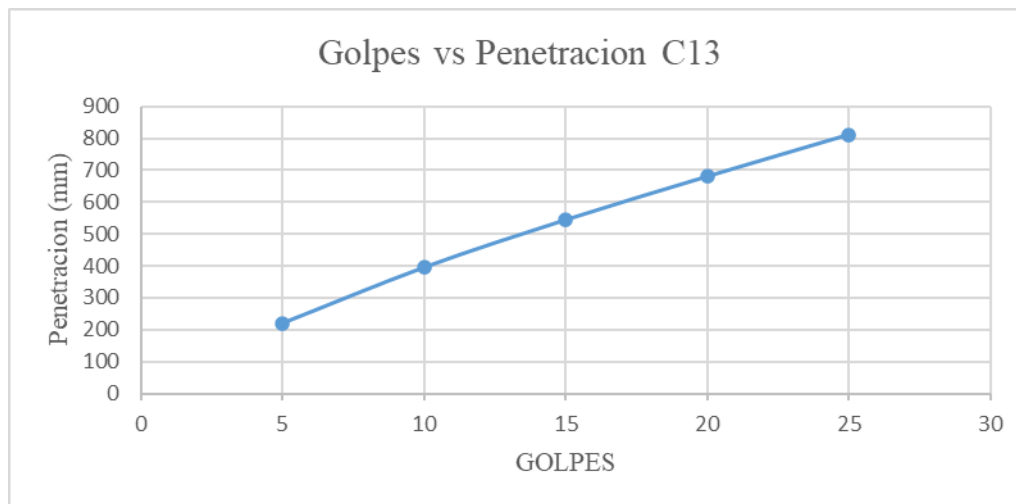
Datos DCP correspondientes a la calicata C13.

DATOS DCP CALICATA 13					
Numero de golpes	Golpes Acumulados	Penetracion Acumulada	Penetracion entre lectura	Penetracion por golpes	Indice DCP mm/golpes
5	5	220	220	44,00	44,00
5	10	395	175	35,00	39,50
5	15	544	149	29,80	36,27
5	20	680	136	27,20	34,00
5	25	811	131	26,20	32,44

Fuente: Realizado por los autores.

Figura 41

Gráfica golpes vs penetración correspondiente a la calicata C13.



Fuente: Realizado por los autores.

7.9 Datos obtenidos calicata C14

Tabla 82

Granulometría correspondiente a la calicata C14.

GRANULOMETRÍA							
TAMIZ		W _s +TAMIZ.(gr.)	W TAMIZ(gr.)	P.RET. PARC.(gr.)	P.RET. ACUM.(gr.)	% RET.	% PASA
U.S	MM						
3/4"	19,050	464,9	464,9	0	0	0,00%	100,00%
3/8"	9,525	460,1	450	10,1	10,1	1,06%	98,94%
4	4,750	515,2	491	24,2	34,3	3,59%	96,41%
10	2,000	480,9	459,4	21,5	55,8	5,84%	94,16%
20	0,850	474	461,4	12,6	68,4	7,16%	92,84%
40	0,425	367,5	361	6,5	74,9	7,84%	92,16%
60	0,250	414	407,3	6,7	81,6	8,55%	91,45%
140	0,106	349,5	287,4	62,1	143,7	15,05%	84,95%
200	0,075	355,1	269	86,1	229,8	24,07%	75,93%
	Fondo	260,1	244	725			
			Sumatoria	954,8	gr.		

Fuente: Realizado por los autores.

Tabla 83*Límite líquido correspondiente a la calicata C14.*

LIMITE LIQUIDO METODO CASA GRANDE							
#MUESTRA	GOLPES	PESO RECIPIENTE (gr)	PESO HUMEDO MATERIAL+ RECIPIENTE(gr)	PESO SECO MATERIAL + RECIPIENTE(gr)	PESO HUMEDO(gr)	PESO SECO(gr)	%HUMEDAD
1	14	17,77	29,41	25,27	11,64	7,5	55,20
2	22	17,92	28,63	24,63	10,71	6,71	59,61
3	27	17,59	28,71	24,25	11,12	6,66	66,97
4	29	17,81	29,57	24,84	11,76	7,03	67,28
					Limite liquido	LL=	64,03

Fuente: Realizado por los autores.

Tabla 84*Límite plástico correspondiente a la calicata C14.*

LIMITE PLASTICO					
PESO RECIPIENTE (gr.)	PESO HUMEDO MATERIAL+ RECIPIENTE (gr.)	PESO SECO MATERIAL + RECIPIENTE(g r.)	PESO HUMEDO (gr.)	PESO SECO (gr.)	%HUMEDAD
17,65	20,31	19,61	2,66	1,96	35,71
17,61	19,58	19,09	1,97	1,48	33,11
17,57	19,47	19,01	1,9	1,44	31,94
				LP	33,59
				IP=	30,44

Fuente: Realizado por los autores.

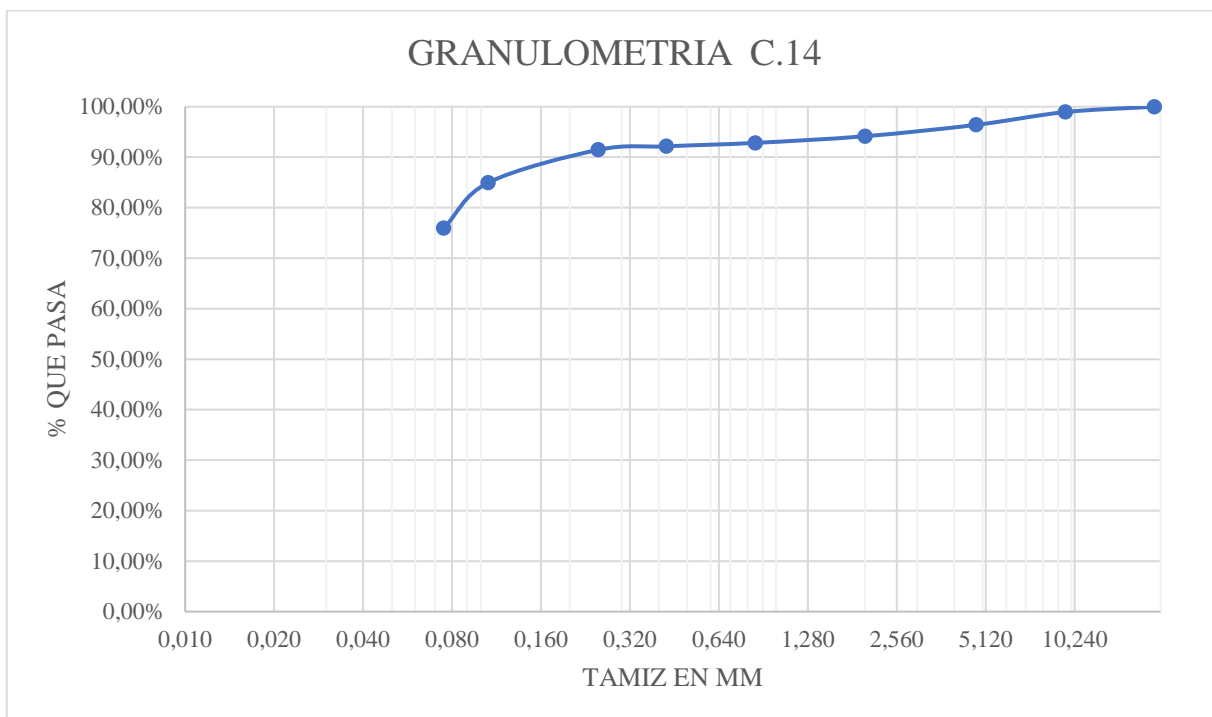
Tabla 85*Clasificación SUCS Y AASHTO correspondiente a la calicata C14.*

CLASIFICACION	
SUCS	MH
AASHTO	A-7-5
IG(indice de gr)	23

Fuente: Realizado por los autores.

Figura 42

Curva granulométrica correspondiente a la calicata C14.



Fuente: Realizado por los autores.

Tabla 86

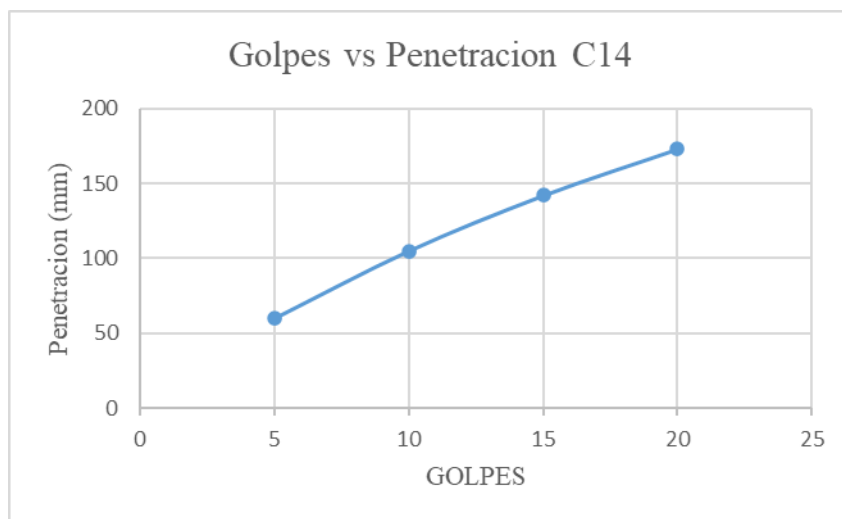
Datos DCP correspondientes a la calicata C14.

DATOS DCP CALICATA 14					
Numero de golpes	Golpes Acumulados	Penetracion Acumulada	Penetracion entre lectura	Penetracion por golpes	Indice DCP mm/golpes
5	5	60	60	12,00	12,00
5	10	105	45	9,00	10,50
5	15	142	37	7,40	9,47
5	20	173	31	6,20	8,65

Fuente: Realizado por los autores.

Figura 43

Gráfica golpes vs penetración correspondiente a la calicata C14.



Fuente: Realizado por los autores.

7.10 Datos obtenidos calicata C22

Tabla 87

Granulometría correspondiente a la calicata C22.

TAMIZ		GRANULOMETRÍA					
U.S	MM	Ws+TAMIZ.(gr.)	W TAMIZ(gr.)	P.RET. PARC.(gr.)	P.RET. ACUM.(gr.)	% RET.	% PASA
3/4"	19,05	464,9	464,9	0	0	0,00%	100,00%
3/8"	9,525	470,5	470,5	0	0	0,00%	100,00%
4	4,75	445,7	443,9	1,8	1,8	0,19%	99,81%
8	2,36	385,5	382,4	3,1	4,9	0,52%	99,48%
40	0,425	355,9	333,8	22,1	27	2,87%	97,13%
50	0,3	329,8	315,9	13,9	40,9	4,35%	95,65%
100	0,15	341,2	298,1	43,1	84	8,93%	91,07%
200	0,075	331,9	295,1	36,8	120,8	12,84%	87,16%
	Fondo	267,8	265,9	820,3			
			Sumatoria	941,1	gr.		

Fuente: Realizado por los autores.

Tabla 88*Límite líquido correspondiente a la calicata C22.*

LIMITE LIQUIDO METODO CASA GRANDE							
#MUESTRA	GOLPES	PESO RECIPIENTE (gr)	PESO HUMEDO MATERIAL+ RECIPIENTE(gr)	PESO SECO MATERIAL + RECIPIENTE(gr)	PESO HUMEDO(gr)	PESO SECO(gr)	%HUMEDAD
1	16	17,84	33,4	27,58	15,56	9,74	59,75
2	26	17,85	33,09	27,25	15,24	9,4	62,13
3	27	17,37	26,63	23,07	9,26	5,7	62,46
4	48	17,33	28,28	24,03	10,95	6,7	63,43
					Limite liquido	LL=	61,80

Fuente: Realizado por los autores.

Tabla 89*Límite plástico correspondiente a la calicata C22.*

LIMITE PLASTICO					
PESO RECIPIENTE (gr.)	PESO HUMEDO MATERIAL+ RECIPIENTE (gr.)	PESO SECO MATERIAL + RECIPIENTE(g r.)	PESO HUMEDO (gr.)	PESO SECO (gr.)	%HUMEDAD
17,65	20,39	19,64	2,74	1,99	37,69
17,15	21,64	20,37	4,49	3,22	39,44
17,27	20,78	19,81	3,51	2,54	38,19
				LP	38,44
				IP=	23,36

Fuente: Realizado por los autores.

Tabla 90

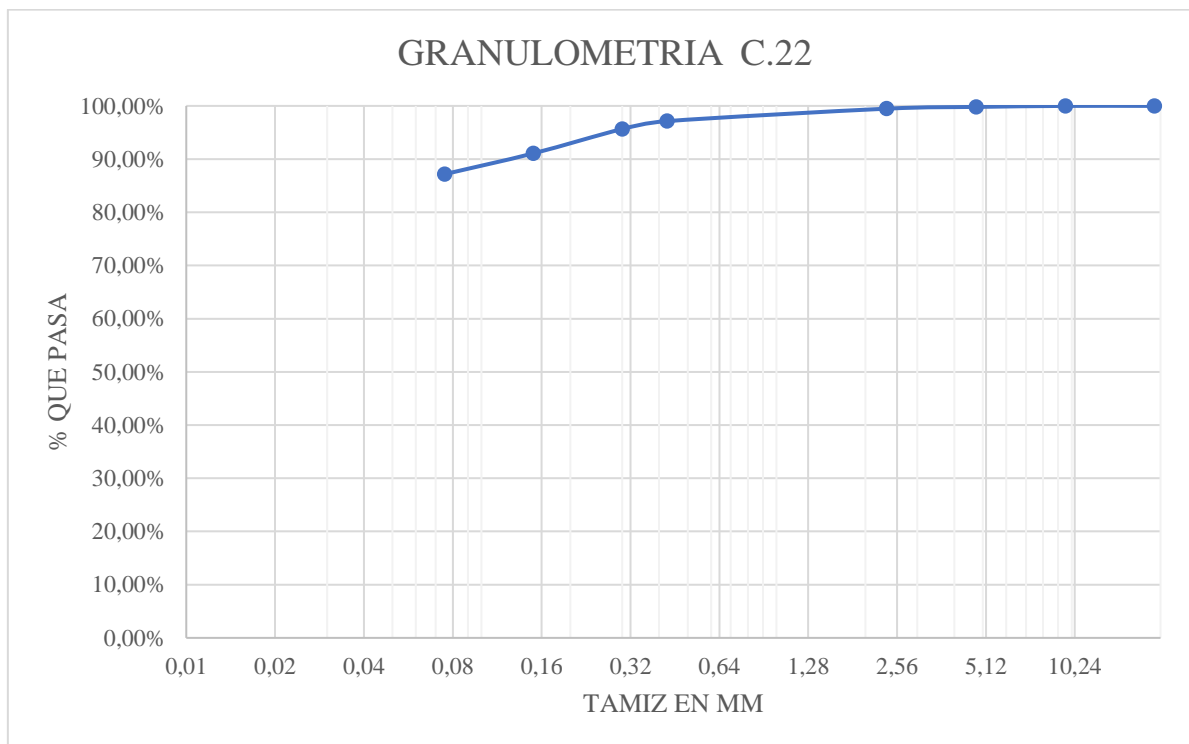
Clasificación SUCS Y AASHTO correspondiente a la calicata C22.

CLASIFICACION	
SUCS	MH
AASHTO	AASHTO: A-7-5
IG(indice de gr	29

Fuente: Realizado por los autores.

Figura 44

Curva granulométrica correspondiente a la calicata C22.



Fuente: Realizado por los autores.

Tabla 91

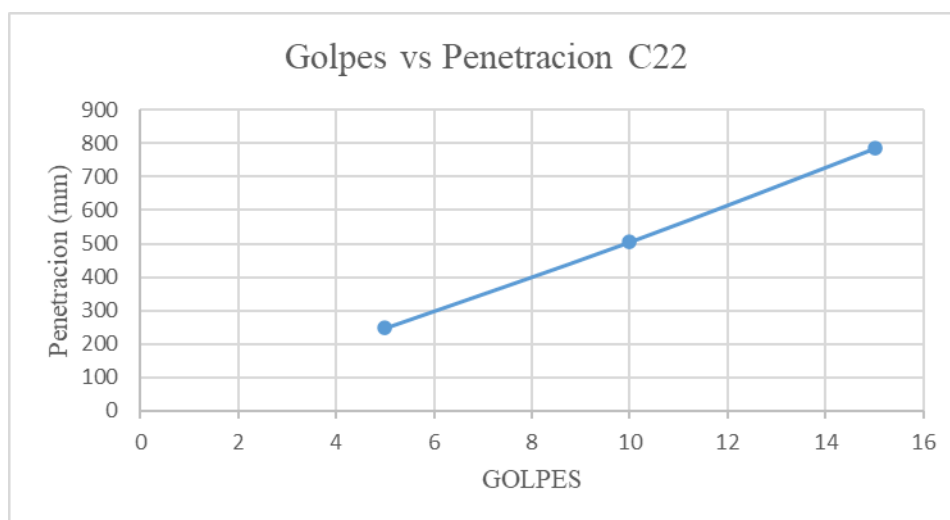
Datos DCP correspondientes a la calicata C22.

DATOS DCP CALICATA 22					
Numero de golpes	Golpes Acumulados	Penetracion Acumulada	Penetracion entre lectura	Penetracion por golpes	Indice DCP mm/golpes
5	5	247	247	49,40	49,40
5	10	505	258	51,60	50,50
5	15	785	280	56,00	52,33

Fuente: Realizado por los autores.

Figura 45

Gráfica golpes vs penetración correspondiente a la calicata C22.



Fuente: Realizado por los autores.

7.11 Registro fotográfico de excavación y ensayo DCP en campo.









7.12 Registro fotográfico de ensayos de laboratorio.











