

UCUENCA

Facultad de ingeniería

Maestría en Ingeniería en Vialidad y Transportes III Cohorte

Determinación de una Correlación entre el valor de CBR y el ensayo DCP para suelos del cantón Cuenca

Trabajo de titulación previo a la obtención del título de Magíster en Ingeniería en Vialidad y Transportes.

Autor:

Ing. Diego Fernando Ordóñez Salazar

CI: 0104429055

Correo electrónico: diego.os.vial@gmail.com

Directora:

Ing. Karla Johanna Santacruz Reyes PhD.

CI: 0301731394

Cuenca-Ecuador

27-mayo-2022

Resumen:

El CBR por sus siglas en inglés (California Bearing Ratio), es un factor importante en el diseño de pavimentos, y en la evaluación de pavimentos. Sin embargo, la ejecución del ensayo representa un alto costo y tiempo. Para la determinación del CBR in situ la normativa ASTM y otros autores han establecido correlaciones con el ensayo de campo denominado DCP por sus siglas de Dynamic Cone Penetration Test; permitiendo relacionar el CBR in situ con el valor DCP obtenido en campo. Sin embargo, al no existir una relación entre estos parámetros aplicada para la ciudad de Cuenca, e incluso para otras partes del Ecuador, se ha frenado el uso de correlaciones existentes entre los dos parámetros. Se considera importante entonces la determinación del CBR, a partir de una correlación con el ensayo DCP aplicada a suelos de la ciudad de Cuenca, y se propone establecerla mediante un análisis estadístico de regresión lineal y validarla en base a correlaciones existentes en la literatura. El presente trabajo llega a dos correlaciones, entre el DCP y el CBR in situ con un coeficiente de determinación R^2 de 0.911; y entre el DCP, la densidad seca de campo, y el CBR, obteniéndose un coeficiente de determinación R^2 ajustado de 0.930. La correlación establecida entre el CBR y DCP fue comparada con las expresiones propuestas en la literatura especializada, y se determinó que mantiene un semejante comportamiento, estableciendo que la correlación obtenida es válida, y una manera rápida y económica para obtención del parámetro CBR para distintos suelos de nuestra ciudad.

Palabras Clave: CBR. DCP. Cuenca. Correlación. Pavimentos.

Abstract:

The CBR for its acronym in English (California Bearing Ratio), is an important factor in the design of pavements, and in the evaluation of pavements. However, the execution of the test represents a high cost and time. For the determination of the CBR in situ, the ASTM standard and other authors have established correlations with the field test called DCP by its acronym for Dynamic Cone Penetration Test; allowing to relate the CBR in situ with the DCP value obtained in the field. However, since there is no relationship between these parameters applied to the city of Cuenca, and even to other parts of Ecuador, the use of existing correlations between the two parameters has been stopped. Therefore, the determination of the CBR is considered important, based on a correlation with the DCP test applied to soils in the city of Cuenca, and it is proposed to establish it through a statistical analysis of linear regression and validate it based on existing correlations in the literature. The present work gets two correlations, between the DCP and the CBR in situ with a determination coefficient R^2 of 0.911; and between the DCP, the dry field density, and the CBR, obtaining an adjusted coefficient of determination R^2 of 0.930. The correlation established between the CBR and DCP was compared with the expressions proposed in the specialized literature, and it was determined that it maintains a similar behavior, establishing that the correlation obtained is valid, and a fast and economical way to obtain the parameter CBR for different soils in our city.

Keywords: CBR. DCP. Cuenca. Correlation. Pavements.

ÍNDICE

1	INTRODUCCIÓN.....	11
1.1	ANTECEDENTES	11
1.2	OBJETIVOS DEL ESTUDIO	13
1.2.1	<i>Objetivo General.....</i>	13
1.2.2	<i>Objetivos Específicos</i>	13
2	MARCO TEÓRICO.....	15
2.1	CBR Y SUS APLICACIONES	15
2.2	DCP Y SUS APLICACIONES	16
2.3	CORRELACIONES ENTRE DCP Y CBR.....	17
2.4	ANÁLISIS ESTADÍSTICO.....	18
2.4.1	<i>Análisis de regresión</i>	18
2.4.2	<i>Pruebas de Hipótesis.....</i>	20
2.4.3	<i>Análisis de Varianza (ANOVA)</i>	20
2.4.4	<i>Distribución t Student.....</i>	21
3	MATERIALES Y MÉTODOS.....	22
3.1	EXPLORACIÓN GEOTÉCNICA.....	23
3.1.1	<i>Extracción de muestras</i>	25
3.2	ENSAYOS DE CAMPO	25
3.2.1	<i>Ensayo Cono Dinámico de Penetración</i>	25
3.2.2	<i>Ensayo de densidad de campo con densímetro nuclear</i>	28
3.3	ENSAYOS DE LABORATORIO.....	29
3.3.1	<i>Ensayo de clasificación</i>	29
3.3.2	<i>Ensayo CBR.....</i>	32
3.4	METODOLOGÍA DE ANÁLISIS DE DATOS	40
4	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	42
4.1	UBICACIÓN Y DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO	42
4.2	CARACTERÍSTICAS DE LOS SUELOS DEL ÁREA	49
4.3	RESULTADOS DE CBR	51
4.4	RESULTADOS DE DCP	56
4.5	RESULTADOS DE DENSIDAD SECA DE CAMPO	59
4.6	RELACIÓN ENTRE DCP Y PARÁMETROS OBTENIDOS	62
4.6.1	<i>Relación DCP y CBR vs parámetros de plasticidad</i>	62
4.6.2	<i>Relación DCP vs Densidad seca campo</i>	65

4.6.3	Relación DCP vs CBR.....	66
4.7	DETERMINACIÓN DE GRUPO DE VALORES CBR PARA EL ESTUDIO.....	67
4.8	DETERMINACIÓN DE CORRELACIÓN DCP VS CBR.....	68
4.9	DETERMINACIÓN DE CORRELACIÓN DCP Y DENSIDAD SECA DE CAMPO VS CBR.....	71
4.10	VALIDACIÓN DE CORRELACIÓN DCP VS CBR.....	73
5	CONCLUSIONES.....	75
6	RECOMENDACIONES.....	80
	REFERENCIAS.....	81
	ANEXOS.....	84

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 2-1	CORRELACIONES DCP-CBR DISTINTOS AUTORES.....	17
TABLA 3-1	COORDENADAS DE UBICACIÓN EXPLORACIONES GEOTÉCNICAS.....	24
TABLA 3-2	SISTEMA DE CLASIFICACIÓN SUCS.....	31
TABLA 3-3	CLASIFICACIÓN DE SUELOS MÉTODO AASHTO.....	31
TABLA 4-1	COORDENADAS DE REFERENCIA ZONA DE ESTUDIO.....	42
TABLA 4-2	CLASIFICACIÓN DE CARRETERAS EN FUNCIÓN DEL TIPO DE TRÁFICO.....	45
TABLA 4-3	LITOLOGÍA DE LAS FORMACIONES GEOLÓGICAS DEL SITIO.....	46
TABLA 4-4	RESULTADOS DE ENSAYOS DE CLASIFICACIÓN, SUELOS DE LOS PUNTOS DE ANÁLISIS.....	50
TABLA 4-5	RESULTADOS ENSAYOS CBR.....	54
TABLA 4-6	RESULTADOS DE ENSAYOS DCP.....	58
TABLA 4-7	RESULTADOS DE DENSIDAD SECA DE CAMPO.....	60
TABLA 4-8	ESTADÍSTICAS DE LA REGRESIÓN LINEAL VARIABLES LOG CBR VS LOG DCP.....	68
TABLA 4-9	ANOVA DE LA REGRESIÓN LINEAL VARIABLES LOG CBR VS LOG DCP.....	69
TABLA 4-10	ANÁLISIS T STUDENT Y COEFICIENTES DE LA REGRESIÓN LINEAL MÚLTIPLE VARIABLES LOG DCP VS LOG CBR.....	69
TABLA 4-11	REGRESIÓN LINEAL MÚLTIPLE VARIABLES LOG CBR VS LOG DCP Y LOGARITMO DE DENSIDAD SECA DE CAMPO.....	72
TABLA 4-12	RESULTADOS DEL ANÁLISIS ANOVA DE LA REGRESIÓN LINEAL MÚLTIPLE VARIABLES LOG CBR VS LOG DCP Y LOGARITMO DE DENSIDAD SECA DE CAMPO.....	72
TABLA 4-13	RESULTADOS DEL ANÁLISIS T STUDENT Y COEFICIENTES DE LA REGRESIÓN LINEAL MÚLTIPLE VARIABLES LOG CBR VS LOG DCP Y LOGARITMO DE DENSIDAD SECA DE CAMPO.....	73

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 3-1 UBICACIÓN DE EXPLORACIONES GEOTÉCNICAS.....	24
FIGURA 3-2 ETIQUETADO DE MUESTRAS EXTRAÍDAS EN LA EXPLORACIÓN.....	25
FIGURA 3-3 EQUIPO CONO DINÁMICO DE PENETRACIÓN DCP 8 KG.....	27
FIGURA 3-4 CARTA DE PLASTICIDAD A EMPLEAR EN EL SUCS.....	30
FIGURA 3-5 MOLDE PARA ENSAYO CBR.....	33
FIGURA 3-6 MARTILLOS DE COMPACTACIÓN PROCTOR ESTÁNDAR Y PROCTOR MODIFICADO.....	33
FIGURA 3-7 VARIACIÓN DE LA CURVA DE DENSIDAD CON EL NÚMERO DE GOLPES, PROCTOR ESTÁNDAR Y PROCTOR MODIFICADO.....	36
FIGURA 3-8 CORRECCIÓN DE CURVA ESFUERZO-PENETRACIÓN.....	39
FIGURA 3-9 CURVA CBR VS DENSIDAD SECA.....	39
FIGURA 4-1 MAPA DE GEOLOGÍA DEL CANTÓN CUENCA. FUENTE: (BASABE & CSS, 1998).....	43
FIGURA 4-2 UBICACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO. FUENTE: (ESRI ET AL., 2021).....	43
FIGURA 4-3 UBICACIÓN DE CALLES DENTRO DEL ÁREA DE ESTUDIO. FUENTE: (ESRI ET AL., 2021).....	44
FIGURA 4-4 GEOLOGÍA DE CHALLUABAMBA.....	45
FIGURA 4-5 DISTRIBUCIÓN PORCENTUAL DE LA GEOLOGÍA SEGÚN SU SUPERFICIE.....	47
FIGURA 4-6 UBICACIÓN DE LAS FORMACIONES DOMINANTES DEL MAPA GEOLÓGICO DE CHALLUABAMBA.....	48
FIGURA 4-7 MAPA DE PENDIENTES DE CHALLUABAMBA.....	48
FIGURA 4-8 RESULTADOS DE LOS SUELOS ESTUDIADOS EN LA CARTA DE PLASTICIDAD. NOTA: SUB: SUBRASANTE; CR: CAPA DE RODADURA.....	50
FIGURA 4-9 DIAGRAMA DE CAJAS Y BIGOTES VALORES DE CBR, GRUPOS CBR MENOR Y CBR MAYOR.....	53
FIGURA 4-10 DIAGRAMA DE CAJAS Y BIGOTES, GRUPOS CBR MENOR Y CBR MAYOR, Y CLASIFICACIÓN ALTA PLASTICIDAD Y BAJA PLASTICIDAD.....	53
FIGURA 4-11 UBICACIÓN DE LOS VALORES DEL GRUPO CBR MENOR OBTENIDOS DENTRO DEL ÁREA ANALIZADA.....	55
FIGURA 4-12 UBICACIÓN DE LOS VALORES DEL GRUPO CBR MAYOR OBTENIDOS DENTRO DEL ÁREA ANALIZADA.....	55
FIGURA 4-13 DIAGRAMA DE CAJAS Y BIGOTES VALORES DE DCP.....	57
FIGURA 4-14 DIAGRAMA DE CAJAS Y BIGOTES, VALORES DE DCP CLASIFICADOS POR ALTA PLASTICIDAD Y BAJA PLASTICIDAD.....	57
FIGURA 4-15 UBICACIÓN DE LOS VALORES DCP OBTENIDOS DENTRO DEL ÁREA ANALIZADA.....	58
FIGURA 4-16 DIAGRAMA DE CAJAS Y BIGOTES, VALORES DE DENSIDAD SECA.....	60
FIGURA 4-17 DIAGRAMA DE CAJAS Y BIGOTES, VALORES DE DENSIDAD SECA CLASIFICADOS POR ALTA PLASTICIDAD Y BAJA PLASTICIDAD.....	61
FIGURA 4-18 UBICACIÓN DE LOS VALORES DE DENSIDAD SECA OBTENIDOS DENTRO DEL ÁREA ANALIZADA.....	61

INDICE DE GRÁFICAS

GRÁFICA 4-1 RELACIÓN DCP vs LÍMITE LÍQUIDO	63
GRÁFICA 4-2 RELACIÓN LÍMITE LÍQUIDO vs CBR	63
GRÁFICA 4-3 RELACIÓN DCP vs ÍNDICE DE PLASTICIDAD	64
GRÁFICA 4-4 RELACIÓN ÍNDICE DE PLASTICIDAD vs CBR	64
GRÁFICA 4-5 RELACIÓN DCP vs DENSIDAD SECA CAMPO	65
GRÁFICA 4-6 RELACIÓN DENSIDAD SECA CAMPO vs CBR	66
GRÁFICA 4-7 VARIACIÓN CBR vs DCP	67
GRÁFICA 4-8 ECUACIÓN DE CORRELACIÓN DCP vs CBR	70
GRÁFICA 4-9 ECUACIÓN DE CORRELACIÓN DCP vs CBR, ALTA PLASTICIDAD Y BAJA PLASTICIDAD	71
GRÁFICA 4-10 VALIDACIÓN DE CORRELACIÓN DCP vs CBR	74

ÍNDICE DE FOTOGRAFÍAS

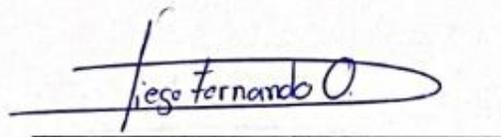
FOTOGRAFÍA 3-1 EQUIPO DCP UTILIZADO EN EL ESTUDIO.	28
FOTOGRAFÍA 3-2 DENSÍMETRO NUCLEAR UTILIZADO EN EL ESTUDIO	29
FOTOGRAFÍA 3-3 PRESA CON PISTÓN DE PENETRACIÓN PARA ENSAYO CBR.....	34

Cláusula de Propiedad Intelectual

Diego Fernando Ordóñez Salazar, en calidad de autor y titular de los derechos morales y patrimoniales del trabajo de titulación "Determinación de una Correlación entre el valor de CBR y el ensayo DCP para suelos del cantón Cuenca", certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autor.

Autorizo a la Universidad de Cuenca para que realice la publicación de esta Tesis de Titulación en el repositorio institucional, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 148 de la Ley de Cuenca, 27 de mayo de 2022

Cuenca, 27 de mayo de 2022



Diego Fernando Ordóñez Salazar

Ci: 0104429055

Cláusula de licencia y autorización para publicación en el repositorio institucional

Diego Fernando Ordóñez Salazar, en calidad de autor y titular de los derechos morales y patrimoniales del trabajo de titulación **“Determinación de una Correlación entre el valor de CBR y el ensayo DCP para suelos del cantón Cuenca”**, de conformidad con el Art. 114 del CÓDIGO ORGÁNICO DE LA ECONOMÍA SOCIAL DE LOS CONOCIMIENTOS, CREATIVIDAD E INNOVACIÓN reconozco a favor de la Universidad de Cuenca una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva para el uso no comercial de la obra, con fines estrictamente académicos.

Asimismo, autorizo a la Universidad de Cuenca para que realice la publicación de este trabajo de titulación en el repositorio institucional, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Cuenca, 27 de mayo de 2022



Diego Fernando Ordóñez Salazar

CI: 0104429055

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer en primer lugar a Dios, por brindarme salud, vida, y por abrir las puertas a oportunidades como la maestría.

Quiero expresar un sincero agradecimiento, a las personas que me ayudaron en el proceso de elaboración de mi trabajo de titulación y desarrollo de la maestría. A la directora, la Doctora Karla Santacruz, por su guía, apoyo, y por compartir sus valiosos conocimientos. Al Doctor Jaime Bojorque, por su asesoramiento, compartir sus conocimientos, y sugerencias en el trabajo de titulación. Al director de la Maestría en Vialidad y Transporte III Cohorte, el Doctor Daniel Mogrovejo, por ayudarnos con su asesoría estudiantil, sus conocimientos, y por guiarnos durante toda la maestría. A todos los profesores que impartieron los distintos módulos y que supieron compartir sus conocimientos y experiencias profesionales. Finalmente, a todos mis compañeros de la maestría que supieron brindar su compañerismo y amistad durante estos años.

DEDICATORIA

Dedico esta tesis a mi amada esposa y mejor amiga Katty, que ha sabido apoyarme, comprenderme, que ha estado a mi lado durante estos años de estudio, y que con su cariño y comprensión me ayudo a superar este reto importante en mi vida. A mi familia en general, que desde siempre han estado pendiente de mí, y que siempre serán mi refugio y mi paz.

1 INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes

Las vías de comunicación en toda ciudad son importantes, dado que, tienen relación con la movilidad y el desarrollo de las actividades cotidianas. Una adecuada calidad de las vías proporcionará confort, seguridad y la reducción de los tiempos de viaje. La calidad de las vías depende de manera directa del estado del pavimento durante su vida útil. Para mantener un buen estado del pavimento, es necesaria una adecuada construcción y un correcto diseño de la estructura que implica, un adecuado establecimiento de los parámetros de diseño como son, el tráfico, la resistencia de la subrasante y las propiedades de las capas que lo componen.

Un parámetro indispensable en el diseño y evaluación de un pavimento es la resistencia de la subrasante y la resistencia de las capas de material granular que lo conforman. Esta resistencia, está representada por el módulo resiliente del material para ciertas condiciones de humedad y densidad, y puede ser determinado a través de ensayos de campo y laboratorio, entre los más conocidos: ensayo de placa de carga, triaxial dinámico, ensayo de relación de soporte de california CBR, California Bearing Ratio (Yoder, 1975).

En Ecuador, de acuerdo con las especificaciones técnicas vigentes para carreteras, propuestas por el Ministerio de Transporte y Obras Públicas en el año 2002, Ministerio de Obras Públicas MOP en aquel entonces, se caracteriza la resistencia de los materiales del pavimento y la subrasante en función del valor de soporte CBR (MOP, 2002). Siendo este valor el que rige actualmente para el diseño, e implementado por la mayoría de instituciones administrativas en el Ecuador.

De acuerdo con las recomendaciones de varias normas de Latinoamérica, se deberá evaluar la resistencia de la subrasante, en función de un CBR realizado cada 250 m (Montejo Fonseca, 2002). Sin embargo, para vías con volúmenes de tráfico entre bajo y medio, característicos de calles secundarias, locales, incluso privadas, en ocasiones no se dispone de un presupuesto para planificación, y ejecución de varios ensayos de CBR, cuyo costo unitario en el mercado de Cuenca estaría entre 150\$ y 200\$, lo cual,

resultaría costoso, o fuera del presupuesto.

De igual forma, dentro de la ejecución de un proyecto vial, un cambio inesperado de material, es solventado con la colocación de material importado, sin que exista un sustento técnico; debido a que, obtener un valor de CBR para evaluar el material de subrasante, es un proceso que puede llegar a tardar hasta tres semanas, y un CBR de campo resultaría costoso por la operatividad que conlleva (Yoder, 1975).

En los dos casos mencionados, se podría utilizar como alternativa obtener el CBR por medio de una correlación, específicamente con el ensayo DCP por sus siglas en ingles de Cono Dinámico de Penetración. Dado que, el DCP se caracteriza como un ensayo rápido, portable, económico, y con una repetibilidad considerable, comparado con el CBR de campo o laboratorio (Al-Refeai & Al-Suhaibani, 1997).

Adicional a los temas económicos mencionados existen dos condicionantes importantes en el ensayo del CBR, que la saturación a la cual se le somete a la muestra sumergiéndola durante cuatro días en laboratorio, no representa las condiciones de saturación que podría experimentar los materiales en el campo, y que los suelos de tipo fino son susceptibles a esta saturación, debilitándose por el proceso de saturación e hinchamiento, mucho más que los suelos granulares (Yoder, 1975). Por lo tanto, para suelos finos, los resultados obtenidos podrían resultar erróneos o no representativos de las características de soporte del material en el sitio.

Con las condicionantes mencionadas, tanto económicas como técnicas, se resalta la importancia de correlacionar el ensayo DCP con el valor de CBR. En Ecuador y en específico en la ciudad de Cuenca, no se ha determinado una relación entre estos parámetros que represente el comportamiento del suelo en el sitio, que permita reducir el margen de incertidumbre en la determinación del CBR para el diseño y las características de la subrasante. Dado que, la mayoría de correlaciones propuestas se realizan con el CBR obtenido en laboratorio, el cual, de acuerdo a lo mencionado en párrafos anteriores, presenta resultados erróneos para suelos de tipo fino o de plasticidad considerable. Además, las correlaciones han sido obtenidas con datos de suelos localizados en un proyecto en específico, reduciendo así su extensión de estudio.

De la publicación de M. A. Gabr, Kelly Hopkins, Jeffery Coonse, y Tom Hearn, se ha podido constatar la existencia de correlaciones entre el DCP y CBR de sitio, para distintos tipos de materiales, sin embargo, en la misma publicación se menciona la necesidad de validar las correlaciones existentes u obtener una correlación para las características de los suelos de cada localidad. Es así, que se ha visto la necesidad de obtener una correlación entre el valor de CBR de sitio y DCP, establecida estadísticamente y validada para suelos de Cuenca. La correlación será obtenida para suelos localizados en una de las zonas de expansión urbanística en Cuenca, en calles donde la capa de rodadura se encuentra a nivel de lastre, y donde GAD municipal de Cuenca planifica la ejecución de proyectos viales; y podrá ser aplicada para el diseño de pavimentos en calles con volúmenes de tráfico bajo y medio, y para suelos de tipo cohesivo.

1.2 Objetivos del Estudio

1.2.1 Objetivo General

Determinar una correlación entre el valor DCP (Dynamic Cone Penetration) y el valor CBR de sitio, de acuerdo a la condiciones mecánicas y físicas que presentan los suelos de la ciudad de Cuenca, basada en ensayos de laboratorio y campo y regida por un análisis estadístico y de validación de datos.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Determinar áreas de análisis dentro de la ciudad de Cuenca en función de información cartográfica, geológica, y de ensayos de laboratorio.
- Plantear y realizar las exploraciones geotécnicas con la finalidad de extraer muestras para ensayos de laboratorio, y ejecutar los ensayos de campo.
- Realizar la caracterización de los materiales obtenidos.
- Analizar estadísticamente y validar los datos obtenidos en campo y laboratorio.
- Establecer una correlación entre el valor DCP y el CBR de campo.
- Validación de la correlación DCP vs CBR, a través de un análisis estadístico

de los resultados obtenidos y a través de comparación con las correlaciones propuesta en la literatura especializada en el tema.

2 MARCO TEÓRICO

2.1 CBR y sus aplicaciones

El valor de CBR es un indicador de la capacidad o resistencia de soporte de subrasantes, subbases y bases, dado que, tiene relación con su módulo resiliente. Fue introducido por el Departamento de Transporte de California, California Department of Transportation (CALTRANS) entre el año de 1928 y 1929, alrededor de la segunda guerra mundial. Llegando a ser popular en varias partes del mundo, e incorporándose como un método estándar en normas internacionales como la ASTM, American Society for Testing and Materials.

El CBR consiste en una prueba de penetración, en donde un pistón estandarizado de tres pulgadas cuadradas de área, penetra una muestra o suelo "in situ", a una velocidad estándar de 0.05 pulgadas por minuto, hasta generar una penetración total de 0.5 pulgadas. El CBR reportado es la razón entre las cargas que generan penetraciones de 0.1 y 0.2 pulgadas, y las cargas estándar evaluadas en una roca triturada donde igualmente se generaron penetraciones de 0.1 y 0.2 pulgadas. Las dos cargas estándar son de 1000 psi y 1500 psi (Yoder, 1975).

El ensayo para la determinación del CBR puede ser realizado tanto en laboratorio como en campo. El CBR de laboratorio, se realiza con muestras extraídas de una exploración geotécnica, que son remoldeadas y sometidas a condiciones de saturación por cuatro días, para luego ser penetradas con la ayuda de un vástago normado y una prensa ASTM D1883 (2021). Mientras que, el CBR de campo, se realiza "in situ", sobre la subrasante o sobre una determinada capa granular del pavimento, con el uso de una gata hidráulica que se apoya verticalmente en un camión o volqueta llena de material, se ejerce una penetración hacia el suelo del sitio, que es medida por un dial ASTM D4429 (2018).

En ambos casos la determinación del parámetro, representa complejidad y altos costos. En el caso de laboratorio, por el tiempo de ejecución del ensayo, al menos 8 días; y en el caso de campo, por la logística y costo de tener un camión o volqueta cargada durante el desarrollo del ensayo, aproximadamente 350\$. A pesar de las complicaciones,

es necesario ejecutar el ensayo para un proyecto de diseño de estructura de pavimento; sin embargo, en el caso de una vía o calle que en toda su vida útil recibirá un tráfico de bajo a medio de hasta 500,000 ESAL's, (Equivalent Single Axle Load), y donde las condiciones de drenaje una vez terminada la vía sean buenas, se podría utilizar métodos alternativos para la determinación del CBR. Uno de esos métodos podría ser las correlaciones establecidas entre el CBR y el ensayo DCP.

2.2 DCP y sus aplicaciones

El cono dinámico de penetración DCP por sus siglas en inglés, es un sondeo de investigación continua y simple del suelo, que consiste en introducir repetidamente una varilla con punta metálica reforzada, mediante la caída y golpe de una masa.

Scala en 1956 desarrolló el DCP en Australia, como una herramienta o método simple, para evaluar pavimentos flexibles. Sin embargo, el método en lo posterior ha sido estudiado y probado por distintos autores en varias partes del mundo, llegando incluso a tener distintos tipos de DCP, que se clasifican de acuerdo con su masa, en ligero, mediano, pesado, y superpesado (Lutenegger, 2021).

De los equipos DCP existentes, el que mayor apogeo y desarrollo ha tenido en el medio, es el DCP ligero, dado su fácil operación, portabilidad, rapidez de ensayo, y fácil repetitividad de la prueba. (Al-Refeai & Al-Suhaibani, 1997)

Kleyn en 1982 desarrollo el DCP ligero para investigar subrasantes en Sudáfrica, que consiste en un martillo deslizante con una masa de 8 kg con una altura de caída de 575 mm. El cono tiene un diámetro de 20 mm y ángulo de apertura de 60°. Este equipo, luego sería usado por el Cuerpo de Ingenieros del Ejército en EEUU, y fue ganando gran popularidad para el diseño de pavimentos, hasta llegar a ser normado por la ASTM 2000, específicamente la norma ASTM D 6951.

El ensayo mide la razón de penetración de cono dinámico de penetración DCP al dejar caer la masa o martillo de 8 kg a través del suelo no alterado y materiales ligeramente compactados. Se puede evaluar las propiedades de un determinado material o suelo hasta una profundidad de 1000 mm (39 pulgadas) por debajo de la superficie del

ensayo. Los resultados del DCP, cuando se grafican, describen el número de golpes en función de la profundidad alcanzada; esto ofrece una ilustración visual instantánea de la resistencia y rigidez del material in situ (Gabr et al., 2000). Cuanto más bajo es el DCP, más rígido es el material, y viceversa.

El DCP puede utilizarse para estimar las características de resistencia de los suelos finos- y de grano grueso, materiales de construcción y materiales granulares estabilizadas o modificados débiles, y puede ser correlacionado con varios parámetros, dentro de estos el CBR.

2.3 Correlaciones entre DCP y CBR

Desde la aparición del DCP ligero en 1982, se han desarrollado varias correlaciones del valor DCP con distintos parámetros como el CBR, el módulo resiliente, la compresión simple no confinada, y el grado de saturación. Sin embargo, la relación con el valor de CBR ha tenido una gran relevancia, debido a su simplicidad y la capacidad de proporcionar resultados rápidos, comparado con el CBR de campo y laboratorio (Chukka & Chakravarthi, 2012).

En las últimas décadas se han desarrollado diferentes investigaciones para correlacionar el valor DCP con el valor de CBR para materiales particulares. En la Tabla 2-1, se presentan las correlaciones más utilizadas entre el CBR y DCP, basadas en distintos procedimientos de laboratorio y campo, aplicadas a diferentes tipos de materiales.

Tabla 2-1 Correlaciones DCP-CBR distintos autores

Autor	Ecuación de correlación	Estudio basado en campo o en laboratorio	Material ensayado	Año del trabajo
(Kleynt et al., 1975)	$\log(\text{CBR}) = 2.62 - 1.27 \log(\text{DCP})$	Laboratorio	No definido	1975
(Smith & Pratt, 1983)	$\log(\text{CBR}) = 2.56 - 1.16 \log(\text{DCP})$	Campo	No definido	1983
(TRRL, 1986)	$\log(\text{CBR}) = 2.317 - 0.858 \log(\text{DCP})$	Campo y Laboratorio	Granular y cohesivo	1986
(Harison, 1987)	$\log(\text{CBR}) = 2.55 - 1.14 \log(\text{DCP})$	Laboratorio	Granular y cohesivo	1987
(Moshe Livneh, 1989)	$\log(\text{CBR}) = 2.56 - 1.16 \log(\text{DCP})$	Laboratorio	Granular y cohesivo	1991
(Webster, 1994)	$\text{CBR} = 1 / (0.00287 \text{ DCP})$	Campo y Laboratorio	Suelos CH	1994
(Moshe Livneh et al., 1995)	$\log(\text{CBR}) = 2.46 - 1.12 \log(\text{DCP})$	Campo y Laboratorio	Granular y cohesivo	1993
(North Carolina Department of Transportation, 1998)	$\log(\text{CBR}) = 2.60 - 1.07 \log(\text{DCP})$	Adaptación del campo, y laboratorio	Cohesivo y suelo estabilizado	1998
(Coonse, 1999)	$\log(\text{CBR}) = 2.53 - 1.14 \log(\text{DCP})$	Laboratorio	Suelo residual	1999

Fuente: Modificada de la publicación de (Gabr et al., 2000)

Como se observa en la Tabla 2-1, existen distintas correlaciones entre el valor DCP y el CBR. Sin embargo, cada autor ha enfatizado la importancia de la variación de los resultados en función de las características que presentan los suelos en cada lugar de estudio, que conlleva a una cierta desconfianza en la aplicabilidad de las correlaciones, y la necesidad de establecer una correlación o validar las correlación para cada sitio de estudio (M. Livneh, 2000).

2.4 Análisis estadístico

Para el análisis de los resultados y establecer la correlación entre el parámetro CBR y DCP, se requerirá de un análisis estadístico, que incluye el análisis de regresión para establecer la correlación entre las variables estudiadas, un análisis de varianza o ANOVA para validar la correlación, y un análisis t Student para determinar la representatividad de las variables de la correlación. Los elementos que intervienen en el análisis estadístico se describen en la presente sección.

2.4.1 Análisis de regresión

A continuación, se detallan los elementos que comprenden el análisis de regresión (Triola, 2018).

Correlación (R): es la relación entre dos variables, y existe cuando los valores de una determinada variable están asociados de cierta manera con los valores de la otra variable. Esta relación es lineal, cuando la gráfica de los valores cuantitativos pareados de las dos variables, mantiene un patrón o tendencia de tipo lineal. La fuerza de la correlación lineal entre las dos variables es medida por el coeficiente de correlación lineal R.

Regresó lineal: corresponde a la línea que mejor ajuste presenta en el diagrama de dispersión de datos. El diagrama de dispersión es el resultado del gráfico de los valores cuantitativos pareados de las dos variables, dependiente e independiente. La Ecuación 2-1, es la ecuación algebraica general de la línea de regresión, donde “x” corresponde a la variable independiente y “y” a la variable dependiente.

$$y = b_0 + b_1x + e \quad \text{Ecuación 2-1}$$

Donde:

y: variable dependiente

x: variable independiente

b₀: intercepción

b₁: parámetro 1

e: error

Variable dependiente (x): es aquella que, dentro de un modelo estadístico, es explicada por otras variables, denominamos independientes.

Variable independiente (y): es aquella que, dentro de un modelo estadístico, determina el valor de la variable dependiente o la explica.

Coefficiente de determinación (R²): conocido como la bondad de ajuste, y es la proporción de la variable dependiente que es explicada por la curva o línea de regresión. Presenta valores entre 0 y 1, y mientras más cercano el valor sea a 1, la variable dependiente será mejor explicada por la curva o línea de regresión. En la ecuación 2-2 se presenta la expresión general para su determinación.

$$R^2 = \frac{SCE}{SCT} = \frac{\sum_1^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2}{\sum_1^n (Y_i - \bar{Y})^2} \quad \text{Ecuación 2-2}$$

Donde:

SCE: Suma de cuadrados explicados (variación explicable)

SCT: Suma de cuadrados totales (variación total)

Y: Variable dependiente observada

\hat{Y} : Variable dependiente predicha

\bar{Y} : media de las variables dependientes observadas

Regresión múltiple: es una ecuación que expresa una relación lineal entre una variable dependiente y dos o más variables independientes.

Coefficiente de determinación ajustado (R² ajustado): es el coeficiente de

determinación R^2 , en el cual, se considera el número de variables y el tamaño de la muestra.

$$R^2 = 1 - \frac{(n-1)}{[n-(k+1)]} (1 - R^2) \quad \text{Ecuación 2-3}$$

Donde:

n: número de muestras

k: número de variables independientes

Como complemento del análisis de regresión y para establecer la validez del modelo de regresión se realiza el análisis de varianza o conocido como ANOVA; y para evaluar la significancia de la variable independiente con respecto a la dependiente se realiza un análisis t Student. En ambos casos, se realizan los análisis bajo pruebas de hipótesis.

2.4.2 Pruebas de Hipótesis

Una prueba de hipótesis es una regla que determina si se puede aceptar o rechazar una afirmación acerca de una población, dependiendo de la información que proporcione una muestra de datos. Además, examina dos hipótesis opuestas entre sí: la hipótesis nula y la hipótesis alternativa. La hipótesis nula es la que se probará, y la hipótesis alternativa es el enunciado que se desea poder concluir que es verdadero en función de la información proporcionada por los datos de la muestra (Triola, 2018).

El dato de la muestra que determina si se puede rechazar la hipótesis nula, es la probabilidad o el valor p para tomar esa decisión. Si el valor p es menor que el nivel de significancia (denotado como α o alfa), entonces puede rechazar la hipótesis nula. En otras palabras, el nivel de significancia, es la probabilidad de rechazar la hipótesis nula cuando es verdadera. Por lo general se asume un nivel de significancia de 0.05, y significa que existe un riesgo del 5% en la toma de decisiones.

2.4.3 Análisis de Varianza (ANOVA)

Este análisis es un método estadístico para analizar las diferencias o probar la igualdad de tres o más medias poblacionales mediante el análisis de varianzas muestrales. El ANOVA puede ser de una factor y dos factores. Se utiliza el ANOVA de

un factor cuando el objetivo es investigar si las variaciones de una variable independiente tienen un efecto medible sobre una variable dependiente. Y se utiliza el ANOVA de varios factores para el caso de dos o más variable independientes. En el caso del análisis de regresión se evalúa la validez del modelo comparando la variación explicable con la variación residual. La variable explicable está definida por la variable dependiente observada y la variable predicha, mientras que, la variable residual está definida por la variable observada y la media de las variables observadas. El análisis proporciona el estadístico F, que es igual a la relación entre la varianza explicable y la varianza residual. Al valor del estadístico F está asociado el p-valor o conocido también como F crítico, que debe ser próximo a cero, o al menos menor al nivel de significación de 0.05, con lo cual, se contrasta la hipótesis nula de que el valor poblacional de R (correlación) es cero, y permite determinar que si existe relación lineal significativa entre la variable dependiente y la variable independiente o un conjunto de variables independientes. El p-valor es la probabilidad resultante de una distribución F, de ahí el nombre de estadístico F. En la ecuación 2.4 se presenta la expresión algebraica para el cálculo del estadístico F.

$$F = \frac{SCE/k}{SCR/(n-k-1)} \quad \text{Ecuación 2.4}$$

2.4.4 Distribución t Student

La distribución t Student es una distribución de probabilidad que tiene como finalidad estimar la media de una población que mantenga comportamiento o distribución normal, con un tamaño de muestra pequeño. En el análisis de regresión sirve para analizar la significación de la o las variables que intervienen en la expresión de correlación. Si la probabilidad obtenida de la distribución T, es menor al nivel de significancia de 0.05 se rechaza la hipótesis nula de que un coeficiente de regresión (b_0 y b_1) vale cero en la población. Un coeficiente de cero en la población representaría la no existencia de una relación lineal, mientras que, los coeficientes distintos de cero indican que la variable correspondiente a ese coeficiente es relevante en la ecuación de correlación y ayuda a explicarla.

3 MATERIALES Y MÉTODOS

La determinación de una ecuación que relacione el ensayo de cono dinámico DCP con el valor de CBR, requiere de un análisis de las características físicas y mecánicas de los materiales a estudiarse. Específicamente una conjugación entre las pruebas que se realicen en campo y los ensayos de laboratorio. Cuyos resultados deberán ser evaluados y relacionados por medio de criterios estadísticos. Para el presente estudio se consideró, trabajos de campo en cada punto de análisis, y trabajo de laboratorio de las muestras extraídas en campo.

El trabajo de campo incluyó la exploración geotécnica del terreno por medio de calicatas, la extracción de muestras alteradas, la ejecución de ensayos de cono dinámico de penetración para obtener el valor DCP, y ensayos de densímetro nuclear para establecer la densidad que presenta el material in situ.

En laboratorio se ejecutaron ensayos de clasificación de los suelos, para la determinar el tipo de material, y ensayos de CBR que se correlacionaron con los valores DCP obtenidos en campo. En el ensayo de CBR, para elaborar los especímenes de prueba, se utilizó la humedad natural del suelo obtenida en laboratorio, y se determinó el valor del CBR con la densidad obtenida con el densímetro nuclear.

Los parámetros CBR y DCP se obtuvieron para suelos de subrasante y para materiales de la capa de rodadura de lastre, con la finalidad de cubrir materiales con distinta dureza, desde subrasantes caracterizadas como arcillas suaves, hasta capas de rodadura de compacidad dura.

En cuanto al área de estudio correspondió a una de las zonas de expansión urbanística y de mayor proceso de consolidación de la ciudad de Cuenca-Ecuador, que cuenta con el mayor porcentaje de vías sin pavimentar, y que enmarca las principales litologías presentes la ciudad, localizada al noroeste de la ciudad.

3.1 Exploración Geotécnica

La exploración geotécnica se realizó mediante la excavación de calicatas a cielo abierto de al menos 0.50 m de profundidad, ejecutadas a mano o máquina, según la normativa ASTM D 42. La finalidad de la exploración fue la descripción del perfil estratigráfico de los suelos y materiales, la conformación de una plataforma para la ejecución de ensayos DCP y densímetro nuclear, y la extracción de muestras para ensayos en laboratorio. Se ejecutaron un total de 18 calicatas distribuidas equitativamente en el área de estudio, ejecutadas en calles secundarias, y con superficie de rodadura de lastre, por su facilidad en la excavación y porque generar un menor daño a las infraestructuras. En la Tabla 3-1, se presenta las coordenadas de ubicación de las calicatas en sistema UTM, datum WGS84, meridiano 17S; y en la Figura 3-1 se presenta la ubicación de las mismas.

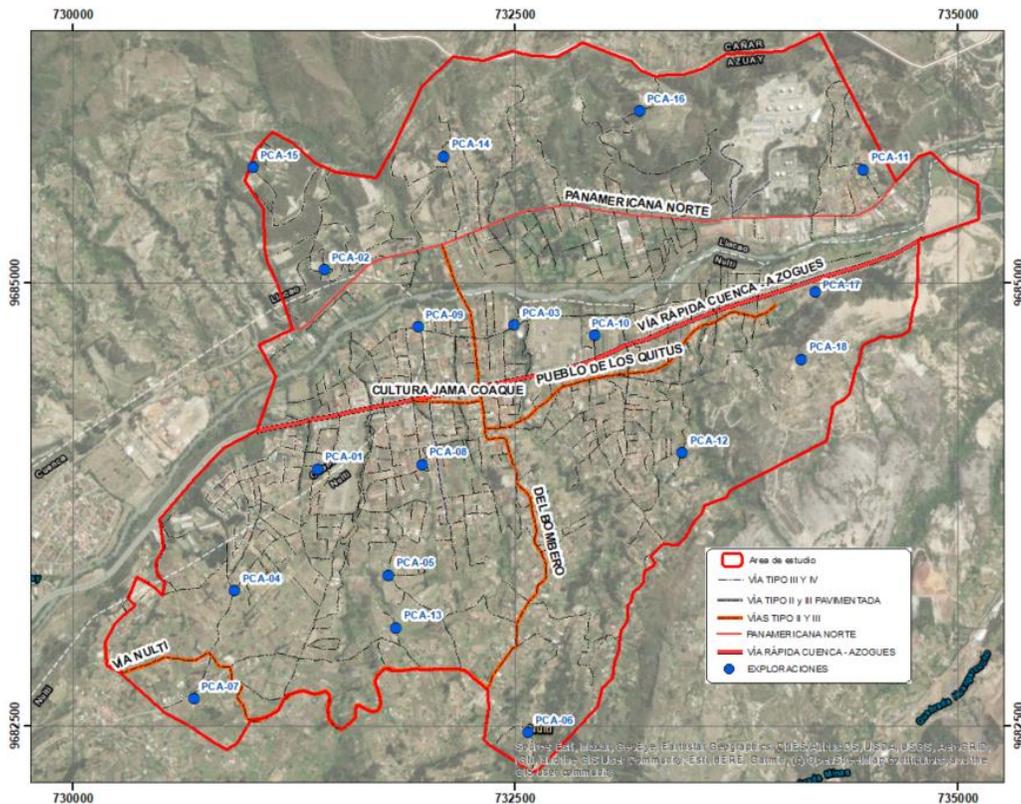
Las excavaciones se realizaron con una profundidad de al menos un metro, considerando que, se realizaron ensayos DCP con una longitud de análisis de un metro, consiguiendo así una profundidad de análisis de hasta dos metros en el peor de los casos, cubriendo así la profundidad recomendada de análisis para pavimentos de 1.50 m (Montejo Fonseca, 2002). Además, en el presente estudio se evaluaron los suelos de subrasante y materiales de capa de rodadura, y dado que, la capa de rodadura de lastre tiene un espesor variable de hasta 0.25 m, con la profundidad de exploración de al menos 1 m, en todos los casos se consiguió el análisis de los materiales. En cualquier circunstancia, para cada material o suelo analizado se realizó el ensayo DCP, se tomó la densidad de campo, y se extrajo muestras para ensayos a la misma profundidad analizada, con lo cual la profundidad representaría una variable constante en el análisis.

La descripción del perfil estratigráfico de los suelos se realizó según la normativa ASTM D 2487, y tuvo como finalidad el reporte de las características de los suelos y materiales desde la superficie de la vía hasta el fondo de la calicata, describiendo de manera cualitativa propiedades físicas, como el color, la consistencia de los suelos en su estado natural, la forma de las partículas, tamaño máximo de bloques, y espesores de los estratos. En el anexo 1 de monografía de calicatas se presenta la descripción de cada exploración.

Tabla 3-1 Coordenadas de ubicación exploraciones geotécnicas.

Exploración	Coordenada E (m)	Coordenada N (m)
PCA-01	731382.79	9683944.03
PCA-02	731418.64	9685071.85
PCA-03	732492.44	9684757.38
PCA-04	730914.20	9683257.08
PCA-05	731783.70	9683346.09
PCA-06	732569.20	9682456.74
PCA-07	730683.09	9682648.61
PCA-08	731970.20	9683972.44
PCA-09	731949.77	9684747.69
PCA-10	732947.78	9684699.81
PCA-11	734463.07	9685635.20
PCA-12	733440.27	9684036.23
PCA-13	731826.09	9683049.34
PCA-14	732095.88	9685708.99
PCA-15	731015.99	9685648.75
PCA-16	733199.42	9685967.51
PCA-17	734192.35	9684945.97
PCA-18	734114.09	9684563.45

Figura 3-1 Ubicación de exploraciones geotécnicas.



3.1.1 Extracción de muestras

El muestreo de los suelos y materiales de las calicatas se realizó a la misma profundidad de ejecución de los ensayos DCP y densímetro nuclear, y en todos los casos se tomaron muestras alteradas. Las muestras para los ensayos de humedad natural y los necesarios para la clasificación de suelos, fueron obtenidas mediante el raspado o extracción de material de la plataforma de ensayos de campo, y luego colocadas en una funda plástica para conservar constante su humedad. Las muestras para el ensayo de CBR fueron obtenidas de la excavación de los 30 cm previos a alcanzar la cota final de la plataforma de ensayos, y fue tomada y transportada al laboratorio mediante sacos, dado que, en este caso el cambio de humedad no es relevante. Todas las muestras tomadas, contaban con un etiquetado, que incluía la nomenclatura de la exploración, el número de muestra, profundidad, descripción general de la muestra, y ensayo a ejecutar en laboratorio, tal como se muestra en la Figura 3-2.

Figura 3-2 Etiquetado de muestras extraídas en la exploración

EXTRACCIÓN DE MUESTRAS DE SUELO	
PROYECTO:	
EXPLORACIÓN:	<input type="text"/>
MUESTRA NRO:	<input type="text"/>
DESCRIPCIÓN:	_____ PROF. m
ENSAYOS:	CLASIFICACIÓN: <input type="checkbox"/>
	CBR: <input type="checkbox"/>
	OTRO: _____

3.2 Ensayos de Campo

3.2.1 Ensayo Cono Dinámico de Penetración

Se ejecutaron ensayos de cono dinámico de penetración para obtener el valor DCP (mm/golpes) siguiendo la normativa ASTM D 6951, en cada sitio de exploración y sobre plataformas localizadas a profundidades variables en cada exploración.

Se ejecutó un total de 22 ensayos distribuidos en todas las exploraciones realizadas. Adicional, en las exploraciones PCA-01, PCA-14, PCA-16, y PCA-18, se evaluarán dos tipos de suelos en cada una, dado que, el suelo presentaba distinto nivel

de compactación, y en otros casos se evaluó tanto el material de la capa de rodadura, como el suelo cimentación.

El equipo DCP utilizado de 8 kg constaba de los siguientes componentes: una varilla de accionamiento de acero de 15,8 mm (5/8 pulgadas) de diámetro con una punta del cono reemplazable, un martillo (17,6 lb) de 8 kg que se deja caer de una altura fija de 575 mm (22.6 pulgadas), un conjunto de acoplador y un mango. La punta tiene un ángulo interno de 60 grados y un diámetro en la base de 20 mm (0,79 pulgadas). En la Figura 3-3 se presenta un esquema del equipo DCP y en la fotografía 3-1 se presenta el equipo DCP utilizado en el estudio.

El procedimiento general del ensayo DCP consistió en medir la penetración de la punta del equipo en el suelo, generada por la caída del martillo deslizante de 8 kg desde el mango superior. Se mantuvo el dispositivo por el mango superior en una posición vertical o a plomo. Se levantó el martillo hasta que se genere un ligero contacto con el mango superior, pero sin golpearlo. Entonces se permitió la caída libre del martillo y se dejó que impacte sobre el acople del yunque. El número de golpes y penetraciones correspondientes se registran. La penetración total de un determinado número de golpes se expresa en mm/golpe.

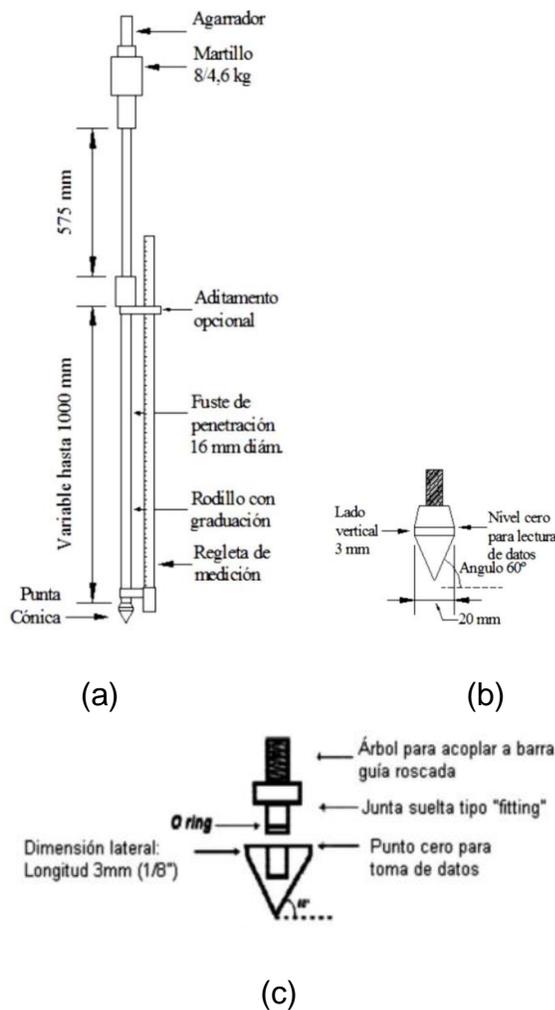
Dentro de la ejecución del ensayo el DCP fue sostenido verticalmente y la punta es asentada de tal forma que el borde superior de la parte más ancha de la punta quede al ras con la superficie del material a ser ensayado, se enceró en todos los casos en 100 mm, y a continuación se tomaron lecturas con una precisión de 1 mm y en tramos referenciales de 100 mm \pm 5 mm.

En casos como la capa de rodadura analizada, la presencia de agregados de gran tamaño puede detener la penetración o desviar la varilla de accionamiento, lo cual puede considerarse como rechazo y se finalizó el ensayo. El rechazo se consideró si después de 5 golpes, el dispositivo no ha avanzado más de 2 mm (0,08 pulgadas) o el mango se ha desviado más de 75 mm (3 pulgadas) de la posición vertical. En caso de rechazo se detuvo la prueba, y se trasladó el dispositivo a otro lugar para la prueba.

Se realizó un ensayo por cada exploración, dado que, la literatura específica en el

tema, detalla la baja variabilidad de los valores DCP cuando se ensaya sobre un mismo tipo de suelo, en una misma profundidad y para condiciones de densidad semejantes (Lutenegger, 2021). Además, la norma detalla que la nueva ubicación de un ensayo DCP debe ser de un mínimo de 300 mm (12 pulgadas) de la ubicación anterior del ensayo con el fin de minimizar el error causado por la alteración del material, y dado el reducido espacio de la calicata, los resultados de un segundo ensayo, se verían afectados por el primer ensayo.

Figura 3-3 Equipo Cono Dinámico de Penetración DCP 8 kg



Fuente: ASTM D6951-03b (2003)

otografía 3-1 Equipo DCP utilizado en el estudio.



El registro de los datos se planificó en intervalos de referencia de 100 mm, con la finalidad de registrar cambios de estratos de material. Se realizaron ensayos de hasta 800 mm, y el valor DCP se obtiene del promedio de los valores registrados, sin embargo, en el caso de cambio de estrato o variaciones significativas en los valores DCP obtenidos, se utilizó el promedio de los primeros 200 mm que corresponde a la profundidad de medida del densímetro nuclear. Con esto se evitó que se comparen dos materiales de distintas características. La variación en las características del material o de estrato se determina a partir de graficar la variación del valor DCP con respecto a la profundidad.

3.2.2 Ensayo de densidad de campo con densímetro nuclear

Se ejecutó un total de 22 ensayos distribuidos en cada sitio de exploración y sobre plataformas localizadas a profundidades variables en cada exploración. En las exploraciones PCA-01, PCA-14, PCA-16, y PCA-18, se evaluarán dos tipos de suelos en cada una, dado que, el suelo presentaba distinto nivel de compactación, y en otros casos se evaluó tanto el material de la capa de rodadura, como el suelo cimentación. En cada plataforma se ejecutó un ensayo, debido al reducido espacio de la calicata y las complicaciones que se presentan al ejecutada el ensayo a la profundidad de un metro.

Este ensayo es regido por la normativa ASTM D 6938 (2017b) y cubre la determinación de la densidad total o húmeda del suelo y mezclas de suelo-roca por la atenuación de radiación gama donde la fuente y el detector permanecen en la superficie (Método de Retrodispersión) o la fuente o el detector está colocado a una profundidad conocida hasta 300 mm (11.81 pulgadas) mientras que el detector o fuente permanece en la superficie (método de transmisión directa). La densidad en masa por unidad de volumen del material sometido a prueba se determina comparando la velocidad detectada de la radiación gamma con datos de la calibración previamente realizada.

Para el presente estudio, se utilizó la metodología de trasmisión directa con la profundidad de la varilla de 200 mm. Se ejecutó un ensayo en cada punto de análisis junto al sitio de ensayo DCP. Es importante en este tipo de ensayo, la uniformidad de la superficie sobre la cual se va a realizar la medida, que el equipo cuente con la calibración necesaria, y que la humedad reporta cierta distorsión con respecto a la obtenida en laboratorio. El densímetro nuclear utilizado es modelo TROXLER 3430, el cual se presenta en la Fotografía 3-2.

Fotografía 3-2 Densímetro nuclear utilizado en el estudio



3.3 Ensayos de laboratorio

3.3.1 Ensayo de clasificación

Se ejecutó un total de 22 ensayos, caracterizando suelos de subrasante y capas de rodadura. Los ensayos de clasificación comprendieron, el ensayo de granulometría de los materiales, regido por la normativa ASTM D422 (2017); y el ensayo de límites de Atterberg, donde se determinó límite líquido, límite plástico, e índice de plasticidad, y es

regido por la normativa ASTM D4318 (2005).

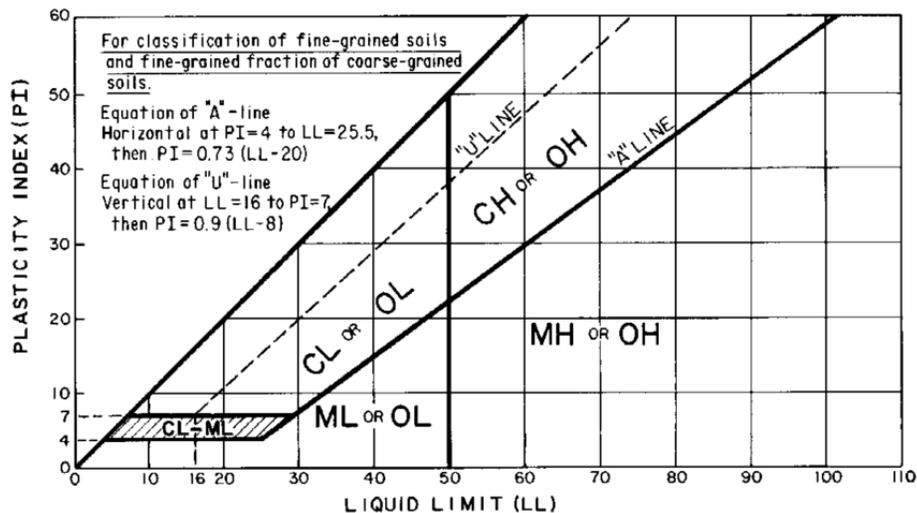
Se realizó la clasificación de suelos por dos metodologías, Sistema Unificado de Clasificación del Suelos SUCS por sus siglas en inglés, regido por la normativa ASTM D2487 (2017) y cuya clasificación general se muestra en la Tabla 3-2. Y el sistema AASHTO, regido por la normativa AASHTO M 145 (1991).

En la clasificación SUCS, con los resultados de límite líquido e índice de plasticidad, se realizó la clasificación del material en arcilla o limo, de alta o baja compresibilidad, por medio de la carta de plasticidad presentada en la Figura 3-4. Y con los resultados del ensayo granulométrico, se obtuvo la gradación y uniformidad de las partículas, y se clasifican los materiales en gravas, arenas, y finos con la ayuda de la Tabla 3-2.

En la clasificación AASHTO, se utilizaron los resultados de límite líquido, índice de plasticidad, y la gradación de las partículas, para clasificar los materiales en granulares y finos, en grupos que varían desde el A-1 hasta el A-7-6, tal como se puede observar en la Tabla 3-3.

Adicional dentro del ensayo de clasificación se obtuvo la humedad natural del sitio, mediante la metodología ASTM D2216 (2010).

Figura 3-4 Carta de plasticidad a emplear en el SUCS



Fuente:(ASTM, 2017a)

Tabla 3-2 Sistema de Clasificación SUCS

Criterio para la asignación de símbolos de grupo				Símbolos de grupo
Suelos de grano grueso Más de 50% retenido en el tamiz núm. 200	Gravas Más de 50% de fracción gruesa retenida en el tamiz núm. 4	Gravas limpias	$C_u \geq 4$ y $1 \leq C_c \leq 3^c$	GW
		Menos de 5% finos ^d	$C_u < 4$ y/o $1 > C_c > 3^c$	GP
	Arenas 50% o más de la fracción gruesa pasa tamiz núm. 4	Gravas con finos	$PI < 4$ o gráficos por debajo de línea "A" (figura 4.2)	GM
		Más de 12% finos ^d	$PI > 7$ y gráficos en o por encima de línea "A" (figura 4.2)	GC
	Limos y arcillas Límite líquido menor que 50	Arenas limpias	$C_u \geq 6$ y $1 \leq C_c \leq 3^c$	SW
		Menos de 5% finos ^b	$C_u < 6$ y/o $1 > C_c > 3^c$	SP
Suelos de grano fino 50% o más pasa a través del tamiz núm. 200	Arenas con finos	$PI < 4$ o gráficos por debajo de línea "A" (figura 4.2)	SM	
	Más de 12% finos ^d	$PI > 7$ y gráficos en o por encima de línea "A" (figura 4.2)	SC	
Suelos altamente orgánicos	Limos y arcillas Límite líquido menor que 50	Inorgánico	$PI > 7$ y gráficos en o por encima de línea "A" (figura 4.2) ^f	CL
		Orgánico	$PI < 4$ o gráficos por debajo de línea "A" (figura 4.2) ^f	ML
	Limos y arcillas Límite líquido 50 o más	Inorgánico	Límite líquido: secado < 0.75 ; vea la figura 4.2; zona OL	OL
		Orgánico	Límite líquido: no secado < 0.75 ; vea la figura 4.2; zona OH	OH
			Gráficos PI en o por encima de línea "A" (figura 4.2)	CH
			Gráficos PI por debajo de "A" línea (figura 4.2)	MH
Materia orgánica principalmente, color oscuro y orgánico				Pt

Fuente:(ASTM, 2017a)

Tabla 3-3 Clasificación de suelos método AASHTO

Clasificación	Materiales granulares (35% o menos pasa por el tamiz N° 200)							Materiales limoso arcilloso (más del 35% pasa el tamiz N° 200)			
Grupo:	A-1		A-3	A-2-4				A-4	A-5	A-6	A-7 A-7-5 A-7-6
	A-1-a	A-1-b		A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7				
Porcentaje que pasa:	Características de la fracción que pasa por el tamiz N° 40										
N° 10 (2mm)	50 máx	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
N° 40 (0,425mm)	30 máx	50 máx	51 mín	-	-	-	-	-	-	-	-
N° 200 (0,075mm)	15 máx	25 máx	10 máx	35 máx			36 mín				
Límite líquido	-		-	40 máx	41 mín	40 máx	41 mín	40 máx	41 mín	40 máx	41 mín
Índice de plasticidad	6 máx		NP	10 máx	10 máx	11 mín	11 mín	10 máx	10 máx	11 mín	11 mín
Constituyentes principales	Fragmentos de roca, grava y arena		Arena fina	Grava y arena arcillosa o limosa				Suelos limosos		Suelos arcillosos	
Características como subrasante	Excelente a bueno							Pobre a malo			

Fuente:(AASHTO, 1991)

3.3.2 Ensayo CBR

Se ejecuto un total de 22 ensayos, determinando las características de resistencia de suelos de subrasante y capas de rodadura.

Para la ejecución del ensayo CBR se tomó en cuenta los lineamientos de la norma ASTM D1883 (2021), con algunas variaciones, como utilizar para la elaboración de las probetas la humedad natural y no la óptima, y que no se someterán las probetas al proceso de saturación de cuatro días. A continuación, se detalla el mecanismo utilizado:

Equipo

- Prensa para penetración, con acople para pistón;
- Deformímetro para poder regular una velocidad uniforme de 1.27 mm/min;
- Moldes de metal, cilíndricos, de 152.4 mm de diámetro interior y de 177.8 mm de altura, previsto con un collar suplementario de 50.8 mm de altura y una placa de base perforada de 9.53 mm de espesor (Figura 3-5);
- Disco espaciador, de metal, de forma circular, de 150.8 mm de diámetro exterior y de $61,37 \pm 0,127$ mm de espesor para insertarlo como falso fondo en el molde cilíndrico durante la compactación;
- Martillos de compactación como los descritos en el modo operativo de los ensayos Proctor Estándar y Proctor Modificado (Figura 3-6);
- Pesas. Una o dos pesas anulares de metal que tengan una masa total de $4,54 \pm 0,02$ kg y pesas ranuradas de metal cada una con masas de $2,27 \pm 0,02$ kg. Las pesas tienen 150,81 mm de diámetro, y la pesa anular un agujero central de 53,98 mm aproximado de diámetro;

Pistón de penetración, metálico de sección transversal circular, de $49.63 \pm 0,13$ mm de diámetro, área de 19.35 cm^2 y con longitud necesaria para realizar el ensayo de penetración (

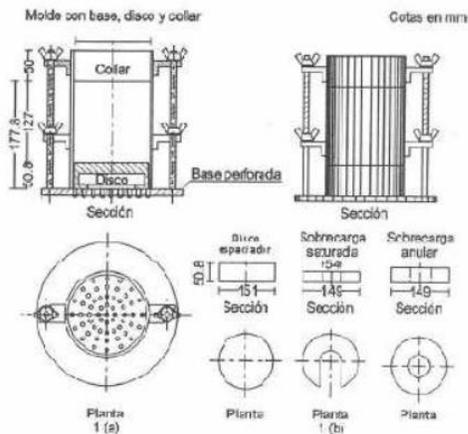
- Fotografía 3-3);

Dial con recorrido mínimo de 25 mm (1") y divisiones para lecturas en 0.025 mm (0.001"), provisto de una pieza que permita su acoplamiento en la prensa para medir la penetración del pistón en la muestra (

- Fotografía 3-3);
- Horno, termostáticamente controlado, capaz de mantener una temperatura de 110

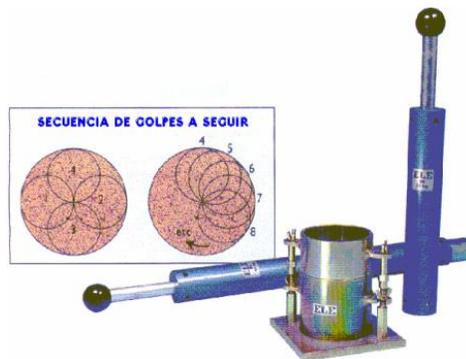
- ± 5°C (230 ± 9 °F);
- Balanzas, una de 20 kg de capacidad y otra de 1000 g con sensibilidades de 1g y 0.1g, respectivamente;
- Tamices, de 4.76 mm (No. 4), 19.05 mm (3/4") y 50,80 mm (2").

Figura 3-5 Molde para ensayo CBR



Fuente: (ASTM, 2021)

Figura 3-6 Martillos de compactación Proctor Estándar y Proctor Modificado



Fuente: (ELE International, 2021)

Fotografía 3-3 Presa con pistón de penetración para ensayo CBR



Preparación de la muestra

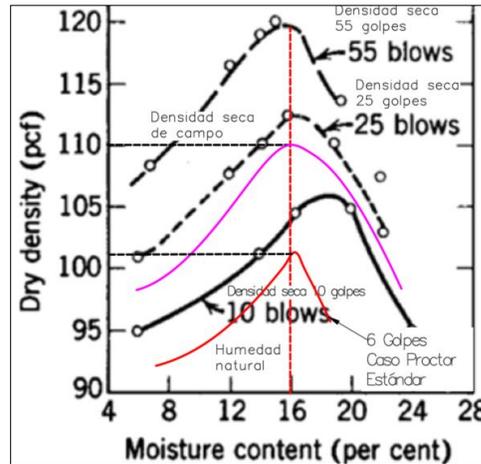
La selección del material se realizó en función de la granulometría obtenida en el ensayo de clasificación. Cuando más del 75 % en peso de la muestra pasó por el tamiz de 19.1 mm (3/4"), se utilizó para el ensayo el material que pasó por dicho tamiz. Cuando la fracción de la muestra retenida en el tamiz de 19.1 mm (3/4") sea superior a un 25% en peso, se separó el material retenido en dicho tamiz y se sustituye por una proporción igual de material comprendido entre los tamices de 19.1 mm (3/4") y de 4.75 mm (No. 4), obtenida tamizando otra porción de la muestra. Del material seleccionado se toma 5000 g. En función de la humedad natural del material estudiado, se elaboraron los especímenes para esta condición. Se determinó la humedad del material en laboratorio. Con la humedad natural del material y la humedad del laboratorio, se le añadió la cantidad de agua que faltante para alcanzar la humedad fijada para el ensayo (humedad de campo), y se mezcla con la muestra. Se pesa el molde con su base, se coloca el collar y el disco espaciador.

Una vez preparado el molde, se compactó el espécimen en su interior, aplicando un sistema dinámico de compactación, Proctor Modificado o Proctor Estándar. Se prepararon tres moldes con 55, 25, y 10 golpes por cada muestra. En cada molde se mantuvo la humedad de campo con una diferencia normada de $\pm 0.5\%$, y la energía de compactación aplicada, fue la necesaria para generar un rango de densidades secas que enmarquen a la densidad seca obtenida a partir de la densidad húmeda del densímetro nuclear y la humedad natural del material.

La norma ASTM D1883 (2021) del CBR establece que se puede variar la energía de compactación y número de golpes, de acuerdo a la densidad seca que se requiera alcanzar. Entonces se ensayó con dos energías y metodologías de compactación, Proctor modificado con un martillo de 4.53 kg de masa, una energía de compactación de 2700 kN-m/m³, y cinco capas de compactación según la norma ASTM D1557 (2007); y Proctor Estándar con un martillo de 2.49 kg de masa, una energía de compactación de 600 kN-m/m³, y tres capas de compactación según la norma ASTM D698 (2012). De manera general para el presente estudio, para materiales que presentan una importante compactación como son la capa de rodadura o suelos de subrasante rígidos, se utilizó la metodología Proctor Modificado, mientras que para suelos blandos de subrasante se utilizó la metodología Proctor Estándar.

Cuando la densidad seca de campo es baja (<1200 kg/m³), generalmente se presentó menor al rango de densidades obtenidas con la energía del ensayo Proctor Estándar que es la menor, se utilizó un número menor de golpes, hasta 6 golpes, para establecer el rango de densidad que sea comparable con la densidad seca de campo. La Figura 3-7 muestra la gráfica de la variación de la densidad con respecto al número de golpes para una determinada humedad, y dentro de esta gráfica se ha trazado dos curvas adicionales que esquematizan en el caso de la línea purpura superior la densidad seca de campo que cae dentro del rango del Proctor Estándar, y la línea roja inferior la densidad de campo que está por debajo de la densidad mínima del Proctor Estándar. Como se puede observar al disminuir el número de golpes, se disminuye la densidad seca por debajo de la mínima del Proctor Estándar, y se puede obtener un rango inferior, que será comparable con la densidad seca de campo.

Figura 3-7 Variación de la curva de densidad con el número de golpes, Proctor Estándar y Proctor Modificado



Fuente: Gráfica modificada de (Yoder, 1975)

Terminada la compactación, se quitó el collar y se enrasó el espécimen por medio de un enrasador. Cualquier depresión producida al eliminar partículas gruesas durante el enrase, se rellenó con material sobrante sin gruesos, comprimiéndolo con una espátula.

Se desmontó el molde y se volvió a montar invertido, sin disco espaciador, y se registró el peso. El número mínimo de golpes que se pudo aplicar en el ensayo es de 6 golpes, para evitar que al invertir se desparrame el material del molde.

Penetración

Se aplicó una sobrecarga para producir una intensidad de carga igual al peso del pavimento (con ± 2.27 kg de aproximación) pero no menor de 4.54 kg (10 lb). Las sobrecargas cuentan con un orificio en el cual se acopló el pistón de penetración. Se montó el dial medidor de manera que se pueda medir la penetración del pistón. Seguidamente se enceró el dispositivo para medir la carga, y el dispositivo de control de la penetración.

Se aplicó la carga de penetración con una prensa manual con control de presiones digital, con una velocidad de penetración uniforme de 1.27 mm (0.05") por minuto. La velocidad de penetración se controló mediante el deformímetro de penetración y un

cronómetro. Se anotaron las lecturas de la carga para las siguientes penetraciones: 0.025, 0.050, 0.075, 0.100, 0.125, 0.150, 0.200, 0.300, 0.400, 0.500 pulgadas.

Finalmente, se desmontó el molde y se tomó de su parte superior, en la zona próxima a donde se hizo la penetración, una muestra para determinar su humedad.

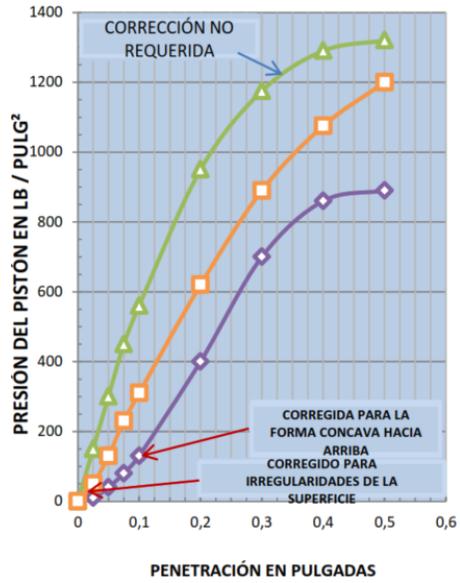
Cálculos

Los cálculos necesarios como parte del presente ensayo, se realizaron en función de todos los lineamientos, formulación y recomendaciones encontrados en la norma ASTM D1883 (2021).

- **Cálculo de humedad de compactación:** representa la cantidad de agua que se necesita agregar a la muestra del suelo, para poder llevarla a la humedad de campo.
- **Densidad o peso unitario:** la densidad se calculó a partir del peso del suelo y de su humedad.
- **Presión de penetración:** Se calculó la presión aplicada por el penetrómetro con la fuerza de penetración aplicada y el área del vástago de penetración.
- **Calculo índice CBR:** Se dibujó la curva que relaciona las presiones (ordenadas) y las penetraciones (abscisas). En los casos donde la curva no presentó un punto de inflexión, se toman los valores correspondientes a 2,54 y 5,08 mm (0,1" y 0,2") de penetración. Si la curva presentó un punto de inflexión, la tangente en ese punto cortará el eje de abscisas en otro punto distinto a cero, que se tomó como nuevo origen para la determinación de las presiones correspondientes a 2,54 y 5,08 mm, tal como se observa en la Figura 3-8. De la curva corregida se tomaron los valores de esfuerzo-penetración para deformaciones de 2,54 mm y 5,08 mm y se calcularon los valores de relación de soporte correspondientes, dividiendo los esfuerzos corregidos por los esfuerzos de referencia 1000 lb/pulgadas² y 1500 lb/pulgadas² respectivamente, y multiplicándolos por 100. La relación de soporte que se reportó para el suelo es normalmente la de 2,54 mm (0,1") de penetración, aunque la relación a 5,08 mm (0,2") de penetración podría resultar menor. (Yoder, 1975). Este índice CBR se obtuvo para cada uno de los moldes elaborados.

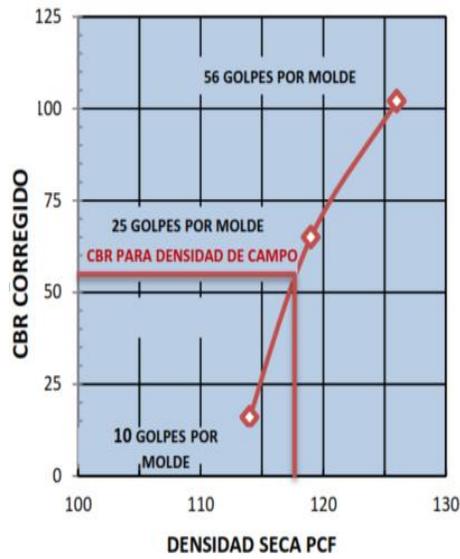
Determinación de CBR del estudio: como se ha mencionado con anterioridad, con el ensayo se trató de obtener el valor de CBR en laboratorio, bajo las condiciones de densidad seca y humedad que presentan los materiales en campo, que pueda compararse con el DCP ejecutado para esas condiciones. Entonces se graficó una curva, con los valores CBR obtenidos para cada molde en las ordenadas, y las densidades secas obtenidas para cada molde en las abscisas. Se proyectó la densidad de campo desde las abscisas y la intersección con la curva CBR vs densidad seca, se proyectó a las ordenadas, cuyo valor corresponde al CBR que se relacionó con el DCP. Para cada ensayo se obtuvieron los valores de CBR correspondientes a 0.1" y 0.2" de deformación, y se los clasificó en dos grupos como CBR menor y CBR mayor dependiendo de su magnitud. La literatura detalla que teóricamente el valor de CBR disminuye con el aumento de la deformación, con lo cual, el CBR correspondiente a 0.1" sería el mayor valor. No obstante, la literatura también señala que, en ciertos casos el CBR de 0.2" podría ser mayor (Yoder, 1975). Con respecto, a que valor asumir de los obtenidos para las deformaciones de 0.1" y 0.2", según la normativa, se debe asumir el mayor valor de los CBR obtenidos. Sin embargo, para el presente caso al obtener el CBR para las condiciones que presenta el material en campo, se analizaron los CBR obtenidos para las dos deformaciones, y se adoptó los valores que presentaron mayor correlación con el ensayo DCP.

Figura 3-8 Corrección de curva esfuerzo-penetración



Fuente: ASTM D-1883-99 (ASTM, 2021)

Figura 3-9 Curva CBR vs Densidad Seca



Fuente: ASTM D-1883-99 (ASTM, 2021)

3.4 Metodología de análisis de datos

Previo al análisis estadístico, los datos obtenidos en los ensayos de campo y laboratorio fueron ordenados y procesados en función de la nomenclatura de exploración, profundidad de análisis y su caracterización según las metodologías SUCS y AASHTO.

El análisis estadístico se realizó mediante un análisis de regresión lineal, con la finalidad de obtener una expresión de correlación entre las variables estudiadas, variables independientes y variable dependiente CBR. En el análisis de regresión se determinó la fuerza de la correlación, o cuanto de la variable dependiente es explicado por la o las variables independientes, lo cual se expresa con el coeficiente de determinación R^2 . Las variables independientes corresponden al DCP, límite líquido, índice de plasticidad, humedad natural, y densidad húmeda, que corresponden a los resultados de los ensayos ejecutados tanto en laboratorio como en campo.

Se realizaron análisis de regresión lineal simple, entre cada variable independiente por separado con la variable dependiente CBR, para establecer qué variable independiente a parte del parámetro DCP, explica el comportamiento de la variable dependiente CBR. Y se realizó un análisis de regresión lineal múltiple de las variables DCP y densidad de campo con el CBR. También el análisis de regresión se realizó para todos los datos obtenidos, y discretizando los cálculos por tipo de material, de tipo fino y de tipo granular.

Los análisis de regresión se complementaron con dos análisis, análisis de varianza y distribución t Student.

- Análisis varianza conocido como ANOVA, se utilizó para determinar la validez del modelo de regresión o correlación determinada. Del análisis de varianza se obtuvo el estadístico F, y el p-valor. Al p-valor en el análisis de regresión se le denominó como F crítico. Se aceptó los modelos de regresión cuando el p-valor o F crítico es próximo a cero o por lo menos inferior al nivel de significancia de 0.05, también, con esto se rechazó la hipótesis nula de que el valor R o fuerza de relación línea es cero en la población.

- Distribución t Student para determinar la significancia de las variables independientes analizadas dentro del modelo de regresión. Si la probabilidad obtenida de la distribución T, se presentó menor al nivel de significancia de 0,05 se rechazó la hipótesis nula de que un coeficiente de regresión vale cero en la población y se determinó que la variante es relevante en la ecuación de correlación y ayuda a explicarla.

Como se mencionó en los párrafos anteriores el tipo de análisis de regresión realizado es lineal, sin embargo, la gráfica de dispersión de los datos pareados de la variable dependiente CBR e independiente DCP, de acuerdo con la literatura específica en el tema tienen una tendencia de tipo logarítmica, por lo cual, para realizar el análisis de regresión lineal, se realizó la parametrización de las variables independientes de la correlación, tal como se muestra a continuación:

$$\text{Ecuación lineal } y = b_0 + b_1x$$

$$\text{Parametrizamos } y = \log CBR \text{ y } x = \log DCP$$

$$\text{Entonces } \log CBR = b_0 + b_1 \log DCP$$

4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Ubicación y descripción del área de estudio

Para el desarrollo del presente trabajo se seleccionó como área de estudio la zona de Challuabamba, dado que, corresponde a una zona de gran expansión urbanística por sus rasgos morfológicos que permiten el rápido asentamiento urbano, y por qué cuentan con una vía de acceso adecuada que es la vía estatal Cuenca – Azogues – Biblián; además, se asienta sobre siete de las unidades geológicas determinadas dentro del cantón Cuenca, como se puede observar en la Figura 4-1; y que tiene aproximadamente un 80% de vías sin pavimentar, que facilita la exploración.

El área de estudio se localiza al noreste del cantón Cuenca y enmarca parte de las parroquias de Nulti, Llacao, y Machángara, y se localiza dentro de las coordenadas de referencia del sistema de coordenadas UTM, Datum WGS-84, Meridiano 17 sur, que se detallan en la Tabla 4-1. En la Figura 4-2 se presenta un esquema de la ubicación con respecto al centro cantonal de Cuenca.

Tabla 4-1 Coordenadas de referencia zona de estudio.

Orientación	Coordenada E (m)	Coordenada N (m)
Norte	732602.42	9686345.89
Sur	730828.45	9682347.08
Este	735101.69	9685532.41
Oeste	731132.27	9684424.89

La zona de Challuabamba se localiza en una zona climática caracterizada por precipitaciones todo el año, incluso en los meses más secos se tiene lluvia, con una precipitación media anual de 1612 mm. Las mediciones en campo fueron realizadas entre los meses de marzo y agosto, que presentan una precipitación máxima en el mes de marzo de 190 mm y una precipitación mínima en el mes de agosto de 63 mm, resultando en un promedio mensual en los meses de medición de 117 mm (Climate-

Data.Org, 2021).

Figura 4-1 Mapa de Geología del Cantón Cuenca. Fuente: (Basabe & CSS, 1998).

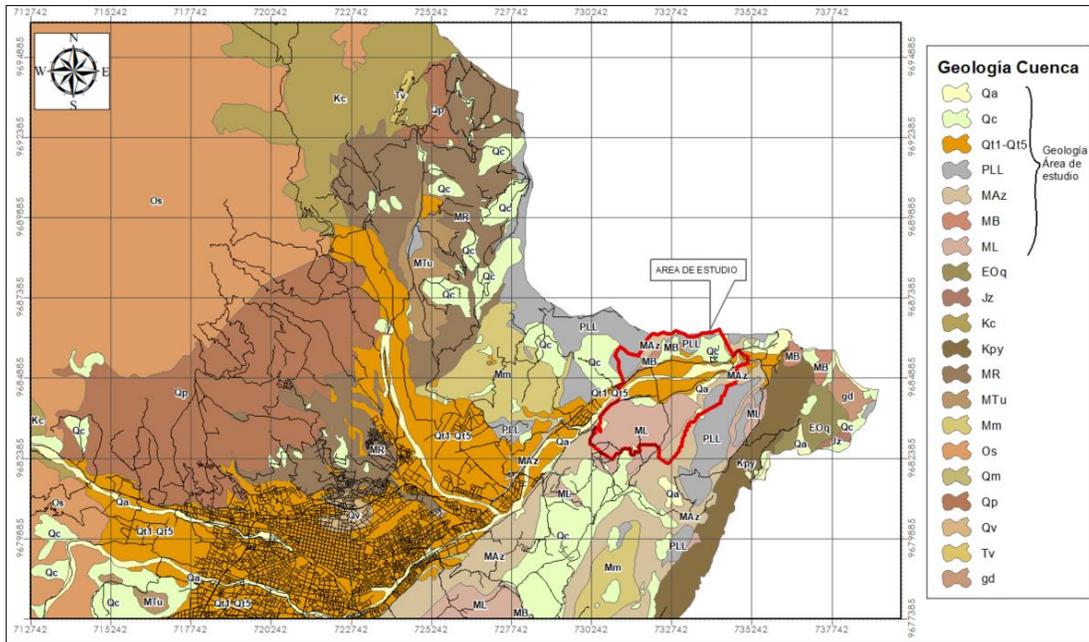
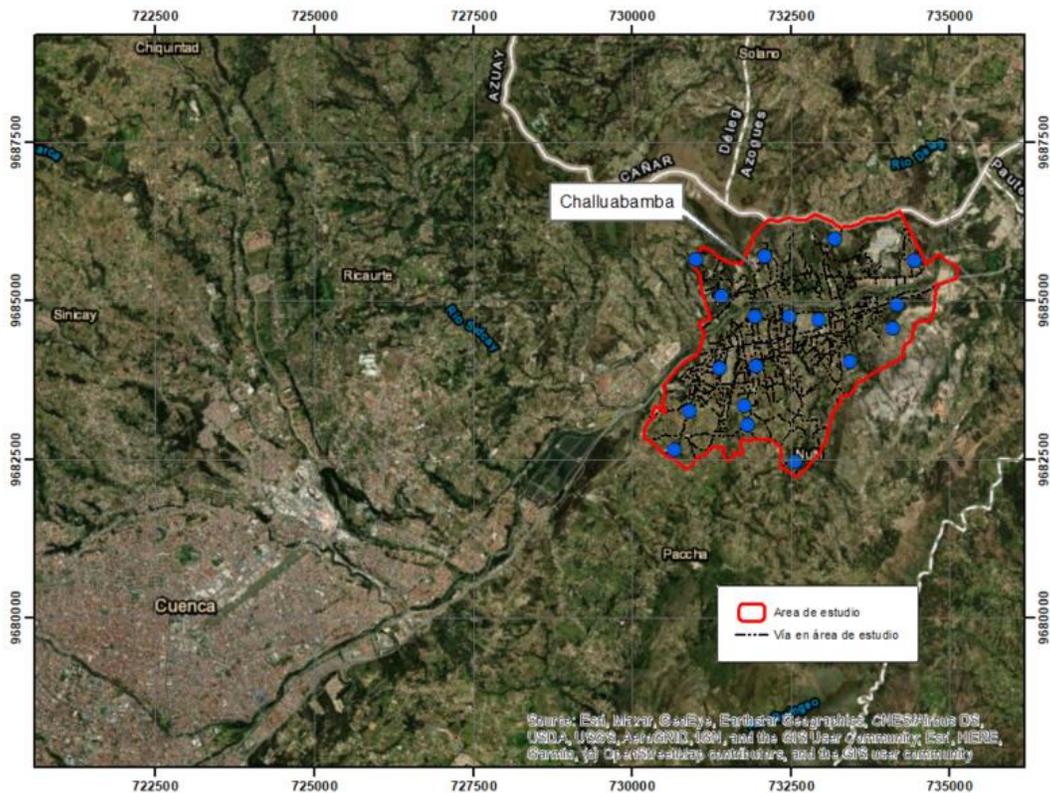


Figura 4-2 Ubicación del área de estudio. Fuente: (ESRI et al., 2021).



De acuerdo con un análisis de la cartografía, se determinó que la zona de Challuabamba, cuenta aproximadamente con 95.50 km de vías, de las cuales, el 19.6% tienen capa de rodadura de asfalto, y el 80.4% tiene capa de rodadura a nivel de lastre. Además de los 95.50 km de vías, el 8.6% corresponden a vías tipo I, R-I y R-II, el 9.1% a vías de tipo II, y el 82.3% a vías tipo III y IV, según la clasificación presentada en la Tabla 4-2. Las vías tipo I corresponden a tramos de la vía rápida Cuenca – Azogues y Panamericana Norte que cruzan la zona de Challuabamba; las vías tipo II, corresponden a las arterias principales del sector de Challuabamba como la vía a Nulti, calle del Bombero, calle Pueblo de los Quitus, y calle Cultura Jama Coaque, todas pavimentadas; y las vías tipo III y IV a calles residenciales del sector. En la Figura 4-3 se muestra un esquema de las calles mencionadas.

Figura 4-3 Ubicación de calles dentro del área de estudio. Fuente: (ESRI et al., 2021)

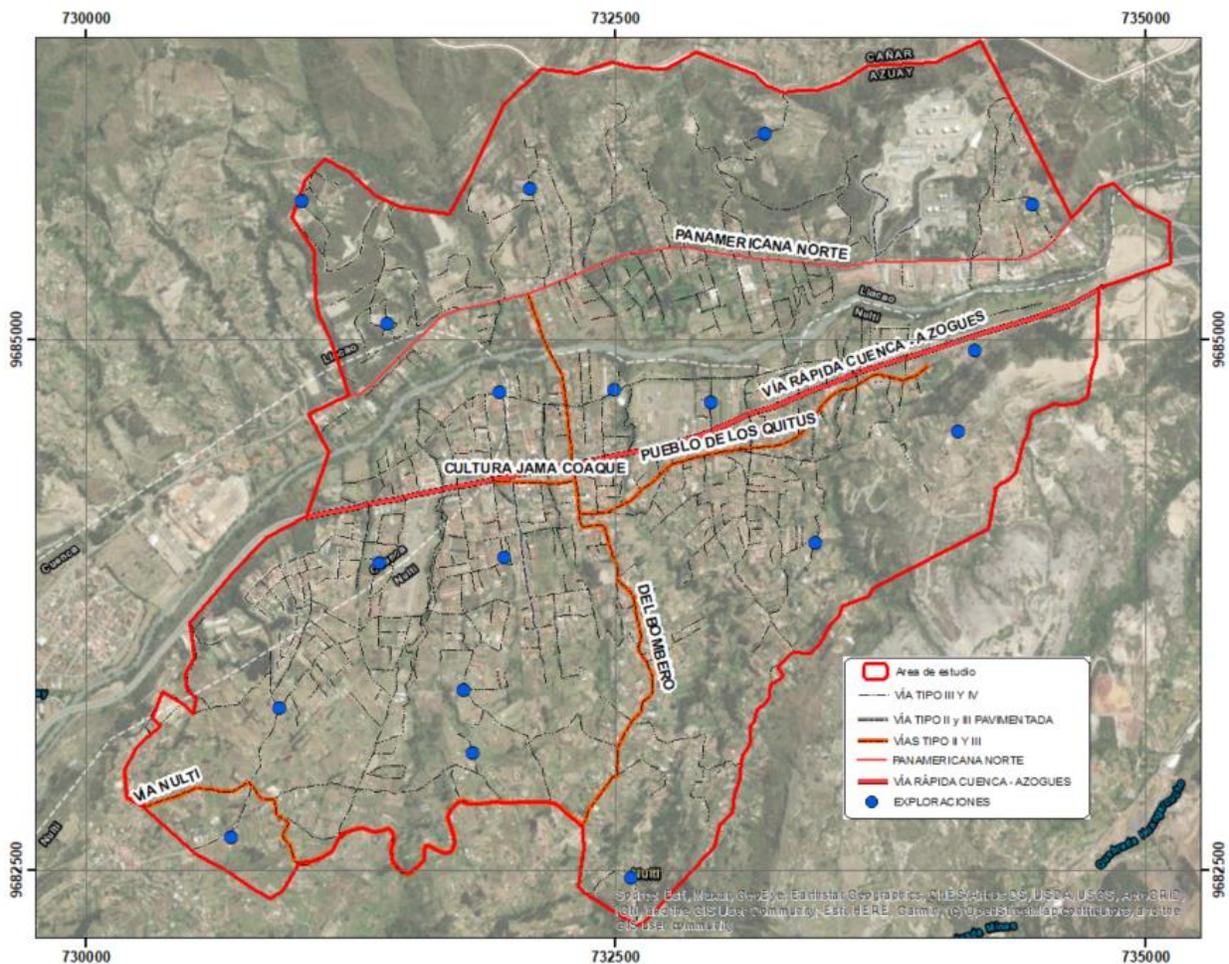


Tabla 4-2 Clasificación de carreteras en función del tipo de tráfico.

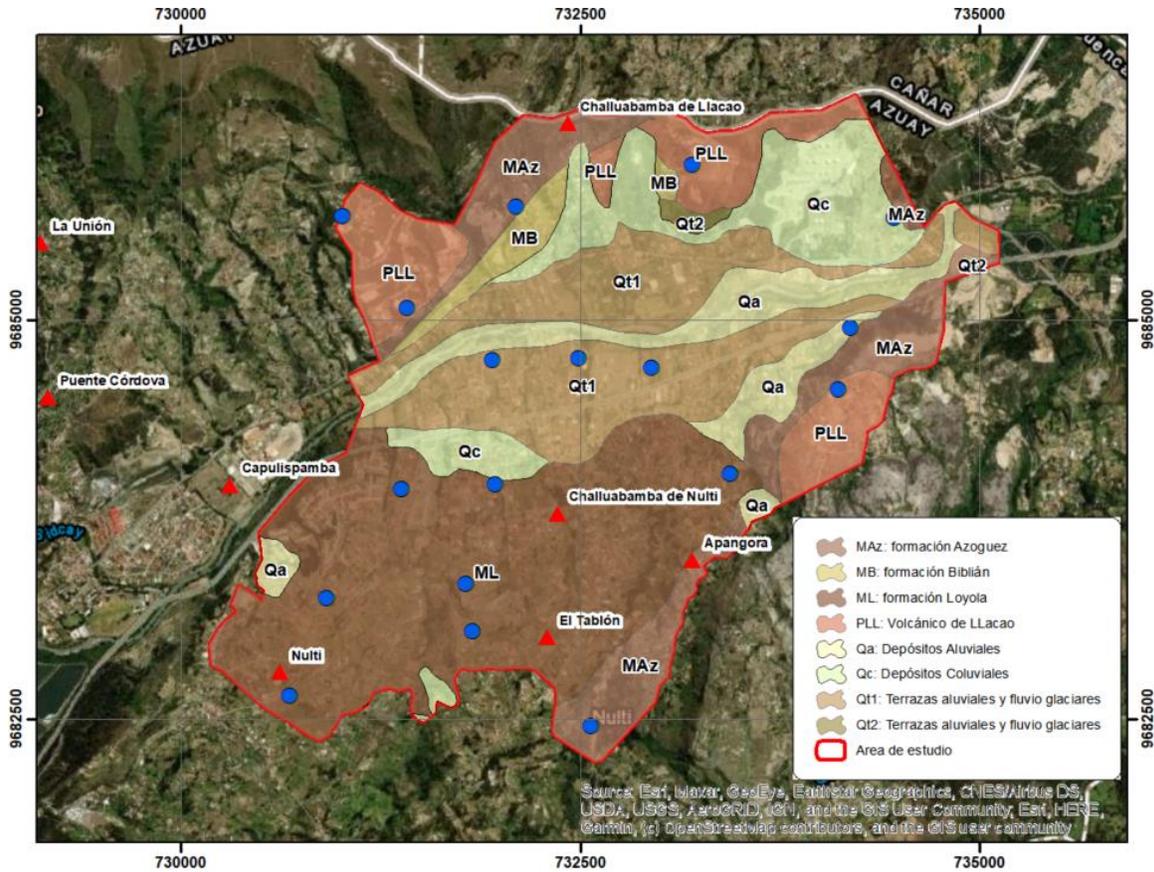
Clase de carretera	Tráfico Proyectado TPDA (vehículos)
R-I o R-II	Más de 8000
I	De 3000 a 8000
II	De 1000 a 3000
III	De 300 a 1000
IV	De 100 a 300
V	Menos de 100

(MOP & T.A.M.S. - ASTEC, 2003)

Desde el punto de vista geológico, la zona de Challuabamba se encuentra mapeada por el proyecto PRECUPA (Prevención de Desastres Naturales en la Cuenca del Río Paute), desarrollado en el año de 1998. La información geológica es presentada en escala 1:25000, y describe distintas formaciones geológicas localizadas en la ciudad de Cuenca. En la zona de Challuabamba se observan, depósitos aluviales, depósitos coluviales, terrazas aluviales y fluvio-glaciares nivel 1 y 2, volcánicos de Llaqueo, formación Azogues, formación Loyola, y formación Biblián. En la Figura 4-4 se presenta un mapa con las formaciones geológicas y las litologías de las formaciones se describen en la Tabla 4-3. De la Tabla 4-3, es importante señalar que, si bien la litología descrita para las terrazas aluviales y fluvio-glaciares es un conglomerado, localmente se observa un suelo de cobertura, caracterizado por un material fino de color negro, y que presenta una potencia de hasta 1.50 m.

De las formaciones determinadas en la zona de Challuabamba, las formaciones dominantes son la formación Loyola (ML) que ocupa el 34.46% de la superficie, seguido de la terraza aluvial fluvio-glaciar nivel 2 (Qt2) con el 19.72%, sumando entre las dos 54.18% del área total, como se puede observar en la Figura 4-5. Las dos áreas ocupan más del 50% de la superficie de Challuabamba y sobre éstas se desarrolla principalmente la expansión urbanística, lo cual, se puede constatar en la Figura 4-6, ya que, la mayor parte de la red vial se asienta sobre estas formaciones y por lo tanto la mayor parte urbanística de la zona.

Figura 4-4 Geología de Challuabamba



Fuente: (Basabe & CSS, 1998)

Tabla 4-3 Litología de las formaciones geológicas del sitio

Formación Geológica	Litología
Depósitos Aluviales (Qa)	Bloques, gravas y arenas limosas en distintos porcentajes, sus formas van de redondeadas a subangulares según la dinámica y morfología del curso fluvial.
Depósitos Coluviales (Qc)	Mezclas heterogéneas de bloques y fragmentos angulares y subangulares en matriz limo arcillosa.
Terrazas aluviales y fluvio glaciares (QT₁₋₂)	Bloques y boleos subangulares a redondeados y subesféricos con una presencia del 40 al 70%, envueltos en una matriz de grava areno arcillosa.
Formación Liacac (PLL)	Flujos piroclásticos, conglomerados y areniscas de origen volcánico.
Formación Loyola (ML)	Lutitas gris oscuras muy fisibles, limolitas que meteorizan a arcillas de color blanco y habano, localmente lentes de areniscas limosas habanas finamente estratificadas con cemento calcáreo, calizas, y mega brechas.
Formación Azogues (MAz)	Areniscas tobáceas de grano medio a grueso café amarillentas con capas de lutitas, limolitas y pocas intercalaciones de conglomerados.
Formación Biblián (MB)	Alternancia de argilitas, limolitas rojizas interestratificadas con areniscas tobáceas de grano fino a grueso, que meteorizan en arcillas de color rojizo.

Fuente: (Basabe & CSS, 1998)

En cuanto a la morfología, y según el mapa de pendientes de la Figura 4-7, la zona de Chilluabamba tiene un pendiente promedio del 20% correspondiente a un relieve de tipo montañoso. Sin embargo, de acuerdo con la distribución de las

formaciones geológicas, las terrazas aluviales y fluvio glaciares y los depósitos aluviales ocupan la zona de Challuabamba con un relieve principalmente plano con pendientes de hasta el 5%, que corresponde al valle del río Cuenca, y que es la zona de mayor expansión urbanística (mayor urbanización y servicios); la formación Loyola ocupa un área con un relieve entre ondulado y montañoso con pendientes de hasta el 40%, que sería la segunda zona con mayor expansión urbanística; y las formaciones restantes y con menor incidencia en el área de estudio, que de manera general presentan un relieve entre montañoso y escarpado con pendientes en algunos casos superiores al 40%. La clasificación de pendientes de la Figura 4-7, es la adoptada por el MTOP, para la clasificación de relieves del terreno.

Figura 4-5 Distribución porcentual de la geología según su superficie

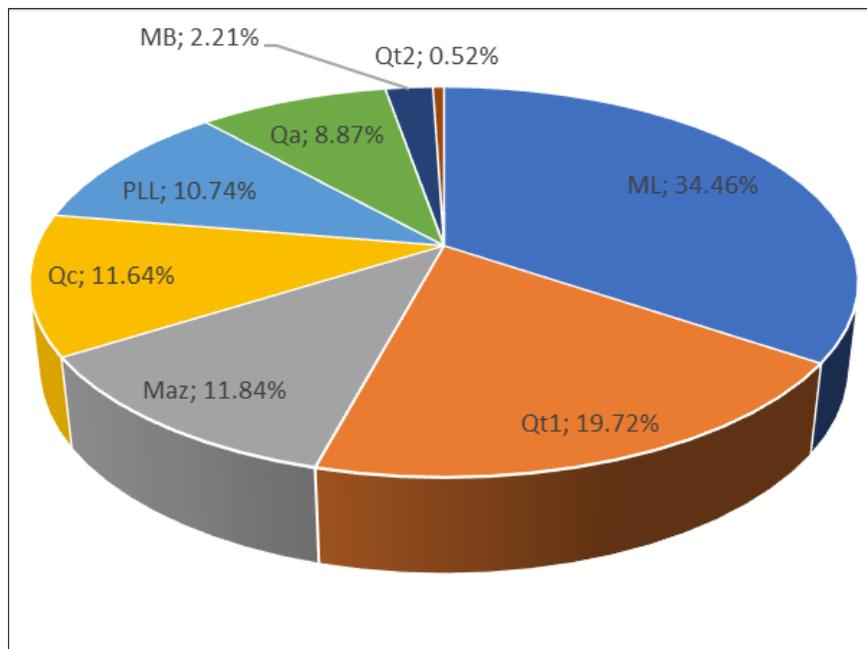


Figura 4-6 Ubicación de las formaciones dominantes del mapa geológico de Challuabamba

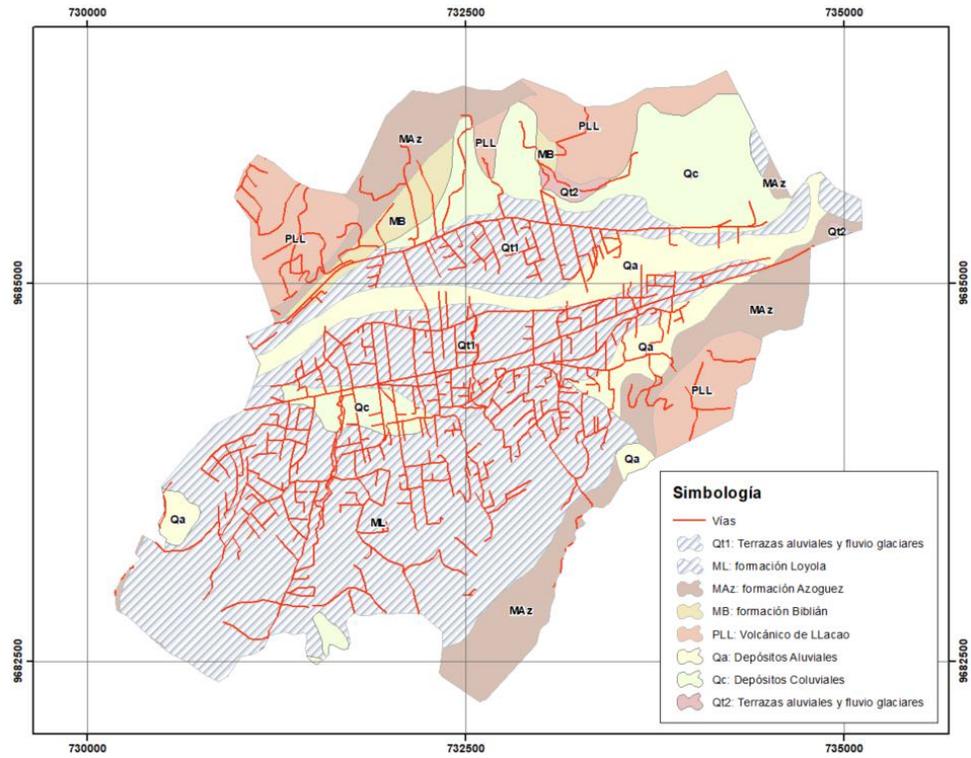
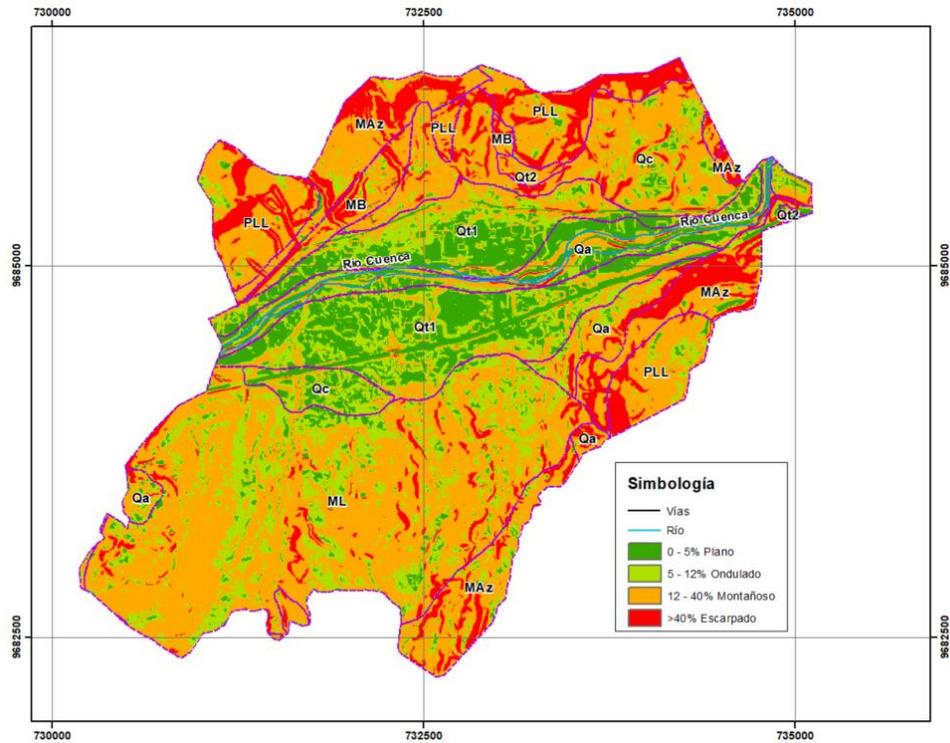


Figura 4-7 Mapa de pendientes de Challuabamba



4.2 Características de los suelos del área

Las características de los suelos de cada punto de análisis se definieron por medio de la clasificación de suelos, ejecutada según las metodologías SUCS y AASHTO. Se ejecutaron un total de 22 clasificaciones. El resumen de los resultados se presenta en la Tabla 4-4, sin embargo, el reporte de los ensayos realizados se presenta en el anexo 2.1 de ensayos de clasificación.

A los distintos suelos analizados se los caracterizó como de alta plasticidad y de baja plasticidad, según el límite líquido reportado, mayor o menor al 50%, tal como se muestra en la carta de plasticidad presentada en la Figura 4-8. Se determinaron 14 suelos con baja plasticidad (SM, ML, GP-GC, SC, GP-GM, GW-GM) y 8 suelos con alta plasticidad (SH, CH, MH). Así mismo, de acuerdo con la gradación que presentaron los suelos analizados, se determinaron 4 suelos como gravas (GP-GC, GP-GM, GW-GM), 13 suelos como arenas con finos (SM, SC), y 5 suelos como netamente finos (SH, CH, MH, ML). Además, en la Figura 4-8 se puede observar que 18 de los 22 suelos analizados, todos con distintas condiciones de plasticidad, se aproximan a línea roja, que corresponde a la línea que separa a las arcillas en la parte superior de la línea y a los limos en la parte inferior de la línea, y considerando que una de las diferencias entre limos y arcillas es el tamaño con un límite de 0.002 mm, significaría que la fracción fina de la mayoría de suelos estudiados tiene un diámetro medio D_{50} de 0.002 mm.

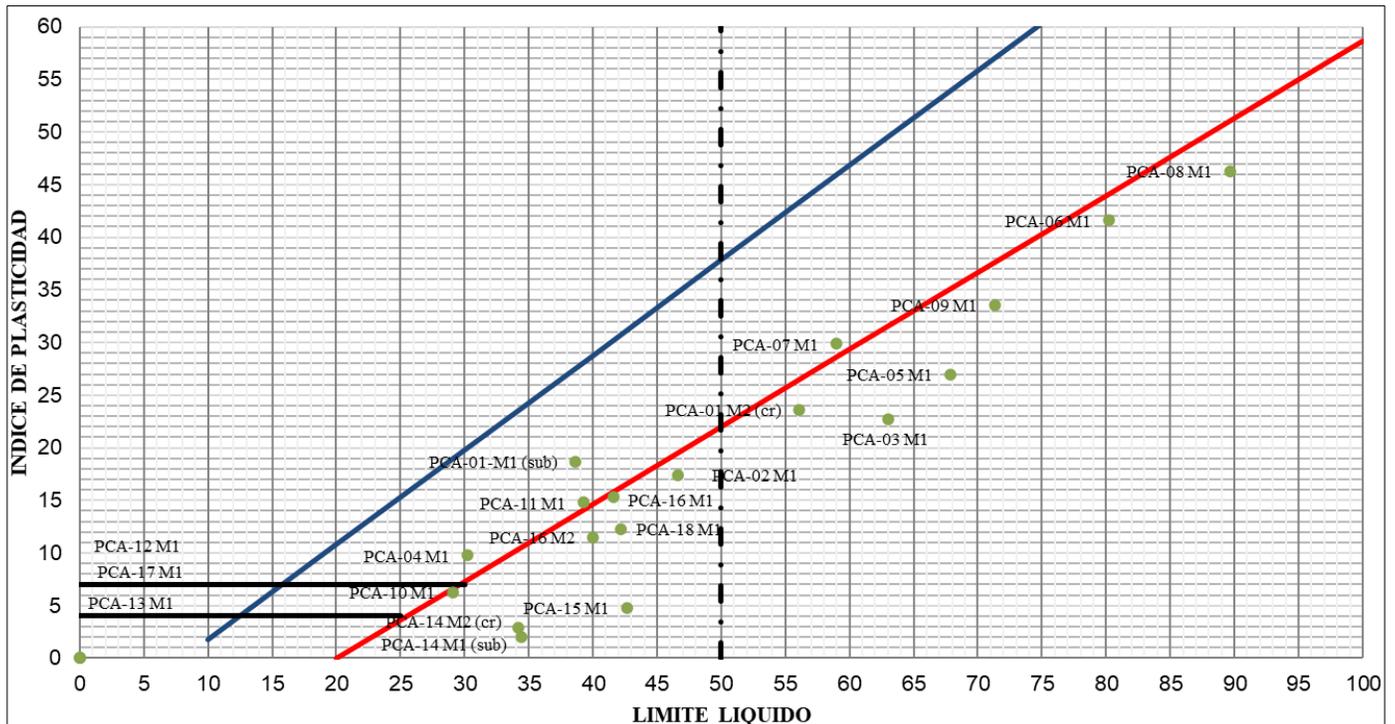
Finalmente, de acuerdo con la clasificación AASHTO se caracterizó el suelo como subrasante de buena a excelente (A-1-a - A-2-7), y de regular a mala (A-4 - A-7-6). Se obtuvo de esta caracterización, 12 suelos como subrasante de buena calidad, y 10 suelos como subrasante de mala calidad. Los suelos de mala calidad en su mayoría corresponden con los suelos de alta plasticidad, con unos pocos casos de suelos de baja plasticidad que también entran en esta clasificación.

Tabla 4-4 Resultados de ensayos de clasificación, suelos de los puntos de análisis

Muestra	Prof. m	H. Natural	Gradación			Clasificación		Límite líquido	Índice de Plasticidad		Tipo de material	Clasificación general de subrasante
		W %	Gravas %	Arenas %	Finos %	SUCS	AASHTO	LL %	IP %			
PCA-01-M1 (sub)	1.00	27.2	18.2	50.8	31.0	SM	A-2-7	57.8	16.3	Alta plasticidad	Excelente a bueno	
PCA-01 M2 (cr)	0.25	7.2	51.9	38.7	9.4	GP-GC	A-2-6	38.6	18.7	Baja plasticidad	Excelente a bueno	
PCA-02 M1	1.50	21.2	8.5	48.6	42.9	SM	A-7-5	56.1	23.6	Alta plasticidad	Regular a malo	
PCA-03 M1	1.50	17.3	2.4	39.1	58.5	ML	A-7-6	46.6	17.4	Baja plasticidad	Regular a malo	
PCA-04 M1	1.50	22.5	0.0	52.3	47.7	SM	A-7-5	63.0	22.7	Alta plasticidad	Regular a malo	
PCA-05 M1	1.50	17.5	6.8	50.9	42.3	SC	A-4	30.2	9.8	Baja plasticidad	Regular a malo	
PCA-06 M1	1.50	26.4	0.0	16.7	83.3	MH	A-7-5	67.9	27.0	Alta plasticidad	Regular a malo	
PCA-07 M1	1.50	36.5	8.1	48.0	43.9	SM	A-7-5	80.2	41.6	Alta plasticidad	Regular a malo	
PCA-08 M1	1.00	18.5	3.0	38.0	59.0	CH	A-7-6	59	29.9	Alta plasticidad	Regular a malo	
PCA-09 M1	1.00	30.7	0.0	8.2	91.8	MH	A-7-5	89.7	46.3	Alta plasticidad	Regular a malo	
PCA-10 M1	1.00	35.1	0.0	12.0	88.0	MH	A-7-5	71.3	33.6	Alta plasticidad	Regular a malo	
PCA-11 M1	1.00	12.7	3.0	64.4	32.5	SM	A-2-4	29.1	6.3	Baja plasticidad	Excelente a bueno	
PCA-12 M1	1.00	26.1	21.2	64.8	14.0	SC	A-2-6	39.3	14.8	Baja plasticidad	Excelente a bueno	
PCA-13 M1	1.00	21.2	6.2	74.9	18.8	SM	A-2-4	0	0	Baja plasticidad	Excelente a bueno	
PCA-14 M1 (sub)	1.00	11.5	45.8	42.3	12.0	GP-GM	A-1-b	0	0	Baja plasticidad	Excelente a bueno	
PCA-14 M2 (cr)	0.50	10.2	32.2	51.8	16.0	SM	A-1-b	34.4	2	Baja plasticidad	Excelente a bueno	
PCA-15 M1	1.00	14.2	30.3	55.1	14.6	SM	A-1-b	34.2	2.9	Baja plasticidad	Excelente a bueno	
PCA-16 M1	0.50	9.1	70.6	21.8	7.6	GP-GM	A-2-6	40	11.5	Baja plasticidad	Excelente a bueno	
PCA-16 M2	1.00	9.1	52.5	35.8	11.7	GW-GM	A-1-a	42.7	4.8	Baja plasticidad	Excelente a bueno	
PCA-17 M1	0.5	10.3	0.0	62.5	37.5	SM	A-7-6	41.6	15.3	Baja plasticidad	Regular a malo	
PCA-18 M1	0.25	12.3	0.7	63.0	36.3	SM	A-4	0	0	Baja plasticidad	Excelente a bueno	
PCA-18 M2	1	12.3	11.6	54.2	34.2	SM	A-2-7	42.2	12.3	Baja plasticidad	Excelente a bueno	

Nota: sub: subrasante; cr: capa de rodadura

Figura 4-8 Resultados de los suelos estudiados en la Carta de plasticidad. Nota: sub: subrasante; cr: capa de rodadura



4.3 Resultados de CBR

En esta sección se presentan los resultados del ensayo CBR, obtenidos de las muestras elaboradas para la densidad húmeda medida campo (γ_h), la humedad natural medida en laboratorio ($W\%$), y con los procedimientos de la normativa ASTM D 1883 (2021). Para cada ensayo se obtuvieron los valores de CBR correspondientes a 0.1" y 0.2" de deformación, y se los clasificó en dos grupos denominados, CBR menor y CBR mayor, dependiendo de su magnitud. La literatura detalla que teóricamente el valor de CBR disminuye con el aumento de la deformación, y el valor de CBR mayor correspondería a 0.1". Sin embargo, para el presente estudio la mayoría de resultados de CBR de 0.2" de deformación resultaron mayores, lo cual, podría deberse a que se modificó la metodología de la prueba para poder simular las condiciones de campo, y no se realizó la saturación de las muestras, en todo caso la literatura también señala que, en ciertos casos el CBR de 0.2" podría ser mayor. Para el presente caso al obtener el CBR para las condiciones que presenta el material en campo, se analizaron los CBR obtenidos, tanto del grupo de CBR mayor como del grupo CBR menor, y se adoptó el grupo de valores que presentaron mayor correlación con el ensayo DCP.

Los valores del grupo CBR menor tienen una media de 24.1% y una mediana a 13.5%; y varían en un rango de 1.6% correspondiente a un suelo de alta plasticidad con una clasificación de subrasante regular a mala, y 127% correspondiente a un suelo de baja plasticidad compactado y conformado como capa de rodadura de lastre, con una clasificación de subrasante excelente a buena. Discretizando por tipo de suelo, los de baja plasticidad presentan un rango de variación entre 3.50% y 127% con una media de 29.52% y una mediana de 16.5%; y los de alta plasticidad una variación entre 1.6% y 52% con una media de 14.6% y una mediana de 4%. Las medidas de tendencia central señaladas se muestran gráficamente en la Figura 4-9.

En cuanto a los valores del grupo CBR mayor tienen una media de 27.7% y una mediana a 16.3%; y varían en un rango de 2.0% correspondiente a un suelo de alta plasticidad con una clasificación de subrasante regular a mala, y 136% correspondiente a un suelo de baja plasticidad compactado y conformado como capa de rodadura de lastre, con una clasificación de subrasante excelente a buena. Discretizando por tipo de

suelo, los de baja plasticidad presentan un rango de variación entre 3.8% y 136% con una media de 33.5% y una mediana de 19.3%; y los de alta plasticidad una variación entre 2.0% y 60.5% con una media de 17.5% y una mediana de 5.8%. Las medidas de tendencia central señaladas se muestran gráficamente en la Figura 4-9.

Considerando que la mediana es una medida de tendencia central no susceptible a valores extremos, se compararon las medianas obtenidas para los suelos de alta plasticidad y baja plasticidad, y para los grupos CBR mayor y CBR menor. De lo cual, se constató que, para el presente estudio los materiales de baja plasticidad presentaron mayor capacidad de soporte al reportar mayores medianas con valores de 19.3% y 16.5%, para el grupo CBR mayor y el grupo CBR menor, respectivamente. Sin embargo, de los suelos clasificados como de alta plasticidad, se obtuvieron valores de CBR en el orden 50% y 60% que son superiores a 10 de los 14 valores de CBR obtenidos para los suelos clasificados como de baja plasticidad. Entonces, considerando que los valores de CBR fueron obtenidos para las condiciones que presentan los materiales en campo, se puede establecer que, el CBR de campo es independiente del tipo de suelo, y depende básicamente del grado de consistencia o compacidad que tenga en campo el suelo o material analizado. Las medidas de tendencia central señaladas se muestran gráficamente en la Figura 4-10.

Figura 4-9 Diagrama de cajas y bigotes valores de CBR, grupos CBR menor y CBR mayor

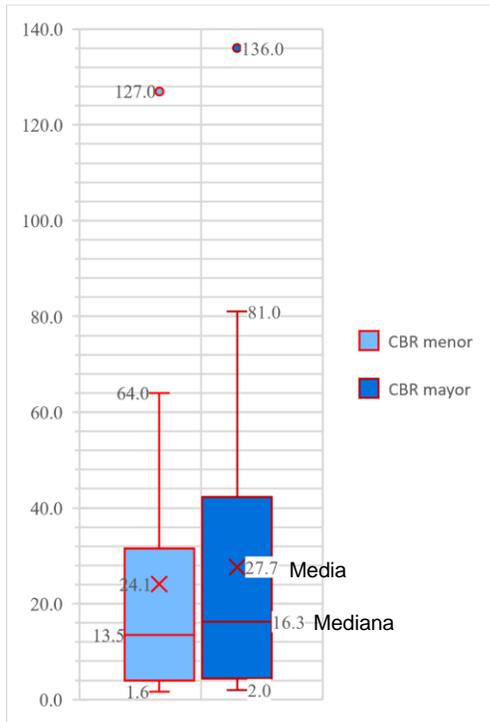
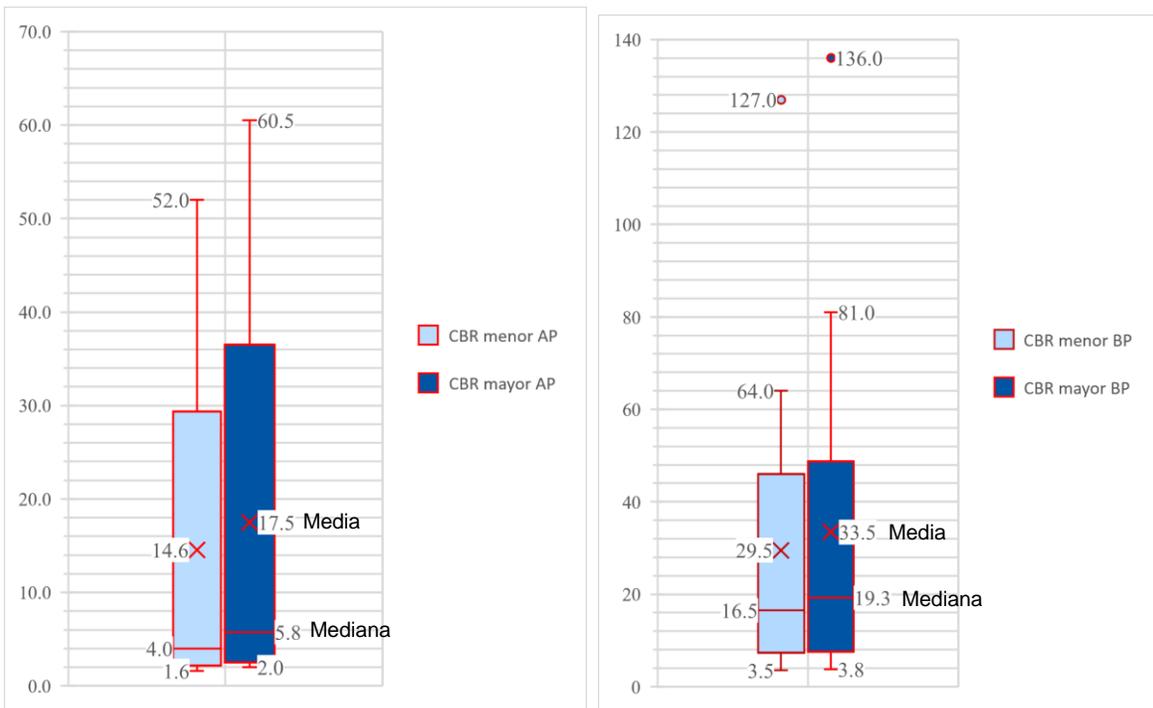


Figura 4-10 Diagrama de cajas y bigotes, grupos CBR menor y CBR mayor, y clasificación Alta Plasticidad y Baja Plasticidad.



Nota: AP: Alta plasticidad; BP: Baja plasticidad

Desde el punto de vista de localización, los valores de CBR inferiores al 5% corresponden al suelo residual de las terrazas aluviales y a zonas de meteorización de la formación Loyola y formación Azogues; valores entre 5% y 10% se presentan en zonas de meteorización de la formación Azogues y la formación Llaaco; y valores superiores a 10% en la zona alta de las laderas de Challuabamba donde la meteorización de las formaciones Azogues, Loyola y Llaaco es mínima, y para el caso de las capas de rodaduras compactadas con material de lastre. En la Figura 4-11 se presenta el esquema de distribución de los CBR con sus distintos valores, y en la Tabla 4-5 se presentan el resumen de los resultados del ensayo CBR, sin embargo, en el anexo 2.2 de ensayos de CBR se presentan los reportes completos de los ensayos.

Tabla 4-5 Resultados ensayos CBR

Muestra	Prof. m	CBR				H. Natural W %	Densidad seca campo γ_d kg/m ³	Clasificación		Tipo de material	Clasificación general de subrasante
		CBR 0.1" %	CBR 0.2" %	CBR menor %	CBR mayor %			SUCS	AASHTO		
PCA-01-M1 (sub)	1.00	15.5	17.0	15.5	17.0	27.2	1344	SM	A-2-7	Alta plasticidad	Excelente a bueno
PCA-01 M2 (cr)	0.25	127	136	127.0	136.0	7.2	1991	GP-GC	A-2-6	Baja plasticidad	Excelente a bueno
PCA-02 M1	1.50	52.0	60.5	52.0	60.5	21.2	1518	SM	A-7-5	Alta plasticidad	Regular a malo
PCA-03 M1	1.50	12.0	12.5	12.0	12.5	17.3	1365	ML	A-7-6	Baja plasticidad	Regular a malo
PCA-04 M1	1.50	34.0	43.0	34.0	43.0	22.5	1448	SM	A-7-5	Alta plasticidad	Regular a malo
PCA-05 M1	1.50	3.8	3.5	3.5	3.8	17.5	1386	SC	A-4	Baja plasticidad	Regular a malo
PCA-06 M1	1.50	4.0	7.0	4.0	7.0	26.4	1292	MH	A-7-5	Alta plasticidad	Regular a malo
PCA-07 M1	1.50	4.0	4.5	4.0	4.5	36.5	985	SM	A-7-5	Alta plasticidad	Regular a malo
PCA-08 M1	1.00	3.8	3.6	3.6	3.8	18.5	1345	CH	A-7-6	Alta plasticidad	Regular a malo
PCA-09 M1	1.00	2.1	1.7	1.7	2.1	30.7	1155	MH	A-7-5	Alta plasticidad	Regular a malo
PCA-10 M1	1.00	2	1.6	1.6	2.0	35.1	1117	MH	A-7-5	Alta plasticidad	Regular a malo
PCA-11 M1	1.00	11	15.5	11.0	15.5	12.7	1739	SM	A-2-4	Baja plasticidad	Excelente a bueno
PCA-12 M1	1.00	19	20	19.0	20.0	26.1	1269	SC	A-2-6	Baja plasticidad	Excelente a bueno
PCA-13 M1	1.00	15	18.5	15.0	18.5	21.2	1609	SM	A-2-4	Baja plasticidad	Excelente a bueno
PCA-14 M1 (sub)	1.00	4	4	4.0	4.0	11.5	1287	GP-GM	A-1-b	Baja plasticidad	Excelente a bueno
PCA-14 M2 (cr)	0.50	61	81	61.0	81.0	10.2	1865	SM	A-1-b	Baja plasticidad	Excelente a bueno
PCA-15 M1	1.00	18	26	18.0	26.0	14.2	1892	SM	A-1-b	Baja plasticidad	Excelente a bueno
PCA-16 M1	0.50	24	26	24.0	26.0	9.1	1647	GP-GM	A-2-6	Baja plasticidad	Excelente a bueno
PCA-16 M2	1.00	7.8	8	7.8	8.0	9.1	1421	GW-GM	A-1-a	Baja plasticidad	Excelente a bueno
PCA-17 M1	0.5	6	6.2	6.0	6.2	10.3	1299	SM	A-7-6	Baja plasticidad	Regular a malo
PCA-18 M1	0.25	41	42	41.0	42.0	12.3	1700	SM	A-4	Baja plasticidad	Excelente a bueno
PCA-18 M2	1	64	69	64.0	69.0	12.3	1825	SM	A-2-7	Baja plasticidad	Excelente a bueno

sub: subrasante; cr: capa de rodadura

Figura 4-11 Ubicación de los valores del grupo CBR menor obtenidos dentro del área analizada

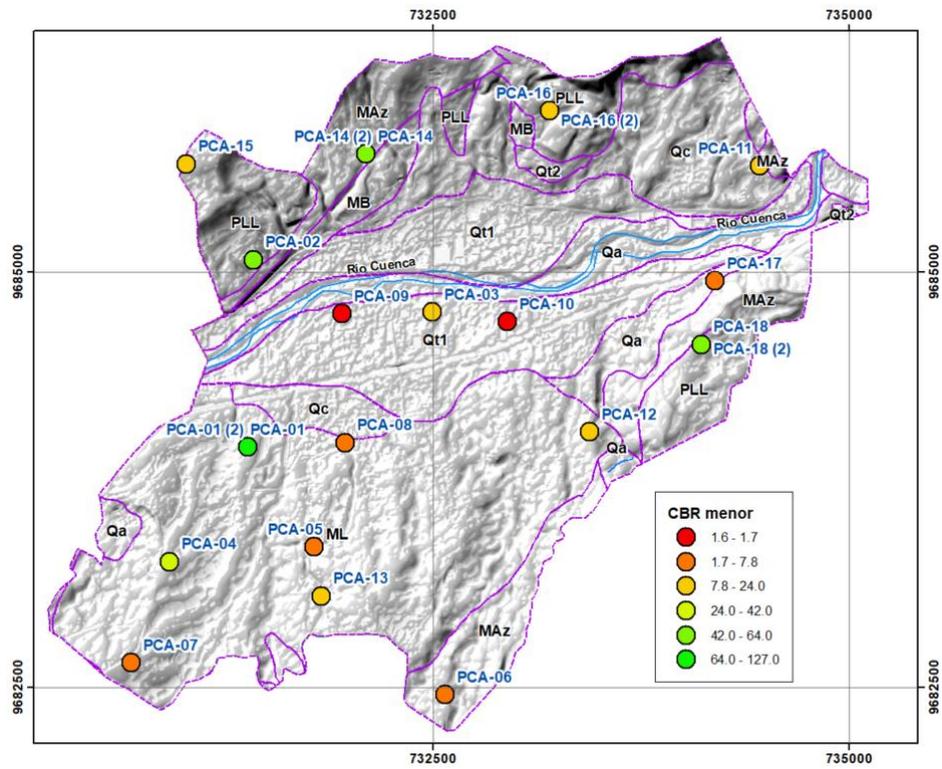
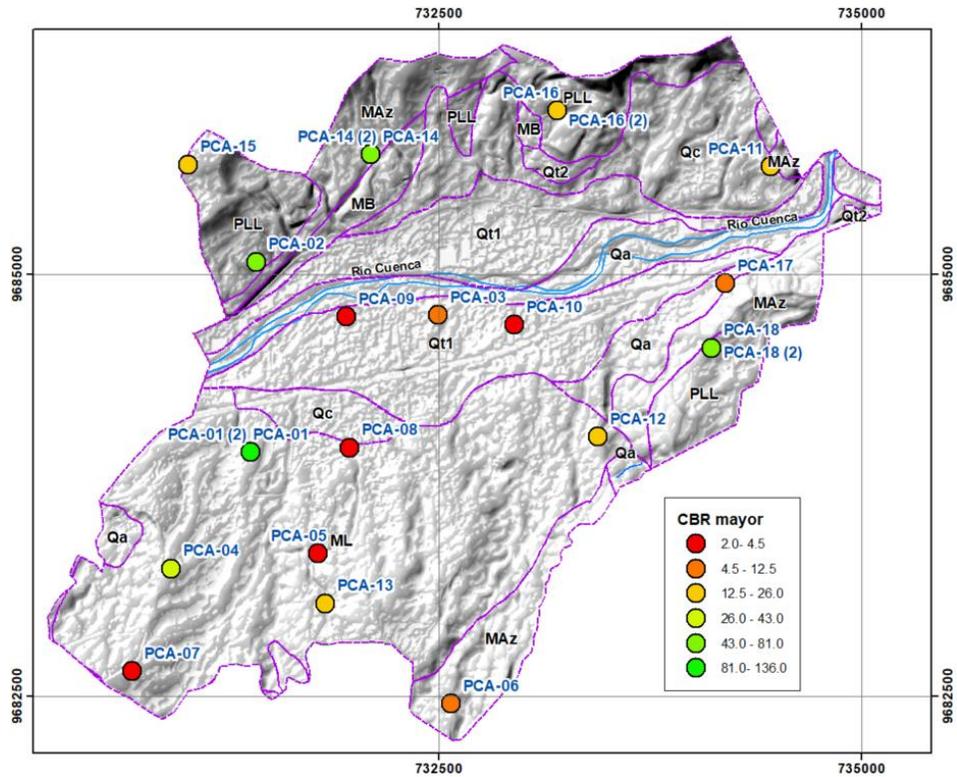


Figura 4-12 Ubicación de los valores del grupo CBR mayor obtenidos dentro del área analizada



4.4 Resultados de DCP

En esta sección se presentan los resultados de los ensayos DCP ejecutados en campo, en cada punto y profundidad de análisis. En la Tabla 4-6 se presenta el resumen de los resultados, sin embargo, el reporte de los ensayos se presenta en el anexo 3.1 de ensayos DCP.

Los resultados DCP obtenidos varían entre 62 mm/golpe para suelos blandos, que corresponde a un suelo areno arcilloso de baja plasticidad, con una clasificación de subrasante de regular a mala; y 2.86 mm/golpe que corresponde a una capa de rodadura caracterizada como un suelo de granular de baja plasticidad, con una clasificación de subrasante de excelente a buena. De los resultados DCP se determina una media de 22.46 mm/golpe y una mediana de 14.05 mm/golpe, tal como se puede observar en la Figura 4-13. Por tipo de suelo, los de baja plasticidad presentan un rango de variación entre 2.86 mm/golpe y 62 mm/golpe con una media de 16.70 mm/golpe y una mediana de 12.01 mm/golpe; y los de alta plasticidad entre 8.59 mm/golpe y 60 mm/golpe con una media de 32.54 mm/golpe y una mediana de 31.64 mm/golpe, tal como se puede observar en la Figura 4-14. De la comparación de las medianas de los dos tipos de materiales, se pudo constatar que, para el presente estudio los materiales de baja plasticidad se presentan más rígidos por presentar un valor menor de DCP 2.86 mm/golpe, sin embargo, tanto en suelos de baja plasticidad como de alta plasticidad se determinaron valores DCP altos próximos a 60 mm/golpe, que correspondieron a suelos blandos, con lo cual, se pudo establecer que el valor DCP es independiente del tipo de suelo, y más bien depende del grado de consistencia o compacidad que tenga en campo el suelo o material analizado.

Desde el punto de vista de localización, los valores de DCP altos corresponden al suelo residual de las terrazas aluviales y a zonas de meteorización de la formación Loyola y formación Azogues, y valores DCP bajos a los suelos de subrasante de laderas de Challuabamba con meteorización mínima, y a capas de rodadura ubicadas en todas las vías sin pavimentar del área de estudio.

Figura 4-13 Diagrama de cajas y bigotes valores de DCP

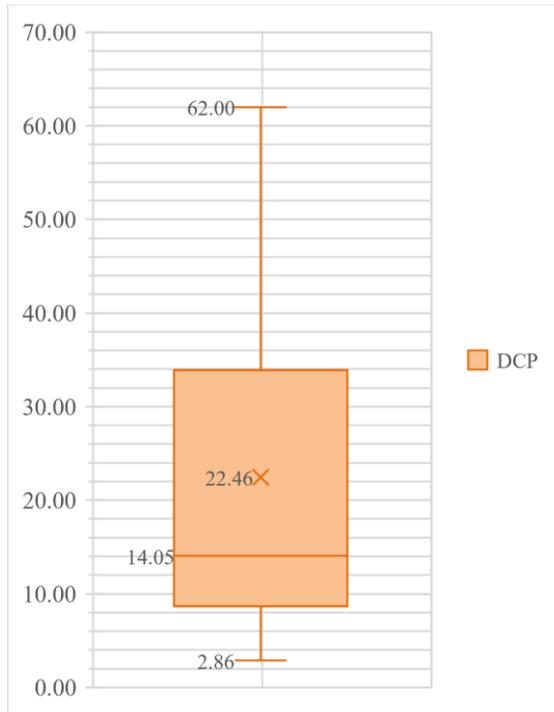
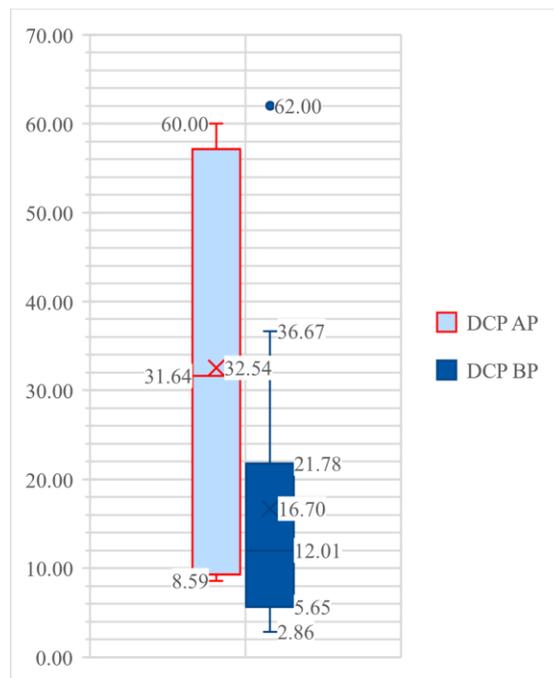


Figura 4-14 Diagrama de cajas y bigotes, valores de DCP clasificados por alta plasticidad y baja plasticidad.



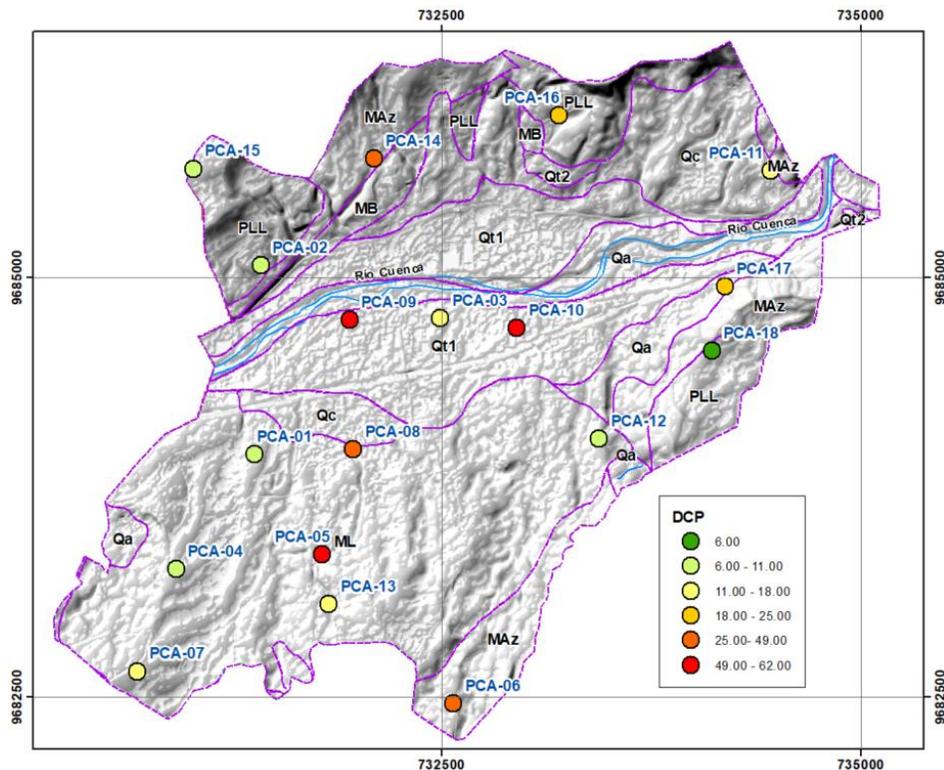
Nota: AP: Alta plasticidad; BP: Baja plasticidad

Tabla 4-6 Resultados de ensayos DCP

Muestra	Prof. m	DCP mm/golpe	Clasificación		Tipo de material	Clasificación general de subrasante
			SUCS	AASHTO		
PCA-01-M1 (sub)	1.00	8.62	SM	A-2-7	Alta plasticidad	Excelente a bueno
PCA-01 M2 (cr)	0.25	2.86	GP-GC	A-2-6	Baja plasticidad	Excelente a bueno
PCA-02 M1	1.50	8.59	SM	A-7-5	Alta plasticidad	Regular a malo
PCA-03 M1	1.50	13.81	ML	A-7-6	Baja plasticidad	Regular a malo
PCA-04 M1	1.50	11.23	SM	A-7-5	Alta plasticidad	Regular a malo
PCA-05 M1	1.50	62.00	SC	A-4	Baja plasticidad	Regular a malo
PCA-06 M1	1.50	45.00	MH	A-7-5	Alta plasticidad	Regular a malo
PCA-07 M1	1.50	18.28	SM	A-7-5	Alta plasticidad	Regular a malo
PCA-08 M1	1.00	48.62	CH	A-7-6	Alta plasticidad	Regular a malo
PCA-09 M1	1.00	60.00	MH	A-7-5	Alta plasticidad	Regular a malo
PCA-10 M1	1.00	60.00	MH	A-7-5	Alta plasticidad	Regular a malo
PCA-11 M1	1.00	14.29	SM	A-2-4	Baja plasticidad	Excelente a bueno
PCA-12 M1	1.00	8.86	SC	A-2-6	Baja plasticidad	Excelente a bueno
PCA-13 M1	1.00	14.29	SM	A-2-4	Baja plasticidad	Excelente a bueno
PCA-14 M1 (sub)	1.00	36.67	GP-GM	A-1-b	Baja plasticidad	Excelente a bueno
PCA-14 M2 (cr)	0.50	3.70	SM	A-1-b	Baja plasticidad	Excelente a bueno
PCA-15 M1	1.00	10.00	SM	A-1-b	Baja plasticidad	Excelente a bueno
PCA-16 M1	0.50	10.20	GP-GM	A-2-6	Baja plasticidad	Excelente a bueno
PCA-16 M2	1.00	20.50	GW-GM	A-1-a	Baja plasticidad	Excelente a bueno
PCA-17 M1	0.5	25.63	SM	A-7-6	Baja plasticidad	Regular a malo
PCA-18 M1	0.25	5.84	SM	A-4	Baja plasticidad	Excelente a bueno
PCA-18 M2	1	5.09	SM	A-2-7	Baja plasticidad	Excelente a bueno

sub: subrasante; cr: capa de rodadura

Figura 4-15 Ubicación de los valores DCP obtenidos dentro del área analizada



4.5 Resultados de densidad seca de campo

En la presente sección se reportan los resultados de la densidad seca de campo obtenida con la metodología del densímetro nuclear ASTM D2922-01 y la humedad natural determinada en laboratorio. Los reportes de la densidad de campo se presentan en el anexo 3.2.

Los resultados de densidad seca de campo variaron entre 984.6 kg/m^3 para el suelo más blando, que es un limo de alta plasticidad, y con una clasificación de subrasante de regular a mala y 1990.7 kg/m^3 que corresponde a una capa de rodadura de lastre, caracterizada como un suelo de granular de baja plasticidad, con una clasificación de subrasante de excelente a buena. Los resultados presentan una media de 1477.2 kg/m^3 y una mediana de 1403.1 kg/m^3 , tal como se puede observar en la Figura 4-16. Por tipo de suelo, los de baja plasticidad presentan una variación entre 1268.8 kg/m^3 y 1990.7 kg/m^3 , con una media de 1592.5 kg/m^3 y una mediana de 1628.0 kg/m^3 ; y los de alta plasticidad entre 984.6 kg/m^3 y 1518.2 kg/m^3 con una media de 1275.5 kg/m^3 y una mediana de 1318.1 kg/m^3 , tal como se puede observar Figura 4-17. De la comparación de las medianas de los dos tipos de materiales, se pudo constatar que, los materiales de baja plasticidad presentan mayor densidad con una mediana de 1628.0 kg/m^3 , sin embargo, la densidad es independiente del tipo de suelo, y más bien depende en este caso del grado de compactación que tenga el suelo en sitio, por lo que hay suelos de baja plasticidad con densidades menores a los suelos de alta plasticidad.

Desde el punto de vista de localización, los valores de densidad bajos corresponden al suelo residual de cobertura de las terrazas aluviales y a zonas de meteorización de la formación Loyola y formación Azogues, y valores de densidad altos a los suelos de subrasante de las laderas de Challuabamba con meteorización mínima, y a capas de rodadura ubicadas en todas las vías sin pavimentar del área de estudio. En la Tabla 4-7 se presenta el resumen de los resultados y en la Figura 4-18 la ubicación de los valores obtenidos dentro del área de estudio.

Tabla 4-7 Resultados de densidad seca de campo

Muestra	Prof. m	Densidad húmeda	Densidad seca	Clasificación		Tipo de material	Clasificación general de subrasante
		campo	campo	SUCS	AASHTO		
		γ_h kg/m ³	γ_d kg/m ³				
PCA-01-M1 (sub)	1.00	1710.0	1344.3	SM	A-2-7	Alta plasticidad	Excelente a bueno
PCA-01 M2 (cr)	0.25	2134.0	1990.7	GP-GC	A-2-6	Baja plasticidad	Excelente a bueno
PCA-02 M1	1.50	1840.0	1518.2	SM	A-7-5	Alta plasticidad	Regular a malo
PCA-03 M1	1.50	1601.0	1364.9	ML	A-7-6	Baja plasticidad	Regular a malo
PCA-04 M1	1.50	1774.0	1448.2	SM	A-7-5	Alta plasticidad	Regular a malo
PCA-05 M1	1.50	1628.0	1385.5	SC	A-4	Baja plasticidad	Regular a malo
PCA-06 M1	1.50	1633.0	1291.9	MH	A-7-5	Alta plasticidad	Regular a malo
PCA-07 M1	1.50	1344.0	984.6	SM	A-7-5	Alta plasticidad	Regular a malo
PCA-08 M1	1.00	1594.0	1345.1	CH	A-7-6	Alta plasticidad	Regular a malo
PCA-09 M1	1.00	1509.0	1154.6	MH	A-7-5	Alta plasticidad	Regular a malo
PCA-10 M1	1.00	1509.0	1117.0	MH	A-7-5	Alta plasticidad	Regular a malo
PCA-11 M1	1.00	1960.0	1739.1	SM	A-2-4	Baja plasticidad	Excelente a bueno
PCA-12 M1	1.00	1600.0	1268.8	SC	A-2-6	Baja plasticidad	Excelente a bueno
PCA-13 M1	1.00	1950.0	1608.9	SM	A-2-4	Baja plasticidad	Excelente a bueno
PCA-14 M1 (sub)	1.00	1435.0	1287.0	GP-GM	A-1-b	Baja plasticidad	Excelente a bueno
PCA-14 M2 (cr)	0.50	2055.0	1864.8	SM	A-1-b	Baja plasticidad	Excelente a bueno
PCA-15 M1	1.00	2161.0	1892.3	SM	A-1-b	Baja plasticidad	Excelente a bueno
PCA-16 M1	0.50	1797.0	1647.1	GP-GM	A-2-6	Baja plasticidad	Excelente a bueno
PCA-16 M2	1.00	1550.0	1420.7	GW-GM	A-1-a	Baja plasticidad	Excelente a bueno
PCA-17 M1	0.5	1433.0	1299.2	SM	A-7-6	Baja plasticidad	Regular a malo
PCA-18 M1	0.25	1909.0	1699.9	SM	A-4	Baja plasticidad	Excelente a bueno
PCA-18 M2	1	2050.0	1825.5	SM	A-2-7	Baja plasticidad	Excelente a bueno

sub: subrasante; cr: capa de rodadura

Figura 4-16 Diagrama de cajas y bigotes, valores de densidad seca

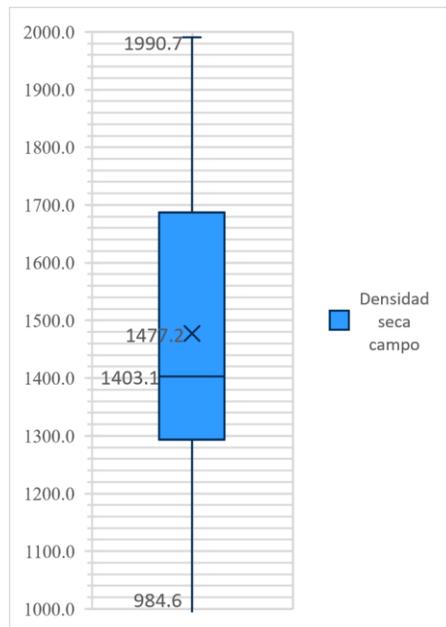
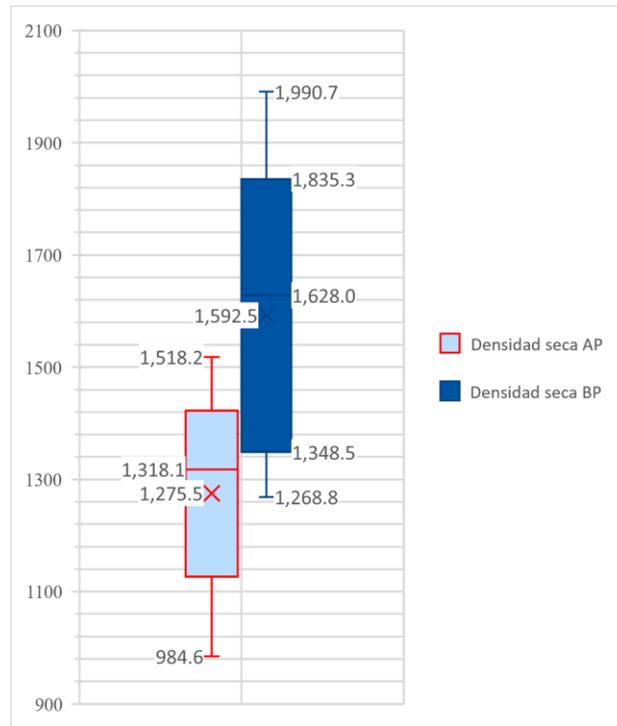
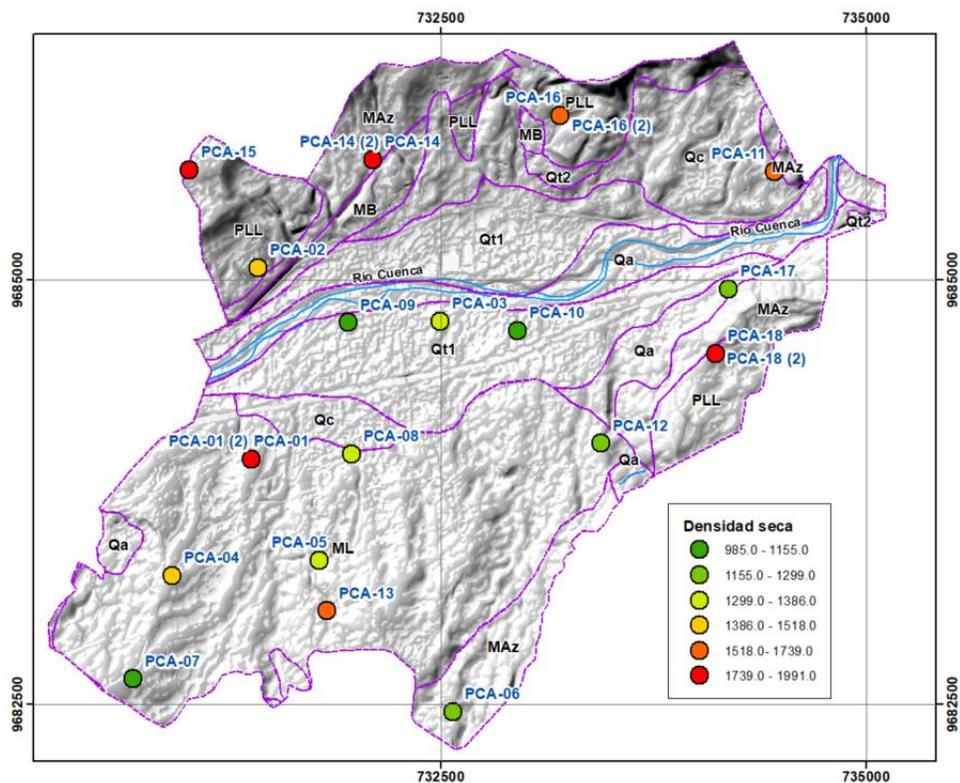


Figura 4-17 Diagrama de cajas y bigotes, valores de densidad seca clasificados por alta plasticidad y baja plasticidad



Nota: AP: Alta plasticidad; BP: Baja plasticidad

Figura 4-18 Ubicación de los valores de densidad seca obtenidos dentro del área analizada



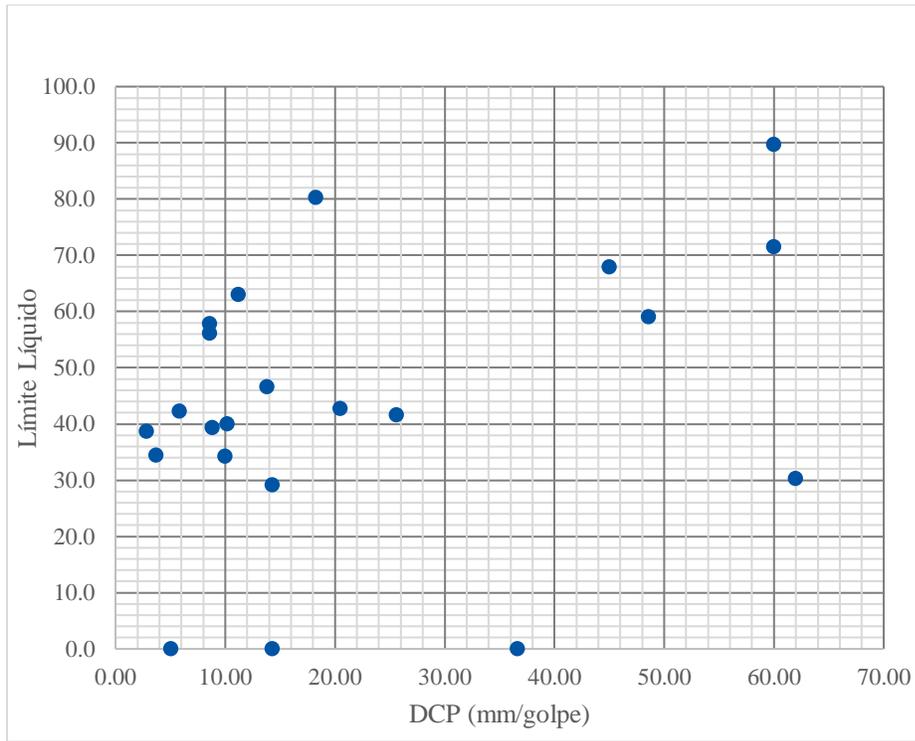
4.6 Relación entre DCP y parámetros obtenidos

El presente estudio se basa en la correlación entre los parámetros DCP y CBR, que de acuerdo con la literatura especializada se pueden relacionar. Sin embargo, del análisis de los resultados de los ensayos DCP y CBR, se pudo comprobar que la variación de estos parámetros depende principalmente de la compacidad o consistencia que presenta los suelos en campo, que fue evaluada con la obtención de la densidad del suelo en el sitio, por lo cual se considera que la densidad de campo es un parámetro que podría relacionarse con el parámetro DCP. Por otra parte, se evaluó la relación de los parámetros de plasticidad, límite líquido e índice de plasticidad, utilizados para la caracterización de los materiales, con los parámetros DCP para comprobar si existe influencia de estos parámetros en la variación de las variables en estudio.

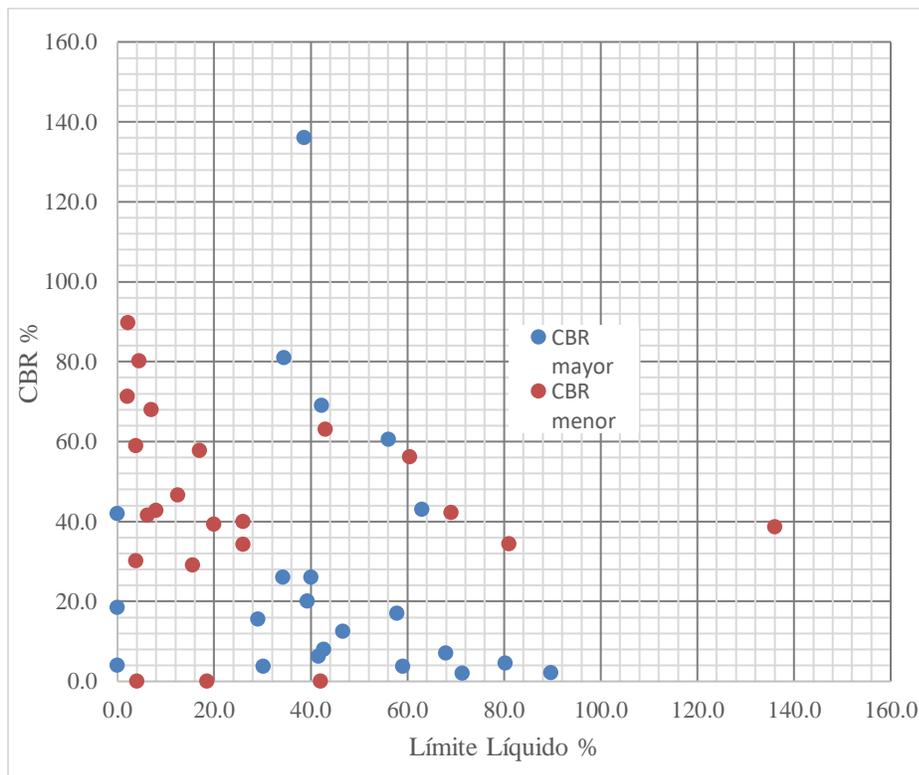
4.6.1 Relación DCP y CBR vs parámetros de plasticidad

En la Gráfica 4-1 se presenta el diagrama de dispersión de las variables DCP y límite líquido, y en la Gráfica 4-2 se presenta el diagrama de dispersión de las variables límite líquido y CBR. Del análisis de las gráficas se constató que los puntos no presentan una dispersión definida, por lo cual, ni la variable DCP puede explicar la variable límite líquido, ni la variable límite líquido puede explicar la variable CBR. Gráfica 4-3 se presenta el diagrama de dispersión de las variables DCP e índice de plasticidad, y en la Gráfica 4-4 se presenta el diagrama de dispersión de las variables índice de plasticidad y CBR. Del análisis de las gráficas, se pudo establecer que los puntos no presentan una dispersión definida, que denota que variable índice de plasticidad no puede ser explicada por la variable DCP, y que la variable CBR no puede ser explicada por la variable índice de plasticidad.

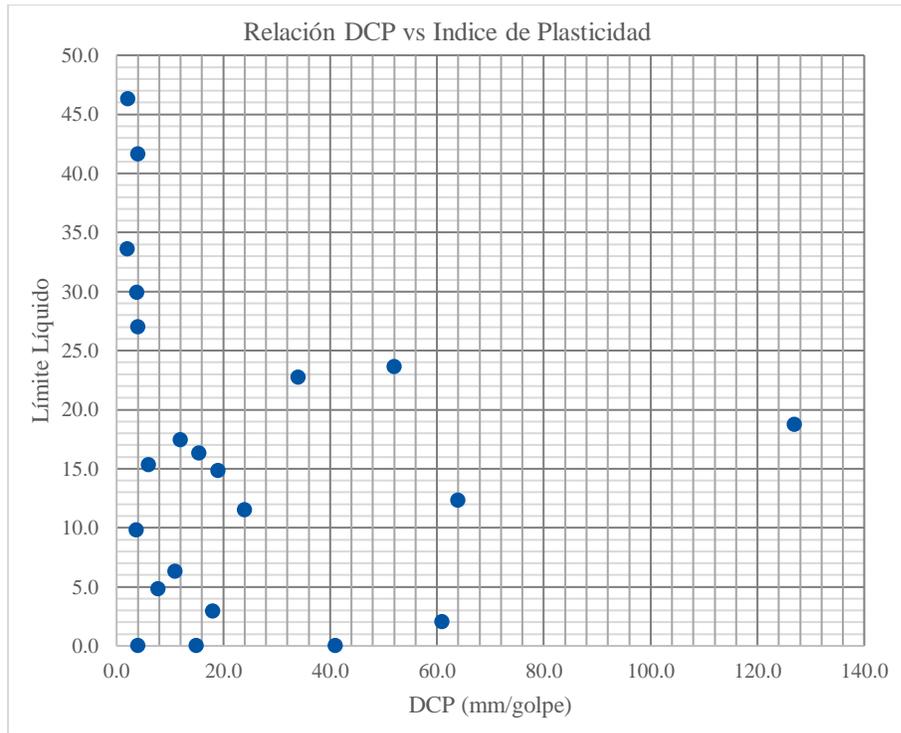
Gráfica 4-1 Relación DCP vs Límite Líquido



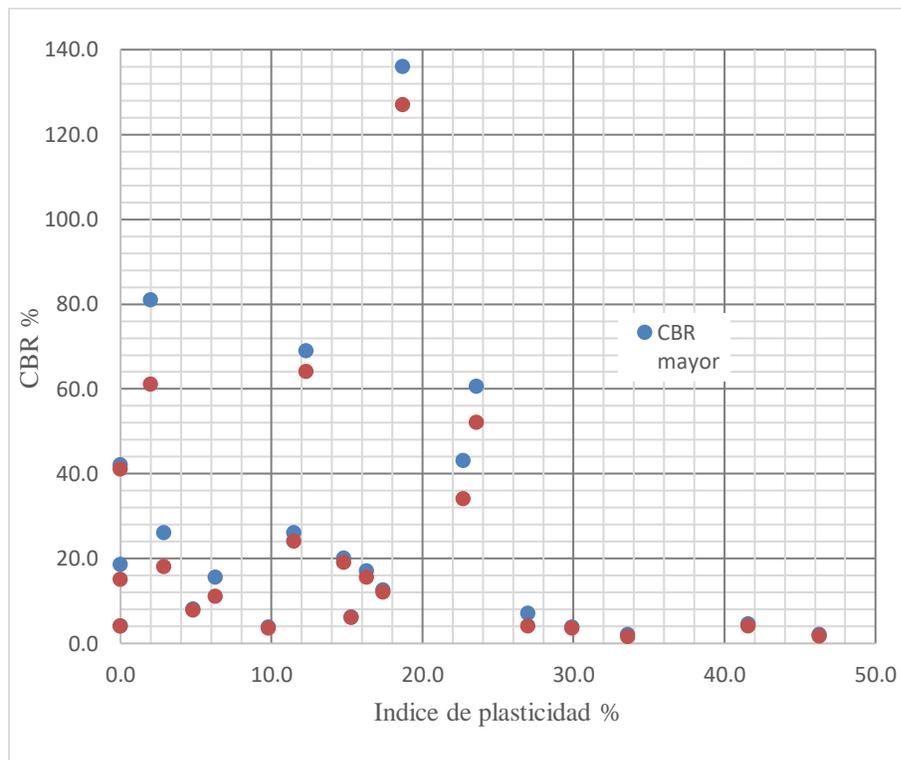
Gráfica 4-2 Relación límite líquido vs CBR



Gráfica 4-3 Relación DCP vs Índice de Plasticidad



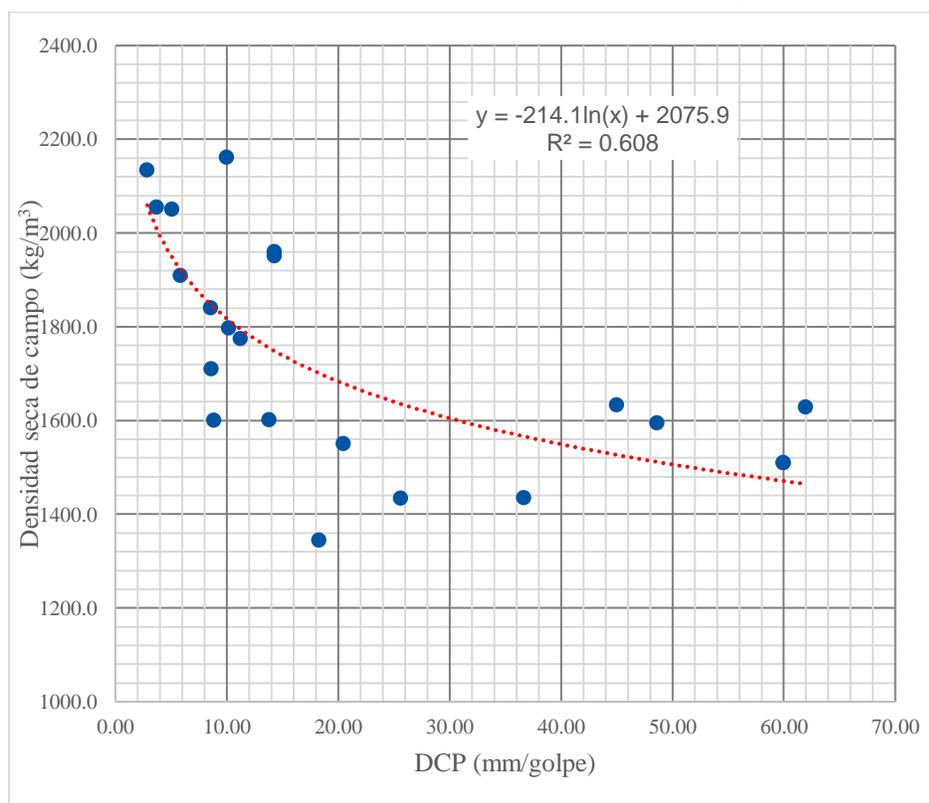
Gráfica 4-4 Relación Índice de Plasticidad vs CBR



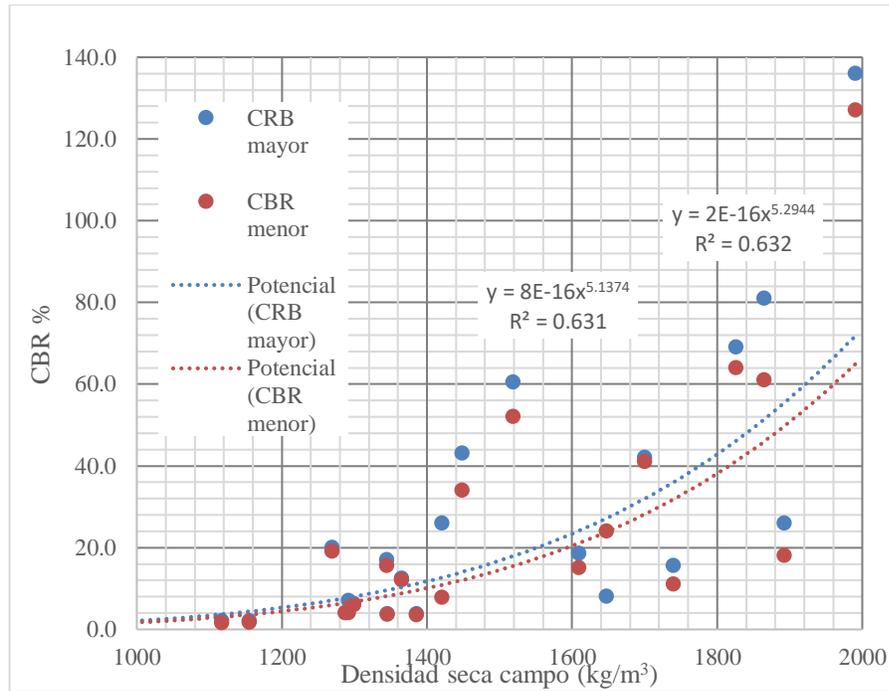
4.6.2 Relación DCP vs Densidad seca campo

En la Gráfica 4-5 se presenta el diagrama de dispersión de las variables DCP y densidad seca de campo, de la cual, se pudo observar que los puntos presentan una dispersión de tipo logarítmica natural y se determinó un coeficiente de determinación R^2 de 0.608. Entonces, con el valor obtenido de R^2 , se prevé que la variable densidad seca de campo puede ser explicada en parte por la variable DCP. En la Gráfica 4-6 se presenta el diagrama de dispersión de las variables densidad seca de campo y CBR, de la cual, se pudo observar que los puntos presentan una dispersión de tipo potencial y se determinó un coeficiente de determinación R^2 de 0.631 para la relación DCP y el grupo CBR mayor y un coeficiente de determinación R^2 de 0.632 para la relación DCP y el grupo CBR menor. Entonces, con los valores obtenidos de R^2 , se prevé que la variable densidad seca de campo puede explicar en parte a la variable CBR.

Gráfica 4-5 Relación DCP vs Densidad seca campo



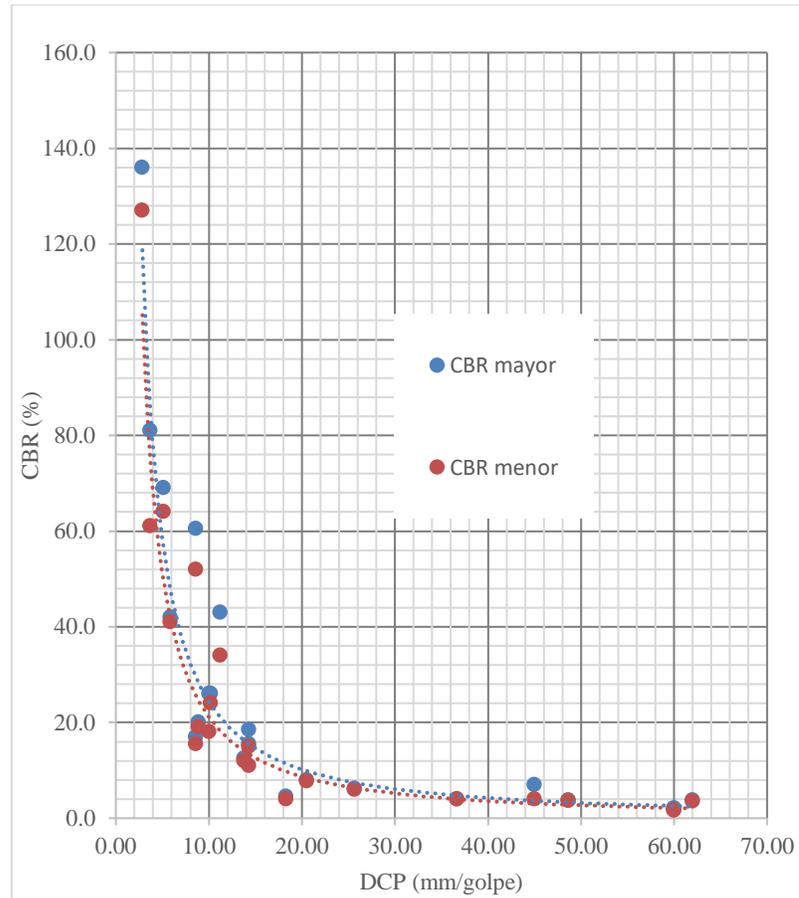
Gráfica 4-6 Relación Densidad seca campo vs CBR



4.6.3 Relación DCP vs CBR

Inicialmente en la Gráfica 4-7 se puede observar que la variación del CBR con respecto al DCP es corresponde a una regresión de tipo logarítmica. Las correlaciones entre los dos parámetros y su análisis, se exponen en la sección correspondiente.

Gráfica 4-7 Variación CBR vs DCP



4.7 Determinación de grupo de valores CBR para el estudio

Para el parámetro CBR se han obtenido dos grupos de valores clasificados como CBR mayor y CBR menor, obtenidos de las dos deformaciones analizadas 0.1" y 0.2", y se analizó que grupo de valores tienen la mejor correlación con el parámetro DCP. Se realizó un análisis de regresión lineal entre el DCP y CBR, y dado que, la dispersión que siguen las dos variables DCP y CBR es de tipo logarítmica, se parametrizó cada variable con la función logaritmo. Los resultados de los análisis se presentan en la Tabla 4-8, y se establecieron coeficientes de determinación R^2 de 0.911 para el grupo CBR menor y R^2 de 0.895 para el grupo CBR mayor. De los coeficientes de determinación R^2 obtenidos para el grupo CBR menor y CBR mayor, se puede establecer que el grupo CBR menor presenta mejor correlación con el parámetro DCP, al presentar un coeficiente de determinación R^2 mayor de 0.911, por lo tanto, se asume el grupo de valores CBR menor,

para la determinación de las correlaciones del estudio y los análisis correspondientes, por lo que, desde este punto en adelante todos los análisis se refieren al grupo de valores CBR menor.

Tabla 4-8 Estadísticas de la Regresión lineal variables log CBR vs log DCP

	<i>Estadísticas de la regresión</i>	
	CBR menor	CBR mayor
Coefficiente de correlación múltiple R	0.955	0.946
Coefficiente de determinación R ²	0.911	0.895
R ² ajustado	0.907	0.890
Error típico	0.163	0.177
Observaciones	22	22

4.8 Determinación de correlación DCP vs CBR

Para la obtención de una correlación entre los parámetros DCP y CBR, se realizó un análisis estadístico que incluyó la obtención del coeficiente de correlación R, coeficiente de determinación R², el coeficiente de determinación ajustado R²_{ajustado}, análisis de regresión multi variable, análisis de varianza, y análisis t Student. La correlación entre el DCP y el grupo de valores CBR asumido para el estudio (CBR menor) establece un coeficiente de determinación R² de 0.911, como se puede observar en la Tabla 4-8 que presenta las estadísticas de la regresión lineal. A continuación, se presentan los resultados del análisis estadístico de la regresión lineal, y el análisis de regresión completo se presenta en el anexo 4 de análisis de regresión.

Del análisis de varianza presentado en la Tabla 4-9 se obtuvo un valor de estadístico F de 204.954 y un valor crítico de F próximo a cero, con lo cual se rechaza la hipótesis nula, de que el valor de R de correlación múltiple en la población es igual a cero, y por lo tanto se comprueba que el modelo de regresión es válido.

Tabla 4-9 ANOVA de la regresión lineal variables log CBR vs log DCP

ANOVA					
	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio de los cuadrados	F	Valor crítico de F
Regresión	1	5.474	5.474	204.954	0.000
Residuos	20	0.534	0.027		
Total	21	6.009			

Del análisis t de Student presentado en la Tabla 4-10, realizado para la variable independiente y la intercepción, se determinó probabilidades próximas a cero para cada elemento evaluado, y, por lo tanto, menores a la significancia de 0.05. Con lo cual, la DCP y la intercepción, son representativas en la ecuación o correlación obtenida, y se rechaza que la hipótesis nula de que los coeficientes de la variable y la intercepción sean iguales a cero en la población.

Tabla 4-10 Análisis t Student y coeficientes de la regresión lineal múltiple variables log DCP vs log CBR

	Coefficientes	Error típico	Estadístico t	Probabilidad
Intercepción	2.605	0.111	23.374	0.0000
Log DCP	-1.280	0.089	-14.316	0.0000

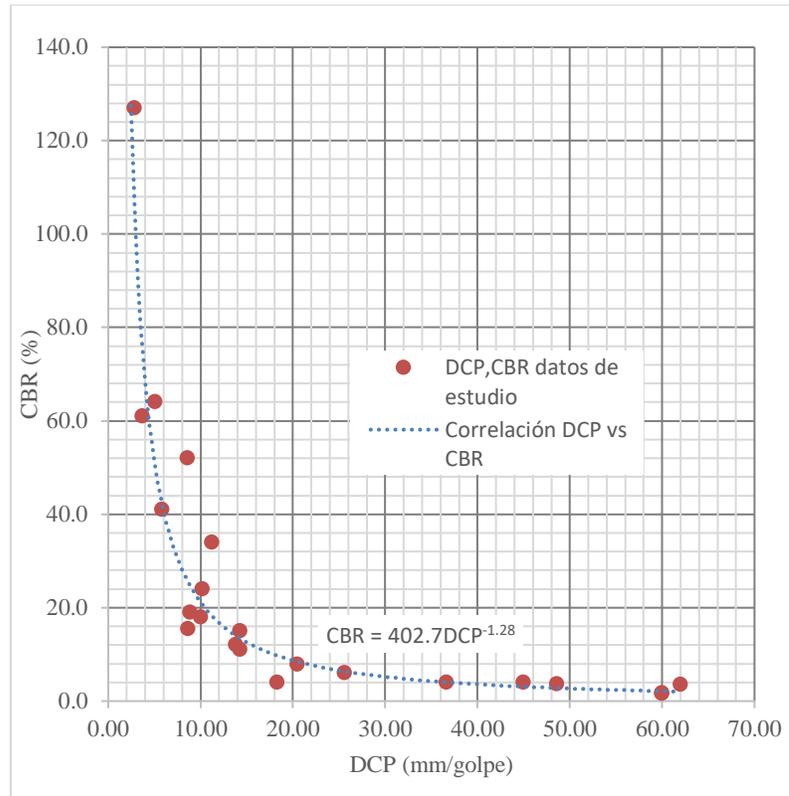
Del análisis de regresión lineal de las variables DCP y CBR se obtuvo la expresión de correlación, de la ecuación 4-1.

$$\log CBR = -1.280 \log DCP + 2.605 \quad (\text{Ecuación 4-1})$$

La ecuación 4.1 expresada sin la función logaritmo, se puede expresar como la ecuación 4-2, y cuya gráfica se presenta en la Gráfica 4-8.

$$CBR = 402.7 DCP^{-1.280} \quad (\text{Ecuación 4-2})$$

Gráfica 4-8 Ecuación de Correlación DCP vs CBR



Adicional se realiza un análisis para materiales de baja plasticidad ($LL < 50\%$) y alta plasticidad ($LL > 50\%$) para establecer con qué tipo de material se tiene una mejor estimación del CBR a partir del DCP, y se han obtenido las siguientes expresiones. El análisis completo se presenta en el anexo 4 de análisis de regresión.

Materiales alta plasticidad $LL > 50\%$ $R^2 = 0.827$:

$$\log CBR = -1.387 \log DCP + 2.750 \text{ (Ecuación 4-3)}$$

Materiales baja plasticidad $LL < 50\%$ $R^2 = 0.961$:

$$\log CBR = -1.215 \log DCP + 2.538 \text{ (Ecuación 4-4)}$$

Las ecuaciones 4.3 y 4.4 expresadas sin la función logaritmo, se puede expresar como las ecuaciones 4-5 y 4.6, respectivamente y cuyas gráficas se presentan en la Gráfica 4-9.

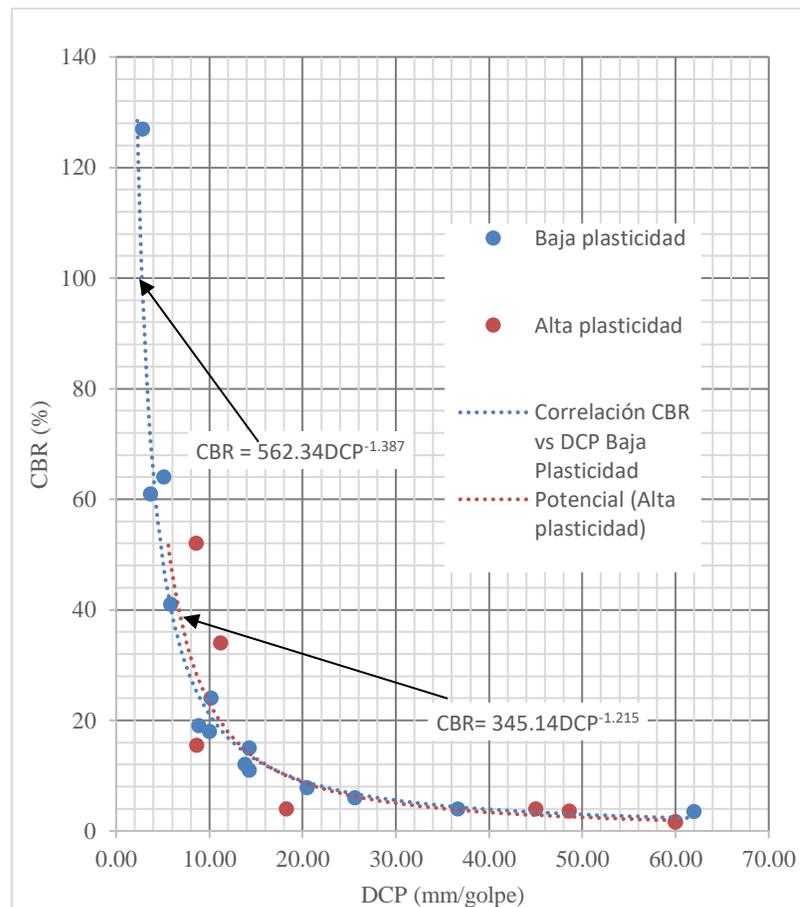
Materiales alta plasticidad $LL > 50\%$

$$CBR = 562.34DCP^{-1.387} \quad (\text{Ecuación 4-5})$$

Materiales baja plasticidad $LL < 50\%$

$$CBR = 345.14DCP^{-1.215} \quad (\text{Ecuación 4-6})$$

Gráfica 4-9 Ecuación de Correlación DCP vs CBR, alta plasticidad y baja plasticidad



4.9 Determinación de correlación DCP y densidad seca de campo vs CBR

Se determinó con anterioridad que la variable densidad seca de campo, explica parte de la variable CBR y parte de la variable DCP, por lo cual, se percibió que la variable densidad de campo ayudaría a explicar la variable CBR en conjunto con la variable DCP. Se realizó un análisis de regresión lineal multivariable de las variables CBR, DCP y

densidad seca de campo, parametrizando cada variable con la función logaritmo. Los resultados del análisis se presentan en la Tabla 4-11, y se determinó un coeficiente de determinación R^2 ajustado de 0.930, con el cual, se estableció que las variables independientes DCP y densidad seca explican la variación de la variable dependiente CBR, mediante una curva de correlación logarítmica en un 93.0%. El análisis completo se presenta en el anexo 4 de análisis de regresión.

Tabla 4-11 Regresión lineal múltiple variables log CBR vs log DCP y logaritmo de densidad seca de campo

Estadísticas de la regresión	
Coeficiente de correlación múltiple	0.968
Coeficiente de determinación R^2	0.937
R^2 ajustado	0.930
Error típico	0.142
Datos	22

Del análisis de varianza presentado en la Tabla 4-12, se obtuvo un valor de estadístico F de 140.304 y un valor crítico de F próximo a cero, con lo cual se rechaza la hipótesis nula, de que el valor de R de correlación múltiple en la población es igual a cero, y por lo tanto se comprueba que el modelo de regresión es válido.

Tabla 4-12 Resultados del análisis ANOVA de la regresión lineal múltiple variables log CBR vs log DCP y logaritmo de densidad seca de campo

ANOVA					
	<i>Grados de libertad</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Valor crítico de F</i>
Regresión	2	5.68	2.814	140.304	0.0000
Residuos	19	0.381	0.020		
Total	21	6.009			

Del análisis t de Student presentado en la Tabla 4-13, realizado para cada variable independiente, se ha determinado que, las probabilidades obtenidas para las variables densidad seca de campo y la variable independiente DCP son próximas a cero, por lo tanto, menores a la significancia de 0.05. Con lo cual, la variable densidad seca de campo y DCP, son representativas en la ecuación o correlación obtenida, y se rechaza que la hipótesis nula de que los coeficientes de las variables sean iguales a cero en la población. Sin embargo, para la intercepción la probabilidad obtenida 0.195 es mayor al grado de significancia de 0.05, por lo cual el coeficiente no es representativo y no será considerado en la ecuación de correlación.

Tabla 4-13 Resultados del análisis *t* Student y coeficientes de la regresión lineal múltiple variables *log CBR* vs *log DCP* y *logaritmo de densidad seca de campo*

	<i>Coefficientes</i>	<i>Error típico</i>	<i>Estadístico t</i>	<i>Probabilidad</i>
Intercepción	-2.476	1.841	-1.345	0.195
Log DCP	-1.059	0.111	-9.532	0.000
Log γ_d	1.524	0.552	2.764	0.012

Del análisis de regresión lineal múltiple de las variables DCP y densidad seca de campo se obtuvo la siguiente expresión de correlación:

$$\log CBR = -1.059 \log DCP + 1.524 \log \gamma_d \quad (\text{Ecuación 4-7})$$

Adicional se realiza un análisis para materiales de baja plasticidad ($LL < 50\%$) y alta plasticidad ($LL > 50\%$) para establecer con qué tipo de material se tiene una mejor estimación del CBR a partir del DCP y densidad seca de campo. Se obtuvo la ecuación 4.8 para materiales de alta plasticidad, y para los materiales de baja plasticidad no se encontró una ecuación válida, al no presentar significancia los coeficientes de la correlación obtenida. El análisis completo se presenta en el anexo 4 de análisis de regresión.

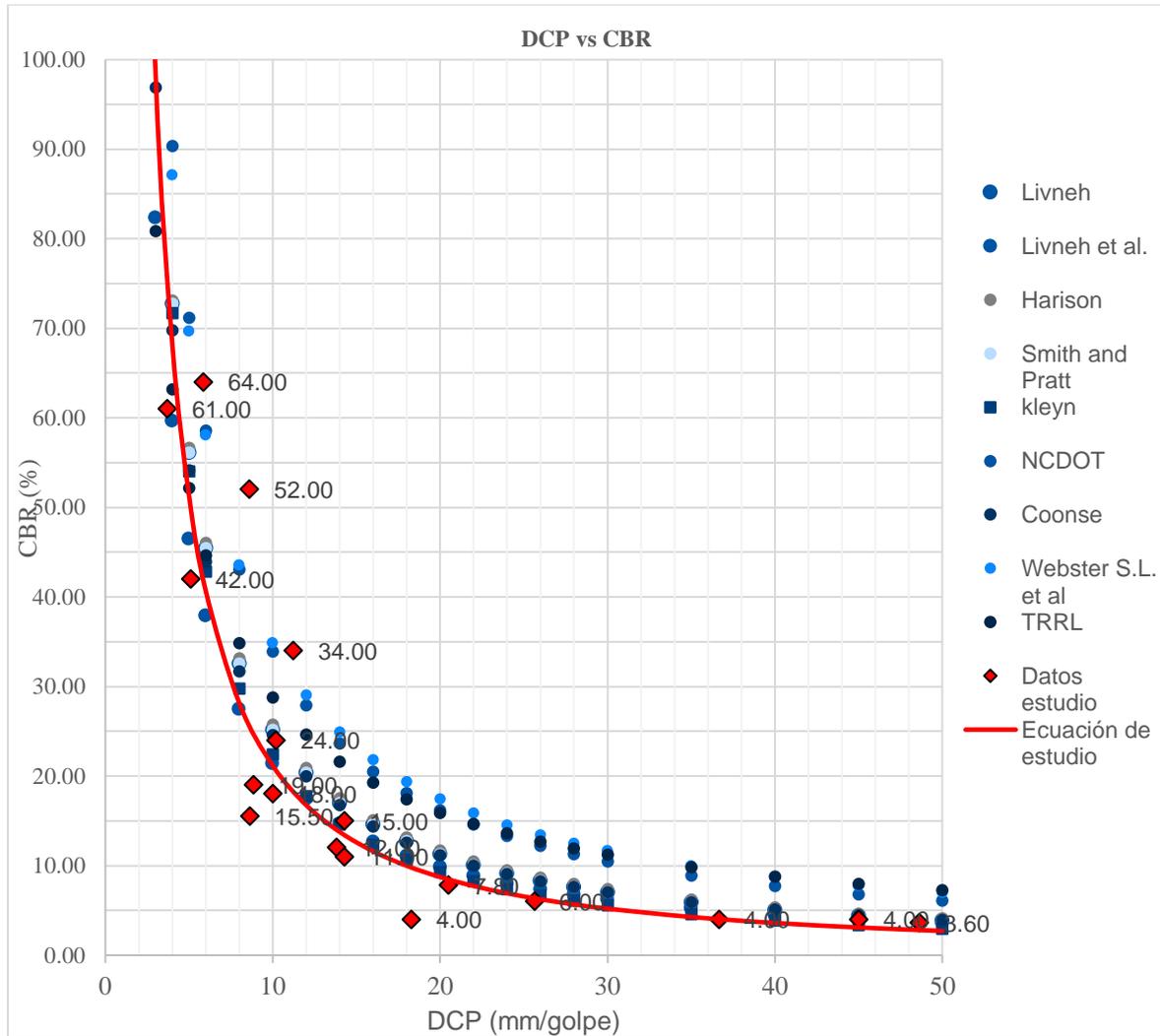
Materiales alta plasticidad $LL > 50\%$ $R^2 = 0.952$:

$$\log CBR = -9.806 - 1.075 \log DCP + 3.909 \log \gamma_d \quad (\text{Ecuación 4-8})$$

4.10 Validación de correlación DCP vs CBR

Se realizó la validación de la ecuación determinada para la relación DCP vs CBR, la ecuación 4.1. Se comparó la curva de la correlación obtenida en el presente estudio, con las dispersiones que presentan las distintas correlaciones encontradas en la literatura especializada y citadas en la sección 1.1.3 en la Tabla 2-1. Como se puede observar en la Gráfica 4-10, la ecuación 4.1 representada por la línea roja, tiene una tendencia o dispersión semejante a la que presentan las correlaciones desarrolladas por varios autores, con lo cual, se puede establecer que, la ecuación obtenida es válida y mantiene el comportamiento de la mayoría de correlaciones obtenidas para la relación CBR y DCP.

Gráfica 4-10 Validación de correlación DCP vs CBR



5 CONCLUSIONES

En función del estudio ejecutado, se exponen las siguientes conclusiones:

- El área de estudio se localizó al sur del Ecuador en el noreste del cantón Cuenca, en el sector conocido como Challuabamba, que enmarca las parroquias de Nulti, Llaqueo, y Machángara. Se seleccionó esta zona como área de estudio, dado que, corresponde a una zona de gran expansión urbanística y el desarrollo de infraestructura vial es primordial, porque se asienta sobre 7 de las 21 unidades geológicas determinadas dentro del cantón Cuenca, y porque aproximadamente el 80% de sus vías están sin pavimentar, lo cual facilitó la exploración del terreno.
- Desde el punto de vista geológico la zona de Challuabamba se asienta sobre depósitos aluviales, depósitos coluviales, terrazas aluviales y fluvio-glaciares nivel 1 y 2, volcánicos de Llaqueo, formación Azogues, formación Loyola, y formación Biblián. De las formaciones determinadas, las dominantes son la formación Loyola (ML) que ocupa el 34.46% de la superficie, seguido de la terraza aluvial fluvio-glaciario nivel 2 (Qt2) con el 19.72%, sumando entre las dos 54.18% del área total, y sobre estas se desarrolla principalmente la expansión urbanística de Challuabamba, por lo tanto, la mayor parte de la red vial se asienta sobre estas formaciones. La litología de las formaciones dominante es principalmente de tipo fina, incluso de las terrazas aluviales y fluvio-glaciares que, si bien se caracterizan como conglomerados, localmente se observa un suelo de cobertura, caracterizado como una arcilla de color negro con una potencia de al menos 1.50 m, y en algunos casos de alta plasticidad.
- La exploración geotécnica incluyó la excavación de calicatas a cielo abierto de al menos 0.50 m de profundidad, para la descripción del perfil estratigráfico, la ejecución de ensayos DCP y densímetro nuclear, y la extracción de muestras para ensayos de CBR, clasificación de suelos y humedad natural en laboratorio. Se ejecutaron un total de 18 calicatas, todas en calles secundarias tipo II y III, y con superficie de rodadura de lastre. Las mediciones en campo se realizaron entre los

meses de marzo y agosto, que presentan una precipitación máxima en el mes de marzo de 190 mm (mes con más lluvia) y una precipitación mínima en el mes de agosto de 63 mm (mes más seco), resultando en un promedio mensual en los meses de medición de 117 mm.

- De acuerdo con la clasificación SUCS, se determinaron 14 suelos con baja plasticidad (SM, ML, GP-GC, SC, GP-GM, GW-GM) y 8 suelos con alta plasticidad (SM, CH, MH). Así mismo, de acuerdo con la gradación que presentaron los suelos analizados, se determinaron 4 suelos como gravas (GP-GC, GP-GM, GW-GM), 13 suelos como arenas con finos (SM, SC), y 5 suelos como netamente finos (CH, MH, ML). De acuerdo con la clasificación AASHTO, se caracterizaron 12 suelos como subrasante de buena calidad, y 10 suelos como subrasante de mala calidad. Las subrasantes de mala calidad en su mayoría coincidieron con los suelos de alta plasticidad, pero, existieron casos de suelos de baja plasticidad que también entraron en esta calificación. El estudio incluyó diversidad de tipos de material desde arcillas de alta plasticidad clasificada según SUCS como CH hasta gravas limosas bien graduadas según SUCS como GW-GM.
- Para el estudio se obtuvieron dos valores CBR para cada muestra, correspondientes a las deformaciones de 0.1" y 0.2", y se los clasificó en dos grupos, CBR mayor y CBR menor, según su magnitud. De acuerdo con un análisis de regresión se determinó que el grupo que mayor correlación mantiene con el parámetro DCP, es el CBR menor, y fue asumido y para los análisis correspondientes y determinación de correlaciones con la variable DCP. El grupo de valores CBR asumido en el estudio presentó una media de 24.1% y una mediana a 13.5%. Sus valores oscilaron en un rango de 1.6% para un suelo de alta plasticidad MH con una clasificación de subrasante regular a mala, y 127.0% para un suelo de baja plasticidad compactado y conformado como capa de rodadura, con una clasificación de subrasante excelente a buena. Por tipo de suelo, los de baja plasticidad presentaron valores de CBR entre 3.5% y 127.0% con una media de 29.5% y una mediana de 16.5%, y los de alta plasticidad valores

de CBR entre 1.6% y 52.0% con una media de 14.6% y una mediana de 4.0%. Del análisis de las medianas se constató que, para el presente estudio los materiales de baja plasticidad presentaron mayor capacidad de soporte al reportar una mediana mayor con un valor CBR de 16.5%. Sin embargo, existen valores altos de CBR, 52.0%, dentro de los suelos de alta plasticidad, por lo que, se puede concluir que el CBR obtenido con las condiciones de campo es independiente del tipo de suelo, fino o granular, plástico o no plástico, y depende principalmente del grado de consistencia o compacidad que tenga en campo el suelo o material analizado. Lo señalado se puede constatar en los resultados del análisis de localización de los CBR, donde se detalla que los mayores valores se presentan en las zonas altas de las laderas donde la degradación del material es mínima, y por lo tanto la compacidad o consistencia del material es alta.

- Los valores DCP obtenidos en el estudio variaron entre 62.00 mm/golpe para el suelo más blando, que es suelo areno arcilloso de baja plasticidad, con una clasificación de subrasante de regular a mala; y 2.86 mm/golpe que corresponde a una capa de rodadura caracterizada como un suelo de granular de baja plasticidad, con una clasificación de subrasante de excelente a buena. Por tipo de suelo, los de baja plasticidad variaron entre 2.86 mm/golpe y 62.00 mm/golpe con una media de 16.46 mm/golpe y una mediana de 12.01 mm/golpe; y los de alta plasticidad entre 8.59 mm/golpe y 60.00 mm/golpe con una media de 32.54 mm/golpe y una mediana de 31.64 mm/golpe. De la comparación de las medianas de los dos tipos de materiales, se pudo constatar que, para el presente estudio los materiales de baja plasticidad se presentaron más rígidos con un valor menor de DCP 2.86 mm/golpe, sin embargo, tanto en suelos de baja plasticidad como de alta plasticidad se determinaron valores DCP altos próximos a 60 mm/golpe, que corresponde a suelos poco rígidos; por lo cual, se pudo establecer que de igual manera que el CBR el valor DCP es independiente del tipo de suelo, y más bien depende del grado de consistencia o compacidad que tenga en campo el suelo o material analizado.

- Se ejecutó un análisis estadístico de las distintas variables obtenidas en el estudio, DCP, CBR, límites de consistencia (LL y LP), y densidad seca de campo. Dentro del estudio, se estableció si dichos parámetros pueden mejorar el grado de estimación del parámetro CBR a partir del DCP o mejorar la fuerza de relación entre las variables estudiadas. Según un análisis de dispersión realizado, los parámetros DCP y CBR, no presentaron una relación importante con los parámetros límite líquido e índice de plasticidad. Para el caso de la densidad seca de campo, sí presentó una relación con el DCP y CBR, y para los tres parámetros se realizó una regresión de tipo logarítmica.
- De los resultados de análisis de regresión lineal simple de la relación CBR y DCP se obtuvo un R^2 de 0.911, por lo que, la variable independiente DCP explica la variación de la variable dependiente CBR, mediante una curva de correlación con un 91.1%, y donde se cumplió la prueba de hipótesis del análisis t de Student para los coeficientes de la correlación y la prueba de hipótesis del ANOVA para el modelo de regresión. Del análisis se obtuvo la correlación **$\log \text{ CBR} = -1.280 \times \log \text{ DCP} + 2.605$** . Adicional del análisis para materiales de baja plasticidad ($LL < 50\%$) se obtuvo la correlación **$\log \text{ CBR} = -1.215 \times \log \text{ DCP} + 2.538$** con un R^2 de 0.961 y para materiales de alta plasticidad ($LL > 50\%$) la correlación **$\log \text{ CBR} = -1.387 \times \log \text{ DCP} + 2.750$** con un R^2 de 0.827. De los R^2 obtenidos por cada tipo de material, se pudo establecer que, para los datos obtenidos en el estudio, la correlación DCP vs CBR se ajusta mejor para los materiales de baja plasticidad donde con coeficiente de determinación R^2 de 0.961.
- Para la relación CBR, DCP y densidad seca de campo, se realizó un análisis de regresión lineal múltiple, del cual, se obtuvo un R^2 ajustado de 0.930, cumpliendo las pruebas t Student para los coeficientes y ANOVA para el modelo de regresión. Con lo cual se concluye que las variables independientes DCP y densidad seca de campo, explican la variable dependiente CBR, con una curva de correlación en un 93.0%, que es un mayor porcentaje que el explicado solo por la variable independiente DCP, 91.1%. Del análisis se obtuvo la correlación **$\log \text{ CBR} = -1.059$**

$x \log DCP + 1.524 \log \gamma_d$. Adicional, del análisis por tipo de materiales se obtuvo la correlación $\log CBR = -9.806 - 1.075 x \log DCP + 3.909 \log \gamma_d$ para el tipo de materiales plásticos, mientras que, para los materiales no plásticos no se determinó una correlación con coeficientes significativos, o que ayuden a explicar la variable dependiente CBR.

- La ecuación obtenida tiene una tendencia o dispersión semejante a las correlaciones desarrolladas por otros autores en distintos países y con distintas metodologías de investigación, con lo cual, se puede establecer que, la ecuación obtenida es válida y mantiene el comportamiento de la mayoría de correlaciones obtenidas para la relación CBR y DCP.

6 RECOMENDACIONES

- Para próximos trabajos de investigación de correlaciones entre el DCP y CBR, se recomienda explorar otras zonas de expansión que se están generando en la ciudad de Cuenca, sectores como Racar, Río Amarillo, Misicata, Baguanchi, entre otros. En conjunto con los datos obtenidos en el presente estudio, se podría mejorar el coeficiente de determinación R^2 obtenido de 0.907 para la correlación DCP y CBR para los suelos de Cuenca. Además, se puede plantear un estudio más extenso, donde se incluyan todas las formaciones geológicas presentes en el cantón Cuenca, que puede complementarse con las exploradas para el presente caso.
- Teóricamente se plantea que existe un efecto de la saturación del ensayo de CBR de laboratorio sobre todo en suelos de tipo fino, con lo cual, se subestima la determinación del valor CBR. Se puede plantear un estudio para obtener la relación del parámetro DCP con el CBR obtenido con las condiciones de campo, y con el CBR de laboratorio, ambos aplicados a la misma muestra de suelo, para establecer el efecto de la saturación en los distintos tipos de suelos. Además, se podría profundizar el estudio análisis de materiales de tipo fino, para mejorar la correlación estimada en el presente estudio y el coeficiente de determinación R^2 determinado.
- Se puede considerar un estudio para un mismo tipo de suelo, sea fino o granular, de alta o baja plasticidad, pero con la variación de la profundidad de análisis, es decir, para cada exploración tomar tres o cuatro medidas hasta alcanzar a la profundidad de influencia de la carga vehicular de 1.50 m.

REFERENCIAS

- AASHTO. (1991). *AASHTO M 145 Standard Specification for Classification of Soils and Soil–Aggregate Mixtures for Highway Construction Purposes*.
- Al-Refeai, T., & Al-Suhaibani, A. (1997). Prediction of CBR Using Dynamic Cone Penetrometer. *Journal of King Saud University - Engineering Sciences*.
[https://doi.org/10.1016/S1018-3639\(18\)30676-7](https://doi.org/10.1016/S1018-3639(18)30676-7)
- ASTM. (2003). ASTM D6951-03 Standard Test Method for Use of the Dynamic Cone Penetrometer in Shallow Pavement Applications. In *ASTM Standard Guide*.
- ASTM. (2005). ASTM D4318-05 Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils. In *ASTM Standard Guide*.
- ASTM. (2007). ASTM D1557-07 Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Modified Effort (56,000 ft-lbf/ft³ (2,700 kN-m/m^{3ASTM Standard Guide.}
- ASTM. (2010). ASTM D2216-10 Standard Test Methods for Laboratory Determination of Water (Moisture) Content of Soil and Rock by Mass. In *ASTM Standard Guide*.
- ASTM. (2012). ASTM D698-12 Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort (12 400 ft-lbf/ft³ (600 kN-m/m^{3ASTM Standard Guide.}
- ASTM. (2017a). ASTM D2487 Standard method for classification of soils for engineering purposes. In *ASTM Standard Guide* (pp. 309–313).
- ASTM. (2017b). *D 6938: Standard Test Method for In-Place Density and Water Content of Soil and Soil- Aggregate by Nuclear Methods (Shallow Depth)1*.

- ASTM. (2018). ASTM D4429-18 Standard Test Method for CBR (California Bearing Ratio) of Soils in Place. *ASTM Standard Guide*. <https://doi.org/10.1520/D4429-09A>
- ASTM. (2021). ASTM D1883-21 Standard Test Method for CBR (California Bearing Ratio) of Laboratory-Compacted Soils. In *ASTM Standard Guide* (Vol. 04).
- Basabe, P., & CSS, C. S. de socorro en caso de desastres. (1998). *Proyecto PRECUPA Prevención de Desastres Naturales en la Cuenca del Paute*.
- Chukka, D., & Chakravarthi, V. K. (2012). Evaluation of Properties of Soil Subgrade Using Dynamic Cone Penetration Index – A Case Study. *International Journal of Engineering Research and Development*.
- Climate-Data.Org. (2021). *Cima Cuenca Ecuador*. <https://es.climate-data.org/america-del-sur/ecuador/provincia-del-azuay/cuenca-875185/>
- Coonse, J. (1999). *Estimating California bearing ratio of cohesive piedmont residual soil using the Scala dynamic cone penetrometre*. North Carolina State University.
- ELE International. (2021). <https://www.ele.com/>. Compaction and CBR Test Equipment.
- ESRI, HERE, Garmin, OpenStreetMap, & Community, G. user. (2021). *World Boundaries and Places*.
- Gabr, M. A., Hopkins, K., Coonse, J., & Hearne, T. (2000). DCP criteria for performance evaluation of pavement layers. *Journal of Performance of Constructed Facilities*. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0887-3828\(2000\)14:4\(141\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0887-3828(2000)14:4(141))
- Harison, J. A. (1987). Technical note. Correlation between California Bearing Ratio and Dynamic Cone Penetrometer strength measurement of soils. Technical note 463. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*, 83(4), 833–844. <https://doi.org/10.1680/iicep.1987.204>

- Kleyn, E. G., Department, T. (South A. R., & Branch, T. R. D. M. (1975). *The Use of the Dynamic Cone Penetrometer (DCP)*. Transvaal Provincial Administration.
- Livneh, M. (2000). Friction correction equation for the dynamic cone penetrometer in subsoil strength testing. *Transportation Research Record*.
<https://doi.org/10.3141/1714-12>
- Livneh, Moshe. (1989). Validation of correlations between a number of penetration tests and in situ California bearing ratio tests. *Transportation Research Record*, 1219, 56–67.
- Livneh, Moshe, Ishai, I., & Livneh, N. A. (1995). Effect of vertical confinement on dynamic cone penetrometer strength values in pavement and subgrade evaluations. *Transportation Research Record*, 1473, 1–8.
- Lutenegger, A. (2021). *In Situ Testing Methods in Geotechnical Engineering*.
<https://doi.org/10.1201/9781003002017>
- Montejo Fonseca, A. (2002). *Ingeniería de Pavimentos para Carreteras*.
- MOP. (2002). *Especificaciones Generales para la Construcción de Caminos y Puentes*.
- MOP, & T.A.M.S. - ASTEC. (2003). *Normas de Diseño Geométrico de Carreteras - 2003*.
- North Carolina Department of Transportation. (1998). *Pavement condition survey manual*.
- Smith, R. B., & Pratt, D. N. (1983). Field Study of in situ California Bearing Ratio and Dynamic Cone Penetrometer Testing for road subgrade investigations. *Australian Road Research*, 13(4), 285–294.
- Triola, M. F. (2018). *Estadística (Decimosegunda)*. Pearson.
- TRRL. (1986). Operating Instruction for the TRL Dynamic Cone Penetrometer, Overseas

Center. In *Transport and road research laboratory*.

Webster, S. L. (1994). Force Projection Site Evaluation Using the Electric Cone Penetrometer (ECP) and the Dynamic Cone Penetrometer (DCP)" Technical Report GL-94-17. Vicksburg, MS: US Army Waterways Experiment Station.

Yoder, E. J. (Eldon J. (1975). *Principles of pavement design* / E. J. Yoder, M. W. Witczak (M. W. Witczak (ed.)). Wiley.

ANEXOS

Anexo 1: Monografía de calicatas

Anexo 2: Ensayos de laboratorio

Anexo 2.1: Reporte ensayos de clasificación de suelos

Anexo 2.2: Reporte ensayos CBR

Anexo 3: Ensayos de campo

Anexo 3.1: Reporte ensayos DCP

Anexo 3.2: Reporte ensayos densidad de campo

Anexo 4: Análisis de regresión

Anexo 5: Fotográfico