

ESTIMACION DEL VALOR DE CBR USANDO PENETROMETRO DE CONO DINAMICO

ESTIMATION OF CBR VALUE USING DYNAMIC CONE PENETROMETER

C.H. Florez G.¹ F. A. Torres C.² F. A Torres P.³ C.A. Peña S.⁴

¹Investigador. Grupo de Investigación en Geotecnia Ambiental, GIGA. . Departamento de Geotecnia y Minería. Universidad Francisco de Paula Santander, San José de Cúcuta, Colombia. carloshumbertofg@ufps.edu.co.

² Co-Investigador. Grupo de Investigación en Geotecnia Ambiental, GIGA. Departamento de Geotecnia y Minería, Universidad Francisco de Paula Santander, San José de Cúcuta, Colombia. ingfabioandrestorres@gmail.com.

³Co-Investigador. Geotechnics Arauca Laboratorio de suelos. geotechnicsarauca@gmail.com.

⁴Co-Investigador. Departamento de Construcciones Civiles Vías y Transportes. Universidad Francisco de Paula Santander. San José de Cúcuta. carlosalbertops@ufps.edu.co

RESUMEN

Este trabajo permitió estimar una nueva correlación entre datos del ensayo de Relación de Soporte de California (CBR, por su sigla en inglés) y el ensayo de Penetración de Cono Dinámico (DCP, por su sigla en inglés) para suelos finos saturados. En base a los resultados obtenidos se aplicó un método estadístico de regresión. Se obtuvo para la base de datos filtrados entre los valores del ensayo CBR y los valores del ensayo DCP una desviación estándar de 0.18, una correlación de 0.93 y un valor de coeficiente de determinación de 0.86. Adicionalmente, se realizó la comparación entre los valores calculados para espesores de bases y subbase de la estructura de un pavimento utilizando la correlación encontrada en este trabajo y un conjunto de correlaciones de otros autores, encontrándose diferencias aproximadas de 300%. Lo que permitió inferir que, la correlación hallada en este trabajo entre el CBR y el DCP ajusta los valores de CBR proporcionando espesores de estructuras de pavimento más robustos, acorde a las condiciones hidrogeológicas y geotécnicas del área estudiada, lo cual permitiría su uso para el diseño de estructuras de pavimento en suelos bajo condiciones similares.

PALABRAS CLAVE: CBR, DCP.

ABSTRACT

This work allowed to estimating a new correlation between test data California Bearing Ratio (CBR) and testing of Dynamic Cone Penetration (DCP) for fine saturated soils. Based on the results obtained a statistical regression method was applied. It was obtained for the database filtered between CBR test values and test values DCP a standard deviation of 0.18, a correlation of 0.93 and a value of coefficient of determination was 0.86. Additionally, comparison between the calculated values for base and subbase thickness of a floor structure using the correlation found in this work and a set of correlations of other authors, finding differences approximate 300%. This allowed infer that, the correlation found in this study between the CBR and DCP adjusts the values of CBR providing thicknesses of structures more robust pavement, according to the hydrogeological and geotechnical conditions of the study area, which would allow its use for design of pavement structures in soils under similar conditions.

KEY WORDS: CBR, DCP.

INTRODUCCIÓN

El parámetro más importante para evaluar la resistencia del suelo, la base y subbase para el diseño de una estructura de pavimento es el valor de CBR. El ensayo de CBR fue propuesto en 1929 por los ingenieros T. E. Stanton y O. J. Porter del Departamento de Carreteras de California en los Estados Unidos de América. Desde esa fecha tanto en Europa como en América, el ensayo CBR se ha generalizado y es una forma de clasificación de un suelo para ser utilizado como subrasante o material de base en la construcción de carreteras (Chang, 2016). De otro lado, en la Alemania de finales del siglo XVII se encontró un dispositivo de prueba muy similar al DCP actual y solo hasta 1964 se normatiza el ensayo bajo la norma DIN 4094. En los Estados Unidos hasta la década de los 90 el DCP se comenzó a utilizar para el diseño de carreteras por el Minnesota Department of Transportation Office of Materials Research and Engineering (Min/ROAD). El DCP es económico, portátil y simple de usar (Burmhan, 1993).

Los diseños de estructuras de pavimentos para carreteras en el mundo, utilizan correlaciones para determinar el valor del CBR según los resultados del ensayo DCP. Diversos investigadores han sugerido diferentes correlaciones entre el DCP (mm/golpes) y los valores de CBR. Por ejemplo, la ecuación (1) establecida para más de 2000 muestras ofrece una correlación para diferentes tipos de suelo (Kleyn, 1975).

$$\text{Log CBR} = 2.62 - 1.27 \log(\text{DCP}) \quad (1)$$

Basado en un estudio en campo, (Smith-Pratt, 1983) sugirió la siguiente correlación dada en la ecuación (2).

$$\text{Log CBR} = 2.56 - 1.15 \log(\text{DCP}) \quad (2)$$

La ecuación (3) esta sugerida para suelos arcillosos con $\text{DCP} > 10$ (mm/golpes) (Harrison, 1986)

$$\text{Log CBR} = 2.56 - 1.16 \log(\text{DCP}) \quad (3)$$

Una ecuación adoptada por varios investigadores e ingenieros a nivel internacional en trabajos de diseño de carreteras es la ecuación (4), conocida como la correlación del U.S. Corps of Engineering (Webster, 1992) la cual sirve para un amplio rango de materiales granulares.

$$\text{Log CBR} = 2.465 - 1.12 \log(\text{DCP}) \quad (4)$$

En Colombia, diversas instituciones han desarrollado, también, correlaciones entre CBR y DCP (Lacera T, 2006). La Corporación para la Investigación y Desarrollo en Asfaltos en el Sector Transporte e Industrial (Corasfaltos, 2004) sugiere la correlación presentada en la ecuación (5):

$$\text{Log}(CBR) = 2.05 - 0.7708(\text{Log}(DCP)) \quad (5)$$

La Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia (UPTC, 2006) obtuvo la correlación de la ecuación (6):

$$\text{Log}(CBR) = 1.284 - 0.62(\text{Log}(DCP)) \quad (6)$$

La Universidad del Cauca (UC, 2008) estableció la correlación de la ecuación (7)

$$\text{Log}(CBR) = 2.27 - 0.8728(\text{Log}(DCP)) \quad (7)$$

Y la Universidad de Nariño (UN, 2009) establece la correlación de la ecuación (8).

$$\text{Log}(CBR) = 2.18 - 0.9342(\text{Log}(DCP)) \quad (8)$$

Las correlaciones (1) a (8) son resultado de las condiciones geotécnicas particulares sobre las cuales se establecen los ensayos de CBR y DCP.

Este trabajo responde a la necesidad de encontrar una correlación entre CBR y DCP para suelos cuyas condiciones geotécnicas se asimilan a la de suelos saturados. Un suelo se encuentra totalmente saturado cuando todos sus vacíos están ocupados por agua. Los suelos de la zona de estudio presentan una característica particular, encontrándose en estado saturado en virtud de las condiciones hidrogeológicas, suelos finos con niveles freáticos altos la mayor parte del año.

METODOLOGIA

La metodología utilizada en este trabajo es de tipo correlacional. Los estudios correlacionales tienen como propósito evaluar la relación que existe entre dos o más conceptos, categorías o variables (Cortes, C.M. e Iglesias, L.M., 2004) y en este trabajo se buscó la correlación existente entre los datos del ensayo CBR sumergido y el ensayo DCP en un suelo saturado. Se definió un área de estudio y sobre ella se establecieron los rasgos fundamentales de aspectos hidrogeológicos y geomorfológicos complementados con una campaña de caracterización geotécnica a partir de pruebas físicas a la unidad de suelo superficial en puntos debidamente referenciados del área de estudio. En los puntos seleccionados se practicaron los ensayos de CBR normal, CBR sumergido y DCP, los cuales proveyeron los datos para el análisis estadístico de regresión.

Área de estudio

Este trabajo experimentalmente se desarrolló en el municipio de Arauca (Colombia), localizado dentro de las planicies inundables del Río Arauca y sus tributarios. El municipio de Arauca se encuentra aproximadamente en las coordenadas geográficas $7^{\circ} 05'13.63''N$ y $70^{\circ} 45'29.61''O$. sobre una cuenca subandina situada entre el escudo Precámbrico de la Guayana al este y la Cordillera Oriental hacia el oeste (Villegas et al., 1994). En el área se presenta una temperatura promedio anual de $29^{\circ}C$, humedad relativa promedio de 77%. La precipitación total con una media anual de 1804 mm (Ideam, 2015). El período de lluvias se extiende entre los meses de

mayo a noviembre con lluvias de tipo torrencial y tormentas. La intensidad invernal se opone a un periodo seco y corto y se tiene un patrón unimodal de pluviosidad a lo largo del año. Este escenario determina la resistencia del suelo en el diseño de estructuras de pavimento.

Muestra

Este trabajo tomo cuatro trayectos viales, dentro del área del municipio de Arauca: vía Arauca – vereda Caracol (PR 0+000 – PR 2+000), vía Arauca – vereda Clarinetero (PR 0+000 – PR 2+000), vía Barrancones – vía Todos Los Santos (PR 0+000 – PR 2+000), y la vía Todos Los Santos – La Becerra (PR 0+000 – PR 2+000). Sobre este conjunto de vías se ejecutaron 44 ensayos CBR normal, CBR sumergidos y DCP. La investigación se complementó con la caracterización física y mecánica de las vías a través de 608 ensayos de laboratorio. Posteriormente los resultados del ensayo CBR y del ensayo DCP se sometieron a un análisis estadístico.

Geología y Geomorfología del área

En el área de estudio desde el punto de vista geológico es posible encontrar en profundidad rocas sedimentarias detríticas poco consolidadas, de edad Neógeno, cubiertas discordantemente por amplios depósitos del cuaternario (torrencial, aluvial y fluvio-lacustres), típicos de la amplia cuenca del Orinoco (Pérez et al., 1985). De la geomorfología del municipio de Arauca son relevantes sus llanuras, las cuales constituyeron la cuenca de un mar interior que, en el transcurso de millones de años se fue rellenando con sedimentos provenientes de la cordillera Oriental de los Andes y del macizo de Guayana. La vaguada del río Meta comprende un límite de falla donde es notorio que los barrancos de la margen derecha son más empinados que los de la izquierda. De hecho, los Llanos de Arauca y Casanare, así como los de Apure en Venezuela, tomaron una forma cóncava, propia para retener agua, mientras que los del Meta y el Vichada mantuvieron una forma convexa, tipo paraguas que, permite un mejor drenaje (Ibíd., 1985) Por esta razón, a los segundos se les denomina Orinoquia no inundable o altillanura, mientras a los primeros se les llama Orinoquia inundable. El área de estudio de este trabajo se encuentra dentro de la Orinoquia inundable.

Ensayo CBR

El número CBR (o simplemente CBR), se obtiene de la relación de la carga unitaria (lb/pulg²) necesaria para lograr una cierta profundidad de penetración del pistón de penetración (19.4 cm²) dentro de la muestra compactada de suelo a un contenido de humedad y densidad dadas con respecto a la carga unitaria patrón (lb/pulg²) requerida para obtener la misma profundidad de penetración en una muestra estándar de material triturado (Chang, 2016) y permite evaluar la calidad del terreno como estructura de subrasante, sub base y base de pavimentos (Feleke y Araya, 2016). El ensayo CBR de laboratorio se ejecutó bajo la norma ASTM-D 1883 para los ensayos CBR in situ se utilizó la ASTM-D 4429-93.

Ensayo DCP

Se realizó el ensayo DCP bajo la norma ASTM-D 6951-03. Este ensayo consiste en la introducción de una varilla de acero de penetración de 16 mm de diámetro, la cual en su extremo

inferior posee un cono de acero temperado de 60 grados y 20 mm de diámetro. El DCP es introducido en el suelo por un martillo deslizante de 8 kg-f que cae desde una altura de 575mm. Para realizar las lecturas posee una regla de medición sujeta al instrumento por dos soportes; un soporte superior unido al yunque que sirve de referencia para las lecturas y un soporte inferior fijo a la regla y unido a la barra de penetración. El ensayo DCP mide la penetración dinámica por golpes, a través del terreno natural o suelo de fundación, o suelos levemente cementados (K.S. Gill et al., 2010).

Análisis estadístico

Con los resultados obtenidos de los ensayos CBR sumergidos y DCP se procedió a realizar un análisis estadístico. Se estableció la correlación existente entre el ensayo CBR y su correspondiente ensayo DCP; entre el ensayo CBR sumergido y su correspondiente ensayo DCP. La finalidad de comparar la correlación entre CBR y DCP y el CBR sumergido y el DCP es el cálculo de un coeficiente de determinación y un coeficiente de correlación óptimos los cuales garanticen un ajuste apropiado para la ecuación obtenida (Zumrawi, 2014). El Anexo 1 contiene la información de los valores encontrados para CBR y DCP en cada uno de los 44 puntos muestreados.

En el Anexo 2 se encuentran los datos y numero de columna asignados, para el seguimiento del proceso para el cálculo de la correlación entre los datos de CBR y DCP. En la columna 1 se muestra, sitio de ubicación espacial de los ensayos CBR y DCP. En la columna 2, se establece número de ensayo o muestra. La columna 3 presenta el valor logarítmico del CBR sumergido= Y_i . La columna 4 muestra el valor logarítmico del DCP= X_i . Por regresión de mínimos cuadrados se estableció la ecuación de ajuste a la curva de puntos. Se calculó el coeficiente de correlacion, desviación estándar y coeficiente de determinación. Adicionalmente utilizando la ecuación de relación entre CBR y DCP, (Lacera T, 2006), dada en la ecuación (9).

$$\text{Log}(CBR) = a - b(\text{Log}(DCP)) \quad (9)$$

Se comprobaron los parámetros a y b de la ecuación lineal calculada mediante regresión por mínimos cuadrados. Se definieron los parámetros $a = a_0$ y $b = a_1$, los cuales se calcularon mediante las llamadas ecuaciones normales. Estos parámetros se resuelven de forma simultánea y están dadas por las ecuaciones (10) y (11) (Chapra y Canale, 2007).

$$a_1 = \frac{n \sum x_i y_i - \sum x_i \sum y_i}{n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2} \quad (10)$$

$$a_0 = \bar{y} - a_1 \bar{x} \quad (11)$$

La columna 5 muestra el valor cuadrado de Y_i . La columna 6 muestra el valor cuadrado de X_i . La columna 7 muestra el producto de $(Y_i)(X_i)$. En la columna 8 se establece el cálculo del S_t , equivalente a la suma total de los cuadrados de las diferencias entre los datos y la media de los valores del CBR sumergido, ecuación (12).

$$S_t = (Y_i - \bar{Y})^2 ; S_t = \left(Y_i - \frac{\sum Y_i}{n} \right)^2 ; \sum_{i=1}^n \frac{Y_i}{n} = \bar{Y} = Y_p \quad (12)$$

Se determinó el valor de S_r o la suma de los residuales, el cual se calculó según ecuación (13).

$$S_r = (Y_i - a_0) - ((a_1)(X_i))^2 \quad (13)$$

Igualmente se calculó el coeficiente de correlación (r^2) dado en la ecuación (14) y el coeficiente de determinación (r) establecido en la ecuación (15).

$$r^2 = \frac{\sum (S_t - S_r)}{\sum S_t} \quad (14)$$

$$r = \frac{n \sum x_i y_i - (\sum x_i)(\sum y_i)}{\sqrt{\sum x_i^2 - (\sum x_i)^2} \sqrt{\sum y_i^2 - (\sum y_i)^2}} \quad (15)$$

Se calculó la desviación estándar total S_y , dada en la ecuación (16) y el error estándar del estimado $S_{y/x}$, formulado en la ecuación (17).

$$S_y = \left(\sum S_t / (n-1) \right)^{0.5} \quad (16)$$

$$S_{y/x} = \left(S_r / (n-2) \right)^{0.5} \quad (17)$$

De manera general, la valoración estadística trató de encontrar la línea media que resuma o sintetice la dependencia entre la variable Y y las X , con la doble finalidad práctica de explicación o descripción causal de la variable dependiente y previsión de los valores futuros de Y para valores dados de X (Martínez, 2005).

RESULTADOS Y DISCUSION

Geotecnia de la zona

Los suelos superficiales del área de estudio, geotécnicamente poseen clasificaron según El Sistema Unificado de Clasificación de Suelos - SUCS (Unified Soil Classification System (USCS) como ML, CL y CL-ML y según sistema de clasificación de la la American

Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) como A-4 y A-7-6, es decir, arcillas de baja plasticidad, arcillas limosas con un bajo potencial de expansión. El conjunto de ensayos para caracterización física del suelo en las cuatro vías referenciadas, encontró en promedio una humedad natural de 18%, límite líquido (LL) de 30,29%, límite plástico (LP) de 17,29%. Contenido de material granular: 1,05%, arena: 15,57% y partículas finas de 83,38%.

El Anexo 1 contiene las Tablas 1, 2, 3 y 4, las cuales muestran los resultados obtenidos para los ensayos CBR normal, CBR sumergido y sus correspondientes valores de ensayos DCP, indicándose los valores índices del DCP, registrados como DN (mm/golpes). Se muestra igualmente la clasificación del suelo obtenida, los límites de Atterbergh, límite líquido (LL) y límite plástico (LP) y una descripción de la característica del material correspondiente en cada uno de los puntos de las vías analizadas.

El Anexo 2 muestra los resultados para los cálculos estadísticos. Se encontró que, la correlación entre los datos de CBR natural y DCP es lineal, al existir una relación inversa entre ambos ensayos. Adicionalmente, se pudo establecer la correlación entre los ensayos CBR sumergidos y sus correspondientes ensayos DCP, determinándose una correlación con mayor fuerza. Esta tendencia se explica por la condición del suelo saturado.

Se estableció una regresión lineal por mínimo cuadrados para el conjunto de datos obtenidos de los ensayos de CBR sumergido y el DCP. A partir de la regresión se obtuvo una función de aproximación ajustada a la forma o a la tendencia general de los datos. Para el conjunto de datos se calculó la desviación estándar, el error estándar del estimado, los valores promedios y acumulados de dichos datos, los coeficientes de correlación y de determinación. La figura 1 muestra la tendencia general del conjunto de datos analizados.

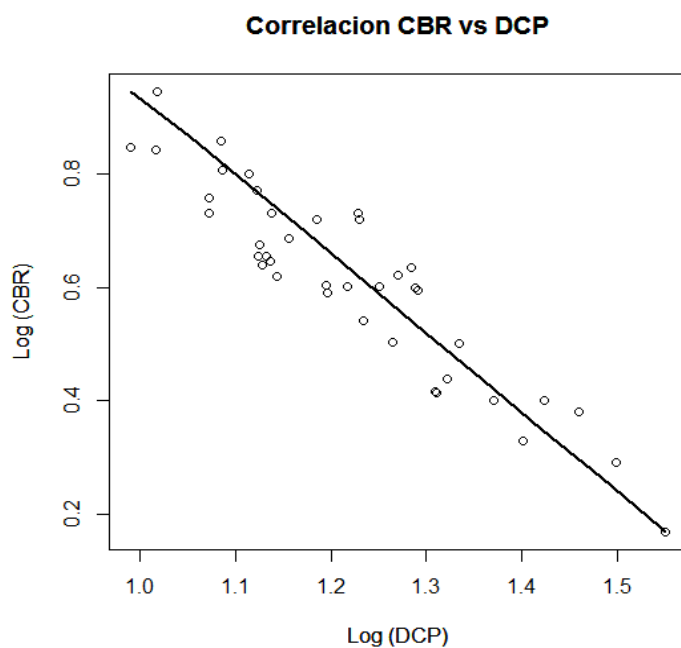


Figura 1. Correlación entre datos de los ensayos de CBR sumergidos y el DCP.

De lo anterior se estableció que, la relación entre el conjunto de ensayos de CBR sumergidos y los ensayos correspondientes DCP es igual a la ecuación (18):

$$\text{Log } CBR = 2.061 - 1.2 \log(DCP) \quad (18)$$

De la ecuación (18) se determinó que, la relación existente entre el CBR sumergido y el índice de golpes (DN) del ensayo DCP es equivalente a la ecuación (19):

$$CBR = 115.1/DN^{1.2} \quad (19)$$

La ecuación (19) determina una nueva relación entre el ensayo CBR sumergido y el *DN* (*mm/golpes*) del DCP para suelos finos saturados.

La ecuación (18) registra un coeficiente de correlación de 0.93, un coeficiente de determinación de 0.86. De hecho, el Instituto Nacional de Vías en Colombia (INVIAS) acepta valores de coeficientes de determinación mayores o iguales a 0.75 para correlaciones entre CBR y DCP en trabajos de diseño y construcción de carreteras, aspecto que debería revisarse, dado que, estadísticamente un coeficiente de determinación igual a 0.75 no garantiza una buena confiabilidad. Para la correlación encontrada se estableció un error estándar del estimado de 0.065 y desviación estándar de 0.171. Lo anterior permite inferir el nivel de confianza del ajuste realizado.

Es importante señalar que, el parámetro *a* que se presenta en la correlación establecida, con un valor de 2.061 está muy cercano a los valores que se han determinado en los diferentes estudios, los cuales se encuentran entre 2,44 a 2,70 y el parámetro *b* con un valor de -1,20 está dentro del rango establecido de - 1,07 a -1,27 (Lacera T, 2009).

El Anexo 3 contiene las Tablas 6 y 7. La Tabla 6 muestra los valores de CBR obtenidos para cada una de las correlaciones analizadas utilizando el índice de golpes (DN) del DCP del presente trabajo. La Tabla 7 muestra una selección de alternativas para comparación de espesor de pavimentos entre varios autores y la correlación establecida en la ecuación (18) del presente trabajo. Se observan los valores para la subbase granular (SBG), mezcla densa en frío (MDF), mezcla densa en caliente (MDC), base granular (BG), y la base estabilizada con emulsión asfáltica (BEE), parámetros de la estructura del pavimento.

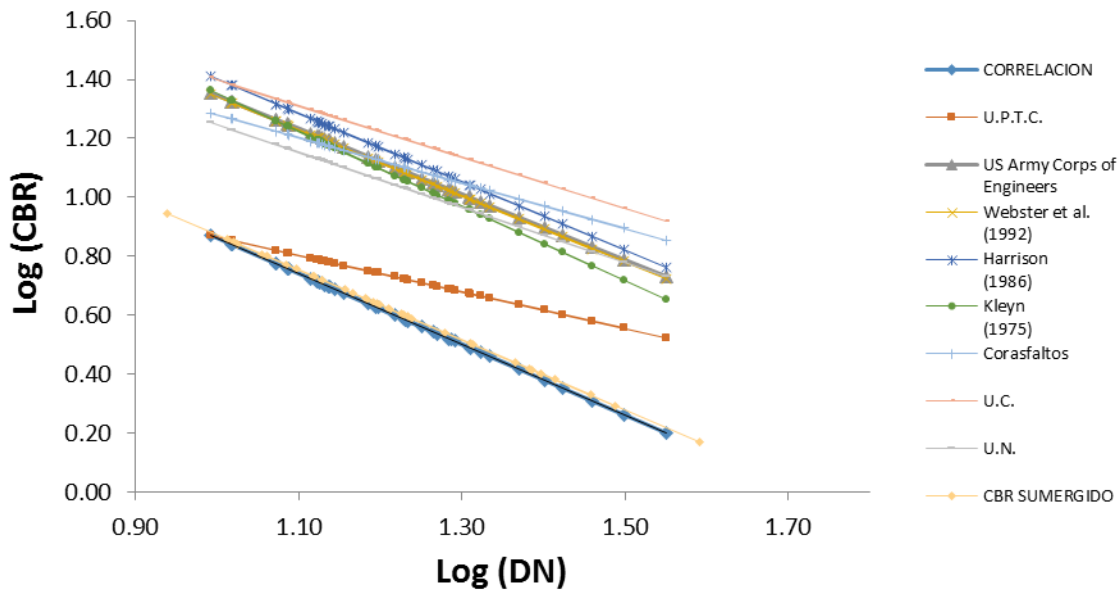


Figura 2. CBR Vs DCP Autores Varios.

Al comparar los resultados obtenidos en la correlación de la investigación (ecuación 18) contra las correlaciones de otros autores se observa en la figura 2 la gran dispersión que existe en los resultados. Lo anterior es debido a las condiciones de historia geológica y geotécnica particulares, las cuales crean la alta dispersión.

CONCLUSIONES

Este trabajo encontró una nueva correlación entre los valores de CBR sumergido y los valores del DCP. La nueva correlación está dada en la ecuación (18). Del resultado analítico, se infirió que, el ajuste del modelo es bueno. El modelo presenta un coeficiente de correlación $r = 0.93$. Además, el valor de coeficiente de determinación, $r^2 = 0.86$ es cercano a 1, es decir, el 86,00% de la variabilidad de la variable Y_i a su promedio es explicado por el modelo de regresión ajustado. Se concluye que, el modelo lineal es adecuado para describir la relación que existe entre el CBR y el DCP, según las condiciones geotécnicas particulares del área de estudio, correspondiente a suelos finos saturados.

Los resultados de CBR obtenidos con otras correlaciones difieren en más de 300% comparados contra los valores calculados con la correlación obtenida en el presente trabajo. En general, las correlaciones comparadas dan valores de CBR altos, afectando de manera negativa el diseño de la estructura de pavimento al orientar la selección de bajos espesores en base y subbase, llevando la estructura a una vida útil muy corta.

La correlación establecida, ecuación (18) tiene un impacto en términos económicos, al disminuir los costos en los estudios y mejorar los mismos, puesto que, en países del tercer mundo, en muchas oportunidades no se destinan suficientes recursos para los estudio de diseños de estructuras de pavimentos.

Finalmente, se recomienda la revisión de la normatividad para el diseño de pavimentos, por cuanto las correlaciones tomadas y aceptadas en muchos de los países de zonas tropicales son en gran medida correlaciones encontradas en condiciones hidrogeológicas y climáticas completamente distintas, las cuales no siempre tienen un buen ajuste bajo las condiciones hidrogeológicas y geotécnicas particulares.

BIBLIOGRAFIA

Burmhan, T and Johnson, D (1993). In situ foundation characterization using the Dynamic Cone Penetrometer. Study No 9PR3001. Final Report. Physical Research Section. Office of Materials Research and Engineering. Minnesota Department of Transportation. En: http://www.dot.state.mn.us/materials/researchdocs/A_93_05.pdf

Cabello, T. & Méndez, J. (2006). Valor estructural del pavimento con el PDC” Perú: Universidad Nacional San Luis Gonzaga.

Chang, Chang Luis (2016). CBR (California Bearing Ratio). Universidad Nacional de Ingeniería. FIC-CISMID. En: http://www.cismid.uni.edu.pe/descargas/a_labgeo/labgeo32_p.pdf

Cortés Cortés, Manuel E., Iglesias León, Miriam (2004). Generalidades sobre Metodología de la Investigación. Universidad Autónoma del Carmen. ISBN: 968 – 6624 – 87– 2. p.105. México. En: http://www.unacar.mx/contenido/gaceta/ediciones/metodologia_investigacion.pdf

Chukka, D., V.K. Chakravarthi (2012). Evaluation of properties of soil subgrade using Dynamic Cone Penetration. International Journal of Engineering Research and Development. ISSN: 2278-800X, www.ijournal.com Volume 4, Issue 4. pp.7-15

E. G. Kleyn. (1975.) The Use of the Dynamic cone Penetrometer (DCP). Report 2/74. Transvaal roads department. *Rehabilitated Pavement Structures, Final Document*, p.19.

Gebremariam G. Feleke and Alemgena A. Araya. (2016). Prediction of CBR using DCP for local subgrade materials. International Conference on Transport and Road Research. Kenya.

J.A. Harrison. (1986). Correlation of CBR and Dynamic cone penetrometer strength measurement of soil. Australian Road Research. Vol. 16. No 2., pp130-136.

Higuera, C. (2007). Manual práctico para la utilización del programa Bisar 3.0 y Depav para el cálculo de esfuerzos, deformaciones y deflexiones en estructuras de pavimento. Tunja: Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia.

Ideam (2015). Información Histórica, Cartas Climatológicas de Arauca. En: <http://bart.ideam.gov.co/cliciu/arauca/arauca.htm>

Instituto Nacional de Vías. (2007). Especificaciones generales de construcción de Carreteras. Bogotá, D.C. En: <http://www.Invias.gov.co>

Lacera Torres, G. F. (2006). Correlación entre los valores de Resistencia a la Penetración Cónica DCP y el valor de Relación de Soporte CBR de suelos para la región geológica del área local de Valledupar. Tesis de grado. Escuela de Ingeniería civil. Universidad Industrial de Santander, UIS. En: <http://repositorio.uis.edu.co/jspui/bitstream/123456789/1729/2/119409.pdf>

M.E. Villegas et al. (1994)- Flow formation waters in the cretaceous-Miocene succession of the Llanos Basin, Colombia. AAPG Bulletin, V. 78, No 12. P.1843-1862

Mendoza, H, & Bautista, G.(2002). Probabilidad y Estadística. En: <http://www.virtual.unal.edu.co/cursos/ciencias/2001065/>

Método de ensayo normal para el uso del penetrómetro dinámico de cono en aplicaciones de pavimentos a poca profundidad. Norma inve-172-07 (2016). En: ftp://ftp.unicauca.edu.co/facultades/fic/ingcivil/especificaciones_normas_inv-07/normas/norma%20inv%20E-172-07.pdf

Montejo, A. (2008). Ingeniería de Pavimentos. Ed. Panamericana. Bogotá, D.C.

Osorio, J. & Casas, A. (2011). Correlación PDC con CBR para suelos en la localidad de suba. Bogotá: Universidad Militar Nueva Granada.

Martínez R. Elena (2005). Errores frecuentes en la interpretación del coeficiente de determinación lineal. Anuario Jurídico y Económico Escurialense, XXXVIII (2005) 315-332 / I S S N: 1133- 3677

Pérez, V.E., Bolívar, A.L.(1985). Cuenca de llanos orientales, exploración petrolera en la subcuenca Apia-Ariari. Publicaciones II Simposio Bolivariano de Exploración Petrolera en las cuencas subandinas, Vol. I, 122 p. Bogotá. En: <http://geologiaa.blogspot.com.co/013/04/la-orinoquia-colombiana-geomorfologia-y.html>

Rivera, W. (2013) Correlación del valor de soporte de california (CBR) con la resistencia a la compresión confinada y la plasticidad del suelo. Valle del Cauca: Universidad del Valle, Colombia.

S. L. Webster, R. H. Grau and R. P. Williams.(1992.) Description and application of dual mass dynamic conce penetromeer. U.S. Army *Engineer Waterways Experiment Station, Instruction Report, No GL-92-3.*

Sánchez, F. (1984). Pavimentos: Fundamentos teóricos. Bogotá: Editorial Panamericana. Bogotá, D,C.p-246.

Chapra S.C. & Canale R. P. (2007). Métodos Numéricos Para Ingenieros. Editorial Mc Graw-Hill Interamericana.p.570. En: <http://www.freelibros.org/matematicas/metodos-numericos-para-ingenieros-5ta-edicion-steven-c-chapra-y-raymond-p-canale.html>

Smith, R.B and Pratt D.N. (1983). A Field Study of In situ California Bearing Ratio and Dynamic Cone Penetrometer Testing for Road Investigations. Australian Road Research, 13(4), 285-294

Tupia Córdova, J. Alva Hurtado (2016). Evaluación de la capacidad de soporte del terreno por medio de un equipo de penetración dinámica. En: http://www.cismid.uni.edu.pe/descargas/a_labgeo/labgeo12_p.pdf

K.S. Gill, J.N. Jha., A.K. Choudhary (2010). CBR value estimation using Dynamic Cone Penetrometer. Indian Geotechnical Conference-.Geotrendz.

Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia. (2009). Nociones sobre métodos de diseño de estructuras de Pavimentos para carreteras. Tunja: Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia.

User Guide to the Dynamic cone penetrometer. (1982) The Minnesota Department of Transportation (Mn/DOT). p.20 En:
http://www.dot.state.mn.us/materials/researchdocs/User_Guide.pdf

Zumrawi M.M.E. (2014). Prediction of in situ CBR of subgrade cohesive soil from Dynamic Cone Penetrometer and soil properties. IACSIT. International Journal of Engineering and Technology Vol. 6 No 5.

Anexo1 Resumen De los ensayos Físicos- Mecánicos de las Vías Analizadas.

Tabla 1. Resumen de datos vía Caracol.

VIA CARACOL									
P.R.	ENSAYO	CBR _{SUMERGIDO} (%)	CBR _{Wn} (%)	DN (mm/golpes)	Humedad (%)	Clasificación	LL(%)	LP(%)	DESCRIPCION
0 + 000	Caracol 1	3,99	17,02	16,53	5,29	CL	24,23	15,23	Arcilla baja plasticidad con arena CL
0 + 200	Caracol 2	1,96	21,53	31,51	14,49	CL	28,03	14,95	Arcilla baja plasticidad con arena CL
0 + 400	Caracol 3	2,13	20,46	25,16	6,52	CL-ML	19,17	15,16	Arcilla limosa con arena CL-ML
0 + 600	Caracol 4	5,24	38,32	15,33	14,04	CL	28,01	15,43	Arcilla baja plasticidad con arena CL
0 + 800	Caracol 5	4,86	16,25	14,31	11,52	CL	23,01	12,77	Arcilla baja plasticidad con arena CL
1 + 000	Caracol 6	6,31	20,51	13,03	13,60	CL-ML	21,58	16,14	Arcilla limosa CL-ML
1 + 200	Caracol 7	6,41	30,92	12,23	11,45	CL-ML	19,54	14,62	Arcilla limosa CL-ML
1 + 400	Caracol 8	3,99	5,12	17,83	19,64	CL	23,87	13,99	Arcilla baja plasticidad CL
1 + 600	Caracol 9	4,33	23,05	19,24	18,48	CL	33,87	12,88	Arcilla media plasticidad CL
1 + 800	Caracol 10	4,51	21,93	13,30	13,69	CL	48,83	18,45	Arcilla media plasticidad CL
2 + 000	Caracol 11	1,57	23,38	20,10	12,88	CL	29,04	18,72	Arcilla media plasticidad CL

Tabla 2. Resumen de datos vía Clarinetero.

VIA CLARINETERO									
P.R.	ENSAYO	CBR _{SUMERGIDO} %	CBR _{Wn} %	DN (mm/golpes)	% Humedad	Clasificación	% LL	% LP	DESCRIPCION
0 + 000	Clarinetero 1	5,37	8,40	16,93	26,08	CH	51,56	23,49	Arcilla alta plasticidad CH
0 + 200	Clarinetero 2	5,40	35,77	11,81	21,07	CL-ML	19,23	15,77	Arcilla limosa con arena CL-ML
0 + 400	Clarinetero 3	2,74	17,62	21,01	12,24	CL	22,46	14,91	Arcilla baja plasticidad con arena CL
0 + 600	Clarinetero 4	2,61	4,23	20,36	20,50	CL-ML	25,67	19,17	Arcilla limosa con arena CL-ML
0 + 800	Clarinetero 5	4,53	7,32	13,56	18,11	CL	21,42	14,18	Arcilla baja plasticidad con arena CL
1 + 000	Clarinetero 6	1,48	6,00	35,48	21,24	CL	36,03	18,44	Arcilla media plasticidad CL
1 + 200	Clarinetero 7	2,52	19,45	26,47	23,72	CL	45,56	20,58	Arcilla media plasticidad CL
1 + 400	Clarinetero 8	3,27	26,89	11,46	9,52	CL-ML	21,00	15,94	Arcilla limosa con arena CL-ML
1 + 600	Clarinetero 9	4,42	10,08	13,69	15,98	CL	43,00	18,47	Arcilla media plasticidad CL
1 + 800	Clarinetero 10	5,40	11,10	13,73	18,62	CL-ML	26,36	19,42	Arcilla limosa con arena CL-ML
2 + 000	Clarinetero 11	3,18	8,77	18,40	19,31	CL	41,10	20,41	Arcilla media plasticidad CL

Tabla 3. Resumen de datos vía Barrancones – Todos Los Santos.

VIA BARRANCONES - TODO LOS SANTOS									
P.R.	ENSAYO	CBR _{SUMERGIDO} %	CBR _{Wn} %	DN (mm/golpes)	% Humedad	Clasificación	% LL	% LP	DESCRIPCION
0 + 000	Barrancones 1	5,72	3,97	11,80	11,67	ML	NL	NP	Limo con arena ML
0 + 200	Barrancones 2	7,21	26,15	12,17	8,16	CL-ML	19,11	12,55	Arcilla limosa con arena CL-ML
0 + 400	Barrancones 3	3,48	36,55	17,14	10,45	CL	23,58	15,57	Arcilla baja plasticidad CL
0 + 600	Barrancones 4	4,72	0,45	13,32	19,79	ML	NL	NP	Limo con arena ML
0 + 800	Barrancones 5	3,98	3,44	19,39	29,62	CL	45,40	19,62	Arcilla media plasticidad CL
1 + 000	Barrancones 6	5,98	8,87	35,50	16,30	CL-ML	21,78	15,30	Arcilla limosa con arena CL-ML
1 + 200	Barrancones 7	4,19	2,93	18,63	21,62	CL-ML	27,31	21,93	Limo con arena ML
1 + 400	Barrancones 8	7,04	3,34	9,80	21,24	CL	32,25	21,42	Arcilla media plasticidad CL
1 + 600	Barrancones 9	8,80	12,28	10,43	17,97	CL	33,26	17,60	Arcilla media plasticidad CL
1 + 800	Barrancones 10	3,89	4,56	15,74	17,54	CL	38,10	22,31	Arcilla media plasticidad CL
2 + 000	Barrancones 11	3,93	4,56	19,56	24,46	CL	31,88	22,61	Arcilla media plasticidad CL

Tabla 4. Resumen de datos vía Todos Los Santos – La Becerra.

VIA TODO LOS SANTOS - LA BECERRA									
P.R.	ENSAYO	CBR _{SUMERGIDO} %	CBR _{Wn} %	DN (mm/golpes)	% Humedad	Clasificación	% LL	% LP	DESCRIPCION
0 + 000	Becerra 1	4,02	30,14	15,66	34,26	CL-ML	20,32	13,80	Arcilla limosa con arena CL-ML
0 + 200	Becerra 2	3,16	34,00	21,59	15,93	CL	33,79	14,40	Arcilla media plasticidad con arena CL
0 + 400	Becerra 3	2,51	13,18	23,44	22,51	CL	44,20	21,93	Arcilla media plasticidad CL
0 + 600	Becerra 4	4,17	13,03	13,93	22,57	CL	45,09	17,38	Arcilla media plasticidad CL
0 + 800	Becerra 5	4,37	11,94	13,42	31,09	CL	28,39	15,48	Arcilla baja plasticidad CL
1 + 000	Becerra 6	2,40	12,94	28,84	18,35	CL	24,74	18,33	Arcilla limosa CL-ML
1 + 200	Becerra 7	5,91	5,96	13,26	23,42	CL-ML	34,20	18,89	Arcilla media plasticidad CL
1 + 400	Becerra 8	6,95	15,76	10,41	18,10	CL	21,62	14,41	Arcilla baja plasticidad con arena CL
1 + 600	Becerra 9	4,29	3,62	44,92	23,17	CL	28,57	16,32	Arcilla baja plasticidad CL
1 + 800	Becerra 10	2,59	20,33	20,42	15,35	CL	42,72	19,89	Arcilla media plasticidad CL
2 + 000	Becerra 11	5,25	2,69	16,98	19,50	CL	23,24	14,30	Arcilla baja plasticidad CL

Anexo 2. Datos para la correlación definitiva entre los ensayos CBR y DCP en cuatro vías terciarias, municipio de Arauca, Arauca, Colombia.

1	2	3	4	5	6	7	8	9
MUESTRA	N	Log C.B.R. Sumergido	Log DN (mm/golpe)	Yi ²	Xi ²	Yi*Xi	St (Yi - \bar{Y}) ²	Sr
		Yi	Xi				(Yi - Yp) ²	
Caracol 1	1	0.601	1.218	0.361	1.484	0.732	0.000	0.000
Caracol 2	2	0.292	1.498	0.085	2.245	0.438	0.102	0.000
Caracol 3	3	0.329	1.401	0.108	1.962	0.460	0.080	0.005
Caracol 4	4	0.719	1.186	0.517	1.406	0.853	0.012	0.004
Caracol 5	5	0.686	1.156	0.471	1.336	0.793	0.006	0.000
Caracol 6	6	0.800	1.115	0.639	1.243	0.892	0.035	0.004
Caracol 7	7	0.807	1.087	0.651	1.182	0.877	0.038	0.001
Caracol 8	8	0.601	1.251	0.361	1.565	0.752	0.000	0.001
Caracol 9	9	0.636	1.284	0.405	1.649	0.817	0.001	0.010
Caracol 10	10	0.654	1.124	0.428	1.263	0.735	0.002	0.005
Clarinetero 1	11	0.730	1.229	0.533	1.510	0.897	0.014	0.017
Clarinetero 2	12	0.732	1.072	0.537	1.150	0.785	0.015	0.003
Clarinetero 3	13	0.438	1.322	0.192	1.749	0.579	0.030	0.003
Clarinetero 4	14	0.416	1.309	0.173	1.713	0.545	0.038	0.008
Clarinetero 5	15	0.656	1.132	0.431	1.282	0.743	0.002	0.003
Clarinetero 6	16	0.169	1.550	0.029	2.402	0.263	0.196	0.002
Clarinetero 7	17	0.401	1.423	0.161	2.024	0.571	0.044	0.001
Clarinetero 11	18	0.503	1.265	0.253	1.600	0.636	0.012	0.003
Clarinetero 9	19	0.645	1.136	0.416	1.291	0.733	0.001	0.004
Clarinetero 10	20	0.732	1.138	0.537	1.294	0.833	0.015	0.001
Barrancones 1	21	0.757	1.072	0.573	1.149	0.812	0.021	0.001
Barrancones 2	22	0.858	1.085	0.736	1.178	0.931	0.061	0.008
Barrancones 3	23	0.541	1.234	0.293	1.523	0.668	0.005	0.003

Barrancones 4	24	0.674	1.125	0.454	1.265	0.758	0.004	0.003
Barrancones 5	25	0.599	1.288	0.359	1.658	0.772	0.000	0.005
Barrancones 11	26	0.595	1.291	0.354	1.668	0.768	0.000	0.005
Barrancones 7	27	0.622	1.270	0.387	1.613	0.790	0.000	0.005
Barrancones 8	28	0.848	0.991	0.718	0.983	0.840	0.056	0.001
Barrancones 9	29	0.945	1.018	0.892	1.037	0.962	0.111	0.009
Barrancones 10	30	0.590	1.197	0.348	1.433	0.706	0.000	0.002
Becerra 1	31	0.604	1.195	0.365	1.428	0.722	0.000	0.001
Becerra 2	32	0.500	1.334	0.250	1.780	0.667	0.013	0.001
Becerra 3	33	0.400	1.370	0.160	1.877	0.548	0.045	0.001
Becerra 4	34	0.620	1.144	0.384	1.309	0.709	0.000	0.007
Becerra 5	35	0.640	1.128	0.410	1.272	0.722	0.001	0.007
Becerra 6	36	0.381	1.460	0.145	2.132	0.556	0.053	0.003
Becerra 7	37	0.771	1.123	0.595	1.260	0.866	0.026	0.002
Becerra 8	38	0.842	1.017	0.709	1.035	0.857	0.053	0.000
Becerra 11	39	0.720	1.230	0.518	1.513	0.885	0.012	0.015
Becerra 10	40	0.413	1.310	0.170	1.716	0.541	0.040	0.008
Σ		24.468	48.778	16.108	60.177	29.012	1.141	0.161
Y_p		0.612						
X_p		1.219						

a0	a1	r ²	r	Sy/x	Sy
2.061	-1.189	0.859	0.927	0.065	0.171

Anexo 3 Comparación de datos CBR para Diseño de pavimentos.

Tabla 6. Valores de CBR según varios autores para datos del DCP obtenidos en campo.

ENSAYO N°	P.R.	C.B.R. Investigación	CBR U.P.T.C.	CBR US Army Corps of Engineers	CBR Webster et al. (1992)	CBR Harrison (1986)	CBR Kleyn (1975)	CBR Corasfaltos	CBR U.C.	CBR U.N.
Caracol 1	0 + 000	3,97	5,36	12,62	12,46	14,02	11,82	12,91	16,10	11,01
Caracol 2	0 + 200	1,83	3,59	6,13	6,05	6,63	5,21	7,85	9,17	6,03
Caracol 3	0 + 400	2,40	4,13	7,88	7,78	8,61	6,94	9,34	11,15	7,44
Caracol 4	0 + 600	4,35	5,62	13,73	13,56	15,30	13,01	13,68	17,19	11,82
Caracol 5	0 + 800	4,72	5,86	14,83	14,64	16,58	14,20	14,43	18,25	12,60
Caracol 6	1 + 000	5,29	6,21	16,47	16,27	18,48	16,00	15,51	19,81	13,75
Caracol 7	1 + 200	5,70	6,46	17,68	17,46	19,89	17,34	16,29	20,94	14,59
Caracol 8	1 + 400	3,63	5,12	11,59	11,45	12,84	10,74	12,18	15,07	10,26
Caracol 9	1 + 600	3,31	4,88	10,64	10,51	11,76	9,75	11,49	14,10	9,56
Caracol 10	1 + 800	5,16	6,13	16,09	15,90	18,04	15,59	15,27	19,46	13,49

Tabla 7. Selección de alternativas para comparación de espesor de pavimentos varios autores.

Correlación Investigación	Correlación UPTC	Correlación U. Nariño	Correlación U. Cauca	Correlación US ARMY
Alternativa 1	Alternativa 3	Alternativa 1	Alternativa 1	Alternativa 1

MDC - 2	10	MDF - 1	10	MDC - 2	7.5	MDC - 2	7.5	MDC - 2	7.5
BG - 2	25	BG - 2	20	BG - 2	15	BG - 2	15	BG - 2	15
SBG - 1	40	SBC - 1	20	SBG - 1	25	SBG - 2	15	SBG - 1	25

Correlación Webster	Correlación Harrison	Correlación Kleyn	Correlación Corasfaltos
Alternativa 1	Alternativa 1	Alternativa 1	Alternativa 1

MDC - 2	7.5	MDC - 2	7.5	MDC - 2	7.5	MDC - 2	7.5
BG - 2	15	BG - 2	15	BG - 2	15	BG - 2	15
SBG - 1	25	SBG - 1	25	SBG - 1	25	SBG - 1	25