

Estudio comparativo de los ensayos California Bearing Ratio (CBR) de laboratorio, (CBR) “in situ” y Penetración Dinámica de Cono (PDC), en la vía rural tramo de cuatro (4) kilómetros plan Jansasoy - puente el Cascajo, del Municipio de Santiago, Departamento del Putumayo

Cristian Esteban Calvache Goyes, ✉ cristianecg_@outlook.com

Andrés Bolaños Ordoñez, ✉ andres12bol@gmail.com

Trabajo de grado presentado como requisito parcial para optar al título de
Ingeniero Civil

Asesor

Ing. Esp. Javier Oswaldo Moreno



Universidad de Nariño
Facultad de Ingeniería
Programa de Ingeniería Civil
San Juan de Pasto
2022

Nota de Responsabilidad

“Las ideas y conclusiones aportadas en el presente trabajo de grado son de responsabilidad exclusiva del autor”. Artículo 1° del Acuerdo 324 de octubre 11 de 1966, emanado del Honorable Consejo Directivo de la Universidad de Nariño.

Nota de aceptación

Ing. Javier Moreno Masías
Presidente del Comité

Ing. Guillermo Muñoz Ricaurte
Jurado 1

Ing. Luis Alejandro Erazo Martínez
Jurado 2

Agradecimientos

De manera especial, presentamos nuestros agradecimientos al Ingeniero Javier Oswaldo Moreno por habernos compartido sus conocimientos y guiarnos con su experiencia y profesionalismo en cada paso de nuestro trabajo de grado.

Al Programa de Ingeniería Civil de la Universidad de Nariño, por ser la sede de la formación brindada y adquirida en estos años.

A todas aquellas personas que de una u otra forma participaron y contribuyeron para culminar con éxito nuestra carrera profesional.

RESUMEN

En el presente documento se da a conocer las diversas actividades que se realizaron en torno al trabajo de grado, modalidad Investigación Institucional, el cual consistió en realizar un “ESTUDIO COMPARATIVO DE LOS ENSAYOS CALIFORNIA BEARING RATIO (CBR) DE LABORATORIO, (CBR) “IN SITU” Y PENETRACIÓN DINÁMICA DE CONO (PDC), EN LA VÍA RURAL TRAMO DE CUATRO (4) KILÓMETROS PLAN JANSASOY - PUENTE EL CASCAJO, DEL MUNICIPIO DE SANTIAGO, DEPARTAMENTO DEL PUTUMAYO” mediante la recopilación de datos en campo para conocer la clasificación y las características físicas del terreno como contenido de humedad, granulometría y límites de consistencia, así como también los valores del C.B.R y P.D.C a partir de ensayos de laboratorio y/o en sitio.

Con la información obtenida, se determinaron dos líneas de tendencia entre el número de golpes PDC y el CBR, de las cuales se derivaron ecuaciones correlativas que permitieron dar a conocer la confiabilidad de los resultados mediante R^2 ; y se comparó gráficamente los valores de CBR proveniente de las ecuaciones (CBR Tesis), con los de laboratorio inalterado y en sitio, según la valoración que se esté llevando cabo para apreciar e identificar de una forma más clara este estudio.

Finalmente, se logró establecer de acuerdo al análisis de resultados, que la determinación de CBR de laboratorio inalterado y en sitio, mediante el empleo del ensayo PDC, haciendo uso de las ecuaciones de correlación, brinda una confiabilidad del 50% aproximadamente en la veracidad de sus resultados; sin embargo se considera que teniendo en cuenta la proximidad y la similitud de los valores de CBR identificados por ensayos y por ecuación, el empleo de las correlaciones queda a criterio propio para tipos de suelo SM-SC (Arena Limo arcillosa), de la subrasante de la vía del municipio de Santiago (Putumayo) en la que se involucra el tramo de investigación.

Palabras clave: California Bearing Ratio, Penetración Dinámica de Cono, granulometría, límites de consistencia, ecuaciones de correlación

ABSTRACT

This document discloses the various activities that were carried out around the degree work, Institutional Research modality, which consisted of conducting a "COMPARATIVE STUDY OF THE CALIFORNIA BEARING RATIO (CBR) LABORATORY TESTS, (CBR) " IN SITU" AND DYNAMIC CONE PENETRATION (PDC), IN THE RURAL ROAD, SECTION OF FOUR (4) KILOMETERS PLAN JANSASOY - PUENTE EL CASCAJO, OF THE MUNICIPALITY OF SANTIAGO, DEPARTMENT OF PUTUMAYO" through the collection of data in the field to know the classification and the physical characteristics of the ground such as moisture content, granulometry and consistency limits, as well as the CBR and PDC values from laboratory and/or on-site tests.

With the information obtained, two trend lines were determined between the number of PDC blows and the CBR, from which correlative equations were derived that allowed the reliability of the results to be known through R²; and the CBR values from the equations (CBR Thesis) were graphically compared with those from the unaltered laboratory and on site, according to the assessment being carried out to appreciate and identify this study more clearly.

Finally, it was possible to establish, according to the analysis of results, that the determination of unaltered laboratory CBR and on-site, through the use of the PDC test, making use of the correlation equations, provides a reliability of approximately 50% in the veracity of its results; however, it is considered that taking into account the proximity and similarity of the CBR values identified by tests and by equation, the use of correlations is left to the own criteria for soil types SM-SC (sand silt clay), of the subgrade of the road in the municipality of Santiago (Putumayo) in which the research section is involved.

Keywords: California Bearing Ratio, Dynamic Cone Penetration, granulometry, consistency limits, correlation equations.

TABLA DE CONTENIDO

GLOSARIO.....	11
I. INTRODUCCIÓN	13
II. TEMA.....	14
A. Título.....	14
B. Modalidad.....	14
C. Formulación del problema	14
D. Localización geográfica del proyecto	14
1) Geografía	14
2) Límites	15
E. Delimitación de la investigación	15
III. JUSTIFICACIÓN	17
IV. OBJETIVOS	18
A. Objetivo general.....	18
B. Objetivos específicos.....	18
C. Hipótesis.....	18
V. MARCO TEÓRICO	20
A. Propiedades físico mecánicas de los suelos	20
1) Contenido de humedad	20
a) Ensayo de Laboratorio (Norma INV-E-122-13).....	20
2) Granulometrías	21
a) Ensayos de Laboratorio (Norma INV E-123-13)	21
3) Límites de atterberg	23
a) Ensayos de Laboratorio (Norma INV E-125- 126-13).....	24
4) Resistencia al esfuerzo cortante.....	26
a) Ensayos en laboratorio y en sitio	26
B. Métodos de clasificación de suelos.	35
1) Método de la AASHTO	35
a) Nomenclatura.....	35
2) Método de la SUCS	36

VI. MARCO METODOLÓGICO.....	39
A. Definición de variables	39
1) Variable independiente.....	39
2) Variable Dependiente	39
B. Operacionalización de variables.....	39
C. Abordaje, técnicas e instrumentos de recolección de datos	40
1) Abordaje metodológico	40
a) Analítica.....	40
b) Cuasi experimental	40
2) Técnica de recolección de datos	41
a) Análisis Estadístico.....	41
3) Instrumentos de recolección de datos	42
a) Guía de observación.....	42
4) Procedimiento investigativo	42
a) Diagrama de flujo de procesos.....	42
VII. RESULTADOS DE LA INVESTIGACIÓN	43
A. Aplicación de procesos	43
1) Recolección de la información disponible.....	43
2) Selección de los equipos a utilizar.....	43
3) Reconocimiento Geotécnico.....	43
4) Ensayos de laboratorio.....	47
a) Aplicación del ensayo PDC IN SITU	47
b) Aplicación del ensayo CBR IN SITU.....	48
c) Aplicación del ensayo CBR en laboratorio (inalterado).....	49
d) Comparación de los resultados de los ensayos de (CBR) de laboratorio, (CBR) “in situ” y (PDC).	51
e) Correlación de (CBR) de laboratorio, (CBR) “in situ” y (PDC).	67
f) Comparación de los resultados obtenidos	69
g) Análisis y sistematización de resultados obtenidos	71
VIII. CONCLUSIONES	72
IX. RECOMENDACIONES.....	73

REFERENCIAS 74
ANEXOS..... 77

LISTA DE TABLAS

Pág.

TABLA I. DENOMINACIÓN DE SUELOS.....	21
TABLA II. LECTURAS DE CARGA.....	30
TABLA III. CARACTERÍSTICAS MUESTRA PATRÓN (PIEDRA PICADA).....	32
TABLA IV. RESULTADOS DE CBR IN SITU.....	52
TABLA IV. RESULTADOS DE CBR DE LABORATORIO (MUESTRA INALTERADA) ...	67
TABLA VI. COMPARACIÓN DE CBR- CORRELACIÓN NO.1.....	69
TABLA VII. COMPARACIÓN DE CBR- CORRELACIÓN NO.2	70

LISTA DE FIGURAS

Pág.

Fig. 1. Localización del Proyecto en el contexto nacional y departamental del municipio de Santiago-Putumayo.	15
Fig. 2. Ubicación aproximada de la zona de estudio.	16
Fig. 3. Condiciones existentes vía Rural plan Jansasoy - puente el Cascajo	16
Fig. 4. Proceso de tamizado	22
Fig. 5. Curva Granulométrica	23
Fig. 6. Límites de Atterberg.....	23
Fig. 7. Deslizamiento de un suelo en el límite líquido.....	24
Fig. 8. Ensayo Limite Plástico	25
Fig. 9. Instrumento (PDC)	27
Fig. 10. Curva PDC.....	28
Fig. 11. Diagrama Estructural.....	28
Fig. 12. Curva de balance estructural.....	29
Fig. 13. Equipo CBR de laboratorio	30
Fig. 14. Curvas penetración - Esfuerzo.....	31
Fig. 15. Equipo CBR "in situ"	33
Fig. 16. Montaje para el ensayo CBR "in situ".....	34
Fig. 17. Nomenclatura para el sistema de clasificación AASHTO.....	36
Fig. 18. Separación en componente fina y gruesa- M.sucs.....	37
Fig. 19. Clasificación Unificada de Suelos.	38
Fig. 20. Operacionalización de Variable Independiente.....	39
Fig. 21. Operacionalización de la Variable Dependiente	40
Fig. 22. Diagrama de flujo	42
Fig. 23. Toma de muestras de suelo.....	44
Fig. 24. Ensayo de contenido de humedad.	44
Fig. 25. Ensayo de granulometría.	45
Fig. 26. Ensayo de limite líquido.....	45

Fig. 27. Ensayo de limite plástico e índice de plasticidad.	45
Fig. 28. Clasificación y propiedades físicas de las muestras de suelo.	46
Fig. 29. Formato de Clasificación de suelos – (Registro de datos y resultados)	46
Fig. 30. Excavación de Apiques en las zonas de estudio (PDC in situ).	47
Fig. 31. Ensayo PDC in situ.....	47
Fig. 32. Preparación de la carga de ensayo.	48
Fig. 33. Excavación de Apiques en las zonas de estudio (CBR in situ)	48
Fig. 34. Instalación del equipo CBR in Situ.	49
Fig. 35. Registro de datos CBR in Situ.....	49
Fig. 36. Excavación de Apiques en las zonas de estudio (CBR inalterado)	50
Fig. 37. Excavación de Apiques en las zonas de estudio (CBR inalterado)	50
Fig. 38. Lecturas de penetraciones (CBR inalterado).....	51
Fig. 39. Formato de CBR “in situ” – (Registro de datos y resultados).....	52
Fig. 40. Curva de PDC: (A1)	53
Fig. 41. Diagrama estructural (A1)	53
Fig. 42. Balance estructural (A1).....	54
Fig. 43. Curva de PDC: (A2)	54
Fig. 44. Diagrama estructural (A2).....	55
Fig. 45. Balance estructural (A2).....	55
Fig. 46. Curva de PDC: (A3)	56
Fig. 47. Diagrama estructural (A3).....	56
Fig. 48. Balance estructural (A3).....	57
Fig. 49. Curva de PDC: (A4)	57
Fig. 50. Diagrama estructural (A4).....	58
Fig. 51. Balance estructural (A4).....	58
Fig. 52. Curva de PDC: (A5)	59
Fig. 53. Diagrama estructural (A5).....	59
Fig. 54. Balance estructural (A5).....	60
Fig. 55. Curva de PDC: (A6)	60
Fig. 56. Diagrama estructural (A6).....	61
Fig. 57. Balance estructural (A6).....	61

Fig. 58. Curva de PDC: (A7)	62
Fig. 59. Diagrama estructural (A7)	62
Fig. 60. Balance estructural (A7)	63
Fig. 61. Curva de PDC: (A8)	63
Fig. 62. Diagrama estructural (A8)	64
Fig. 63. Balance estructural (A8)	64
Fig. 64. Curva de PDC: (A9)	65
Fig. 65. Diagrama estructural (A9)	65
Fig. 66. Balance estructural (A9)	66
Fig. 67. Correlación PDC vs CBR In situ	67
Fig. 68. Correlación PDC vs CBR In situ	68
Fig. 69. Comparación de CBR In Situ – CBR Tesis	69
Fig. 70. Comparación de CBR In Situ – CBR Tesis	70

LISTA DE ANEXOS MEDIO MAGNÉTICO

Pág.

Anexo 1. Documentos de clasificación de suelos (Registros de datos y resultados).....	77
Anexo 2. Documentos de Ensayos de CBR “In situ” (Registros de datos y resultados).....	77
Anexo 3. Documentos de Ensayos PDC (Registros de datos y resultados).....	77
Anexo 4. Documentos de Ensayos de CBR de laboratorio, Muestra Inalterada (Registros de datos y resultados)	77

GLOSARIO

California Bearing Ratio (CBR): La prueba CBR de suelos consiste básicamente en compactar un terreno en unos moldes normalizados, sumergirlos en agua y aplicar un punzonamiento sobre la superficie del terreno mediante un pistón normalizado. Se emplea para evaluar la mide la resistencia al corte de un suelo bajo condiciones de humedad y densidad controladas, permitiendo obtener un (%) de la relación de soporte [1].

Capacidad portante: Es la capacidad del terreno para soportar las cargas aplicadas sobre él. Técnicamente la capacidad portante es la máxima presión media de contacto entre la cimentación y el terreno tal que no se produzcan un fallo por cortante del suelo o un asentamiento diferencial excesivo [2].

Compactación: Consiste en una disminución de los espacios porosos en un suelo; en cual se compacta en capas para aumentar la densidad de sus componentes [3].

Contenido de humedad: Es un ensayo que permite determinar la cantidad de agua en una muestra de suelo al momento de ser extraído, definiéndose como la relación entre el peso del agua y el peso de los sólidos.

Correlación: La correlación determina la relación o dependencia que existe entre las variables que intervienen en un estudio. Se considera que dos variables cuantificables están correlacionadas cuando los valores de una de ellas varían sistemáticamente con respecto a los valores homónimos de la otra [4].

Densidad: Es un indicativo de la relación peso por volumen del suelo, y está en relación a la porosidad. A mayor contenido de materia orgánica, más poroso y menos denso será el suelo [5].

Granulometría: Consiste en clasificar la distribución de las partículas de acuerdo a su tamaño, contenidas en una muestra del suelo. También sirve para ver si un suelo puede emplearse en la

elaboración de concreto, determinando su tamaño máximo de agregado y dependiendo de sus porcentajes del material retenido por medio del análisis de los tamices a utilizar [6].

Penetración Dinámica de cono (PDC): Es un método no destructivo mide la penetración dinámica por golpes, a través del terreno natural o suelo fundación, y con ello, la capacidad estructural in situ del suelo de fundación [7].

Subrasante: Es la superficie del camino sobre la cual se apoyará la estructura de un pavimento. Pudiendo estar constituida por el suelo natural del corte o de la parte superior de un relleno debidamente compactado [8].

Suelos: Es la capa superficial de la corteza terrestre, el cual se forma por la descomposición de rocas por cambios bruscos de temperatura y la acción de la humedad, aire y seres vivos [9].

I. INTRODUCCIÓN

En el presente documento, que cumple la función de proyecto de investigación denominado “ESTUDIO COMPARATIVO DE LOS ENSAYOS CALIFORNIA BEARING RATIO (CBR) DE LABORATORIO, (CBR) “IN SITU” Y PENETRACIÓN DINÁMICA DE CONO (PDC), EN LA VÍA RURAL TRAMO DE CUATRO (4) KILÓMETROS PLAN JANSASOY - PUENTE EL CASCAJO, DEL MUNICIPIO DE SANTIAGO, DEPARTAMENTO DEL PUTUMAYO”, se dan a conocer los resultados de los estudios técnicos llevados a cabo in situ como en laboratorio, para determinar los valores de CBR del material de la zona objetivo.

En la investigación se implementaron los diferentes instrumentos y equipos de ensayos para el estudio de la subrasante del tramo especificado en el proyecto, los cuales permitieron analizar la confiabilidad del uso del ensayo de (PDC), con respecto al ensayo de CBR de laboratorio y CBR “in situ”, obteniendo resultados satisfactorios que logran ampliar la posibilidad de que la mayoría de los ingenieros en actividad profesional puedan inspeccionar y analizar los datos obtenidos en otras situaciones similares, con la aplicación de un instrumento económico, liviano, practico, ligero y de fácil transporte en lugares inaccesibles como es el equipo de PDC, puesto que los trabajos necesarios para determinar la capacidad de soporte del material bajo las condiciones existentes, y efectuar la rehabilitación y mantenimiento de los pavimentos en las carreteras, inciden mucho en la economía de nuestro país, dado que hoy en día es obligatorio en la construcción de sub rasantes, sub bases y bases en pavimentos.

II. TEMA

A. Título

Estudio comparativo de los ensayos California Bearing Ratio (CBR) de laboratorio, (cbr) “in situ” y penetración dinámica de cono (pdc), en la vía rural tramo de cuatro (4) kilómetros plan jansasoy - puente el cascojo, del municipio de santiago departamento del putumayo.

B. Modalidad

El presente proyecto se clasifica dentro de la modalidad de Investigación Institucional, según Acuerdo No. 005 de 2010 emanado del Consejo Académico, en el cual, una vez desarrolladas las actividades y obtenidos los resultados de los estudios realizados, se elaborará el informe final que será sometido a la consideración del Jurado Calificador que designe el Comité Curricular.

C. Formulación del problema

¿De qué manera el CBR de laboratorio (Muestra inalterada) y CBR “in situ”, permite analizar la confiabilidad de los valores del Penetrómetro Dinámico de Cono (PDC) de la sub rasante de la vía Rural plan Jansasoy - puente el Cascajo, del municipio de Santiago, Putumayo?

D. Localización geográfica del proyecto

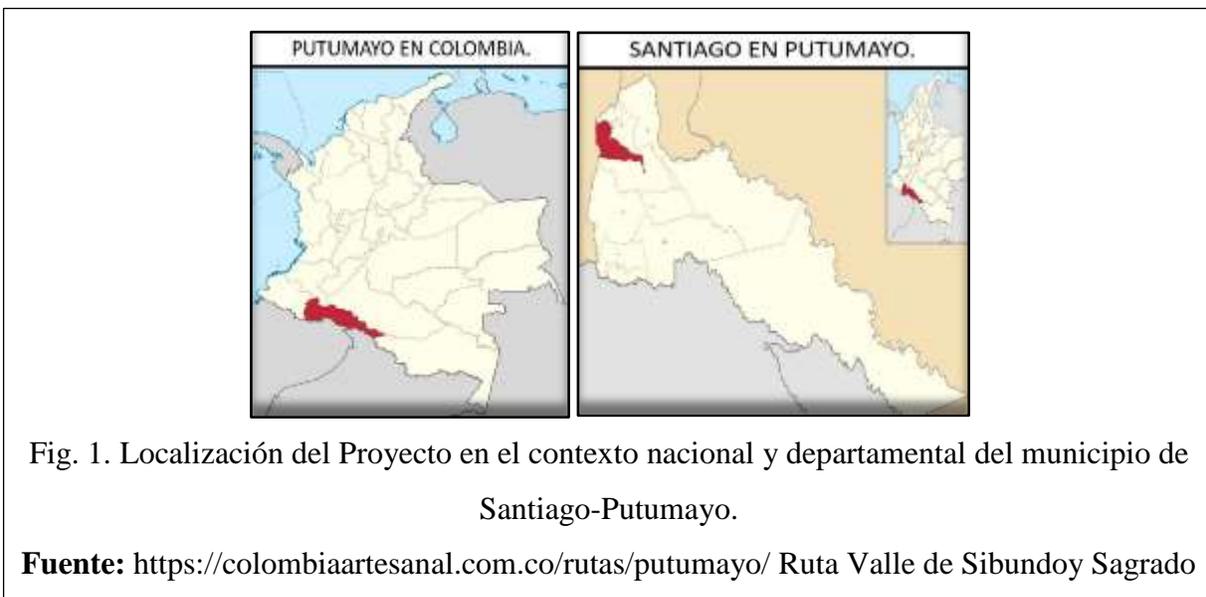
1) Geografía

El Espacio Geográfico del Municipio de Santiago reviste especial importancia en el contexto nacional y regional, ya que en él se establecen varios pisos térmicos, brindándole la oportunidad de tener una variada vegetación, fauna, diferentes formas de relieve, gran riqueza hídrica y el asentamiento de grupos humanos, que hacen de Santiago un importante Municipio en el Alto putumayo.

2) Límites

El Municipio de Santiago Se encuentra ubicado al sur occidente colombiano en el departamento del Putumayo distante 90 Km, de la capital Mocoa. Limítrofe con el departamento de Nariño, dista solo 55 Km de Pasto su capital y su principal centro abastecedor. Con los municipios de San Francisco, Colón y Sibundoy, forma parte de la Subregión del Alto Putumayo [10].

- **Extensión total:** 320 Km²
- **Altitud de la cabecera municipal (metros sobre el nivel del mar):** 2150
- **Distancia de referencia:** 55 [10]



E. Delimitación de la investigación

Los estudios técnicos para desarrollar la presente investigación, se realizaron en la vía rural tramo de cuatro (4) kilómetros plan Jansasoy - puente el cascajo del municipio de Santiago departamento del putumayo.



III. JUSTIFICACIÓN

Teniendo en cuenta que para llevar a cabo un proyecto de construcción vial en la actualidad, sería de gran beneficio contar con registros de ensayos para obtener datos inmediatos de las propiedades mecánicas del suelo, como por ejemplo valores de resistencia al corte; se ha pretendido con esta investigación, obtener la correlación del ensayo de PDC con respecto al CBR de laboratorio inalterado y CBR in situ, para una posible aplicación confiable y formal del mismo, además, el empleo del equipo de (PDC) generaría un beneficio económico debido a su bajo costo de uso operacional, así como también minimizaría el impacto ambiental por ser una ensayo no destructivo y sostenible.

Por lo tanto, para llevar a la realidad lo nombrado y satisfacer la iniciativa del proyecto, la presente investigación se desarrolló en el Municipio de Santiago, en la vía rural delimitada entre el plan Jasasoy y puente el Cascajo, por el mal estado en el que se encuentra la subrasante actualmente, puesto que se evidencia que no se ha realizado la construcción de algún tipo de mejoramiento que facilite el tránsito vehicular; lo que permite realizar el estudio para determinar las propiedades de los materiales hasta una profundidad de auscultación determinada y con ello la resistencia, la calidad relativa del suelo que será empleado como subrasante para el futuro mejoramiento, o en su defecto para la pavimentación de la vía.

IV. OBJETIVOS

A. Objetivo general

Verificar la confiabilidad del resultado del ensayo de penetración dinámica de cono (PDC), con respecto al (CBR) de laboratorio y (CBR) “in situ”, realizados en vía rural plan Jansasoy - puente el Cascajo, del municipio de Santiago, Departamento del Putumayo, de acuerdo a los estándares de la normatividad vigente.

B. Objetivos específicos

- Determinar las propiedades físicas y mecánicas del suelo del tramo en estudio y clasificarlo.
- Determinar el CBR laboratorio y CBR “In situ”, para la subrasante objeto de investigación.
- Realizar la curva del Penetrómetro dinámico de cono (PDC) in situ, Diagrama estructural y el balance estructural de la subrasante del suelo del tramo en estudio, de acuerdo a los resultados obtenidos.
- Correlacionar los resultados del Penetrómetro Dinámico de Cono (PDC) con respecto al California Bearing Ratio (CBR) de laboratorio y (CBR) “in situ”.
- Procesar los datos obtenidos, interpretar los resultados y determinar la confiabilidad del ensayo penetrómetro dinámico de cono (PDC).

C. Hipótesis

En virtud de lo anterior, la presente investigación se orientará a profundizar sobre las siguientes hipótesis:

- Los resultados obtenidos del ensayo de Penetrómetro Dinámico de Cono (PDC) in situ, realizados en el municipio de Santiago (Putumayo), son confiables con respecto al California Bearing Ratio (CBR) de laboratorio inalterado de diseño.

- Los resultados obtenidos del ensayo de Penetrómetro Dinámico de Cono (PDC) in situ, realizados en el municipio de Santiago (Putumayo), NO son confiables con respecto al California Bearing Ratio (CBR) de laboratorio de diseño.

V. MARCO TEÓRICO

A. Propiedades físico mecánicas de los suelos

En la proyección de estructuras es necesario analizar las condiciones de los suelos, siendo de mayor interés las propiedades físico mecánicas, como por ejemplo la resistencia que nos permite dimensionar las bases con un cierto coeficiente de seguridad a la rotura, la deformabilidad que indica la magnitud de los desplazamientos a tener en cuenta a través del tiempo, entre otras [10].

1) Contenido de humedad

El contenido de humedad es el contenido de agua por unidad de masa de los sólidos de la muestra de suelo empleada, que se expresa en porcentaje (%). Es de gran importancia su determinación puesto que el contenido de agua puede afectar significativamente la resistencia del suelo o material que se disponga en el sitio de construcción.

a) Ensayo de Laboratorio (Norma INV-E-122-13)

Para determinar el contenido de agua, se emplea la norma colombiana INV-E-122, (determinación en el laboratorio del contenido de agua (humedad) de muestras de suelo, roca y mezclas de suelo – agregado), la cual también permite conocer algunas propiedades del suelo como son la cohesión, consistencia, cambios de volumen y estabilidad mecánica. Esta práctica se puede realizar por dos métodos dependiendo el número de cifras significativas que se solicite en los resultados, el método “A” aproxima a 1% y el método “B” de resultados con aproximación a 0.1% [11].

➤ **Cálculos:**

Se realiza el cálculo del contenido de agua, aplicando la siguiente formula:

$$w = \frac{w_1 - w_2}{w_2 - w_c} \times 100 = \frac{w_w}{w_s} \times 100 \quad (1)$$

Dónde: w = Contenido de agua, %

w_1 = Masa del recipiente con la muestra húmeda, g;

w_2 = Masa del recipiente con la muestra seca, g;

w_c = Masa del recipiente, g;

w_w = Masa de agua, g;

w_s = Masa de las partículas sólidas, g;

2) *Granulometrías*

a) *Ensayos de Laboratorio (Norma INV E-123-13)*

Para llevar a cabo el análisis granulométrico, se emplea la norma Colombiana INV-E-123-13, (determinación de los tamaños de las partículas de los suelos) [12], la cual, para lograr el proceso de separación de un suelo en diferentes fracciones según sus tamaños, la norma especifica dos tipos de ensayos: por tamizado para las partículas grueso-granulares (gravas y arenas) las cuales son mayores de 75 μm (retenidas en el tamiz No. 200) y el de sedimentación para la fracción fina del suelo (limos y arcillas), las cuales son menores a 75 μm (pasa tamiz No. 200) (Tabla 1) [13].

TABLA I. DENOMINACIÓN DE SUELOS

Partículas	Tamaño MAX	Tamaño MIN
Grava	75mm (3")	4.75mm (No.4)
Arena Gruesa	4.75 mm (No.4)	2.0 mm (No. 10)
Arena Media	2.0 mm (No. 10)	0.425 mm (No. 40)
Arena Fina	0.425 mm (No. 40)	0.075 mm (No. 200)
Limo	0.075 mm (No. 200)	0.005 mm
Arcilla	0.005 mm	

En presente investigación, el método que permitió realizar el análisis granulométrico es por tamizado.



Fig. 4. Proceso de tamizado

Comúnmente, los resultados obtenidos se los da a conocer por medio de un gráfico granulométrico que se representa en escala logarítmica y semilogarítmica, para obtener una mejor claridad del mismo [11].

La forma de la curva de distribución de tamaños de las partículas, indica si los tamaños varían en un rango amplio (curva C) o estrecho (curva B); si el rango tiende a los tamaños mayores del suelo grueso (A) o a los menores de un suelo fino, (C). Si todos los tamaños tienen proporciones en peso relativamente iguales, el rango es amplio y la curva suave, el suelo así será bien gradado como A y C. La mala gradación puede ser por falta de extensión (B) o por discontinuidad. En suelos granulares la gradación expresada numéricamente, se puede determinar con el apoyo del coeficiente de uniformidad C_u y con el coeficiente de curvatura C_c . [14]

$$c_u = \frac{D_{60}}{D_{10}}; c_c = \frac{D_{30}^2}{D_{10} \times D_{60}} \quad (2)$$

→ *Bien gradado cuando $c_u \geq 4$ en gravas ≥ 6 en arenas*

$$1 < c_c < 3$$

Cuanto más alto sea C_u , mayor será el rango de tamaños del suelo. Los D_i ; $i = 10, 30, 60$, son los tamaños o diámetros de las partículas, para el cual el $i\%$ del material es más fino que ese tamaño.

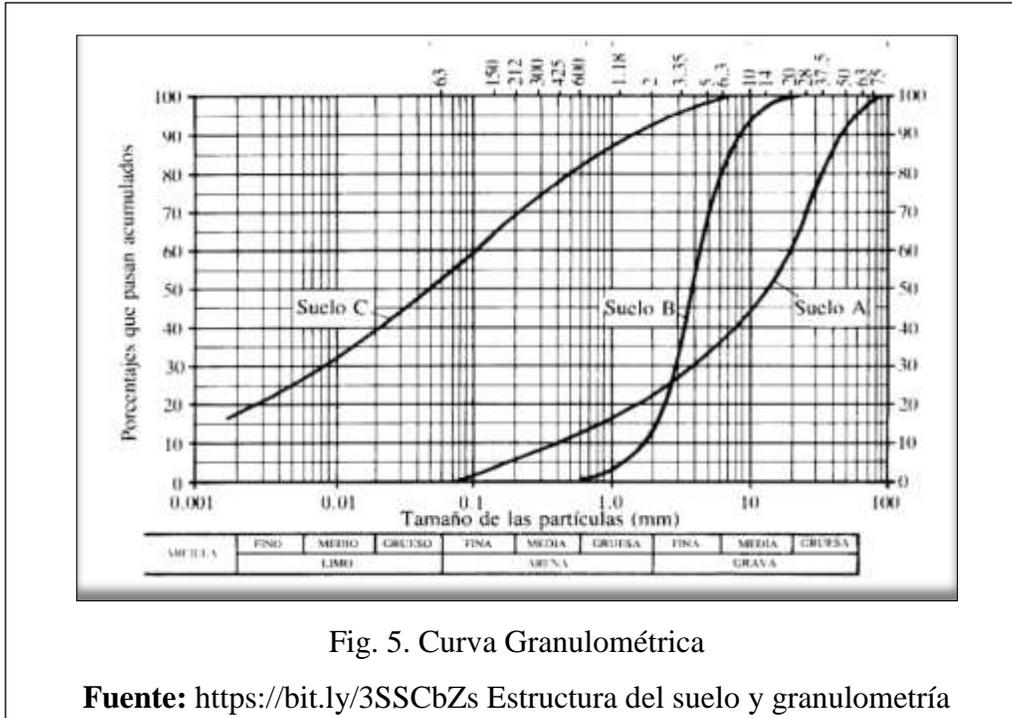


Fig. 5. Curva Granulométrica

Fuente: <https://bit.ly/3SSCbZs> Estructura del suelo y granulometría

3) Límites de atterberg

Los límites de Atterberg o también llamados límites de consistencia, se basan en el concepto de que los suelos finos presentes en la naturaleza, de acuerdo a la cantidad de humedad que contengan, pueden encontrarse en diferentes estados como sólido, semisólido, plástico y líquido o viscoso (Figura 6) [15].

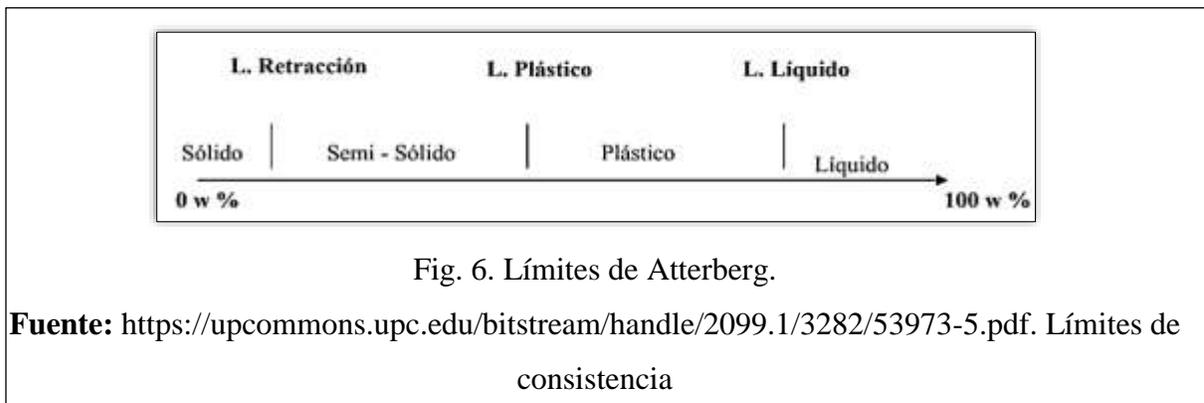


Fig. 6. Límites de Atterberg.

Fuente: <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/3282/53973-5.pdf>. Límites de consistencia

a) Ensayos de Laboratorio (Norma INV E-125- 126-13)

Los ensayos de laboratorio normalizados permiten obtener los límites del rango de humedad dentro del cual el suelo se mantiene en estado plástico. Con ellos, es posible clasificar el suelo en la Clasificación Unificada de Suelos (Unified Soil Classification System, USCS) [17].

- Determinación del límite líquido.

Para determinar el límite líquido, se cuenta con la Norma Colombiana INV E 125-13 (determinación del límite líquido de los suelos) [16], la cual, es un ensayo que se determina de forma estandarizada mediante la cuchara de Casagrande. Para entender el significado del ensayo mediante este dispositivo, se puede decir que, para golpes secos, la resistencia a la corte dinámica de los taludes de la ranura se agota, generándose una estructura de flujo que produce el deslizamiento (Figura7). La fuerza resistente a la deformación puede considerarse como la resistencia al corte de un suelo. La resistencia al corte de todos los suelos en el límite líquido es constante y tiene un valor aproximado de 2,2 kPa [15].

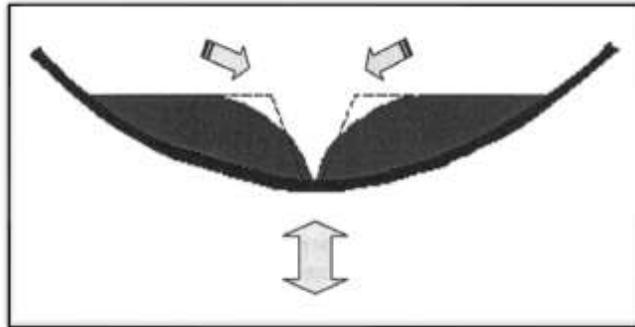


Fig. 7. Deslizamiento de un suelo en el límite líquido.

Fuente: <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/3282/53973-5.pdf>. Deslizamiento de un suelo

Para la presente investigación, la muestra representativa del suelo a determinar sus características se lo preparará mediante vía húmeda, el cual, primeramente, se lo deberá pasar por el tamiz No. 40 (425 μm), y si se tiene poco o ningún material retenido en este tamiz, se prepara el espécimen

será de 150g a 200g de material que pase el tamiz mediante una mezcla intima con agua en el recipiente de mezclado; pero si por el contrario, el material contienen una gran cantidad de partículas retenidas, se realiza la operación de lavado descrita en el literal 9.1.2.2, de la Norma INV E 125-13. Vale la pena resaltar que el material retenido en el tamiz No 40 en cualquiera de los dos casos, se deberá descartar [17].

- Determinación del límite plástico e índice de plasticidad.

El límite plástico es el contenido de humedad del suelo expresado en porcentaje, cuando se halla en el límite entre los estados plástico y semisólido. Para su determinación, se cuenta con la Norma Colombiana INV. E 126-13 (limite plástico e índice de plasticidad de los suelos) [16].

Para determinar el límite plástico, se calcula el contenido de agua de las dos muestras tomadas, y se realiza el promedio de las dos humedades, aproximando los resultados al entero más cercano. El promedio se tomará como el límite plástico (LP). El ensayo se deberá repetir, si la diferencia entre las dos humedades supera el rango de aceptabilidad para los resultados de dos ensayos, efectuados por un solo operador; es decir, 1.4 puntos porcentuales (2.8×0.5) [11].

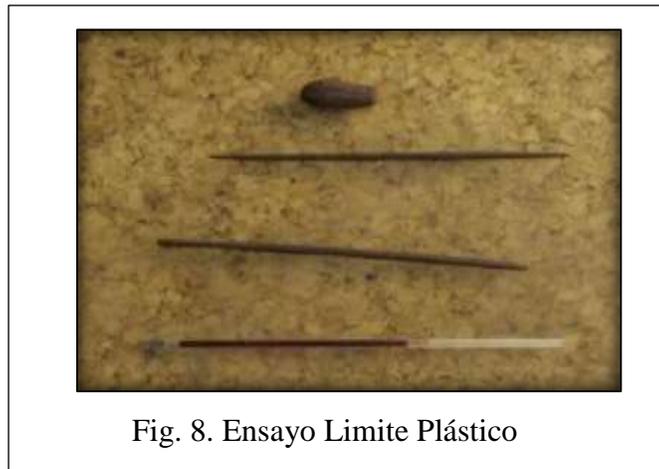


Fig. 8. Ensayo Limite Plástico

En cuanto al índice de plasticidad, este se lo calcula aplicando la siguiente formula:

$$IP = LL - LP \quad (3)$$

Donde LL = limite líquido

LP = limite plástico.

Si el LL o el LP no se pueden determinar, o si el LP es igual o mayor que el LL se informara que el suelo es no plástico, NP.

4) Resistencia al esfuerzo cortante

La capacidad de soporte es una de las propiedades más importantes de los suelos, puesto que su comportamiento, al estar sometido a tensiones es bastante más complejo que el de otros materiales, sufre una determinada deformación, la cual, si se llega al momento en que el suelo se rompe o sigue deformándose con un pequeño o ningún esfuerzo, significa que ha alcanzado el valor límite de su resistencia, ósea, que el suelo ha fallado por corte Por eso que todos los métodos destinados a determinar la capacidad de carga de un suelo, se basan en el esfuerzo cortante directa o indirectamente [18].

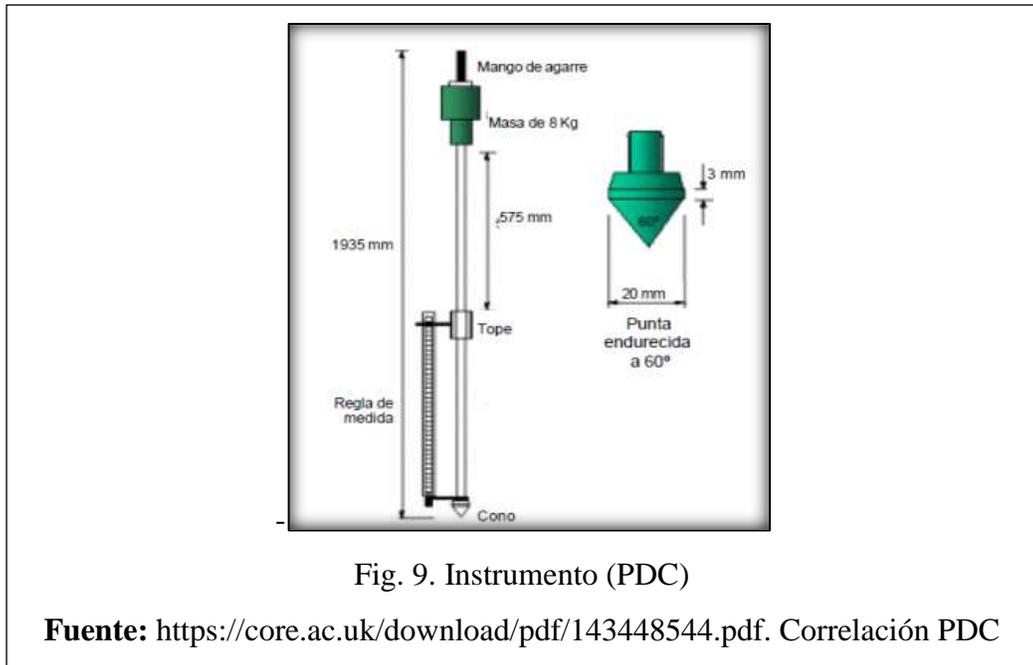
a) Ensayos en laboratorio y en sitio

- Ensayo de Penetración Dinámica de Cono (PDC).

La norma colombiana para realizar el ensayo de PDC es la INV E 173-13 (uso del penetrómetro dinámico de cono en aplicaciones de pavimentos a poca profundidad) [19]. El equipo P.D.C, como instrumento de medida del CBR, aporta una gran ventaja en la facilidad de ejecución del ensayo y el tiempo que se requiere para poder obtener resultados. Mide la penetración por golpe a través de las distintas capas componentes del suelo, La cual, es función de la resistencia al corte “in situ”. [8]

- Descripción del Penetrómetro Dinámico del Cono.

Los penetrómetros son dispositivos que pueden ser introducidos en el suelo o en una muestra de éste y medir la resistencia que ofrece a la penetración. (Figura 9).



El instrumento del que se hará uso en la investigación, consta de una varilla de acero de penetración de 16mm. de diámetro, unida a un cono de acero templado de 60 grados y 20mm. de diámetro en su extremo inferior, el cual permite ser introducido en el suelo por un martillo deslizante de 8Kg 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 [20].

- Formas y Evaluación de los Resultados del Ensayo PDC

Numero de Golpes Vs Profundidad o Curva PDC. Cada capa homogénea de suelo da lugar a una recta cuya pendiente recibe el nombre de índice de penetración o número PDC, el cual representa la penetración obtenida por golpe y se expresa en mm/golpe; Asimismo, esta medida de penetración describe la resistencia promedio de un suelo a través de cierta profundidad alcanzada, la cual se determina como el trabajo realizado por el suelo para detener el cono de penetración, dividido entre la distancia de penetración; por lo tanto mientras más vertical sea la gradiente, menor será la resistencia del suelo [7].

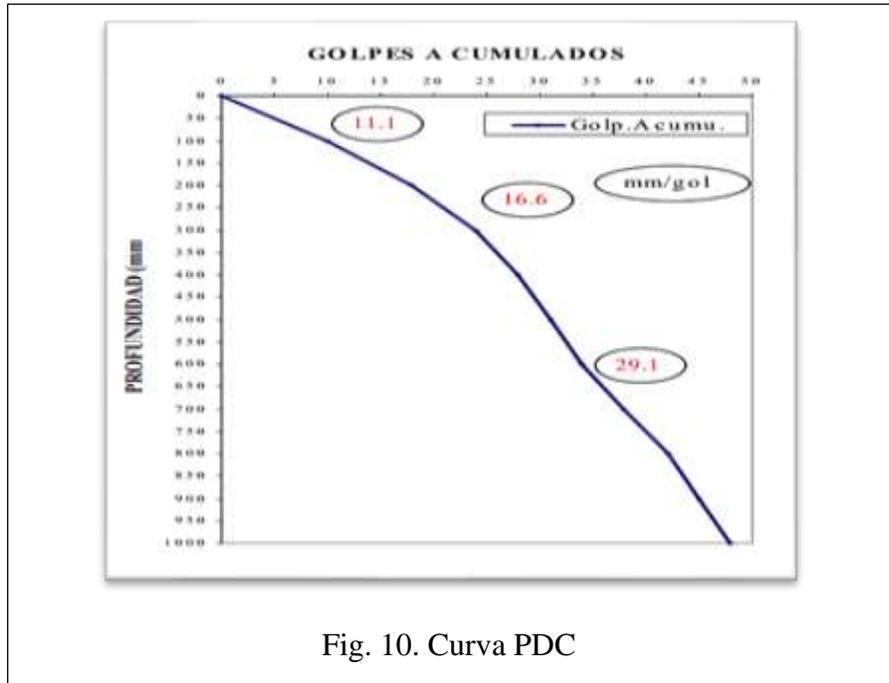


Fig. 10. Curva PDC

Diagrama Estructural. Relaciona el número de PDC con la profundidad. La constancia en dicho número implica uniformidad en el material y su variación indica modificaciones en las características de humedad, densidad o bien un cambio de estrato de suelo, Si se presentara el caso de variaciones continuas se traza una recta vertical, de tal manera se mantenga el promedio en el espesor de una capa [7].

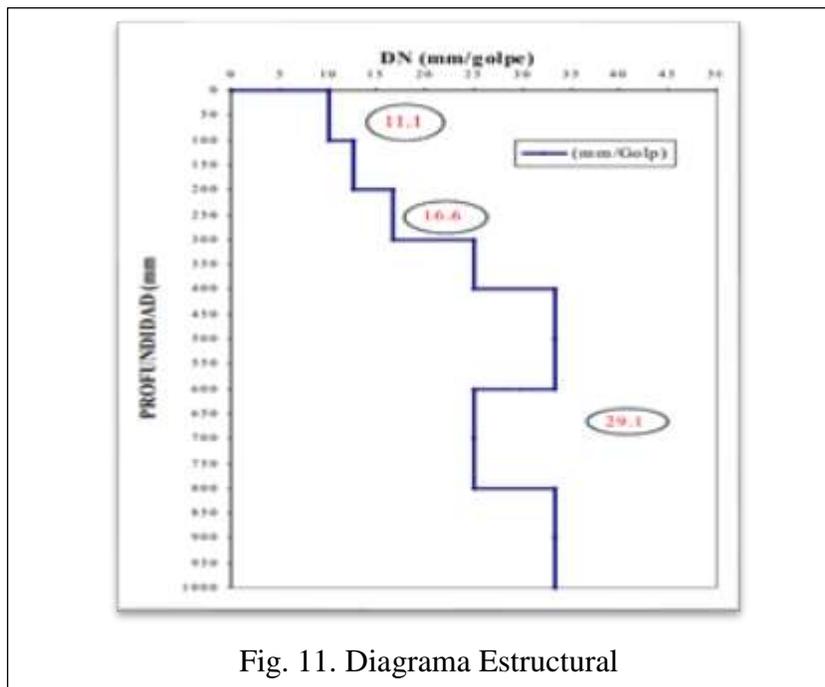
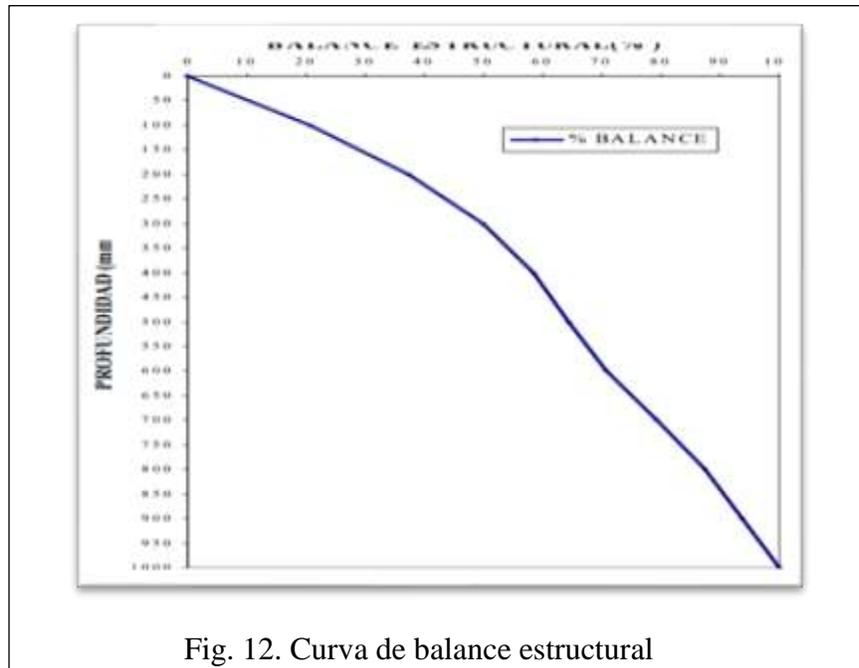


Fig. 11. Diagrama Estructural

Curva de Balance Estructural. Esta curva relaciona el porcentaje de golpes requeridos para penetrar cierta profundidad, respecto del número total de golpes necesario para penetrar la profundidad evaluada. Normalmente la capacidad de soporte de un pavimento decrece con la profundidad y si dicha disminución es uniforme se considera que el pavimento se encuentra estructuralmente equilibrado [7].



- Ensayo California Bearing Ratio (CBR) De Laboratorio en muestra inalterada.

CBR significa en español relación de soporte California. Es un ensayo para evaluar la calidad de un material de suelo con base en su resistencia, medida a través de un ensayo de placa a escala, haciendo uso de la Norma Colombiana INV E 148-13 (CBR de suelos compactados en el laboratorio y sobre muestra inalterada). Este método de prueba se emplea para evaluar la resistencia potencial de materiales de sub-rasante, sub-base y base, incluyendo materiales reciclados para empleo en pavimentos de carreteras y pistas de aterrizaje [20].

Descripción Del CBR de Laboratorio en muestra inalterada: El equipo CBR de laboratorio, a emplear en la compactación del material, consta de un molde de diámetro igual a 6" y altura de 7" a 8", un collarín de 2", un disco espaciador de acero diámetro 5 15/16" y altura 2.5", un pisón Peso

10 lb y altura de caída 18", extensómetro con aprox. 0.001", y pesas de plomo anular de 5 libras c/u (2 pesas).

Para la penetración del mismo, el equipo consta de un pistón sección circular diámetro igual a 2", Prensa hidráulica que trabajará a una velocidad $V = 0.05$ pulg/min y Equipo misceláneo como balanza, horno, recipientes y pala. (Figura 13)

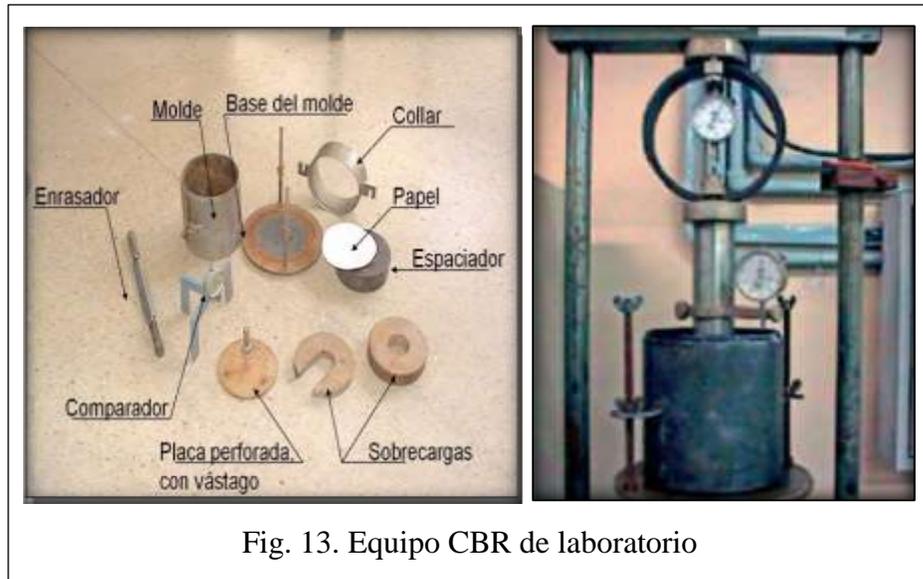


Fig. 13. Equipo CBR de laboratorio

Procedimiento: Esta prueba de CBR, consiste básicamente en extraer la muestra de suelo en el molde metálico en sus condiciones inalteradas, la cual, para determinar la resistencia a la penetración, sobre la superficie del espécimen ya extraído, se ubican la pesas metálicas anulares de plomo, se coloca en ceros el extensómetro que mide a deformación y se aplica una penetración vertical controlada mediante el pistón a una velocidad de 0.05" por minuto, se anotan las cargas para incrementos de 0.025" (Tabla 2) y finalmente se determina el contenido de humedad.

Una vez ensayadas las muestras, se realiza el cálculo del esfuerzo, que se denomina como relación entre la carga aplicada y el área de contacto con el pistón, y se grafican los datos obtenidos entre esfuerzo y deformación.

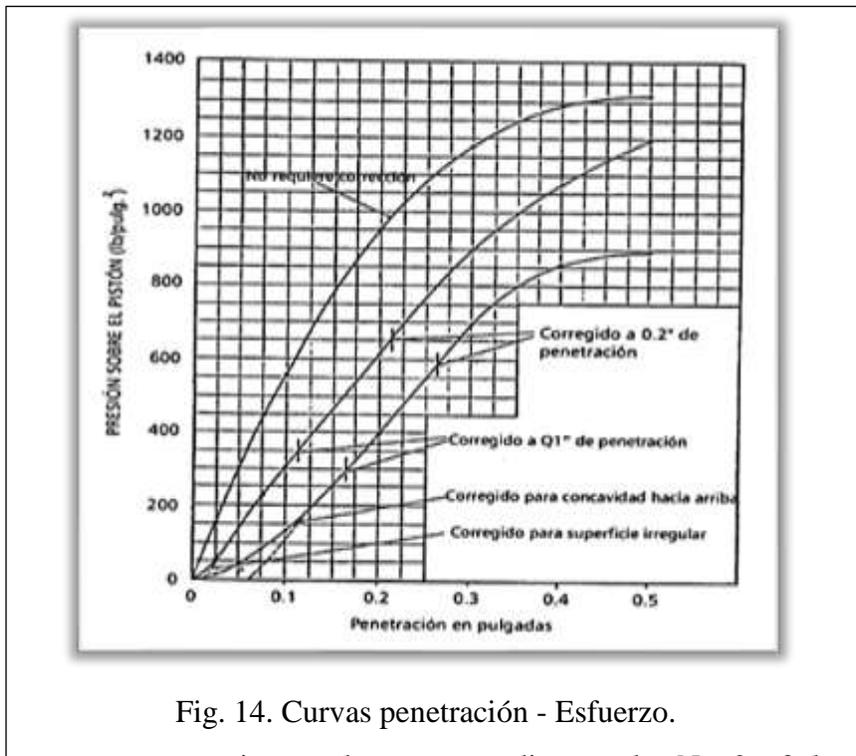
TABLA II. LECTURAS DE CARGA

Milímetros	Pulgadas
0,63	0,025
1,27	0,050
1,91	0,075
2,54	0,100
3,18	0,125
3,81	0,150
5,08	0,200
7,62	0,300
10,16	0,400 *
12,70	0,500 *

Nota. Estas lecturas se hacen si se desea definir la forma de la curva, pero no son indispensables

- Cálculos.

Curva penetración- esfuerzo: Las lecturas tomadas, tanto de las penetraciones como de las cargas, se representan gráficamente en un sistema de coordenadas. Si la curva esfuerzo/penetración que se obtiene es semejante a la del ensayo No. 1 de la Figura 14, los valores anotados serán los que se tomen en cuenta para el cálculo de C.B.R. [8]



En cambio, si las curvas son semejantes a las correspondientes a los No. 2 y 3, las curvas deberán ser corregidas trazando tangentes en la forma indicada en la Figura 14. Los puntos A y B, donde

dichas tangentes cortan el eje de abscisas, serán los nuevos ceros de las curvas. Las cargas unitarias y penetraciones se determinarán a partir de estos ceros. Si se analiza la curva del ensayo No. 3 tendremos que el esfuerzo correspondiente a la penetración corregida de 0.10” será de 300 lb/pulg² en lugar de 120 lb/pulg², que es la correspondiente a la lectura inicial sin corregir de 0.10” [21].

Valor de relación de soporte: A través de este procedimiento se determina la relación de soporte (**Índice CBR**) expresado en porcentaje, la cual se define como la relación entre la carga determinada y la que se obtiene por el mismo procedimiento para una muestra tipo de piedra picada (Tabla 3), puesto que para determinar el C.B.R. se toma como material de comparación la piedra triturada que sería el 100%, es decir C.B.R. = 100%.

TABLA III. CARACTERÍSTICAS MUESTRA PATRÓN (PIEDRA PICADA)

Penetración		Presión		
mm	Pulgadas	MPa	Kg/cm ³	lb/plg ²
2,54	0,1	6,90	70,31	1,000
5,08	0,2	10,35	105,46	1,500

La resistencia a la penetración que presenta a la hincada del pistón es la siguiente:

$$\%CBR = \frac{\text{esfuerzo del suelo ensayado}}{\text{esfuerzo en la muestra patron}} * 100 \quad (4)$$

De los %CBR obtenidos en el ensayo se grafica con las densidades obtenidas para las energías de compactación utilizadas y con los datos obtenidos en Proctor de densidades secas con lo cual se puede obtener un CBR de diseño.

Si los C.B.R. para 0.10” y 0.20” son semejantes, se recomienda usar en los cálculos, el C.B.R. correspondiente a 0.20”. Si el C.B.R. correspondiente a 0.20” es muy superior al C.B.R. correspondiente al de 0.10”, deberá repetirse el ensayo.

- Ensayo California Bearing Ratio (CBR) “In Situ”.

Los ensayos de CBR "in situ" son usados para evaluación y diseño de las capas de un pavimento flexible como base, subbase y subrasante y para otras aplicaciones (como vías sin capa de rodadura) para las cuales el CBR es el parámetro de resistencia deseado, y se lo determina empleando la norma colombiana INV E- 169 – 13 (relación de soporte del suelo en el terreno (CBR IN-SITU)) [22].

Descripción Del CBR "In situ": El equipo de ensayo de CBR in situ, a utilizar en la presente investigación, está diseñado para la aplicación de cargas en campo, de acuerdo a las especificaciones de las normas de ensayo con capacidad máxima de 4500kf (10000lbf), y consta de un anillo de carga de 45kn, un comparador de carátula análogo, gato manual de dos velocidades, base escualizable, viga soporte en aluminio de 2" x 150 cm de largo para el comparador de carátula, dos pesas abiertas de 20lb, dos pesas abiertas de 10lb, una pesa cerrada de 10 lb, y un pistón de penetración para CBR de 49.63mm de diámetro longitud mayor a 101.6mm [22].



Fig. 15. Equipo CBR "in situ"

Procedimiento: Para efectuar el ensayo se debe alistar la superficie e ir armando el equipo hasta quedar totalmente instalado, de tal forma que éste quede directamente sobre la superficie por ensayar, en seguida se debe asentar el pistón bajo una carga inicial de aproximadamente 21 kPa (3 lb/pulg²) e ir adicionando a la platina un número de pesos de sobrecarga respecto a la colocada inicialmente, de tal forma que transmita una presión equivalente a la intensidad de carga, producida por las capas de pavimento, que se colocarán sobre la subrasante, una vez hecho esto, se debe colocar en cero las lecturas de ambos diales y aplicar la carga al pistón de penetración a una determinada velocidad, registrando las lecturas del anillo de carga para cada

0.64 mm (0.025") de incremento de penetración hasta una profundidad final de 12.70 mm (0.500") [22].



Fig. 16. Montaje para el ensayo CBR "in situ"

Al finalizar el ensayo, se debe obtener una muestra en el punto de penetración, para determinar la humedad. También, se debe determinar la densidad en un sitio alejado de 100 a 150mm (4" a 6") del punto de penetración. La densidad se debe determinar de acuerdo con alguna de las normas INV E-161, INV E-162 o INV E-164. La humedad se debe determinar aplicando alguna de las normas INV E-122, INV E-135, INV E-50 o INV E-164 [22].

- Cálculos.

Curva esfuerzo-penetración: Se calcula el esfuerzo de penetración para cada incremento de penetración y se dibuja la curva de Esfuerzo vs. Penetración. En ocasiones, la curva de Esfuerzo vs. Penetración puede en su parte inicial resultar cóncava hacia arriba, debido a irregularidades de la superficie u otras causas y, en tales casos, el punto cero se debe ajustar como se indica en la Figura14.

Relación de soporte de california (CBR): De la curva (corregida cuando corresponda) se toman los valores de esfuerzo para penetraciones de 2.54mm (0.100") y 5.08 mm (0.200") y se calculan las relaciones de soporte para cada uno (Ecuación 7). Se calcula adicionalmente, la relación de soporte para el Max esfuerzo, si la penetración es menor de 5.08mm, interpolando el esfuerzo de referencia. El CBR reportado para el suelo es, normalmente el correspondiente a 2.54mm de

penetración. Cuando la relación a 5.08mm de penetración (o a la máxima penetración, si es menor de 5.08mm) resulta mayor, se repite el ensayo. Si el ensayo de comprobación da un resultado similar, se usa la relación de soporte determinada para 5.08mm o a la máxima penetración. Ninguna otra relación de soporte se puede identificar como valor de CBR.

B. Métodos de clasificación de suelos.

1) Método de la AASHTO

Este método está basado en la agrupación de los suelos de acuerdo con el comportamiento que presentan ante las solicitudes de soporte de cargas en la aplicación como capas de cimiento de un firme. Este es el principal sistema utilizado para la clasificación de los suelos aplicables para la construcción de vías y carreteras [23].

a) Nomenclatura

Con esta tabla se puede observar como la norma AASHTO clasifica los suelos granulares en tres grandes grupos y que estos tienen algunas subdivisiones por otro lado los suelos finos se dividen en cuatro grupos. Los parámetros que tiene en cuenta este método de clasificación son el porcentaje pasa No.10, No.40, No.200, el límite líquido, el índice de plasticidad y por último el índice de grupo [24].

Clasificación general	materiales granulares (35% o menos pasa la No 200)							materiales limo arcillos (mas de 35% pasa la No 200)			
	A-1		A-3	A-2				A-4	A-5	A-6	A-7
Clasificación de grupo	A-1a	A-1b		A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7				A-7-5* A-7-6**
Analisis de cernido porcentaje que pasa: NO. 10 NO. 40 NO. 200	50 max										
	30 max	50 max	51 min								
	15 max	25 max	50 max	35 max	35 max	35 max	35 max	36 min	36 min	36 min	36 min
características de la fraccion que pasa la NO. 40 Limite liquido Indice de plasticidad											
				40 max	41 min	40 max	41 min	40 max	41 min	40 max	41 min
	6 max		NP	10 max	10 max	11 min	11 min	10 max	10 max	11 min	11 min
Indice de grupo	0		0	0		4 max		8 max	12 max	16 max	20 max
* A - 7 - 5 : IP < wL - 30) **A - 7 - 6 : IP > (wL - 30)											
$IG = 0.2(a)+0.005*(a*c)+0.01*(b*d)$											

Fig. 17. Nomenclatura para el sistema de clasificación AASHTO

2) Método de la SUCS

Esta clasificación divide a los suelos en tres grupos principales, estos son:

- ✓ Suelos de grano grueso.
- ✓ Suelos de grano fino.
- ✓ Suelos orgánicos.

El tamiz determinante del tamaño de suelos gruesos y finos es el tamiz N°200; las fracciones del suelo que son retenidas en este tamiz corresponden a suelos gruesos y las fracciones que lo pasan se consideran suelos finos. De esta forma se considera que un suelo es grueso si más del 50% de las partículas del mismo son retenidas en el tamiz N°200 y fino si más del 50% de sus partículas son menores que dicho tamiz [23].

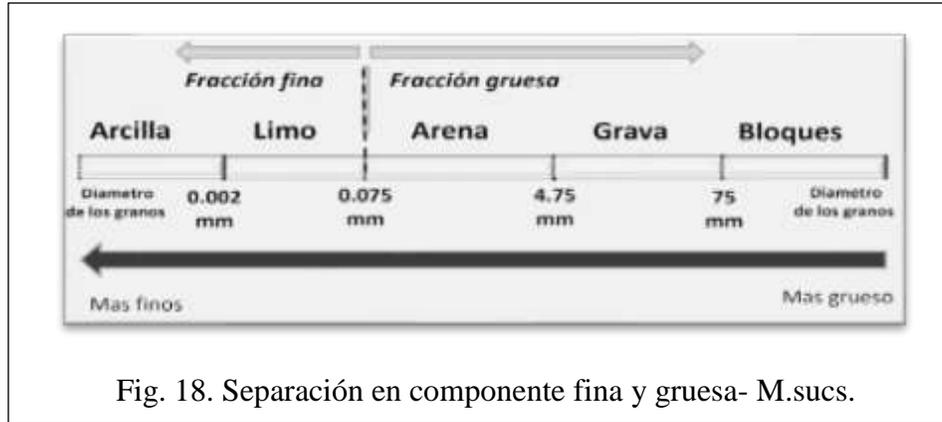


Fig. 18. Separación en componente fina y gruesa- M.sucs.

Los suelos se designan por símbolos de grupo, el símbolo de cada grupo consta de un prefijo y un sufijo. Los prefijos son las iniciales de los nombres ingleses de los seis principales tipos de suelos (grava, arena, limo, arcilla, suelos orgánicos de grano fino y turba), mientras que los sufijos indican subdivisiones en dichos grupos, así, el símbolo GW, el prefijo G (gravel) se refiere a las gravas y W (well graded) bien graduado; de forma similar en el símbolo GP se hace referencia a gravas pobremente gradadas o mal gradadas (poorly graded) [23].

Por otra parte, el S.U.C.S. considera los suelos finos divididos en tres grupos, estos son:

- ✓ Limos inorgánicos (M),
- ✓ Arcillas inorgánicas (C) y
- ✓ Limos y arcillas orgánicos (O)

Cada uno de estos suelos se subdivide a su vez, según su límite líquido, en dos grupos cuya frontera es $LI=50\%$. Si el límite líquido del suelo es menor de 50 se añade al símbolo general la letra L (low compressibility); si es mayor de 50 se añade al símbolo general la letra H (high compressibility). Los suelos altamente orgánicos, como las turbas, se designan con el símbolo Pt [23].

DIVISIONES		Simbolos del grupo	NOMBRES TÍPICOS	IDENTIFICACIÓN DE LABORATORIO		
PRINCIPALES						
SUELOS DE GRANO GRUESO	GRAVAS	Gravas limpias	GW	Gravas, bien graduadas, mezclas grava-arena, pocos finos o sin finos.	Determinar porcentaje de grava y arena en la curva granulométrica. Según el porcentaje de finos (fracción inferior al tamiz número 200). Los suelos de grano grueso se clasifican como sigue:	
		(sin o con pocos finos)	GP	Gravas mal graduadas, mezclas grava-arena, pocos finos o sin finos.	Limites de Atterberg debajo de la línea A con $IP < 4$.	
		Gravas con finos	GM	Gravas limosas, mezclas grava-arena-limo.	Encima de línea A con IP entre 4 y 7 son casos límite que requieren doble símbolo.	
		(apreciable cantidad de finos)	GC	Gravas arcillosas, mezclas grava-arena-arcilla.	Limites de Atterberg sobre la línea A con $IP > 7$.	
	ARENAS	Arenas limpias	SW	Arenas bien graduadas, arenas con grava, pocos finos o sin finos.	$< 5\%$ -> GW, GP, SW, SP.	
			(pocos o sin finos)	SP	Arenas mal graduadas, arenas con grava, pocos finos o sin finos.	$> 12\%$ -> GM, GC, SM, SC.
		Arenas con finos	SM	Arenas limosas, mezclas de arena y limo.	5 al 12% -> casos límite que requieren usar doble símbolo.	
			(apreciable cantidad de finos)	SC	Arenas arcillosas, mezclas arena-arcilla.	Limites de Atterberg sobre la línea A con $IP > 7$.
						Limites de Atterberg debajo de la línea A con $IP < 4$.
						Los límites situados en la zona rayada con IP entre 4 y 7 son casos intermedios que precisan de símbolo doble.
SUELOS DE GRANO FINO	Limos y arcillas:		ML	Limos inorgánicos y arenas muy finas, limos limpios, arenas finas, limos o arcillosos, o limos arcillosos con ligera elasticidad.		
			CL	Arcillas inorgánicas de plasticidad baja a media, arcillas con grava, arcillas arenosas, arcillas limosas.		
		Limite líquido menor de 50	OL	Limos orgánicos y arcillas orgánicas limosas de baja plasticidad.		
	Limos y arcillas:		MH	Limos inorgánicos, suelos arenosos finos o limosos con mica o diatomeas, limos elásticos.		
			CH	Arcillas inorgánicas de plasticidad alta.		
	Más de la mitad de material pasa por el tamiz número 200		OH	Arcillas orgánicas de plasticidad media a elevada; limos orgánicos.		
		Limite líquido mayor de 50				
	Suelos muy orgánicos		PT	Turba y otros suelos de alto contenido orgánico.		

Fig. 19. Clasificación Unificada de Suelos.

VI. MARCO METODOLÓGICO

A. Definición de variables

1) Variable independiente

Suelo

2) Variable Dependiente

California Bearing Ratio (CBR) De Laboratorio.

California Bearing Ratio (CBR) In situ.

Penetrómetro Dinámico de Cono (PDC).

B. Operacionalización de variables

Variable	Dimensiones	Indicadores	Subíndices	Índice	Técnicas de recolección de información	Instrumento de recolección de información	Instrumento de medición	
INDEPENDIENTE								
Suelo	Propiedades	Contenido de humedad	Agua	%	observación	Guía de observación	Balanza	
		Granulometría	Agre. Fino	mm	observación	Guía de observación	Juego de tamices	
			Agre. Grueso	mm				
		Limite Líquido	Agua	%	observación	Guía de observación	Cazuela de casagrande	
	Limite Plástico e índice de plasticidad	Agua	%	observación	Guía de observación	Metodo Manual		
	Normatividad	INV E-122-13	Contenido de humedad		%	observación	Guía de observación	Balanza
		INV E-123-13	Análisis granulométrico		mm	observación	Guía de observación	Juego de tamices
		INV E-125-14	Limite Líquido		%	observación	Guía de observación	Cazuela de casagrande
INV E-126-15		Limite Plástico e índice de plasticidad		%	observación	Guía de observación	Metodo Manual	

Fig. 20. Operacionalización de Variable Independiente

Variable	Dimensiones	Indicadores	Subindices	Indice	Técnicas de recolección de información	Instrumento de recolección de información	Instrumento de medición
DEPENDIENTE							
California Bearing Ratio (CBR) de laboratorio	Propiedades	Capacidad de soporte del suelo bajo condiciones de humedad y densidad.	--	mm/kg	observación	Guia de observación	Método de CBR de laboratorio
	Normatividad	INV E-148-13	Relaciones de penetración - carga	mm/kg	observación	Guia de observación	Método de CBR de laboratorio
California Bearing Ratio (CBR) in situ	Propiedades	Capacidad de soporte del suelo bajo condiciones de humedad y densidad.	--	mm/kg	observación	Guia de observación	Método de CBR en sitio
	Normatividad	INV E-169-13	Relaciones de penetración - carga	mm/kg	observación	Guia de observación	Método de CBR en sitio
Penetración Dinámica de Cono (PDC) in situ.	Propiedades	Resistencia a la penetración del suelo por medio de golpes.	--	mm/No. golpes	observación	Guia de observación	Penetrómetro Dinámico de Cono
	Normatividad	INV E-173-13	Relaciones de penetración - Numero de golpes	mm/No. golpes	observación	Guia de observación	Penetrómetro Dinámico de Cono

Fig. 21. Operacionalización de la Variable Dependiente

C. Abordaje, técnicas e instrumentos de recolección de datos

1) Abordaje metodológico

a) Analítica

“Se empleó este método, puesto que permitió realizar un profundo análisis de las variables (independientes y dependientes), procediendo de lo simple a lo compuesto y de pequeñas ideas hasta abordar el problema como tal” [20].

b) Cuasi experimental

Teniendo en cuenta el objetivo principal del presente proyecto, este se ha clasificado en una investigación Cuantitativo cuasi - experimental, puesto que se llevaron a cabo ensayos de CBR de

laboratorio, in situ y PDC de acuerdo a los parámetros de la Normatividad vigente, los cuales, de acuerdo a los datos derivados de dichos ensayos, se logró dar respuesta a la problemática planteada inicialmente, y por otro lado, este tipo de investigación nos permitió aproximarnos a los resultados de una investigación experimental en situaciones en las que no es posible el control y manipulación absolutos de las variables [20].

2) *Técnica de recolección de datos*

a) *Análisis Estadístico*

Para definir la cantidad necesaria de muestras (n) desde el punto de vista estadístico, se empleó coeficiente de correlación de Pearson (r), ecuación (5) [25].

$$n = \left(\frac{z_{1-\alpha/2} + z_{1-\beta}}{\frac{1}{2} \ln \left(\frac{1+r}{1-r} \right)} \right)^2 + 3 \quad (5)$$

Dónde:

✓ $Z_{1-\alpha/2}$, $Z_{1-\beta}$ = Factores que dependen de la seguridad y el poder estadístico deseados; para el desarrollo de este proyecto se contó con una seguridad y poder estadístico del 95%. Por lo tanto, $Z_{1-\alpha/2}$, $Z_{1-\beta}$ adoptan el valor de 1,96 y 1,645 respectivamente.

✓ r = Coeficiente de correlación de Pearson r igual a 0,90 (se espera al menos una correlación de 0,90).

Remplazando los valores en la ecuación (5), se determina que, de acuerdo a las condiciones especificadas anteriormente, es necesario tomar 9 muestras en el tramo de estudio.

$$n = \left(\frac{1.96 + 1.645}{\frac{1}{2} \ln \left(\frac{1 + 0,90}{1 - 0,90} \right)} \right)^2 + 3 = 8.99 = 9.00 \quad (6)$$

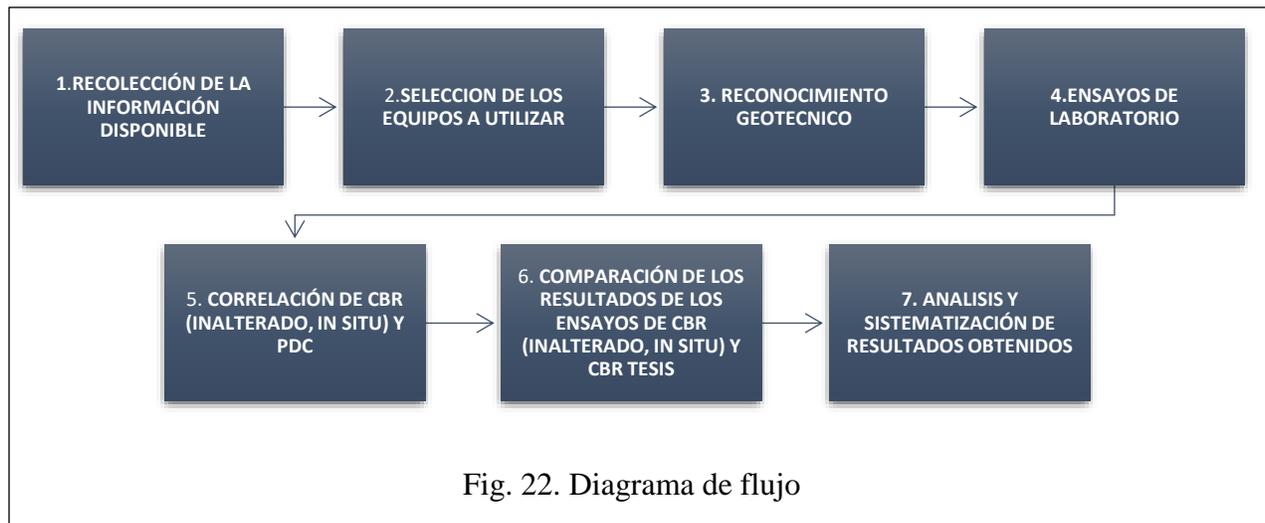
3) Instrumentos de recolección de datos

a) Guía de observación

Como instrumentos de recolección de datos, se utilizó los formatos requeridos y necesarios para ingresar y completar los datos según cada ensayo que se realizó en el laboratorio de mecánica de suelos, en la cual se observó los fenómenos ocurridos, así mismo se procedió a describir las conclusiones correspondientes del análisis de dichos ensayos.

4) Procedimiento investigativo

a) Diagrama de flujo de procesos



VII. RESULTADOS DE LA INVESTIGACIÓN

A. Aplicación de procesos

1) Recolección de la información disponible

Este proceso consistió en la recolección de información proveniente de informes, artículos científicos, tesis, normas nacionales vigentes, entre otras, la cual fue necesaria y de gran ayuda para poder lograr un mayor entendimiento de cada procedimiento llevado a cabo para el desarrollo de la presente investigación, alcanzando de esta manera la eficacia de los mismos, los cuales abarcaron desde el análisis de las características del material de estudio, hasta la etapa final del análisis de los resultados obtenidos en dicha investigación.

2) Selección de los equipos a utilizar

De acuerdo con los ensayos programados para el desarrollo de la presente investigación, se seleccionaron los equipos necesarios tanto de laboratorio como en sitio, entre ellos principalmente el equipo de CBR en sitio, CBR de laboratorio, PDC, etc.; en base y haciendo uso de los parámetros de la normatividad vigente, los cuales permitieron determinar los datos necesarios y requeridas para dicho estudio, obteniendo de esta manera resultados óptimos que fueron indispensables para cumplir con el objetivo del proyecto.

3) Reconocimiento Geotécnico

Como parte de los trabajos de campo, se realizaron visitas al sitio de estudio, y se llevó a cabo la respectiva localización de los apiques a nivel de la subrasante. Se estimaron veintisiete (27) apiques a una profundidad variable; por lo tanto, para realizar las comparaciones de CBR, se realizaron nueve (09) ensayos de PDC, nueve (09) ensayos para CBR “in situ”, y nueve (09) ensayos para CBR en laboratorio inalterado, esto con el fin, de poder lograr una mayor precisión en los resultados, teniendo en cuenta la correlación de Pearson.

Para determinar las propiedades físicas y mecánicas de los materiales existentes de los tramos en estudio y poder llevar a cabo el análisis de CBR, se tomaron muestras de suelo de cada sitio representativo. (Figura 18)



Los ensayos de laboratorio tomados a cada muestra de suelo, fueron los siguientes:

- ✓ Contenido de humedad, de acuerdo a la norma INV-E-122-13 [26].



- ✓ Análisis granulométrico de suelos por tamizado, de acuerdo a la norma INV-E-123-13 [12].



- ✓ Limite líquido, de acuerdo a la norma INV-E-125-13 [17].



- ✓ Limite plástico e índice de plasticidad, de acuerdo a la norma INV-E-126-13 [16].



Del muestreo se pudo determinar la existencia de tipos de suelos como arena arcillosa, arena limosa y arena limo arcillosa, determinados a una profundidad aproximada de -0.25m a -1.50m y clasificados según el método de la SUCS y la ASSTHO (figura 28):

APIQUE	TRAMO	SECTOR	No. DE MUESTRA	PROF. (m)	PROPIEDADES FISICAS							CLASIFICACIÓN	
					CH %	FINOS %	ARENA%	GRAVA %	LL %	LP%	IP%	SUCS	AASHTO
1	2	Parque principal	1	0,6	40,50	22,91	74,91	2,18	39,03	34,09	4,94	A - 2 - 4	SM - SC
2	1	San luis Beltran	1	0,3	39,61	33,91	64,49	1,60	47,67	43,48	4,19	A - 2 - 5	SM - SC
3	3	EL triunfo	1	0,3	28,81	32,26	47,40	20,34	47,67	37,93	9,74	A - 2 - 5	SC
4	5	Transversal 1-E	1	0,5	38,47	37,32	62,68	0,00	54,12	48,15	5,97	A - 5	SM - SC
5	5	Transversal 1-E	4	0,5	33,81	24,87	54,80	20,33	32,66	27,66	5,00	A - 1 - b	SM - SC
6	6	Mayaneth	1	0,6	49,30	44,90	50,09	5,01	51,37	42,86	8,51	A - 5	SC
7	4	Los estudiantes	1	0,4	29,96	29,84	38,18	31,97	41,43	36,36	5,06	A - 2 - 5	SM - SC
8	4	Los estudiantes	2	0,3	31,55	27,14	52,68	20,17	49,62	42,25	7,37	A - 2 - 5	SC
9	4	Los estudiantes	3	0,3	32,87	24,65	56,12	19,23	28,42	24,07	4,34	A - 1 - b	SM - SC

Fig. 28. Clasificación y propiedades físicas de las muestras de suelo.

Los resultados obtenidos fueron registrados en los formatos elaborados para tal fin (Ver Anexo N°1), una muestra de ello se puede observar a continuación:

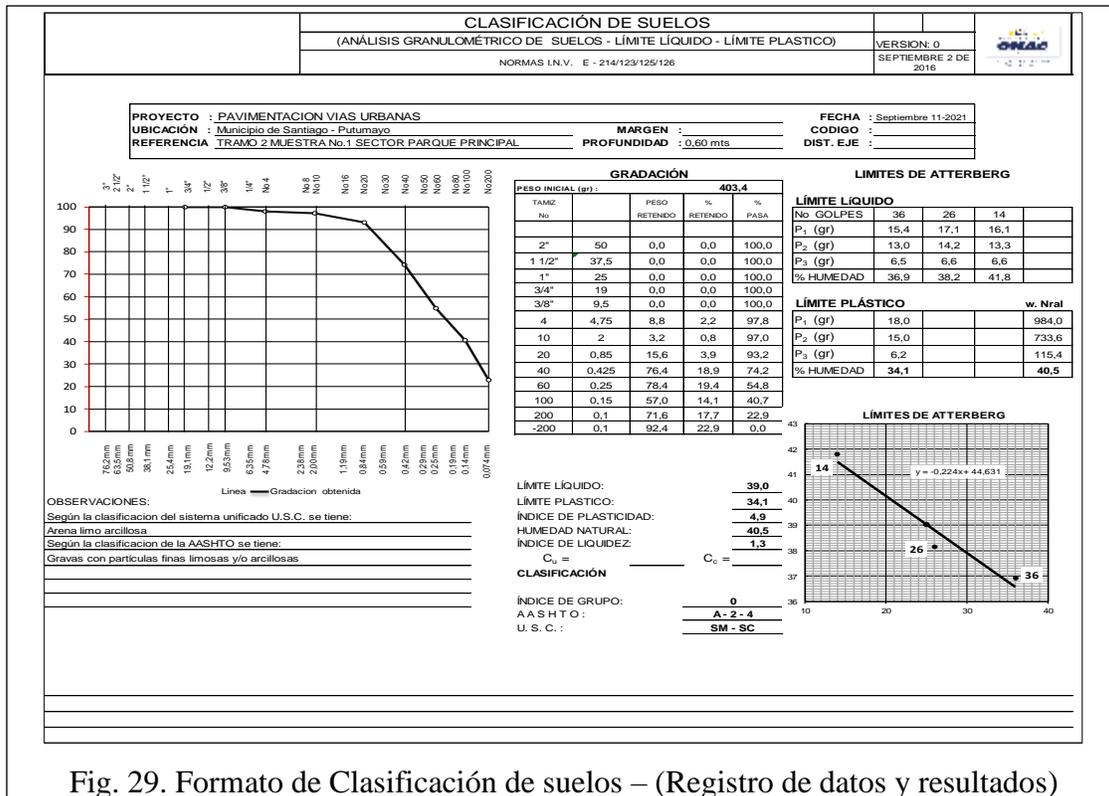


Fig. 29. Formato de Clasificación de suelos – (Registro de datos y resultados)

4) Ensayos de laboratorio

a) Aplicación del ensayo PDC IN SITU

Para llevar a cabo el ensayo del Penetrómetro dinámico Cónico (PDC) in situ, se realizaron nueve (9) apiques a varias profundidades, siendo la Max de 0.70mts aproximadamente, localizados en la vía rural comprendida ente el plan Jansasoy y puente el Cascajo, específicamente en el Sector del estadio, Barrio San Luis Beltrán, Barrio El triunfo, Barrio Mayaneth de acuerdo a la ubicación establecida (Figura 30).



Fig. 30. Excavación de Apiques en las zonas de estudio (PDC in situ).

Una vez elaborados los apiques, se ensambló el instrumento de PDC en el sitio de interés, realizando el registro de penetraciones a varias profundidades, obteniendo la Max de 1.50mts, garantizando que dicha penetración sea perpendicular al terreno (Figura 24).

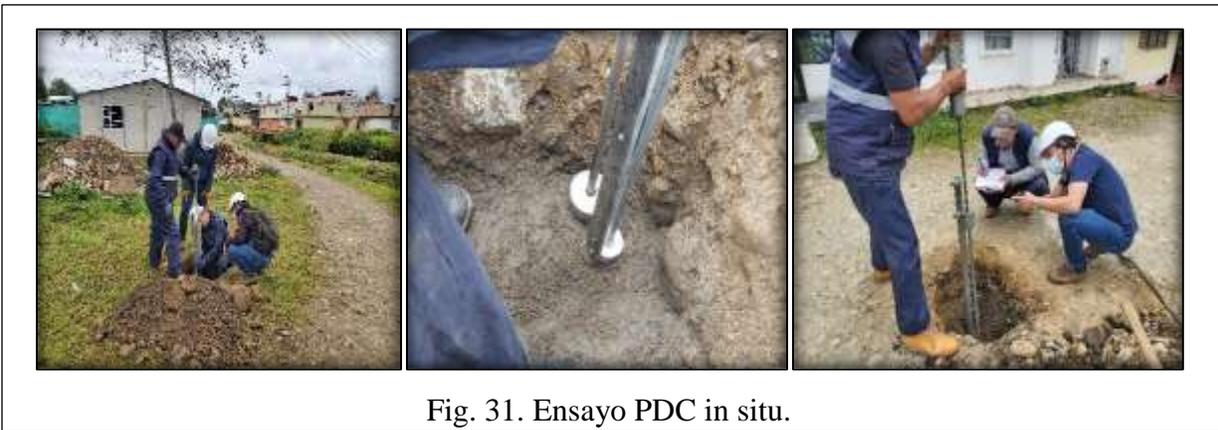


Fig. 31. Ensayo PDC in situ.

b) Aplicación del ensayo CBR IN SITU

Como primera instancia, se llevó a cabo el cargue de la volqueta con material granular (7m³), con el fin de servir como carga de reacción, y así de esta manera poder determinar la resistencia al corte del suelo en estudio (Figura 25).



Fig. 32. Preparación de la carga de ensayo.

Posteriormente de la misma manera que el ensayo PDC, se realizaron nueve (9) apiques a varias profundidades, siendo la Max de 0.70mts aproximadamente, localizados en la vía rural comprendida ente el plan Jansasoy y puente el Cascajo, específicamente en el Sector Barrio el triunfo, San Luis Beltrán, avenida los estudiantes, el estadio, parque principal y Mayaneth.



Fig. 33. Excavación de Apiques en las zonas de estudio (CBR in situ)

Enseguida, con el apoyo del personal de laboratorio, se realizó la instalación del equipo CBR in situ sobre la superficie a ensayar, y de acuerdo a los estándares del procedimiento, se asentó el

pistón bajo la carga inicial de 21 kPa (3 lb/pulg²) y se fue adicionando a la platina un número de pesos de sobrecarga respecto a la colocada inicialmente. (Figura 27).



Fig. 34. Instalación del equipo CBR in Situ.

Una vez hecho esto, se colocó en cero las lecturas de ambos diales y se aplicó la carga al pistón de penetración a una determinada velocidad, registrando las lecturas del anillo de carga para cada 0.64 mm (0.025") de incremento de penetración hasta una profundidad final de 12.70 mm (0.500"), obteniendo de esta manera una base de datos, que permitieron proyectar la curva de penetración en lb/pul² (Figura 35).



Fig. 35. Registro de datos CBR in Situ.

c) Aplicación del ensayo CBR en laboratorio (inalterado)

Como bien se sabe, para llevar a cabo el ensayo de CBR en laboratorio de muestra inalterada, el suelo a analizar se debe encontrar en estado natural, así bien, en un área de 1m², se removió la

capa vegetal en los sitios que era necesario, y se realizaron los apiques a profundidades entre 0.50 y 0.70 para poder extraer los especímenes de estudio (Figura 29).



Una vez nivelado el terreno, se instaló el molde cilíndrico, en el cual, para poder incrustarlo en el terreno y extraer la muestra, se empleó una pesa para efectuar la fuerza y realizar dicho procedimiento (Figura 37).



Finalmente, para cada muestra, se tomó su peso, humedad de horno y se la evaluó en el pistón de penetración, recopilando los datos observando la lectura del dial (Figura 38).



Fig. 38. Lecturas de penetraciones (CBR inalterado)

d) Comparación de los resultados de los ensayos de (CBR) de laboratorio, (CBR) “in situ” y (PDC).

Para lograr el objetivo principal de la investigación, se determinó la capacidad de soporte de la subrasante [27], y se recolectó la información necesaria para realizar la comparación de los ensayos de (PDC), CBR “in situ” y de laboratorio de muestra inalterada y analizar lo práctico y confiable del primero, con respecto al segundo y tercer ensayo.

- Resultados de CBR “in situ”.

Las gráficas de curvas de penetración determinadas del ensayo CBR inalterado para este proyecto, se presentan en el **anexo No.2- Documentos de Ensayos de CBR “In situ” (Registros de datos y resultados)** una muestra de ello se puede observar a continuación:

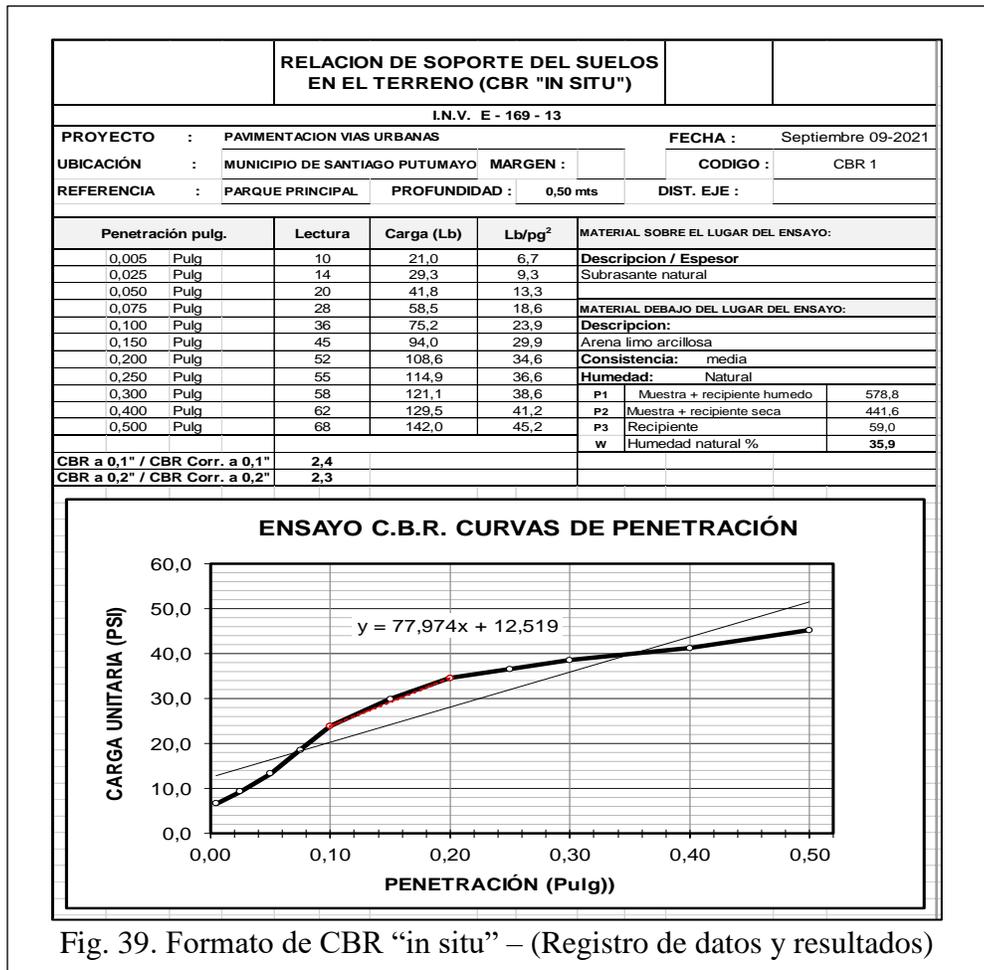


Fig. 39. Formato de CBR "in situ" – (Registro de datos y resultados)

Los resultados de CBR reportado para cada apique ejecutado corresponden a los 2.54mm (0.1") de penetración, los cuales se presentan a continuación:

TABLA IV. RESULTADOS DE CBR IN SITU

APIQUE	CBR a 0,1" / CBR Corr. a 0,1"	CBR a 0,2" / CBR Corr. a 0,2"
1	2,4	2,3
2	2,5	2,0
3	2,6	2,3
4	3,0	2,7
5	2,7	2,4
6	3,1	2,6
7	2,8	2,6
8	2,6	2,4
9	2,7	2,4

- Resultados Ensayo PDC.

De las gráficas que se presentan a continuación, vale la pena tener en cuenta que, si el valor de R^2 se acerca a uno, significa que la ecuación tiene mayor grado de confiabilidad de los resultados con respecto a los datos observados [27].

Apique No.1- Sector "Parque Principal"

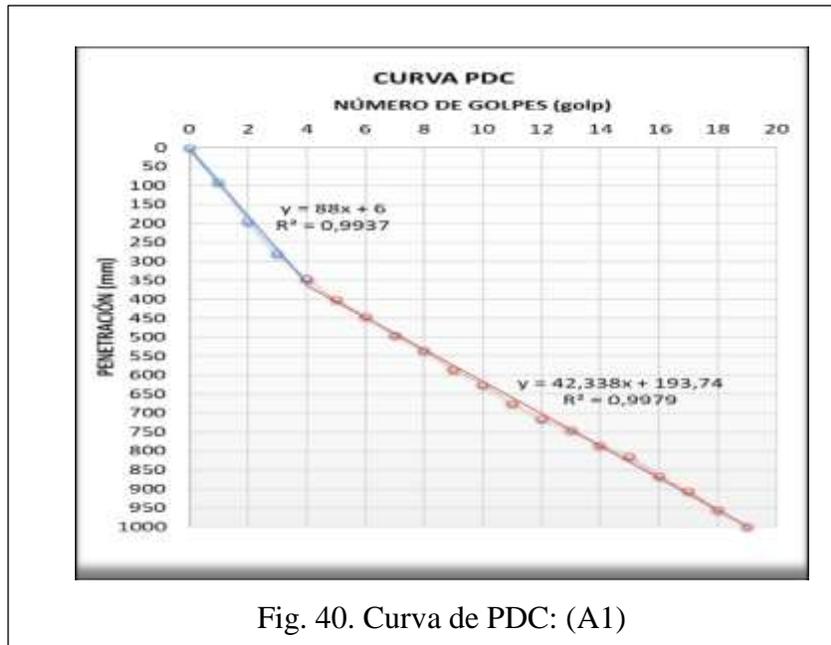


Fig. 40. Curva de PDC: (A1)

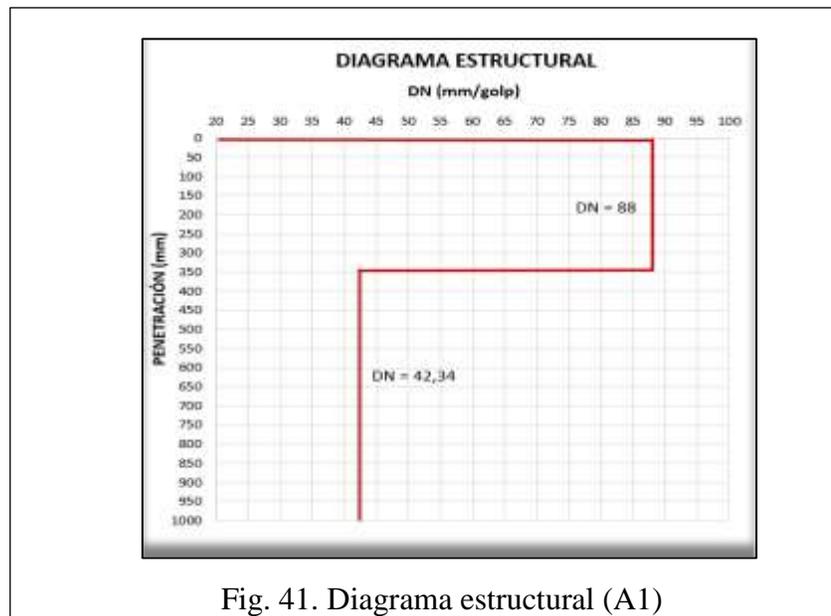
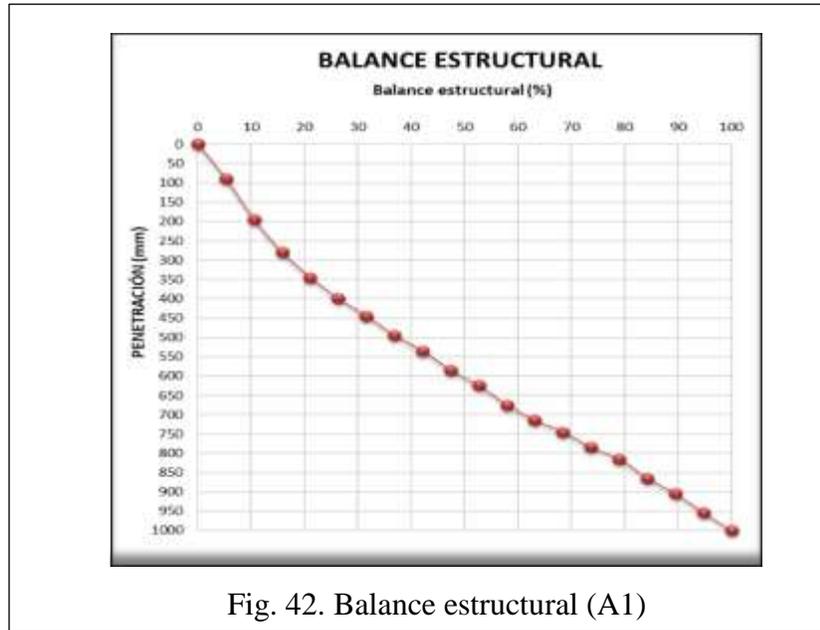
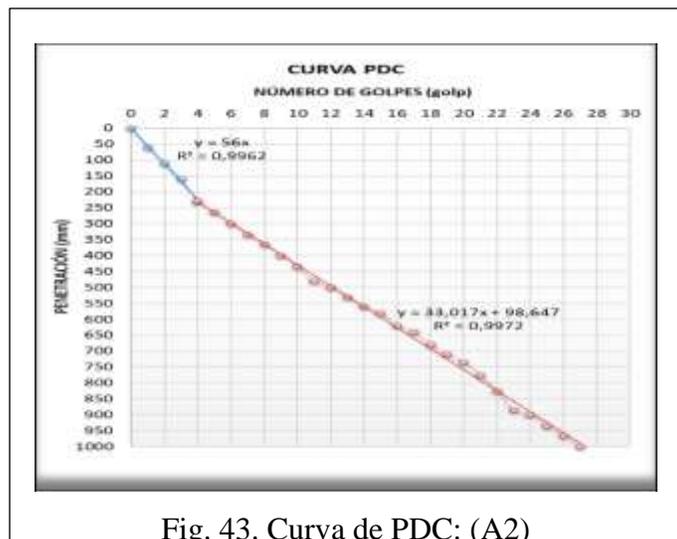


Fig. 41. Diagrama estructural (A1)



La figura de la curva PDC indica la similitud en las capas del suelo en estudio; para este caso, observaron y registraron 2 capas, cada una da origen a una recta cuya pendiente es el número de PDC o también llamado DN, empleadas para graficar el diagrama estructural, donde se define que entre mayor es la pendiente, menor es la resistencia del suelo; en este caso la primera capa es la que presenta menor resistencia; por último, la gráfica del balance estructural, que relaciona el número de golpes necesarios expresados es porcentaje para cada profundidad a evaluar.

Apique No.2- Sector "San Luis Beltran"



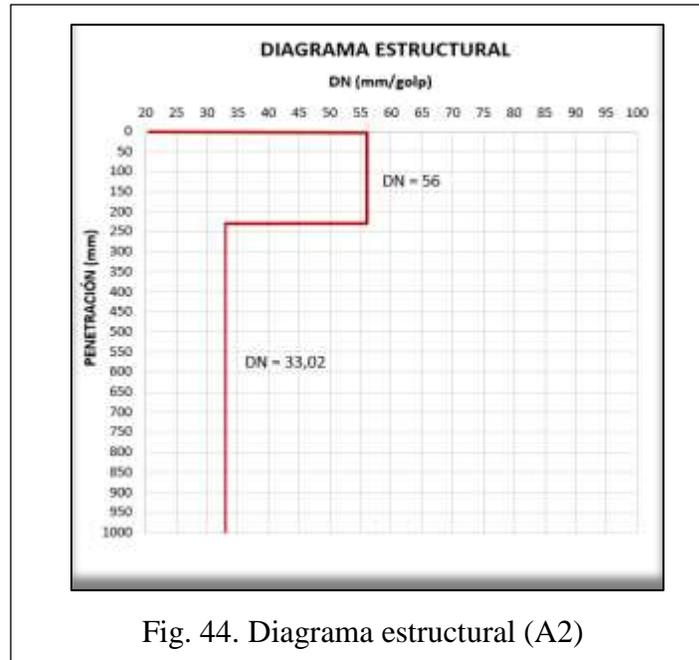


Fig. 44. Diagrama estructural (A2)

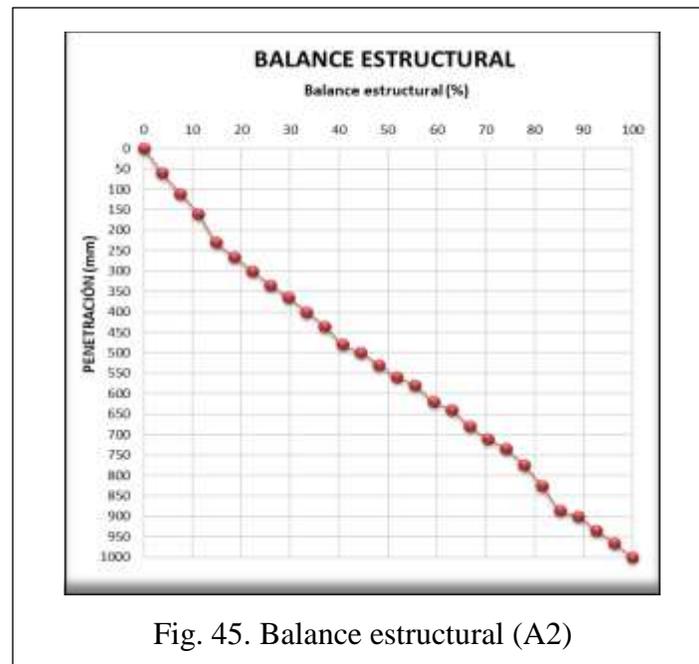


Fig. 45. Balance estructural (A2)

La grafica de la curva PDC nos indica la similitud que hay en las capas del suelo en estudio; para este caso, se lograron observar y registrar 2 capas, las cuales cada una da origen a una recta cuya pendiente es el número de PDC o también llamado DN, empleadas para graficar el diagrama estructural, donde se define que entre mayor es la pendiente, menor es la resistencia del suelo; en este caso la primera capa es la que presenta menor resistencia; por último, se obtiene la gráfica del

balance estructural, que relaciona el número de golpes necesarios expresados es porcentaje para cada profundidad a evaluar.

Apique No.3- Sector “El triunfo”

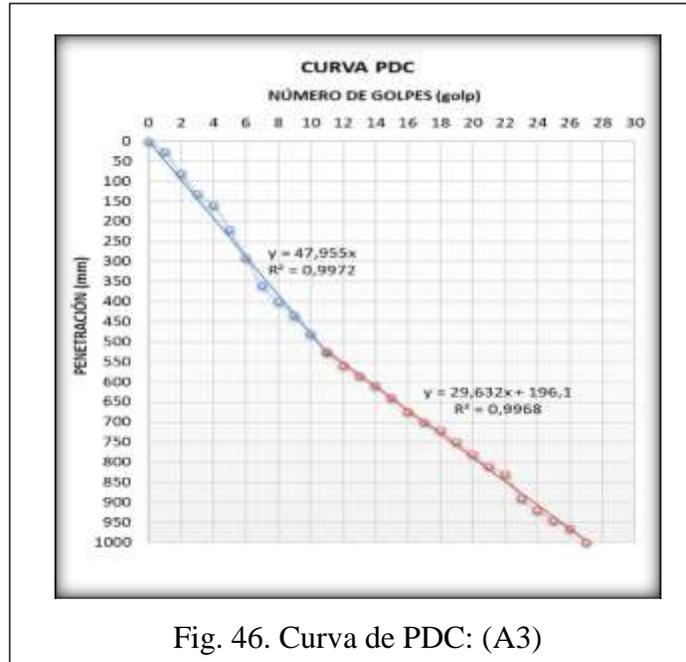


Fig. 46. Curva de PDC: (A3)

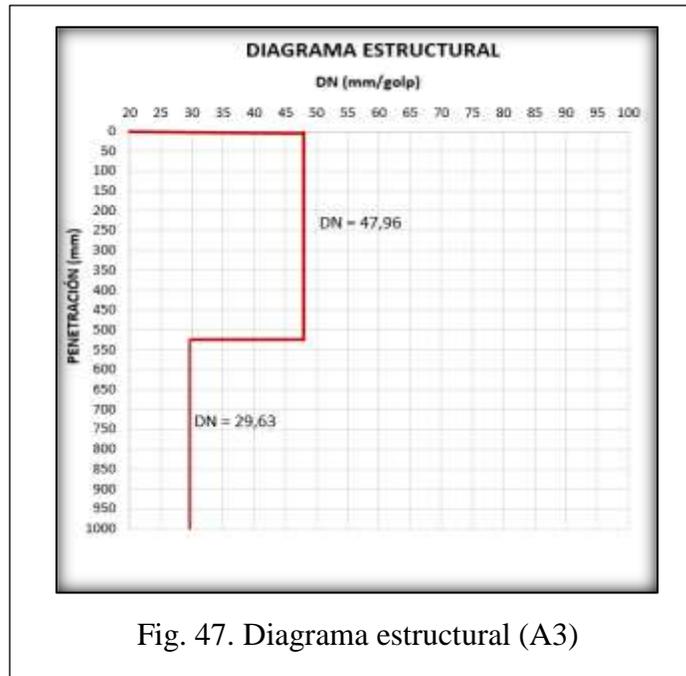
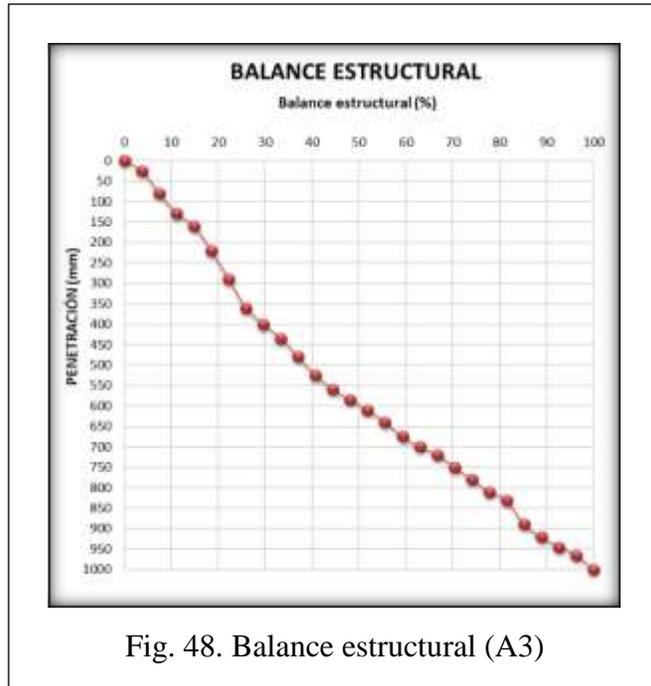
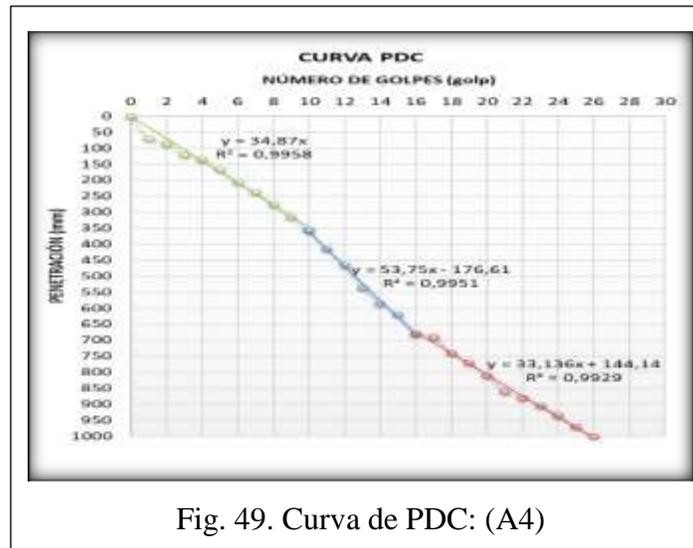


Fig. 47. Diagrama estructural (A3)



La grafica de la curva PDC indica la similitud que hay en las capas del suelo en estudio; se observaron y registraron 2 capas, las cuales cada una da origen a una recta cuya pendiente es el número de PDC o también llamado DN, empleadas para graficar el diagrama estructural, donde se define que entre mayor es la pendiente, menor es la resistencia del suelo; la primera capa es la que presenta menor resistencia; por último, la gráfica del balance estructural, relaciona el número de golpes necesarios expresados es porcentaje para cada profundidad a evaluar.

Apique No.4 - Sector "Transversal I-E"



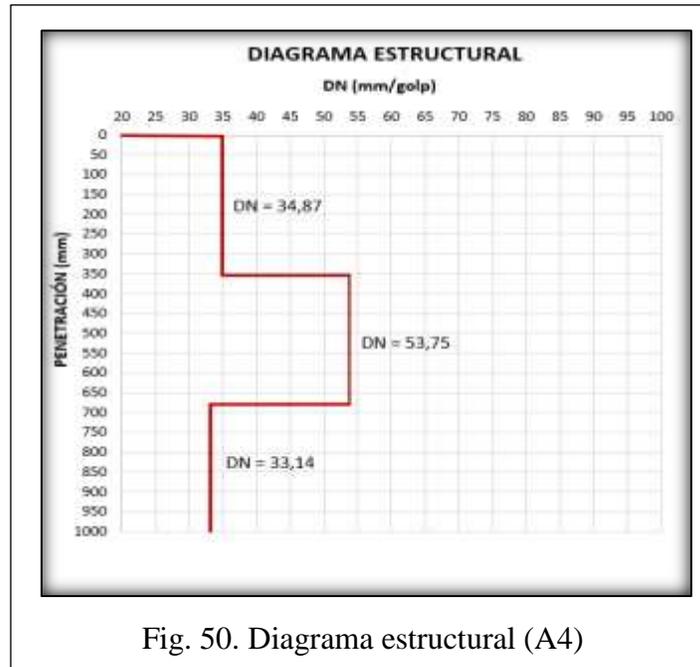


Fig. 50. Diagrama estructural (A4)

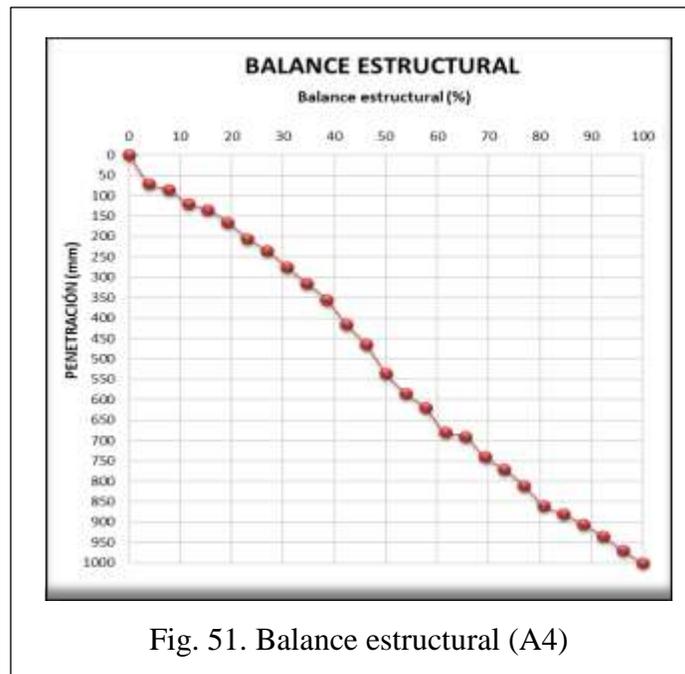


Fig. 51. Balance estructural (A4)

La grafica de la curva PDC nos indica la similitud que hay en las capas del suelo en estudio; para este caso, se lograron observar y registrar 3 capas, las cuales cada una da origen a una recta cuya pendiente es el número de PDC o también llamado DN, empleadas para graficar el diagrama

estructural, donde se define que entre mayor es la pendiente, menor es la resistencia del suelo; en este caso la segunda capa es la que presenta menor resistencia; por último, se obtiene la gráfica del balance estructural, que relaciona el número de golpes necesarios expresados es porcentaje para cada profundidad a evaluar.

Apique No.5 - Sector "Transversal I-E"

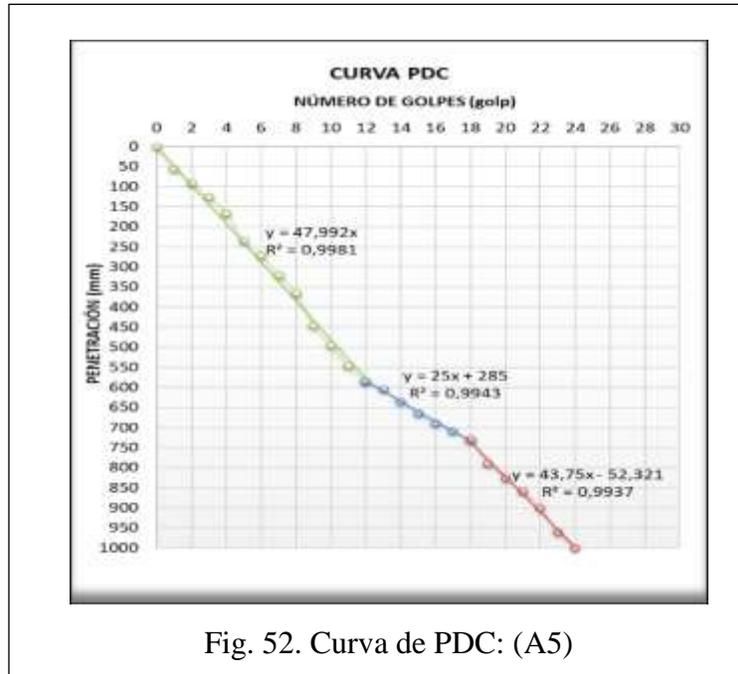


Fig. 52. Curva de PDC: (A5)

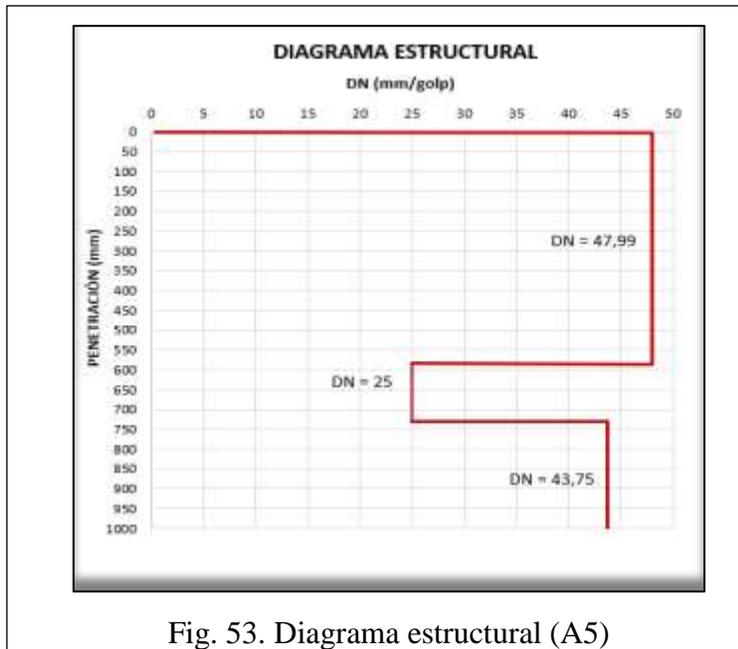
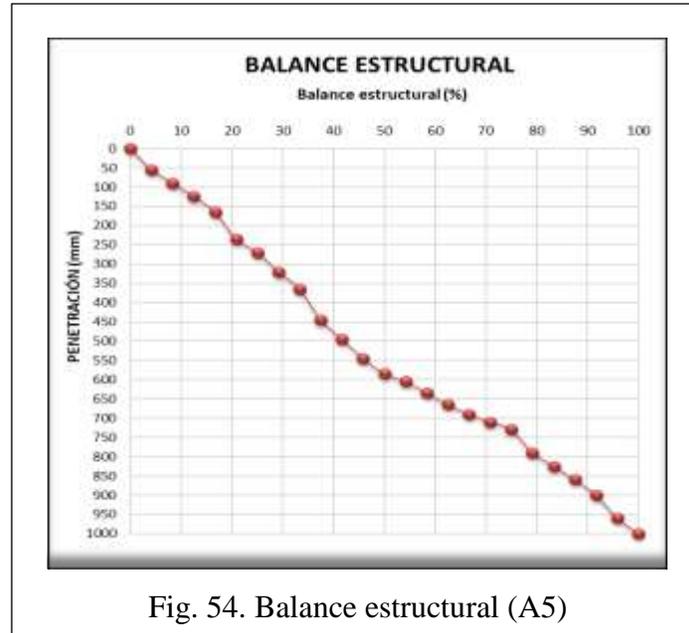
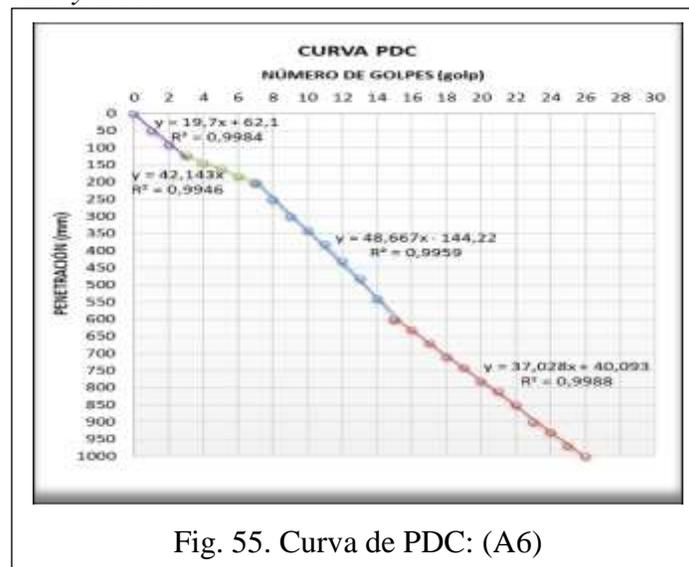


Fig. 53. Diagrama estructural (A5)



La grafica de la curva PDC indica la similitud que hay en las capas del suelo en estudio; se lograron observar y registrar 3 capas, las cuales cada una da origen a una recta cuya pendiente es el número de PDC o también llamado DN, empleadas para graficar el diagrama estructural, donde se define que entre mayor es la pendiente, menor es la resistencia del suelo; la primera capa presenta menor resistencia; por último, la gráfica del balance estructural, que relaciona el número de golpes necesarios expresados es porcentaje para cada profundidad a evaluar.

Apique No.6 - Sector "Mayaneth"



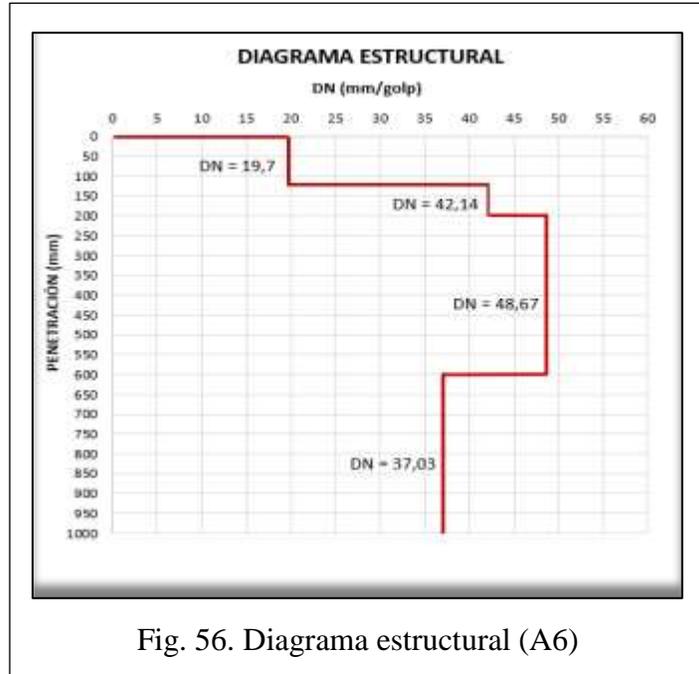


Fig. 56. Diagrama estructural (A6)

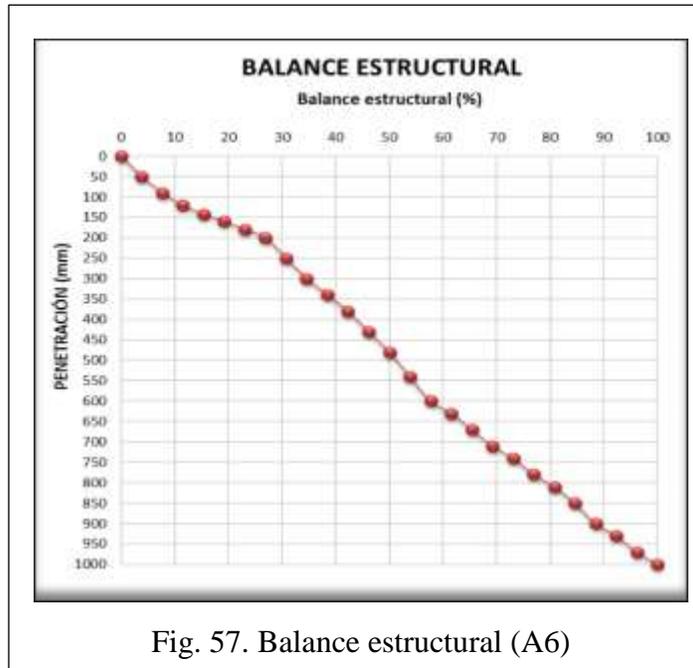


Fig. 57. Balance estructural (A6)

La grafica de la curva PDC nos indica la similitud que hay en las capas del suelo en estudio; para este caso, se lograron observar y registrar 4 capas, las cuales cada una da origen a una recta cuya pendiente es el número de PDC o también llamado DN, empleadas para graficar el diagrama estructural, donde se define que entre mayor es la pendiente, menor es la resistencia del suelo; en este caso la tercera capa es la que presenta menor resistencia; por último, se obtiene la gráfica del

balance estructural, que relaciona el número de golpes necesarios expresados es porcentaje para cada profundidad a evaluar.

Apique No.7 - Sector "Av Los Estudiantes"

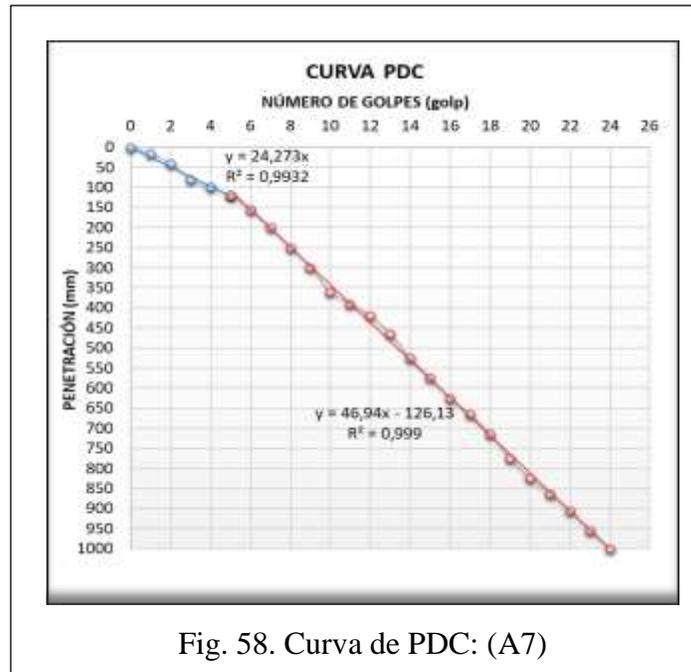


Fig. 58. Curva de PDC: (A7)

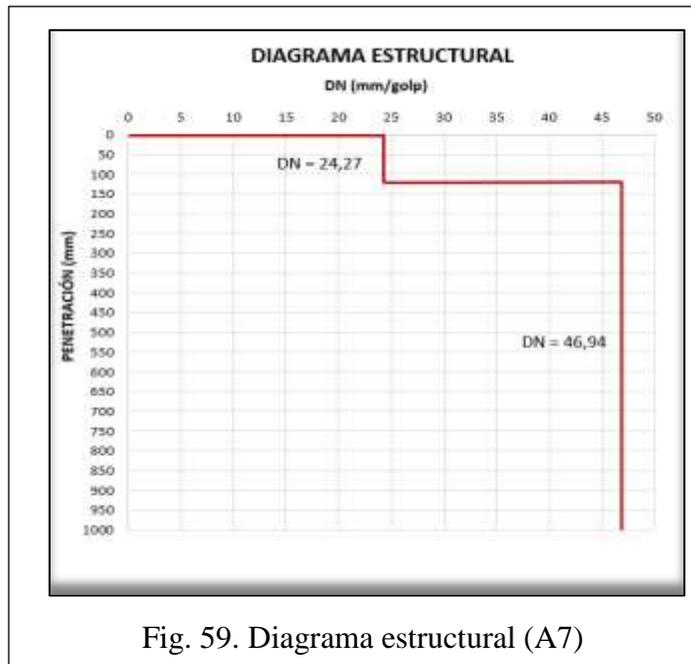


Fig. 59. Diagrama estructural (A7)

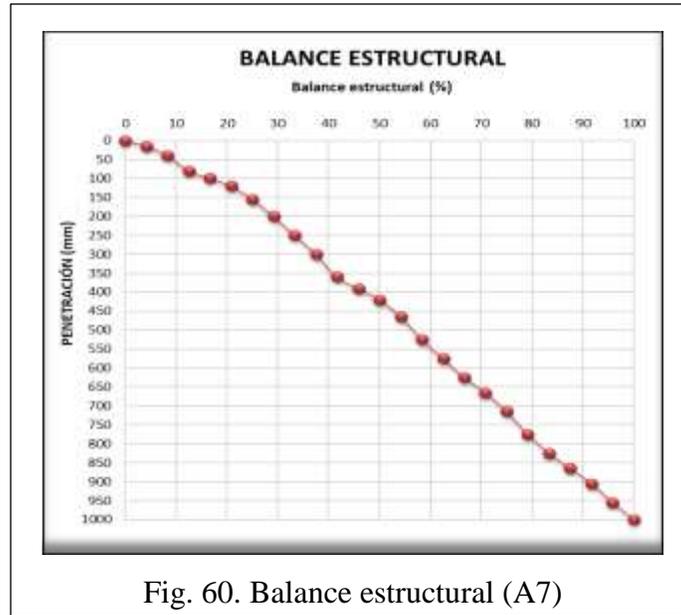


Fig. 60. Balance estructural (A7)

La grafica de la curva PDC indica la similitud que hay en las capas del suelo en estudio; se lograron observar y registrar 2 capas, las cuales cada una da origen a una recta cuya pendiente es el número de PDC o también llamado DN, empleadas para graficar el diagrama estructural, define que entre mayor es la pendiente, menor es la resistencia del suelo; la segunda capa es la que presenta menor resistencia; por último, la gráfica del balance estructural, relaciona el número de golpes necesarios expresados es porcentaje para cada profundidad a evaluar.

Apique No.8 - Sector "Av Los Estudiantes"

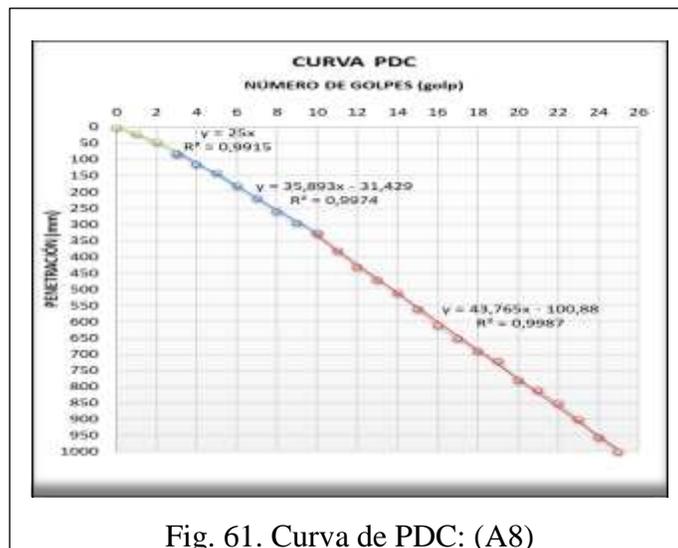


Fig. 61. Curva de PDC: (A8)

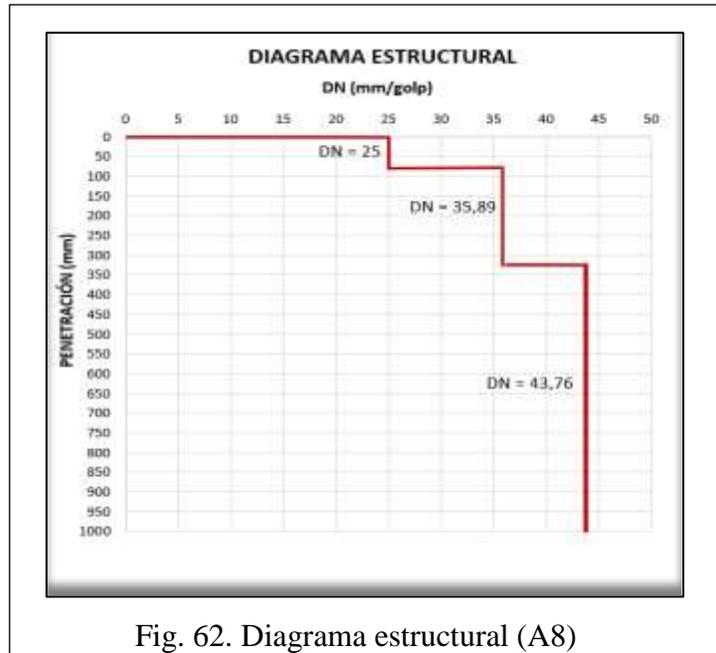


Fig. 62. Diagrama estructural (A8)

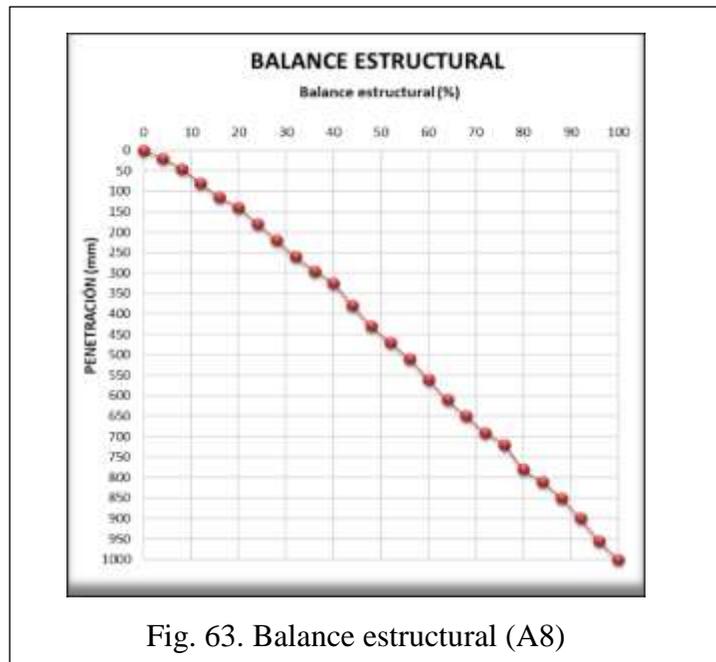


Fig. 63. Balance estructural (A8)

La grafica de la curva PDC nos indica la similitud que hay en las capas del suelo en estudio; para este caso, se lograron observar y registrar 3 capas, las cuales cada una da origen a una recta cuya pendiente es el número de PDC o también llamado DN, empleadas para graficar el diagrama estructural, donde se define que entre mayor es la pendiente, menor es la resistencia del suelo; en este caso la tercera capa es la que presenta menor resistencia; por último, se obtiene la gráfica del

balance estructural, que relaciona el número de golpes necesarios expresados es porcentaje para cada profundidad a evaluar.

Apique No.9 - Sector "Av Los Estudiantes"

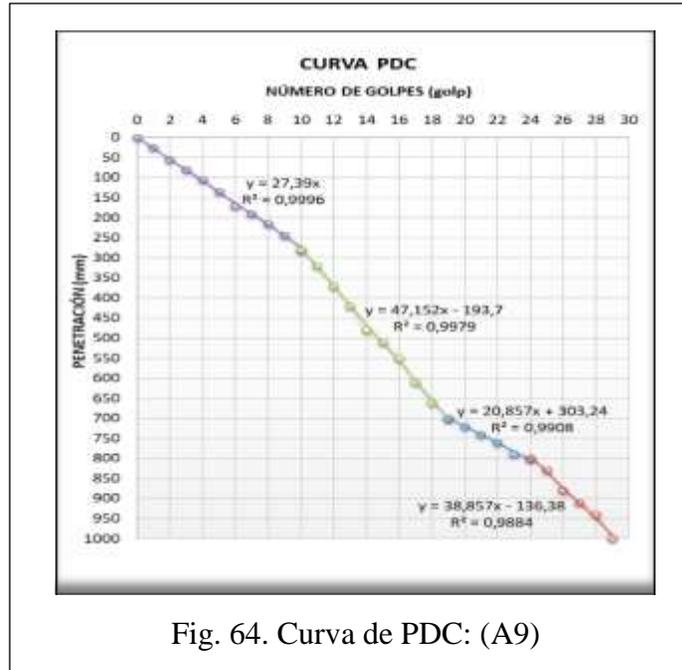


Fig. 64. Curva de PDC: (A9)

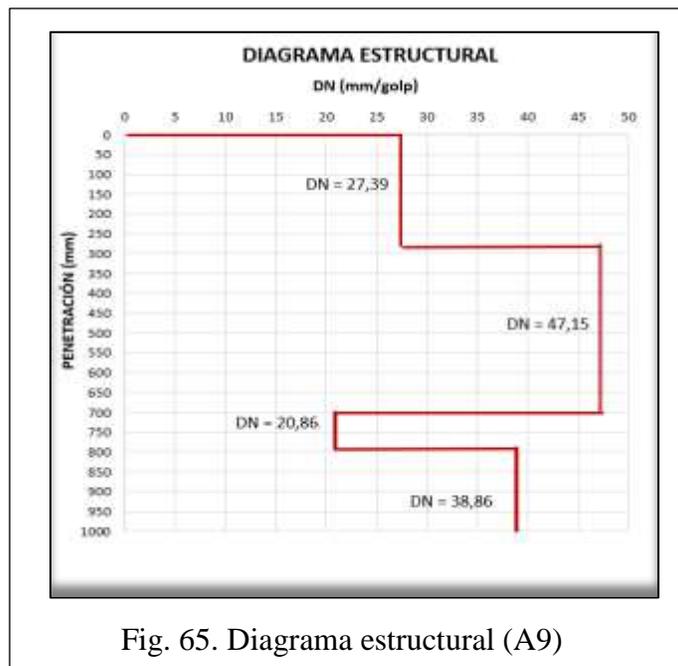


Fig. 65. Diagrama estructural (A9)

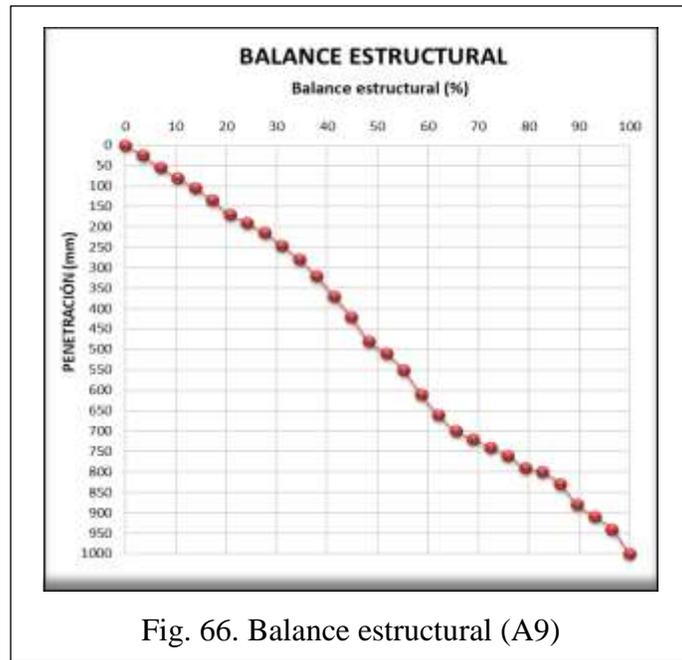


Fig. 66. Balance estructural (A9)

La gráfica de la curva PDC nos indica la similitud que hay en las capas del suelo en estudio; para este caso, se lograron observar y registrar 4 capas, las cuales cada una da origen a una recta cuya pendiente es el número de PDC o también llamado DN, empleadas para graficar el diagrama estructural, donde se define que entre mayor es la pendiente, menor es la resistencia del suelo; en este caso la segunda capa es la que presenta menor resistencia; por último, se obtiene la gráfica del balance estructural, que relaciona el número de golpes necesarios expresados en porcentaje para cada profundidad a evaluar.

- Resultados Ensayo CBR de laboratorio (Muestra inalterada).

Las gráficas de curvas de penetración determinadas del ensayo CBR inalterado para este proyecto, se presentan en el **ANEXO No4-Documentos de Ensayos de CBR de laboratorio, Muestra Inalterada (Registros de datos y resultados)**. Los resultados de CBR reportado para cada apique ejecutado corresponden a los 2.54mm (0.1”) de penetración, los cuales se presentan a continuación:

TABLA V. RESULTADOS DE CBR DE LABORATORIO (MUESTRA INALTERADA)

APIQUE	CBR a 0,1" / CBR Corr. a 0,1"	CBR a 0,2" / CBR Corr. a 0,2"
1	2,3	2,3
2	2,4	2,0
3	2,4	2,3
4	2,7	2,6
5	2,5	2,5
6	2,8	2,5
7	2,6	2,4
8	2,4	2,3
9	2,4	2,4

e) Correlación de (CBR) de laboratorio, (CBR) “in situ” y (PDC)

Una vez obtenidos los resultados de cada uno de los ensayos, se realizaron dos gráficas en las que se ubicó en el eje de las abscisas (variable independiente), el número de PDC (mm/golpes) obtenidos de la curva de PDC del suelo, y en el eje de las ordenadas (variable dependiente), el valor de CBR (en una gráfica el valor de CBR de laboratorio (muestra inalterada), y en otra el valor de CBR “in situ”), todos en función de la primera capa del suelo identificado en cada apique.

- Correlación No 1 - PCD VS CBR “In Situ”

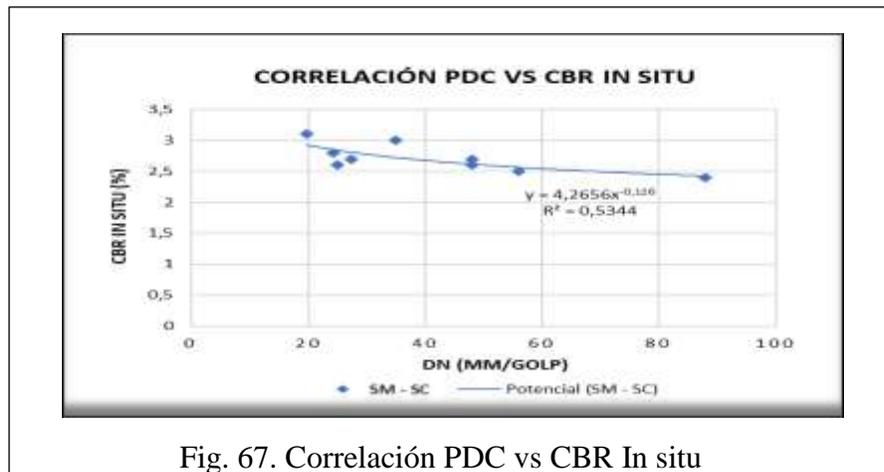


Fig. 67. Correlación PDC vs CBR In situ

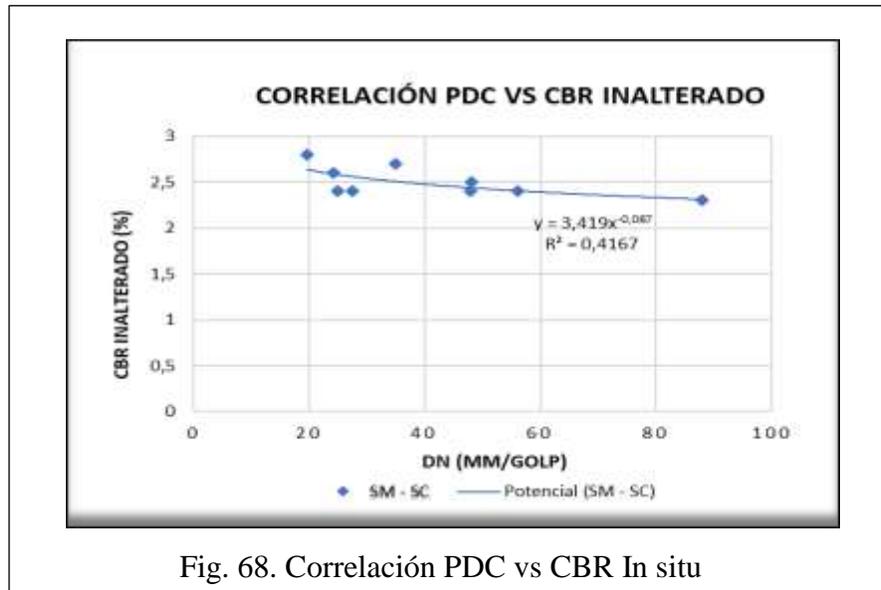
La correlación de PDC vs CBR In Situ demostrada en la gráfica anterior, para suelos SM -SC, hallados entre el Plan Jansasoy y el puente el Cascajo, fue realizada por medio de una regresión potencial, obteniendo de esta manera una línea de tendencia que da origen a una ecuación de la forma:

$$y = 4,2656x^{-0,126} \text{ con } R^2 = 0,5344 \quad (7)$$

Dónde:

- ✓ X = Numero de golpes P.D.C
- ✓ Y = C.B.R. (%)

- Correlación No 2. - PCD VS CBR De Laboratorio Inalterado.



La correlación de PDC vs CBR In Situ demostrada en la gráfica anterior, para suelos SM -SC, hallados entre el Plan Jansasoy y el puente el Cascajo, fue realizada por medio de una regresión potencial, obteniendo de esta manera una línea de tendencia que da origen a una ecuación de la forma:

$$y = 3,419x^{-0,087} \text{ con } R^2 = 0,4167 \quad (7)$$

Donde:

- ✓ X = Numero de golpes P.D.C
- ✓ Y = C.B.R. (%)

f) Comparación de los resultados obtenidos

✓ **CBR In situ – CBR TESIS**

Una vez determinada la ecuación de correlación P.D.C. con C.B.R In situ, para el tramo seleccionado en nuestro trabajo, se obtiene los valores de CBR TESIS, y se comparan con los valores de CBR inalterado, usando el número de apiques establecidos en este proyecto (tabla 6)

TABLA VI. COMPARACIÓN DE CBR- CORRELACIÓN NO.1

Apique	CBR IN SITU (%)	CBR TESIS (%)
1	2,40	2,43
2	2,50	2,57
3	2,60	2,62
4	3,00	2,73
5	2,70	2,64
6	3,10	2,93
7	2,80	2,85
8	2,60	2,84
9	2,70	2,81

Finalmente, se obtiene la gráfica representada a continuación:

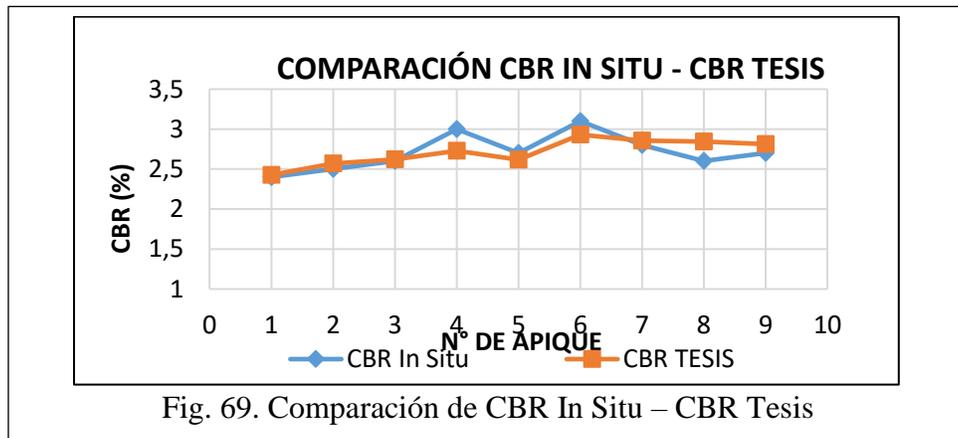


Fig. 69. Comparación de CBR In Situ – CBR Tesis

En ella se evidencia la gran similitud de los valores de CBR hallado in situ y los valores de CBR que se obtuvieron después de hallar la correlación tomando datos del PDC.

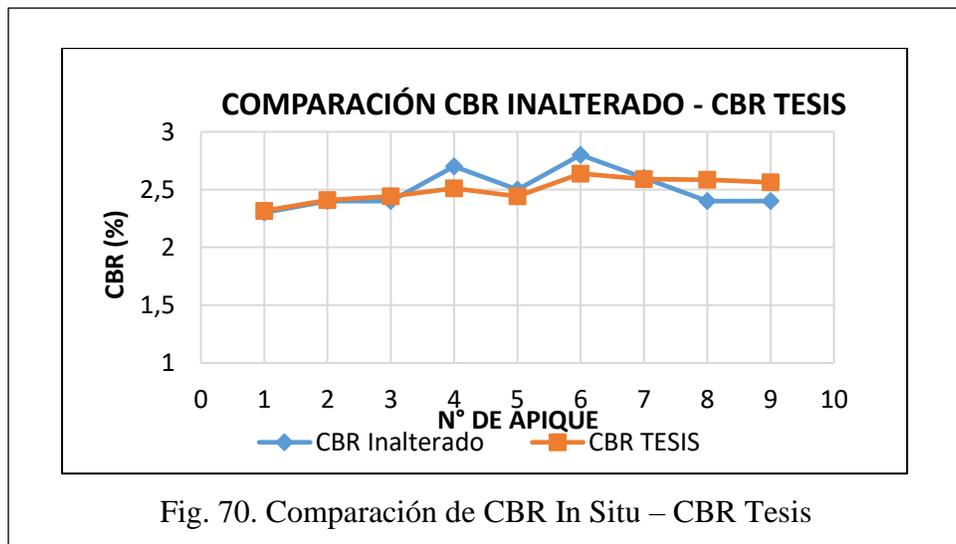
✓ **CBR Inalterado – CBR Tesis**

Una vez determinada la ecuación de correlación P.D.C. con C.B.R Inalterado para el tramo seleccionado en nuestro trabajo, obtenemos los valores de CBR TESIS, y los comparamos con los valores de CBR inalterado, utilizando el número de apiques establecidos en este proyecto; para lo anterior se tiene la siguiente tabla:

TABLA VII. COMPARACIÓN DE CBR- CORRELACIÓN NO.2

Apique	CBR IN SITU (%)	CBR TESIS (%)
1	2,30	2,32
2	2,40	2,41
3	2,40	2,44
4	2,70	2,51
5	2,50	2,44
6	2,80	2,64
7	2,60	2,59
8	2,40	2,58
9	2,40	2,56

Finalmente, se obtiene la gráfica representada a continuación:



En ella se evidencia la gran similitud de los valores de CBR hallado in situ y los valores de CBR que se obtuvieron después de hallar la correlación tomando datos del PDC.

g) Análisis y sistematización de resultados obtenidos

Teniendo en cuenta los resultados finales a partir de los tres ensayos, se efectuó el siguiente análisis que determina la confiabilidad del ensayo PDC con respecto al ensayo de CBR “in situ” y de laboratorio con muestra inalterada:

Las ecuaciones (6 y 7) determinadas anteriormente mediante regresión potencial, son las que más se ajustan a la correlación P.D.C. con C.B.R. con los datos obtenidos del tramo del municipio de Santiago, establecido para este trabajo de grado; sin embargo, el coeficiente correlativo $R^2 = 0,5344$ y $R^2 = 0,4167$ derivados de dichas ecuaciones respectivamente, nos demuestran un 53% y 42% aproximadamente de confiabilidad en los resultados, (puesto que para lograr el 100% el valor de R^2 debería ser igual a 1), esto se debe a que no existe una homogeneidad en los datos representativos, es decir, que existen valores de CBR ya sea de muestra inalterada o in situ, que difieren en mayor o menor cantidad, comparados con los que resultan de la correlación.

Se puede decir que probablemente hubo la necesidad de aumentar la cantidad de ensayos a realizar para encontrar un mayor número de datos homogéneos, pero teniendo en cuenta las gráficas en las que se comparan los datos de CBR de laboratorio inalterado y in situ, con CBR Tesis, se puede apreciar claramente la similitud y proximidad de los mismos, por lo tanto, las ecuaciones determinadas pueden ser aceptadas a criterio propio para tipos de suelo SM-SC (Arena Limo arcillosa), de la subrasante de la vía del municipio de Santiago (Putumayo) en la que se involucra el tramo en estudio.

VIII. CONCLUSIONES

Teniendo en cuenta las propiedades físicas y la clasificación de las diferentes muestras de suelo de acuerdo al método de la SUCS y AASHTO, se determinó que el tipo de suelo del tramo en estudio, en su mayor parte es Arena limo arcillosa.

Compartiendo la gran similitud de los resultados obtenidos del presente trabajo en él se brinda un grado de confiabilidad del 53% en correlación PDC con CBR in situ, y 42% en correlación PDC con CBR de laboratorio inalterado, con los resultados de algunos trabajos investigativos con objetivos semejantes como la tesis denominada “correlación PDC con CBR para suelos de localidad de Suba” [23], en la que presenta un grado de confiabilidad del 41% en correlación PDC con CBR in situ; se puede establecer al igual que su análisis final, que es posible calibrar las ecuaciones para la correlación PDC con CBR con un mayor grado de confiabilidad, si se aumenta la cantidad de datos homogéneos; de esta forma se obtendrían valores del coeficiente correlativo (R^2) más cercanos a 1; por otra parte, se define que no es 100% confiable utilizar la correlación PDC con CBR, por los bajos porcentajes de grados de confiabilidad obtenidos; por lo tanto, queda a criterio propio el empleo de las ecuaciones (6 y 7) para tipos de suelo SM-SC (Arena Limo arcillosa), de la subrasante de la vía del municipio de Santiago (Putumayo) en la que se involucra el tramo en estudio.

Finalmente, Esta técnica de correlación permitió obtener datos muy importantes del objeto de estudio, como características, comportamientos y diversos factores que, con ayuda de los ensayos de laboratorio lograron dar respuesta a la presente investigación, como por ejemplo, definir que presenta un mayor grado de confiabilidad la ecuación de correlación PDC-CBR In situ, que PDC-CBR de laboratorio inalterado; se puede decir que esto se debe a la exactitud de los ensayos.

IX. RECOMENDACIONES

Se recomienda calibrar una ecuación para más zonas de los diferentes departamentos del País, en el que se emplee una mayor cantidad de datos y un alcance más extenso, puesto que, de esta manera, se podrían obtener resultados con un mayor grado de confiabilidad, y cada vez se haría más útil el ensayo del PDC en la evaluación del CBR para proyectos viales en Colombia.

Se recomienda el uso de penetrómetro dinámico de cono (PDC), debido a que es un instrumento de fácil manejo y transporte, el cual puede intervenir en lugares de difícil acceso, sin alterar su aplicación eficaz y economía en la exploración, valoración y estudios de los suelos.

REFERENCIAS

- [1] Geotecnia Fácil, «El ensayo CBR de laboratorio: ¿Qué es? y ¿cuál es su procedimiento?,» 2021. [En línea]. Disponible en: <https://geotecniafacil.com/ensayo-cbr-laboratorio/>.
- [2] A. Mengual y M. Iñaki, «Capacidad portante,» 2020. [En línea]. Disponible en: https://www.urbipedia.org/hoja/Capacidad_portante.
- [3] S. Chirinos, «Proceso de compactación,» 2017. [En línea]. Disponible en: https://www.academia.edu/7373724/Proceso_de_compactaci%C3%B3n.
- [4] Fisterra, «Relación entre variables cuantitativas,» 2010. [En línea]. Disponible en: <https://www.fisterra.com/formacion/metodologia-investigacion/relacion-entre-variables-cuantitativas/>.
- [5] J. Anaya, S. Vargas, M. Hernández, M. Sarmiento y E. Calderón, «Densidad del suelo,» 2015. [En línea]. Disponible en: <https://www.buenastareas.com/ensayos/Densidad-Del-Suelo-1/70036213.html>.
- [6] Y. Ayala, H. Delgado, V. Cuellar y A. Salazar, «Manual de ensayos para laboratorio. Agregados (AG) para mezclas asfálticas,» 2019. [En línea]. Disponible en: <https://imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt551.pdf>.
- [7] C. Tupia y J. Alva, «Evaluación de las capacidades de soporte del terreno por medio de un equipo de penetración dinámica,» 2012. [En línea]. Disponible en: <http://www.jorgealvahurtado.com/files/Capacidad%20de%20Soporte%20PDC.pdf>.
- [8] Ministerio de Transportes y Comunicaciones de Perú, «Manual de carreteras, suelos geología, geotécnia y pavimentos,» 2013. [En línea]. Disponible en: https://cdn-web.construccion.org/normas/files/tecnicas/Manual_Suelos_Pavimentos.pdf.
- [9] Concepto Definición, «Suelo,» 2022. [En línea]. Disponible en: <https://conceptodefinicion.de/suelo/>.
- [10] Ortega, J; Rojas, H; Delgado, D, «Expediente municipal de Santiago Putumayo,» 2009. [En línea]. Disponible en: https://www.corpoamazonia.gov.co/files/Ordenamiento/POT/Exp_Municipal_Santiago.pdf.

- [11] A. Malagón, «Propuesta de guía para el laboratorio de suelos de la facultad de ingeniería civil de la Universidad La Gran Colombia,» 2016. [En línea]. Disponible en: <https://repository.ugc.edu.co/handle/11396/5172?show=full>.
- [12] Instituto Nacional de Vías, «Norma INV E-123-13. Determinación del tamaño de las partículas de los suelos,» 2013. [En línea]. Disponible en: <https://www.studocu.com/co/document/universidad-popular-del-cesar/ingenieria-ambiental/norma-inv-e-122-13-y-inv-e-123-13/16073301>.
- [13] HLC Sistemas, «¿Cómo se hace un análisis granulométrico?,» 2019. [En línea]. Disponible en: <https://bit.ly/3fh8mnP>.
- [14] G. Duque y G. Escobar, «Estructura del suelo y granulometria, Geomecánica. Universidad Nacional de Colombia,» 2016. [En línea]. Disponible en: <https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/57121/estructuradelsueloygranulometria.pdf>.
- [15] A. Puy, «Los límites de Atterberg,» 2005. [En línea]. Disponible en: <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/3282/53973-5.pdf>.
- [16] Instituto Nacional de Vías, «I.N.V. E-126-13 (ASTM D-4318-00): Limite plástico e índice de plasticidad de los suelos,» 2013. [En línea]. Disponible en: <https://www.da-lab.co/wp-content/uploads/2021/04/INV-126-13.pdf>.
- [17] Instituto Nacional de Vías, «I.N.V. E-125-13 (ASTM D-4318-00): Determinación del límite líquido de los suelos.,» 2013. [En línea]. Disponible en: <https://www.da-lab.co/wp-content/uploads/2021/04/INV-125-13.pdf>.
- [18] S. Ojeda, «Determinación ensayo capacidad del soporte del suelo (CBR),» 2018. [En línea]. Disponible en: http://ingeconuvdocs.weebly.com/uploads/8/9/4/7/8947127/capacidad_de_soporte_del_suelo.pdf.
- [19] Instituto Nacional de Vías, «I.N.V. E 172 -13. (ASTM D 6951/6951M – 09): uso del penetrómetro dinámico de cono en aplicaciones de pavimentos a poca profundidad,» 2013. [En línea]. Disponible en: <https://www.da-lab.co/wp-content/uploads/2021/04/INV-172-13.pdf>.

- [20] A. Llanos y K. Reyes, «Estudio comparativo de los ensayos california bearing ratio (CBR) de laboratorio y penetración dinámica de cono (PDC) en la localidad de PICSI,» Tesis de pregrado. Departamento de Ingeniería Civil, Universidad Señor de Sipán, 2017. [En línea]. Disponible en: <https://repositorio.uss.edu.pe/handle/20.500.12802/4125>.
- [21] J. Osorio y A. Casas, «Correlación P.D.C. con C.B.R. para suelos en la localidad de Suba,» Tesis de especialización, Facultad de Ingeniería, Universidad Nueva Granada, 2011. [En línea]. Disponible en: <https://core.ac.uk/download/pdf/143448544.pdf>.
- [22] Instituto Nacional de Vías, «I. N. V. E-169-13. (ASTM D 4429 – 09a). Relación de soporte del suelo en el terreno (CBR In Situ),» 2013. [En línea]. Disponible en: <https://www.da-lab.co/wp-content/uploads/2021/04/INV-169-13.pdf>.
- [23] C. Chacón, C. Ordóñez y L. Varón, «Clasificación de la fracción fina de materiales provenientes de canteras aledañas a Bogotá, a partir de su valor de azul de metileno y su relación con la clasificación por el sistema unificado y sistema AASHTO,» Tesis de especialización, Facultad de Ingeniería, Universidad Católica de Colombia, 2016. [En línea]. Disponible en: <https://repository.ucatolica.edu.co/handle/10983/13923?locale=es>.
- [24] R. Coraquilla, «Evaluación de los métodos aashto y uscs en la caracterización del suelo del barrio mochuelo bajo en la localidad de Ciudad Bolívar -propuesta de una metodología particular,» Tesis de pregrado, Facultad de Ciencias de la Ingeniería e Industrias, Universidad Tecnológica Equinoccial, 2017. [En línea]. Disponible en: http://repositorio.ute.edu.ec/bitstream/123456789/13954/1/68527_1.pdf.
- [25] E. Sandoval y W. Rivera, «Correlación del CBR con la resistencia a la compresión inconfinaada,» *Revista Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, vol. 29, n° 1, pp. 135-152, 2019.
- [26] Instituto Nacional de Vías, «I.N.V. E-122-13: Determinación en laboratorio del contenido de agua (humedad) del suelo, roca y mezclas del suelo – agregado.,» 2013. [En línea]. Disponible en: <https://www.da-lab.co/wp-content/uploads/2021/04/INV-122-13.pdf>.
- [27] J. Argoty, «Estudio de suelos de la subrasante,» Universidad de Nariño, Pasto, 2022.
- [28] A. Bazán y S. Prado, «Correlación entre CBR y el PDC en la determinación de la resistencia del suelo en la localidad de Moche,» Tesis de pregrado, Facultad de Ingeniería, Universidad César Vallejo, 2020. [En línea]. Disponible en: <https://hdl.handle.net/20.500.12692/50527>.

ANEXOS

Anexo 1. Documentos de clasificación de suelos (Registros de datos y resultados)

Anexo 2. Documentos de Ensayos de CBR “In situ” (Registros de datos y resultados)

Anexo 3. Documentos de Ensayos PDC (Registros de datos y resultados)

Anexo 4. Documentos de Ensayos de CBR de laboratorio, Muestra Inalterada (Registros de datos y resultados)