

CAPÍTULO I

PERFIL DE LA INVESTIGACIÓN

1.1. Introducción

Prácticamente todas las estructuras de ingeniería civil, deben cimentarse sobre la superficie de la tierra o dentro de ella. Para que una estructura se comporte satisfactoriamente debe poseer una cimentación adecuada.

Los terraplenes sobre los que se requieren construir las obras viales, transmiten esfuerzos al terreno natural bajo ellas, esos esfuerzos a su vez, producen deformaciones que se reflejan en el comportamiento estructural de los mismos.

Es por esto que al proyectar una obra civil es necesario conocer las condiciones del suelo en el cual se pretende cimentar, principalmente la capacidad portante de dicho suelo. Pero conocer las condiciones de terreno de fundación de la obra vial puede resultar una tarea costosa y difícil en terrenos cuyas características varíen constantemente.

El California Bearing Ratio (C.B.R.) o Relación Soporte California consiste en medir la resistencia al esfuerzo cortante de un suelo y para poder evaluar la calidad del terreno para sub-rasante, sub-base y base de pavimentos. El método de CBR fue propuesto en 1929 por los ingenieros T. Staton y D. J. Porter, del departamento de Carreteras del Estado de California, como una forma de clasificación de la capacidad de un suelo para ser utilizado como sub-rasante o material de base en construcción de carreteras (pavimentos flexibles). Durante la segunda guerra mundial, el Cuerpo de Ingenieros de los Estados Unidos adoptó este ensayo para utilizarlo en la construcción de aeropuertos.

El ensayo C.B.R. (la ASTM denomina el ensayo simplemente un ensayo de relación de soporte) mide la resistencia al corte de un suelo bajo condiciones de humedad y densidad controladas. El ensayo permite obtener un número de la relación de soporte, pero por la aseveración anterior es evidente que este número no es constante para un

suelo dado, sino que se aplica sólo al estado en el cual se encuentra el suelo durante el ensayo. De paso, es interesante comentar que el experimento puede hacerse en el terreno o en un suelo.

El Penetrómetro con anillo de carga se trata del instrumento más simple y sencillo que existe para obtener mediciones de penetración estática. El empuje es directamente aplicado por el operador, quien, empujando el mango, introduce la punta en el suelo; un anillo dinamométrico mide la resistencia.

Se utiliza de una forma rápida para determinar la resistencia a la penetración de los suelos en trabajos de exploración poco profundos. Los ensayos de campo y laboratorio con este equipo han probado ser una herramienta muy útil y rápida para revisar y reemplazar otros ensayos que consumen mucho tiempo.

Dentro de las bondades que presenta el conocer el C.B.R. de un terreno mediante el uso de un Penetrómetro con Anillo de Carga, se puede mencionar el mejor conocimiento de las capas del suelo y su capacidad estructural, con lo cual se puede realizar un seguimiento del comportamiento estructural e influencia de las solicitaciones, y de esta manera no sólo se puede evaluar el comportamiento del suelo existente sino además identificar tramos homogéneos con características similares. Igualmente, se puede realizar un gran número de sondeos en poco tiempo, lo que convierte al Penetrómetro con Anillo de Carga en un aparato muy útil al momento de realizar evaluaciones preliminares en un gran número de puntos.

A continuación, se presenta un estudio comparativo con el cual se relacionan datos obtenidos en el ensayo C.B.R. y del ensayo de Penetrómetro con Anillo de Carga. Se realiza un cruce de estos datos para así establecer una correlación que permita estimar los valores de C.B.R. con el uso del Penetrómetro con Anillo de Carga.

1.2. Justificación del Tema

El conocer la compactación de un terreno y su capacidad soporte ha sido, desde un principio, una de las principales actividades de la ingeniería civil.

El propósito de realizar un estudio general de las condiciones de un terreno es, ante todo, el de recolectar información lo más fidedigna posible de las condiciones del suelo en el menor tiempo, costo y esfuerzo posible.

La utilización del valor del C.B.R. (California Bearing Ratio) constituye una importante herramienta cuando se desean obtener valores que muestren cual es la capacidad portante de un suelo que será destinado a una obra vial. Este parámetro puede ser calculado in-situ o en el laboratorio, sin embargo, el cálculo del C.B.R. in-situ presenta una serie de dificultades, debidas en parte a su alto costo, tiempo de respuesta, etc.

El Penetrómetro con Anillo de Carga es un aparato portátil, puede ser usado para realizar pruebas a suelos in-situ, pavimentos de pequeño espesor, etc. Del mismo modo, este aparato presenta repetitividad de los resultados, es un ensayo casi no destructivo.

El C.B.R. se utiliza como norma para obtener valores que reflejen la capacidad portante de un suelo. En este método, utilizado en el laboratorio, se establece una relación entre la resistencia de penetración del suelo y su capacidad soporte como base de sustentación, teniendo como patrón la resistencia que ofrece la piedra picada de California, a la que se le ha asignado un máximo valor soporte igual a 100%; sin embargo, cuando se desea obtenerlo en el campo, bien sea para la subrasante en condiciones de diseño, en bases o para condiciones de rehabilitación, se realiza una penetración in-situ. Para ésto se requiere utilizar para la realización del ensayo un equipo tal que ejerza reacción a la penetración, para lo cual se suele emplear un equipo pesado que por facilidad de desplazamiento, se reduce a un camión. Las limitaciones que presenta dicho método son los problemas operacionales y de interpretación, así como su alto costo, además de lo difícil que resulta encontrar estos equipos en cualquier laboratorio de campo. Por otro lado, al realizar ensayos C.B.R. se toma un número de puntos que se consideran como representativos de la condición de todo el terreno, lo cual crea cierta incertidumbre acerca de la capacidad portante de un lugar específico del mismo.

Es por esto que se hace necesaria la utilización de distintas metodologías que permitan estimar los valores de C.B.R. con métodos más prácticos que el ensayo de C.B.R. en laboratorio, para así poder determinar dicho valor de manera rápida en un gran número de puntos.

Tomando en cuenta todo lo expuesto anteriormente, surge la necesidad de realizar una investigación en la cual se correlacionen datos obtenidos en el ensayo de C.B.R. en laboratorio y datos provenientes de ensayos con un Penetrómetro con Anillo de Carga, para así poder conseguir valores de C.B.R., usando este aparato.

1.3. Situación Problemática

Los suelos son el lugar de apoyo de toda obra civil, por lo que deben ser capaces de soportar convenientemente las cargas transmitidas por las estructuras y responder con un comportamiento apropiado.

La naturaleza presenta diversos tipos de suelos, no todos aptos para la construcción; se debe tener mucho cuidado al determinar las características del nivel de fundación de un proyecto para asegurar que un suelo pueda soportar las cargas provenientes de la estructura.

La utilización del valor del C.B.R. (California Bearing Ratio) constituye una importante herramienta cuando se desean obtener datos que muestren cuál es la capacidad portante de un suelo que será destinado a una obra vial. Este parámetro puede ser calculado in-situ o en el laboratorio. Sin embargo, el principal problema del cálculo del C.B.R. (California Bearing Ratio) es el tiempo que demanda la realización de este ensayo.

Las determinaciones que un ingeniero realiza a la aprobación de datos o muestras mediante el ensayo de C.B.R. resultan largos, por lo tanto es necesario realizar ensayos con equipos convencionales, como el Penetrómetro con Anillo de Carga, a menor tiempo.

1.3.1. Problema

- ¿Cuál es la incidencia de la correlación entre el ensayo de C.B.R. y el Penetrómetro con Anillo de Carga en suelos finos, que permita determinar valores de C.B.R. en función del Penetrómetro con Anillo de Carga, optimizando recursos?

1.4. Objetivos de la Investigación

1.4.1. *Objetivo General*

- Determinar la correlación con los resultados del C.B.R. y Penetrómetro con Anillo de Carga en suelos finos, en función al mejor ajuste entre estas variables, para estimar los valores de C.B.R., acortando el tiempo y costo que demanda el ensayo.

1.4.2. *Objetivos Específicos*

- ✓ Caracterizar y clasificar los suelos con los que se va a trabajar.
- ✓ Describir un procedimiento eficiente para el uso del Penetrómetro con Anillo de Carga.
- ✓ Establecer las principales características y funcionamiento del equipo “Penetrómetro con Anillo de Carga”.
- ✓ Definir las principales ventajas del ensayo “Penetrómetro con Anillo de Carga” con referencia al C.B.R. (California Bearing Ratio).
- ✓ Proporcionar una herramienta útil a la hora de determinar el valor de C.B.R. (California Bearing Ratio) por medio de una correlación con el Penetrómetro con Anillo de Carga.
- ✓ Establecer una ecuación que permita determinar el valor de C.B.R. (California Bearing Ratio), mediante el “Penetrómetro con Anillo de Carga”.

1.5. Hipótesis

Como parte del presente trabajo de investigación se plantea la siguiente hipótesis:

- ✓ A partir de resultados obtenidos mediante el Penetrómetro con Anillo de Carga, podemos estimar valores de C.B.R. (California Bearing Ratio) de manera rápida y óptima, en base a una correlación entre estos dos ensayos.

1.6. Definición de las variables dependientes e independientes

1.6.1. Variable Dependiente

- C.B.R. (California Bearing Ratio).

1.6.2. Variable independiente

- Penetrómetro con Anillo de Carga.

1.7. Diseño Metodológico

1.7.1. Componentes

1.7.1.1. Unidades de estudio y Decisión muestral

- Unidad de Estudio

La unidad a estudiarse son las características portantes del suelo, determinando la resistencia del suelo en laboratorio, en los suelos finos.

- Población

Los suelos finos, se extraerán el material que tenga las características específicas que requiere la investigación a realizarse.

- Muestra

Serán suelos de tipo fino, se definirán 13 tipos de suelo fino que serán extraídos de distintos puntos de la ciudad de Tarija.

- Muestreo

Se procederá a la identificación de una zona que tenga la presencia de suelo fino y posteriormente a la extracción de la muestra.

1.8. Métodos y Técnicas Empleadas

1.8.1. Definición de métodos y técnicas

Esta investigación es de tipo correlacional, las variables que intervienen en la misma son los datos de C.B.R. (California Bearing Ratio) y los datos del Penetrómetro con Anillo de Carga obtenidos en laboratorio. Ambas variables serán manipuladas para conseguir, por medio de la regresión lineal, una correlación que permita estimar el valor del C.B.R. (California Bearing Ratio) conociendo los datos del ensayo del penetrómetro con anillo de carga.

1.8.2. Técnicas de Muestreo

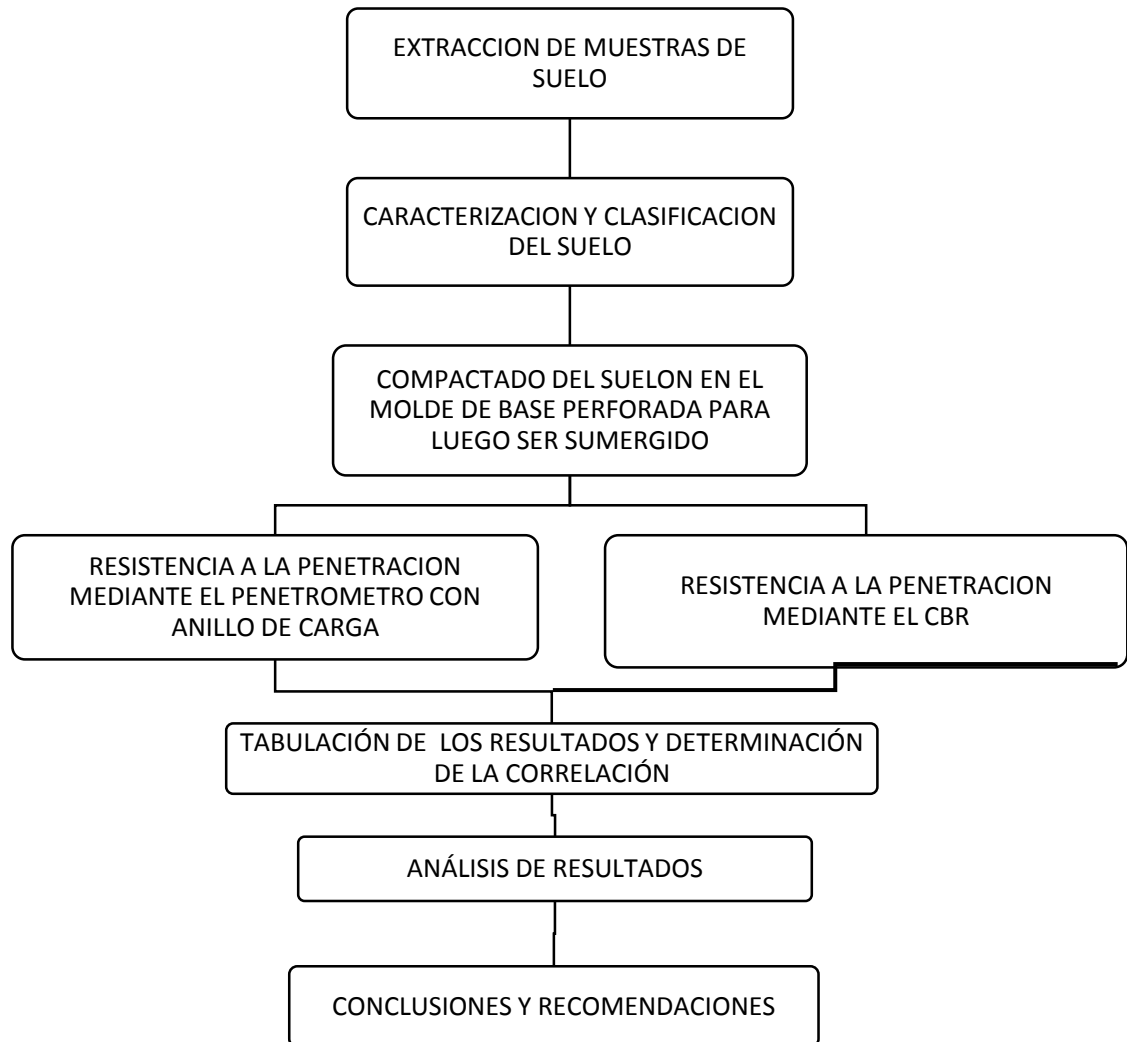
Para ello, se procede a identificar 13 puntos en zonas de la ciudad de Tarija que tenga presencia de suelo fino.

Una vez ubicado el lugar se realiza un pozo circular de una altura aproximada de 1 metro para poder realizar la extracción de 50 kg de muestra de suelo.

Que posteriormente es llevado a laboratorio para poder realizar la clasificación adecuada de la muestra, determinando así todas las características del suelo.

Luego se realizar los ensayos C.B.R. (California Bearing Ratio) y los datos del Penetrómetro con Anillo de Carga para poder obtener los datos necesarios para poder establecer la correlación necesaria para la presente investigación.

1.8.3. Procedimiento de Aplicación



1.8.4. Alcance de la Investigación

Las muestras de suelos tomadas de la ciudad de Tarija serán suelos finos, suelos que pasa más del 35% el tamiz N° 200, según la clasificación de la AASHTO.

La investigación se basará en ensayos de laboratorio, tanto del ensayo de C.B.R. (California Bearing Ratio) como el ensayo de Penetrómetro con Anillo de Carga, ambos para suelos finos.

Para el ensayo de Penetrómetro con Anillo de Carga se realizara un número de 3 pruebas para los suelos extraídos, que determine datos reales, los cuales tendrán las mismas características que para el ensayo del C.B.R. (California Bearing Ratio).

Con los resultados del Penetrómetro con Anillo de Carga y C.B.R. (California Bearing Ratio) se determinara una correlación entre la variable independiente y dependiente, en función al mejor ajuste entre ellas.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. Suelo

El suelo, es desde el punto de vista geotécnico cualquier material terrestre, excluida la roca firme, sin alterar. El mismo está formado por un conjunto de granos de rocas de diversos tamaños y formas, así como materia orgánica, agua y gases. La fuerza de cohesión que mantiene unidas estas partículas es muy pequeña, en comparación con una roca sana y así una muestra tomada del suelo se desmoronara fácilmente cuando se haya secado en el exterior y aún más si después de seca se introduce al agua y se agita un poco.

El suelo puede haberse formado por la descomposición de la roca firme que tiene debajo, o bien por descomposición de otras rocas situadas más lejos. En este caso, habrá sido transportado por agentes tales como agua, viento, hielo o fenómenos volcánicos.

El proceso de descomposición de una roca firme se llama meteorización. Bajo la acción de los agentes atmosféricos se producen unos fenómenos físicos y químicos que acaban por deshacer la roca. Unos minerales son disueltos y arrastrados por las aguas, otros más resistentes aguantan más y son llevados en suspensión o por arrastre, finalmente, al encontrar condiciones favorables se depositan.

2.2. Contenido de Humedad

El contenido de agua de un suelo o contenido de humedad es la relación entre el agua contenida en el mismo y el peso de su fase sólida, y se expresa en forma de porcentaje.

Éste puede variar entre 0 e ∞ dependiendo de las condiciones de humedad del sitio donde se localice el suelo. (Juárez, Rico, 2004 p.54) La cantidad de agua se obtiene

mediante la diferencia de peso entre el suelo en estado natural y el suelo secado en horno. La relación que expresa la humedad de un suelo es la siguiente.

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

Dónde: W_w = Peso del agua

W_s = Peso del suelos seco

2.3. Método de secado al horno

Este es el método más preciso para obtener el grado de humedad en porcentaje, y consiste en introducir en el horno eléctrico una muestra representativa del suelo en un recipiente de aluminio previamente pesado, al igual que el conjunto (recipiente + suelo). El tiempo de exposición en el horno es de 16 horas, luego del cual se retira el conjunto y se pesa nuevamente para realizar los cálculos.

2.4. Análisis granulométrico

Su finalidad, es obtener la distribución por tamaño de las partículas presentes en una muestra de suelo. Así es posible también su clasificación mediante sistemas como AASHTO o USCS. El ensayo es importante, ya que gran parte de los criterios de aceptación de suelos para ser utilizados en bases o sub-bases de carreteras, presas de tierra o diques, drenajes, etc., depende de este análisis.

Para obtener la distribución de tamaños, se emplean tamices normalizados y numerados, dispuestos en orden decreciente.

2.5. Límites de Atterberg

Los suelos que poseen algo de cohesión, según su naturaleza y cantidad de agua, pueden presentar propiedades que lo incluyan en el estado sólido, semi-sólido, plástico o semi-líquido. El contenido de agua o humedad del límite al que se produce el estado varía de un suelo a otro. El método usado para medir estos límites se conoce como método de Atterberg y los contenidos de agua o humedad con los cuales se producen los cambios de estado se denominan Límites de Atterberg.

Los límites de Atterberg o límites de consistencia se utilizan para caracterizar el comportamiento de los suelos finos. El nombre de éstos es debido al científico sueco

Albert Mauritz Atterberg. (1846-1916).

Los límites se basan en el concepto de que en un suelo de grano fino sólo pueden existir 4 estados de consistencia según su humedad. Así, un suelo se encuentra en estado sólido, cuando está seco. Al agregársele agua poco a poco va pasando sucesivamente a los estados de semisólido, plástico, y finalmente líquido. Los contenidos de humedad en los puntos de transición de un estado al otro son los denominados límites de Atterberg.

Los ensayos se realizan en el laboratorio y miden la cohesión del terreno y su contenido de humedad, para ello se forman pequeños cilindros de 3mm de espesor con el suelo.

2.6. Limite líquido

El Límite Líquido (LL) es el contenido de humedad por encima del cual la mezcla suelo-agua pasa a un estado líquido. En este estado, la mezcla se comporta como un fluido viscoso y fluye bajo su propio peso. Por debajo de este contenido de humedad la mezcla se encuentra en estado plástico. Cualquier cambio en el contenido de humedad a cualquier lado de LL produce un cambio en el volumen del suelo.

2.7. Limite plástico

El Límite Plástico LP es el contenido de humedad por encima del cual la mezcla suelo-agua pasa a un estado plástico. En este estado, la mezcla se deforma a cualquier forma bajo ligera presión. Por debajo de este contenido de humedad, la mezcla está en un estado semi - sólido. Cualquier cambio en el contenido de humedad a cualquier lado de LP produce un cambio en el volumen del suelo.

2.8. Índice de plasticidad

Atterberg definió el índice de plasticidad para describir el rango de contenido de humedad natural sobre el cual el suelo era plástico. El índice de plasticidad IP, es por tanto numéricamente igual a la diferencia entre el límite líquido y el límite plástico.

2.9. Clasificación de los suelos

Los sistemas de clasificación de suelos dividen a estos en grupos y subgrupos en base a propiedades ingenieriles comunes, tales como la distribución granulométrica, el

límite líquido y el límite plástico. Los dos sistemas principales de clasificación actualmente en uso son el sistema Unificado de Clasificación de los Suelos (S.U.C.S.) y el sistema AASHTO (American Association of State Highway Officials). El sistema de clasificación AASHTO se usa principalmente para clasificación de las capas de carreteras.

No obstante, para los trabajos de campo los suelos se clasifican en cinco grupos que son los que frecuentemente se emplean para describir el material, estos son rocas, gravas, arenas, limos y arcillas.

2.10. Sistema Unificado de Clasificación de los Suelos (S.U.C.S.)

Este sistema fue presentado por Arthur Casagrande como una modificación y adaptación más general a su sistema de clasificación propuesto en 1942 para aeropuertos.

Los suelos de partículas gruesas y los suelos de partículas finas se distinguen mediante el cernido del material por el tamiz #200.

Los suelos gruesos corresponden a los retenidos en esa malla y los finos a los que la pasan, y así un suelo se considera grueso si más del 50% de las partículas del mismo son retenidas en el tamiz #200 y fino si más del 50% son menores que dicho tamiz.

Los suelos se designan por símbolos de grupo. El símbolo de cada grupo consta de un prefijo y de 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 representan subdivisiones en dichos grupos.

2.11. Sistema de clasificación AASHTO (American Association of State Highway Officials)

El sistema de clasificación de la AASHTO utiliza un índice de grupo para comparar diferentes suelos en un mismo grupo. El índice de grupo se calcula de acuerdo a la siguiente ecuación.

$$IG = 0.2 * a * 0.005 ac + 0.01 bd$$

Donde:

a = porcentaje de material más fino que el tamiz #200, mayor que el 35% pero menor que el 75%, expresado como un número entero positivo ($1 < a < 40$).

b = porcentaje que pasa el tamiz #200, mayor que el 15% pero menor que el 55%, expresado como un número entero positivo ($1 < b < 40$).

c = porción de límite líquido mayor que 40, pero menor que 60, expresado como un número positivo entero ($1 < c < 20$).

d = porción del índice de plasticidad mayor que 10, pero menor a 30, expresado como un número positivo entero ($1 < d < 20$).

El índice encontrado de esa forma se redondea al entero siguiente y se reemplaza entre paréntesis después del número de clasificación correspondiente.

2.12. Compactación

La compactación es un proceso por medio del cual las partículas del suelo se fuerzan a un estado de empaque de mayor proximidad, con la correspondiente reducción de volumen y la expulsión de aire; para esto se requiere alimentar energía mecánica. Los suelos más susceptibles son las arenas en estado suelto o las arenas con gravas y material de relleno, en especial las que se han depositado sin una compactación adecuada.

2.13. Relación de Soporte California (C.B.R.)

La Relación de Soporte de California (California Bearing Ratio), conocida comúnmente como C.B.R., es una medida de la resistencia al esfuerzo cortante de un suelo bajo condiciones de humedad y densidad cuidadosamente controladas, que tiene aplicaciones principalmente en el diseño de pavimentos flexibles. Este ensayo se denomina simplemente como “Relación de soporte” y está normado con el número D 1883-73 de la ASTM.

El ensayo C.B.R., fue propuesto por los ingenieros T. E. Stanton y O. J. Porter del Departamento de Carreteras del Estado de California en el año de 1929 como una

forma de clasificación de la capacidad de un suelo para ser utilizado como subrasante o material de base en construcción de carreteras. Durante la segunda guerra mundial, el Cuerpo de Ingenieros de los Estados Unidos adoptó este ensayo para utilizarlo en la construcción de aeropuertos. Desde esa fecha, tanto en Europa como en América este método se ha generalizado y es hoy en día uno de los más usados en pavimento flexible. El mismo, mide la resistencia al corte de un suelo bajo condiciones de humedad y densidad controladas.

El valor C.B.R., es una relación entre la resistencia a la penetración del suelo ensayado y su capacidad soporte como base de sustentación, teniendo como patrón la resistencia que ofrece la piedra picada de California, cuyo valor de soporte es del 100%.

Se establece en este método una relación entre la resistencia a la penetración de un suelo, y su capacidad de soporte como base de sustentación para pavimentos flexibles. Si bien este método es empírico, se basa en un sinnúmero de trabajos de investigación llevados a cabo tanto en los laboratorios de ensayo de materiales, como en el terreno, lo que permite considerarlo como uno de los mejores métodos prácticos sugeridos hasta hoy.

Por medio de este método se determinan la relación humedad - peso unitario seco, las propiedades expansivas del suelo, y la relación resistencia - penetración, utilizando muestras compactadas al contenido óptimo de humedad obtenido en el ensayo Próctor Modificado. El procedimiento a seguir para la realización de este ensayo es como lo especifica la norma A.S.T.M.

Por lo tanto, el C.B.R. se define como la relación entre el esfuerzo requerido para introducir un pistón normalizado dentro del suelo que se ensaya y el esfuerzo requerido para introducir el mismo pistón hasta la misma profundidad en una muestra patrón de piedra triturada. Esta relación se expresa en porcentaje.

El ensayo C.B.R. mide la carga necesaria para penetrar un pistón de dimensiones determinadas a una velocidad previamente fijada en una muestra compactada de suelo después de haberla sumergido en agua durante cuatro días y de

haber medido su hinchamiento. El hecho de sumergir la muestra se debe a que así podemos prever la hipotética situación de acumulación de humedad en el suelo después de la construcción.

Por tanto, después de haber compactado el suelo y de haberlo sumergido, lo penetramos con un pistón, con los resultados nos genera una gráfica donde se nos representa la carga respecto la profundidad a la que ha penetrado el pistón dentro de la muestra. Esta gráfica suele ser una curva con el tramo inicial recto y el tramo final cóncavo hacia abajo (si el tramo inicial no es recto, se corrige). Una vez tenemos la gráfica miramos los valores de la carga que soportaba el suelo cuando el pistón se había hundido 2.5 mm y 5mm y los expresamos en tanto por ciento, tomando como índice C.B.R. el mayor de los porcentajes calculados.

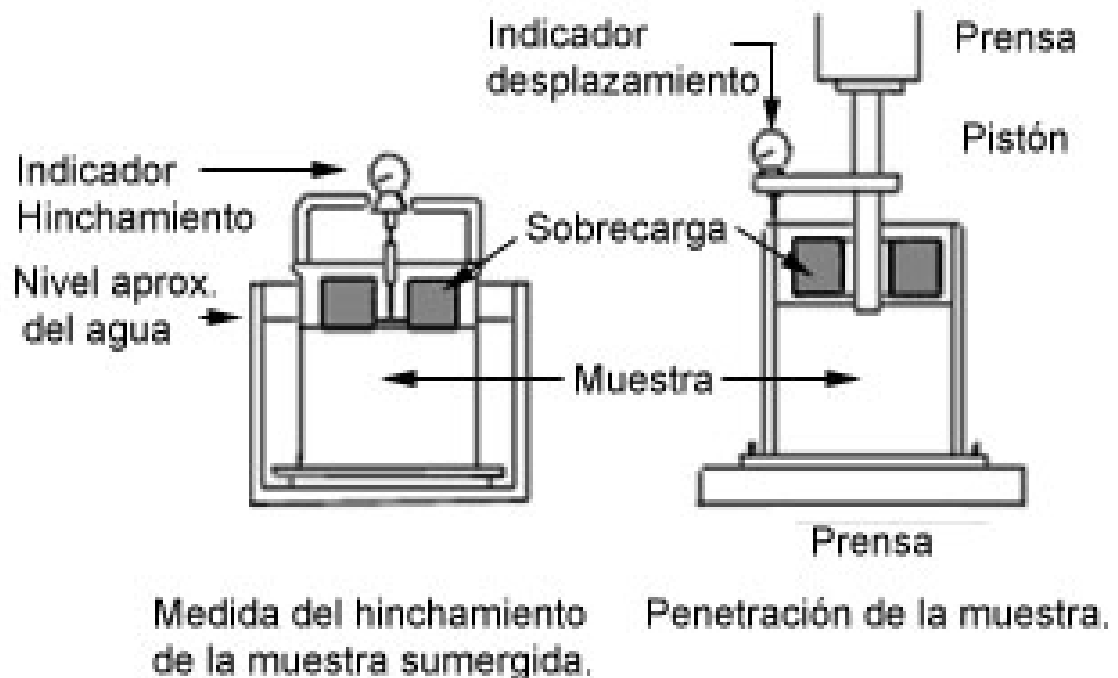


Figura 1. Prensa Hidráulica (Carreteras, calles y autopistas – Raúl V. Rodas)

El ensayo C.B.R. mide la resistencia al corte (esfuerzo cortante) de un suelo bajo condiciones de humedad y densidad controladas, la A.S.T.M. denomina a este ensayo, simplemente como “Relación Soporte” y está normado con el número

A.S.T.M. D1883-73. Este ensayo puede realizarse tanto en laboratorio como en terreno, aunque este último no es muy practicado.

El número C.B.R. (o simplemente, C.B.R.) se obtiene como la relación de la carga unitaria (en kilogramo por centímetro cuadrado) necesaria para lograr una cierta profundidad de penetración del pistón de penetración dentro de la muestra compactada de suelo a un contenido de humedad y densidad dadas con respecto a la carga unitaria patrón requerida para obtener la misma profundidad de penetración en una muestra estándar de material triturado. En forma de ecuación ésto es:

$$CBR = \frac{\text{carga unitaria del ensayo}}{\text{carga unitaria patron}} * 100$$

De esta ecuación se puede ver que el número C.B.R. es un porcentaje de la carga unitaria patrón. En la práctica, el símbolo de porcentaje se quita y la relación se presenta simplemente por el número entero, como 3, 45, 98.

Para determinar el C.B.R. se toma como material de comparación la piedra triturada. Las resistencias a la penetración que presenta ésta son los siguientes:

Tabla 1.

Valores de Carga Unitaria (**Carreteras, calles y autopistas – Raúl V. Rodas**)

<i>Penetración</i>	<i>Carga Unitaria Patrón</i>
<i>Para 0.1" pulgadas.....</i>	<i>1000 lb. /pulg² ó 70 Kg. /cm².</i>
<i>Para 0.2" pulgadas.....</i>	<i>1500 lb. /pulg² ó 105 Kg. /cm².</i>

El número C.B.R. usualmente se basa en la relación de carga para una penetración de 2.54 mm (0,1”), sin embargo, si el valor del C.B.R. para una penetración de 5.08 mm (0,2”) es mayor, dicho valor debe aceptarse como valor final de C.B.R.

Los ensayos de C.B.R. se hacen usualmente sobre muestras compactadas al contenido de humedad óptimo para el suelo específico, determinado utilizando el ensayo de compactación Próctor estándar (o modificada).

2.13.1. Aplicaciones

Se aplica para evaluación de la calidad relativa de suelos de subrasante, algunos materiales de sub-bases y bases granulares, que contengan solamente una pequeña cantidad de material que pasa por el tamiz de 50 mm, y que es retenido en el tamiz de 20 mm. Se recomienda que la fracción no exceda del 20%.

El C.B.R. establece una relación entre el comportamiento de los suelos principalmente utilizados como bases y subrasantes bajo el pavimento de carreteras y aeropistas. La siguiente tabla da una clasificación típica:

Tabla 2.

(Joseph E. Bowles – Manual de Laboratorio de Suelos en Ingeniería Civil)

Clasificación de los suelos de acuerdo al valor de C.B.R.

CBR	Clasificación General	Usos	Sistema de Clasificación	
			Unificado	AASHTO
0 - 3	muy pobre	Subrasante	OH, CH, MH, OL	A5,A6,A7
3 - 7	pobre a regular	Subrasante	OH, CH, MH, OL	A4,A5,A6,A7
7 - 20	regular	Sub-base	OL, CL, ML, SC SM, SP	A2,A4,A6,A7
20 - 50	bueno	Base, Subbase	GM,GC,W,SM SP,GP	A1b,A2-5,A3 A2-6
> 50	excelente	Base	GW, GM	A1-a, A2-4,A3

Para el diseño de las capas de pavimentos existen métodos en los cuales se leen tablas

Con el resultado del C.B.R. se puede clasificar la subrasante, base o subbase:

Tabla 3.
Clasificación de la subrasante de acuerdo al valor de C.B.R.
(Carreteras, calles y autopistas – Raúl V. Rodas)

C.B.R.	CLASIFICACIÓN
0 - 5	SUBRASANTE MUY MALA
5 - 10	SUBRASANTE MALA
10 - 20	SUBRASANTE REGULAR A BUENA
20 - 30	SUBRASANTE MUY BUENA
30 - 50	SUBBASE BUENA
50 - 80	BASE BUENA
80 - 100	BASE MUY BUENA

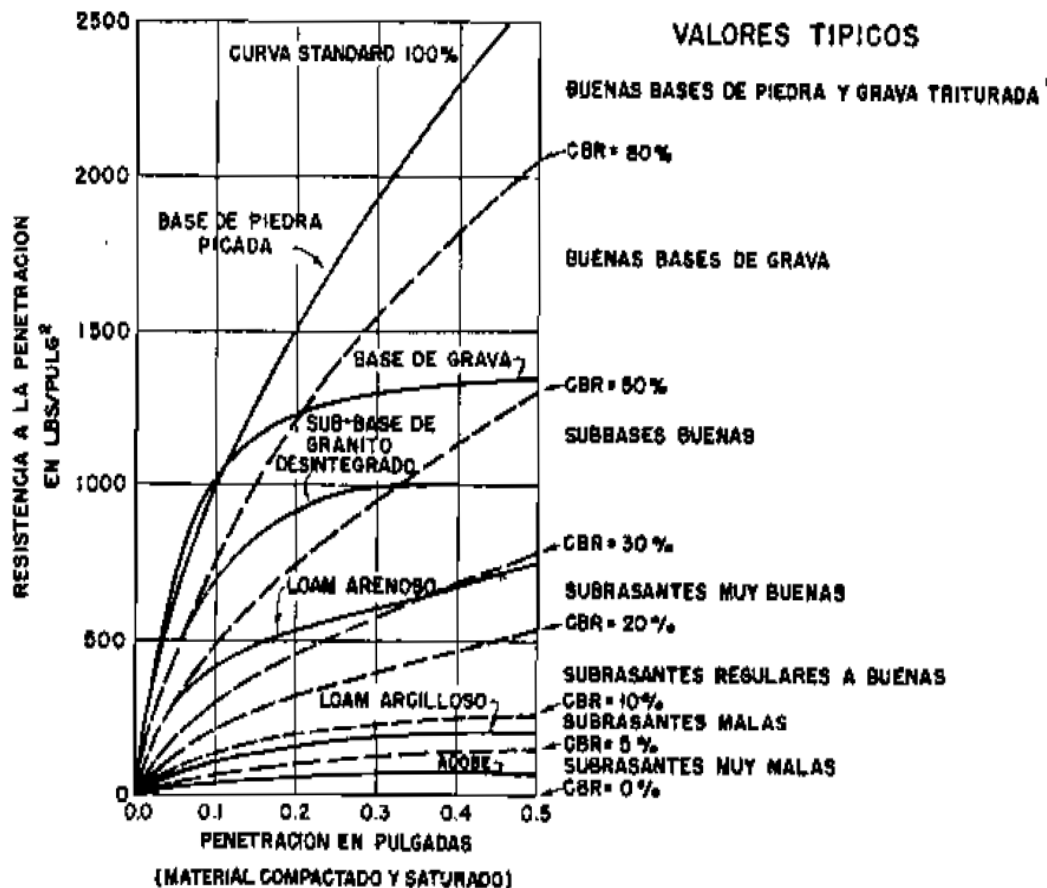


Figura 2. Clasificación de la subrasante de acuerdo al valor de C.B.R.

(Carreteras, calles y autopistas – Raúl V. Rodas)

2.13.2. Variantes del Ensayo de C.B.R.

El ensayo de C.B.R. puede efectuarse tanto en el terreno, ensayando el suelo con su humedad natural o sometándolo a saturación previa, como en el laboratorio sobre muestras inalteradas o compactadas allí. Las muestras inalteradas deberán ensayarse con su contenido natural de humedad, mientras que las compactadas en el laboratorio pueden probarse luego de inmersión o no, de acuerdo a las condiciones esperadas en el terreno.

El método C.B.R., comprende los tres ensayos siguientes:

- Determinación de la densidad y humedad.
- Determinación de las propiedades expansivas del material.
- Determinación de la resistencia a la penetración.

Como quiera que el comportamiento de los suelos varía de acuerdo con su grado de alteración: inalterados, perturbados, etc., y con su granulometría y sus características físicas: granulares, finos, poco plásticos, etc.

El método a seguir para determinar el C.B.R. será diferente en cada caso, por lo tanto, tendremos:

- *Determinación de C.B.R. de suelos perturbados y remoldeados.*
 - Suelos cohesivos, poco plásticos y poco o nada expansivos.
 - Suelos cohesivos y expansivos.

2.13.2.1. Determinación de C.B.R. de suelos perturbados y remoldeados

El equipo que se emplea para determinar el C.B.R. de muestras perturbadas y remoldeadas es, en líneas generales, el que indicamos a continuación.

Para la compactación de las muestras se emplea el siguiente equipo:

- Molde cilíndrico de 15.2 cm (6 pulg.) de diámetro interior y altura de 17.8 a 20cm (7 a 8 pulg.), equipado con un collarín de extensión de 5.1 cm (2 pulg.) de altura y una placa de base perforada.
- Un disco separador de 15 cm (5.94 pulg.) de diámetro y 6.3 cm (2.5 pulg.) de altura, para insertarlo como fondo falso en el molde cilíndrico, durante la compactación.
- Un compactador semejante al utilizado en la prueba de compactación ensayo Próctor Modificado [4.54 kg (10 libras) de peso y 5.1 cm (2 pulg.) de diámetro en la superficie de golpeo].

Para medir el hinchamiento del material, al absorber agua, se utiliza el siguiente equipo:



Imagen 1. (Equipo para medir hinchamiento)

- Vástago cuya altura puede graduarse, se halla fijado en un disco metálico.
- Trípode y extensómetro para medir la expansión del material, el extensómetro tiene una aproximación al 0.0025 cm. (0.001 pulg.), montado sobre un trípode.

- Pesas que funcionan como sobrecarga en la superficie del suelo, durante el proceso de saturación y de penetración, se emplea una pesa anular y varias pesas en forma de “U”. Estas pesas son de plomo y cada una de ellas es de 2.27 kg. (5 lb).

Para la prueba de penetración, se requiere el siguiente equipo:



Imagen 2. (Prensa hidráulica para la prueba de Penetración)

- Pistón de penetración de 4.9 cm (1.92 pulg.) de diámetro y aproximadamente 10 cm (4 pulg.) de longitud.
- Máquina de prueba, que pueden usarse cualquiera de los dos, para introducir el pistón en el espécimen con una velocidad de 0.127 cm/min (0.05 pulg. por minuto).
- Equipo general de laboratorio, como charolas para mezclado, espátulas, enrasadores, balanzas, cápsulas para determinación de contenido de agua, horno, etc.

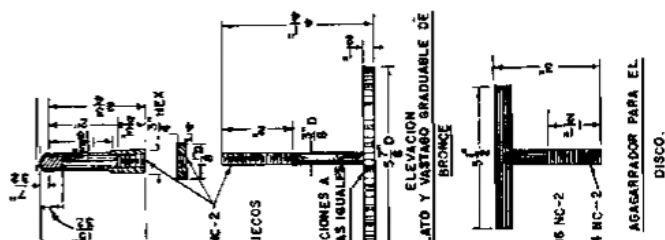


Figura 3.

Equipo empleado para el ensayo de C.B.R. (Carreteras, calles y autopistas – Raúl V. Rodas)

2.13.2.2. Suelos cohesivos, poco plásticos y poco o nada expansivos.

Los suelos de este grupo se ensayan de manera de obtener datos que mostraran su comportamiento sobre un intervalo completo de contenidos de humedad anticipados para muestras representativas. Las curvas de compactación se desarrollan para 56, 25 y 12 golpes por capa, sumergiendo y penetrando cada espécimen, con el fin de obtener una familia completa de curvas que muestran la relación entre el peso específico, contenido de agua y C.B.R.

Como ayuda para determinar la validez de los datos de compactación se dibujan sobre un papel semilogarítmico el peso específico máximo contra la energía de compactación (trabajo por unidad de volumen); los puntos así obtenidos dan, por lo general, una línea recta.

2.13.2.3. Suelos cohesivos, plásticos y expansivos.

Los procedimientos de prueba para suelos de gran expansión son los mismos que los descritos antes para suelos cohesivos. Sin embargo, los objetivos del programa de prueba no son exactamente los mismos.

Las pruebas que se realizan en suelos expansivos tienen como finalidad la determinación del contenido de humedad y el peso volumétrico que producen la expansión mínima.

El contenido de humedad y el peso volumétrico apropiados para este caso no son necesariamente los valores óptimos obtenidos a través del ensayo Próctor Modificado. Por lo general la expansión mínima y el máximo C.B.R. saturado ocurren para un contenido de humedad ligeramente mayor que el óptimo.

Cuando se ensayan suelos que se expanden con facilidad, puede ser necesario que se requiera la preparación de muestras para un intervalo más amplio de humedades y pesos volumétricos que los utilizados normalmente, con el objeto de establecer la relación entre el contenido de humedad, el peso volumétrico, la expansión y el C.B.R. en un suelo determinado.

Un cuidadoso estudio de los resultados de la prueba, hecho por un ingeniero experimentado, permitirá seleccionar el contenido de humedad y el peso volumétrico adecuados para llenar los requisitos del campo. Debe hacerse notar que existe la posibilidad de que el espesor de diseño esté gobernado en algunos casos por los requisitos de compactación en lugar del C.B.R.

Por lo tanto, el C.B.R. que se seleccione para el diseño de un pavimento flexible a construirse sobre un suelo expansivo, será el correspondiente a la humedad y densidad bajo las cuales el suelo presenta menor expansión.

Para facilitar la selección del C.B.R. de diseño, es recomendable representar gráficamente los porcentajes de expansión versus los contenidos de humedad en los diferentes estados de compactación. La comparación de las curvas que relacionan la expansión, C.B.R. y densidades, con las humedades de compactación, permitirá establecer los límites de humedad y densidad apropiados, facilitando así la selección del C.B.R. de diseño.

2.14. Penetrómetro con Anillo de Carga (P.A.C.)

El Penetrómetro con Anillo de Carga es una herramienta que puede ser usada en un sinnúmero de aplicaciones. Se utiliza de una forma rápida para determinar la resistencia a la penetración de los suelos en trabajos de exploración poco profundos. Los ensayos de campo y laboratorio con este equipo han probado ser una herramienta muy útil y rápida para revisar y reemplazar otros ensayos que consumen mucho tiempo.

Partes del Penetrómetro con Anillo de Carga:

- El instrumento consta de un mango o agarradera (tipo T), un anillo de medición de 101.97 kg (1 KN) de capacidad. Contiene un extensómetro indicador y un freno que mantiene la lectura hasta que éste sea liberado manualmente.

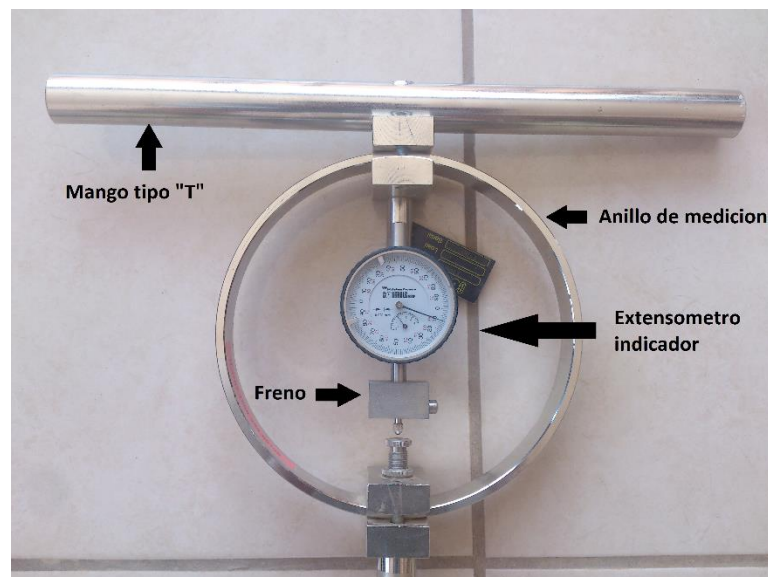


Imagen 3. (Mango, Anillo, Extensómetro y freno del “P.A.C.”)

- Una barra de penetración de 45 cm, graduada cada 15 cm,



Imagen 4. (Barra graduada)

- Una punta cónica removible. La punta del cono tiene un área en la base de $6,34 \text{ cm}^2$ ($0,983 \text{ pulg}^2$) y un área cónica de $12,50 \text{ cm}^2$ ($1,938 \text{ pulg}^2$).



Imagen 5. (Punta cónica)

2.14.1. Procedimiento y Uso del Equipo.

Para poder llevar a cabo los ensayos con el equipo, las pruebas no se llevaron a cabo en el campo, sino más bien en el laboratorio, en donde reproducir las condiciones necesarias es mucho más sencillo.

Para poder correlacionar el C.B.R. con el Penetrómetro con Anillo de Carga, se realizaron los ensayos en moldes de C.B.R., en condición saturada (sumergido durante 96 horas) y en condición no saturada (humedad óptima del suelo), así poder realizar ambos ensayos en las mismas condiciones del suelo.

El procedimiento para realizar la prueba se describe a continuación:

1. Deje que el penetrómetro se sostenga verticalmente desde su mango mientras que la puesta a cero se lleva a cabo. Después de un ajuste aproximado a cero mediante el uso de los dos tornillos de seguridad en la apoyo de montaje del anillo, el ajuste fino se logra girando el perno, atornillado en el medio del bloque

de montaje inferior del anillo. Haciendo contacto el vástago indicador con la cabeza del tornillo, cualquier movimiento del tornillo se refleja en el anillo.



Imagen 6. (Puesta a cero del equipo P.A.C.)

Cuando la lectura ha cambiado en cualquier momento o si alguna parte se cambia en el penetrómetro, el instrumento de nuevo debe ser puesto a cero, pulsando el botón del freno.

2. Asegúrese de que el marcador se ha ajustado a la posición cero. Seleccione el sitio para ser probado o el lugar de prueba, debe ser una superficie plana y limpia.

Sostenga el equipo verticalmente en el lugar de la prueba. Agarrando el mango firmemente, empuje el penetrómetro como hacia abajo dentro del suelo a una velocidad uniforme constante hasta que la parte superior del cono esté exactamente debajo de la superficie.



Imagen 7. (Prueba de penetración)

3. Determine la lectura del indicador de marcación de la siguiente manera:

Cada subdivisión tiene un valor de uno. El pequeño marcador lee la rotación completa de la esfera grande. Cada valor en el marcador pequeño tiene un valor de 200. Por lo tanto, media rotación de la esfera grande es 100 y se registra como 1 en el pequeño marcador.

Para determinar la resistencia a la penetración (capacidad de carga) en kilogramo por centímetro cuadrado, se registra la lectura de ambos marcadores interior y exterior.

Después de registrar la lectura del marcador, usar la tabla de calibración del Anillo de prueba proporcionada para determinar la resistencia a la penetración (capacidad de carga).

Con el fin de medir la resistencia a la penetración en 15cm., 30cm. u otras profundidades, empuje el punto de cono hacia abajo en el suelo hasta que el 15cm., 30cm. u otras marcas en la varilla y registran la lectura del marcador.

Nota especial

Una resistencia aproximada (capacidad de carga) se obtiene dividiendo la carga de la penetración entre superficie de la base del cono. El área de la base del cono es en

realidad 6.34 cm^2 (0.983 pulg^2). Pero con el fin de hacer la corrección de la fricción del cono al suelo, la área de la base debe ser tomada como 6.45 cm^2 (1 pulg^2). De ahí que la lectura de carga penetración en kilogramo es numéricamente igual a la resistencia a la penetración o el índice de cono en kilogramo por centímetro cuadrado. En las zonas donde el cono se puede manejar solamente a través de $1/2$ o $1/4$ de la altura del cono (muy alta resistencia a la penetración) con una fuerza de más de 1 KN (límite seguro), la resistencia a la penetración real se puede obtener multiplicando la correspondiente lectura de carga por un factor apropiado.

Tabla 4.
Factor por altura de penetración (H-4204 “Proving Ring Penetrometer”)

Cono altura	Factor
$1/4$	16
$1/2$	4
$3/4$	1.77
1	1



Imagen 8. (Penetración del cono hasta la mitad de su altura)

2.14.2. Cálculo para Determinar la Resistencia a la Penetración

LECTURAS

1,9296	1,931	1,914
--------	-------	-------

PROMEDIO:	1,9249
------------------	--------

LECTURA PROCESADA	1924,87
-------------------	---------

CARGA (KN):	0,8432
-------------	--------

CARGA (Kg):	85,98
-------------	-------

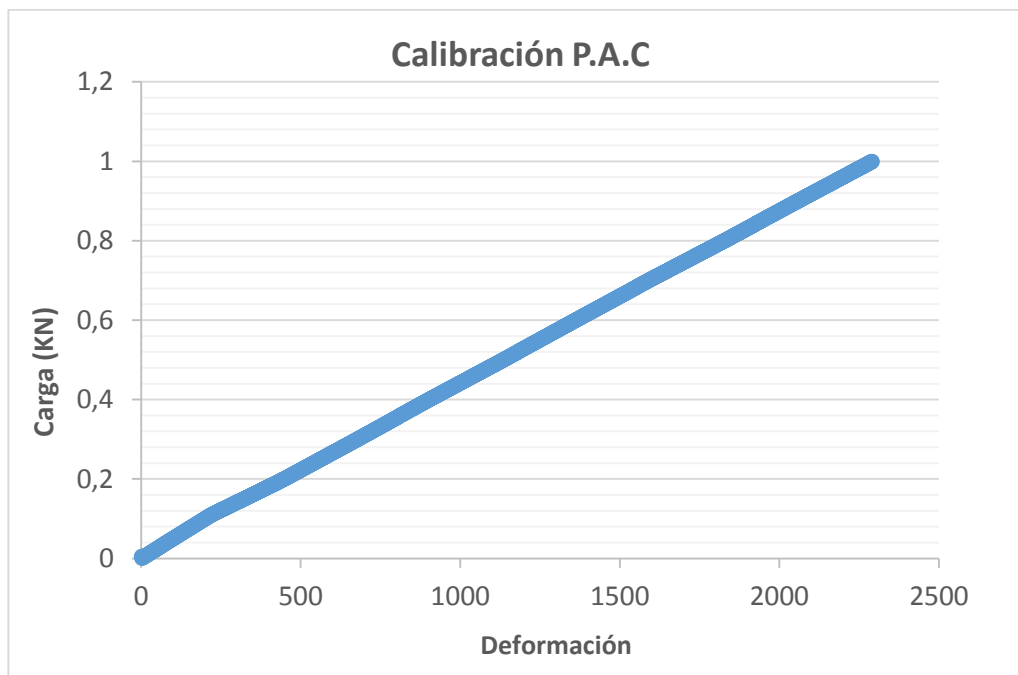
ÁREA DEL CONO (cm2)	6,45
---------------------	------

FACTOR POR ALTURA DE PENETRACIÓN	1/2
	4

RESISTENCIA A LA PENETRACIÓN (kg/cm2)	53,32
--	--------------

- Ecuación para determinar la carga

$$\text{Carga (KN)} = (0,00043386 * \text{Deformación}) + 0,00805036$$



2.15. Estadística

2.15.1. Correlación

Una correlación existe entre dos variables cuando una de ellas está relacionada con la otra de alguna manera.

En esta sección se explica el coeficiente de correlación lineal r que es una medida numérica de la fuerza de la relación entre dos variables que representan datos cuantitativos. Utilizando datos muestrales apareados (que en ocasiones se llaman **datos bivariados**), calculamos el valor de r (generalmente con la ayuda de recursos tecnológicos) y luego utilizamos este valor para concluir que existe (o no) una relación entre las dos variables.

2.15.2. Coefficiente de correlación lineal

El coeficiente de correlación lineal r mide la fuerza de la relación lineal entre los valores cuantitativos apareados X y Y en una *muestra*. También se conoce como **coeficiente de correlación producto momento de Pearson**, en honor de Karl Pearson (1857-1936), quien lo desarrolló originalmente. Su valor se calcula con la siguiente fórmula:

$$r = \frac{n(\sum xy) - (\sum x)(\sum y)}{\sqrt{n(\sum x^2) - (\sum x)^2} * \sqrt{n(\sum y^2) - (\sum y)^2}}$$

n = representa el número de pares de datos presentes.

\sum = denota la suma de los elementos indicados.

$\sum x$ = denota la suma de todos los valores de x .

$\sum x^2$ = indica que cada valor de x debe elevarse al cuadrado y después deben sumarse esos cuadrados.

$(\sum x)^2$ = indica que los valores de x deben sumarse y el total elevarse al cuadrado.

Es sumamente importante evitar confundirse entre $\sum x^2$ y $(\sum x)^2$.

$\sum xy$ = indica que cada valor de x debe multiplicarse primero por su valor y correspondiente. Después de obtener todos estos productos, se calcula su suma.

r = representa el coeficiente de correlación lineal de una *muestra*.

ρ = la letra griega rho se usa para representar el coeficiente de correlación lineal de una población.

El valor de r^2 (coeficiente de determinación muestral) es la proporción de la variación de y que está explicada por la relación lineal entre X y Y .

2.15.3. Conceptos Básicos de las Medidas de Tendencia Central

2.15.3.1. Media

La media (aritmética), por lo general, es la medida numérica más importante que se utiliza para describir datos; comúnmente se le conoce como *promedio*. Es la medida de tendencia central que se calcula al sumar los valores y dividir el total entre el número de valores.

$$\text{MEDIA} = \frac{\sum x}{n}$$

$\sum x$ = suma de todos los valores de la muestra.

n = número de valores muestrales.

2.15.3.2. Mediana

La mediana de un conjunto de datos es la medida de tendencia central que implica el valor intermedio, cuando los valores de los datos originales se presentan en orden de magnitud creciente (o decreciente).

Una desventaja de la media es su sensibilidad a cada valor, de tal forma que una puntuación excepcional puede afectarla de manera drástica. La mediana resuelve, en gran medida, esa desventaja. La mediana es un “valor intermedio”, ya que la mitad de los valores de los datos están por debajo de la mediana y la otra mitad por arriba de ella.

Para calcular la mediana, primero se *ordenan* los valores (se acomodan en orden) y luego se sigue uno de los siguientes dos procedimientos:

- Si el número de valores es impar, la mediana es el número que se localiza exactamente a la mitad de la lista.
- Si el número de valores es par, la mediana se obtiene calculando la media de los dos números que están a la mitad.

2.15.3.3. Moda

La moda de un conjunto de datos es el valor que se presenta con mayor frecuencia.

- Cuando dos valores se presentan con la misma frecuencia y ésta es la más alta, ambos valores son modas, por lo que el conjunto de datos es bimodal.
- Cuando más de dos valores se presentan con la misma frecuencia y ésta es la más alta, todos los valores son modas, por lo que el conjunto de datos es multimodal.
- Cuando ningún valor se repite, se dice que no hay moda.

2.15.3.4. Sesgo

Una distribución de datos está sesgada si no es simétrica y se extiende más hacia un lado que hacia el otro. (Una distribución de datos es simétrica si la mitad izquierda de su histograma es aproximadamente una imagen en espejo de su mitad derecha). Una comparación de la media, la mediana y la moda pueden revelar información acerca de las características de sesgo.

CAPÍTULO III
ANÁLISIS DE CORRELACIÓN

3.1. Ubicación

Las muestras fueron extraídas de distintas zonas y/o barrios del valle central de la ciudad de Tarija, las cuales se indican a continuación:

Muestra “Av. Integración”

Coordenadas	
Latitud	21°30'50.64"S
Longitud	64°44'58.59"O
Elevación	1912 m.



Imagen 9. Av. Integración

Muestra “Constructor”

Coordenadas	
Latitud	21°31'37.52"S
Longitud	64°42'44.53"O
Elevación	1886 m.

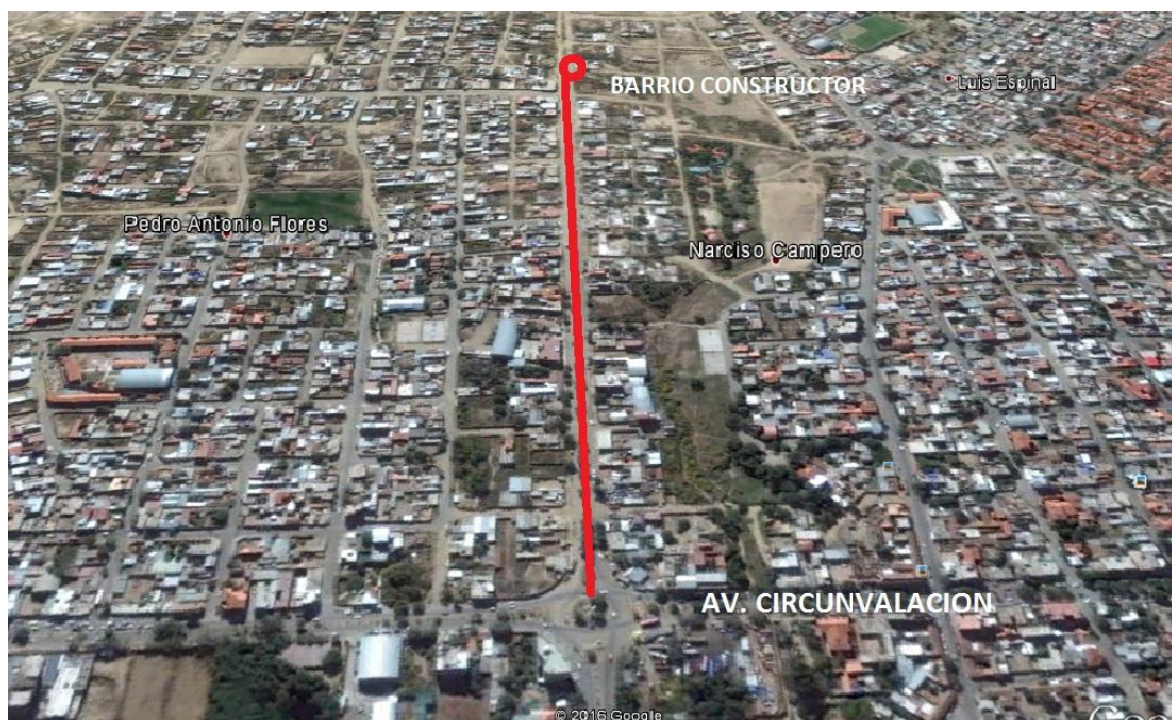


Imagen 10. Barrio Constructor

Muestra “Barrio Paraíso”

Coordenadas	
Latitud	21°30'10.85"S
Longitud	64°45'12.09"O
Elevación	1951 m.



Imagen 11. Barrio Paraíso

Muestra “Barrio San Gerónimo”

Coordenadas	
Latitud	21°33'24.92"S
Longitud	64°42'23.78"O
Elevación	1852 m.



Imagen 12. Barrio San Gerónimo

Muestra “Barrio 3 de Mayo”

Coordenadas	
Latitud	21°30'23.57"S
Longitud	64°43'51.29"O
Elevación	1924 m.

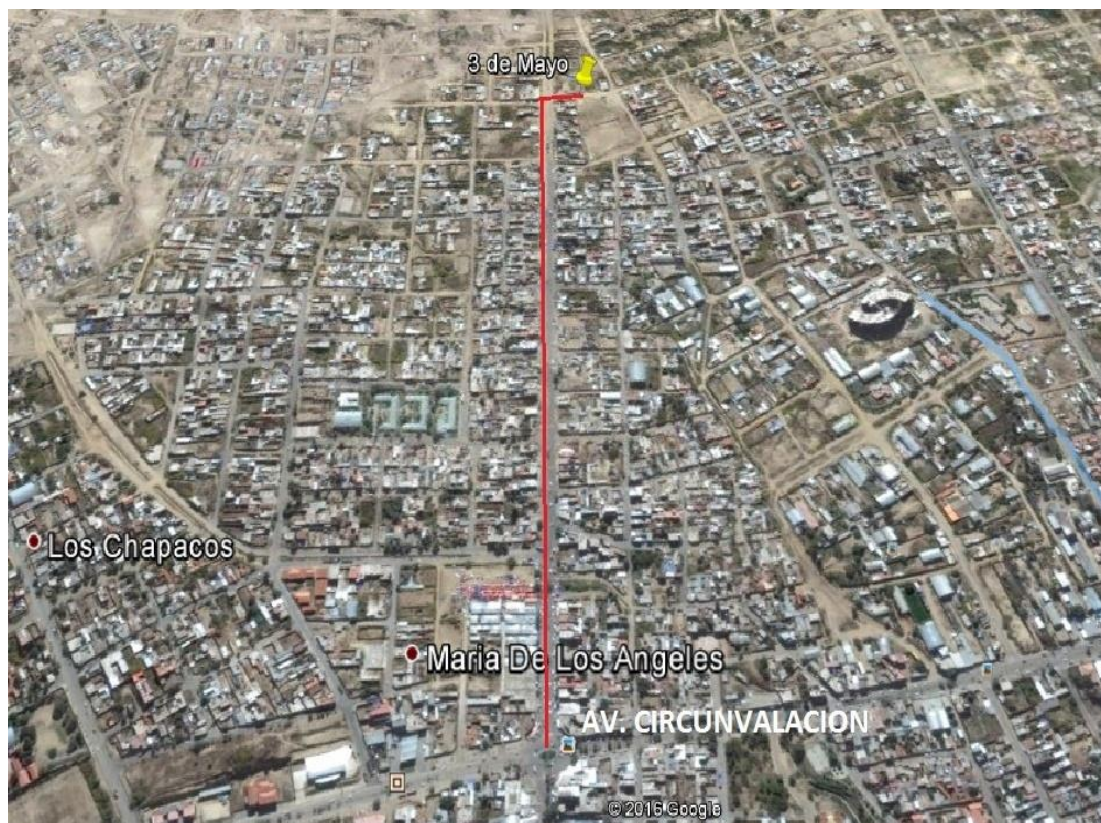


Imagen 13. Barrio 3 de Mayos

Muestra “Barrio San Bernardo”

Coordenadas	
Latitud	21°31'11.10"S
Longitud	64°43'19.04"O
Elevación	1883 m.



Imagen 14. Barrio San Bernardo

Muestra “Barrio Tejar”

Coordenadas	
Latitud	21°32'44.68"S
Longitud	64°43'21.34"O
Elevación	1859 m.



Imagen 15. Barrio Tejar

Muestra “Barrio Andaluz”

Coordenadas	
Latitud	21°31'8.06"S
Longitud	64°42'55.36"O
Elevación	1895 m.



Imagen 16. Barrio Andaluz

Muestra “Barrio Monte Cristo”

Coordenadas	
Latitud	21°31'29.37"S
Longitud	64°42'14.55"O
Elevación	1899 m.



Imagen 17. Barrio Monte Cristo

Muestra “Barrio Luis Espinal”

Coordenadas	
Latitud	21°31'44.15"S
Longitud	64°42'28.55"O
Elevación	1892 m.



Imagen 18. Barrio Luis Espinal

Muestra “Barrio Nueva Terminal”

Coordenadas	
Latitud	21°33'30.28"S
Longitud	64°40'29.65"O
Elevación	1860 m.

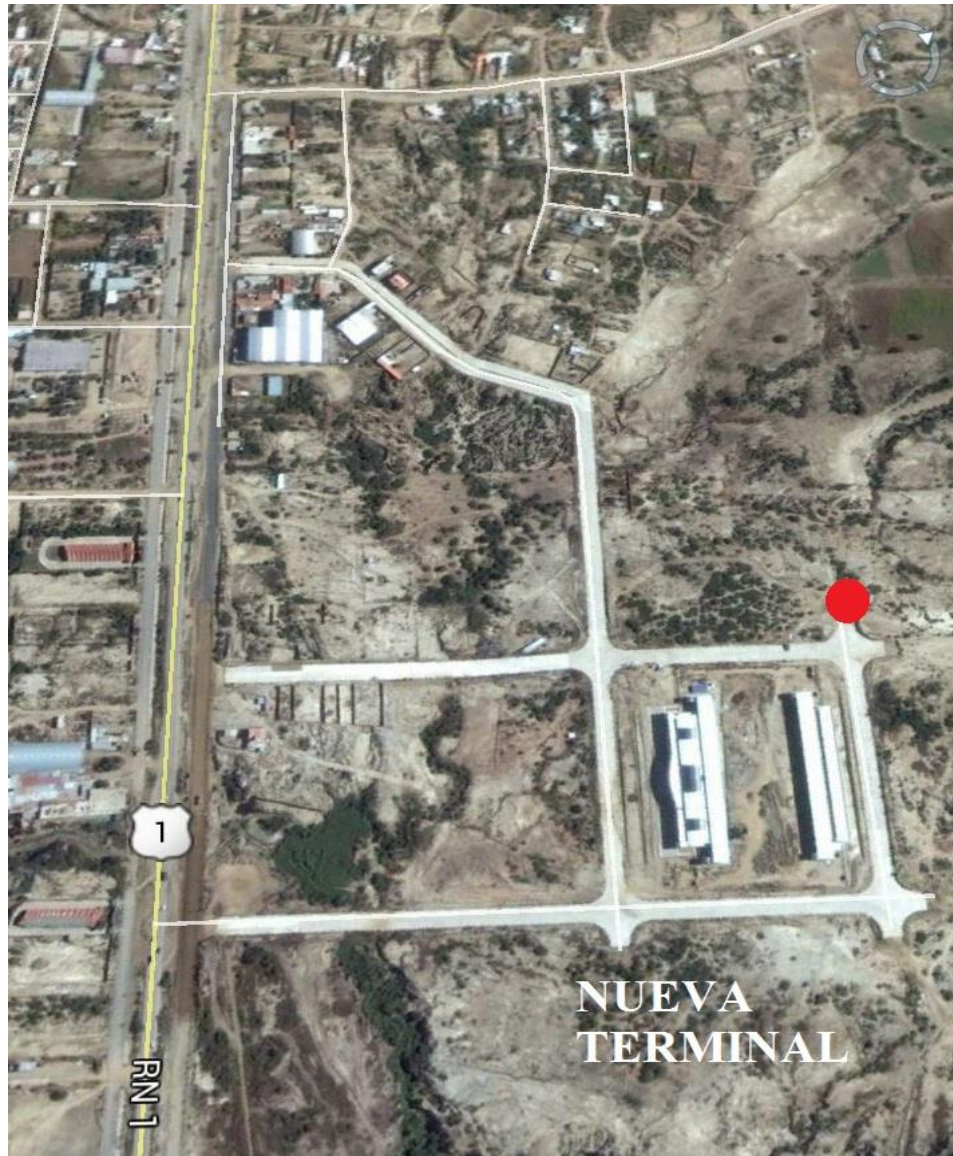


Imagen 19. Nueva Terminal

Muestra "Turumayo"

Coordenadas	
Latitud	21°32'59.23"S
Longitud	64°46'11.12"O
Elevación	1962 m.



Imagen 20. Turumayo

Muestra “Barrio Los Chapacos”

Coordenadas	
Latitud	21°30'1.91"S
Longitud	64°44'24.70"O
Elevación	1930 m.

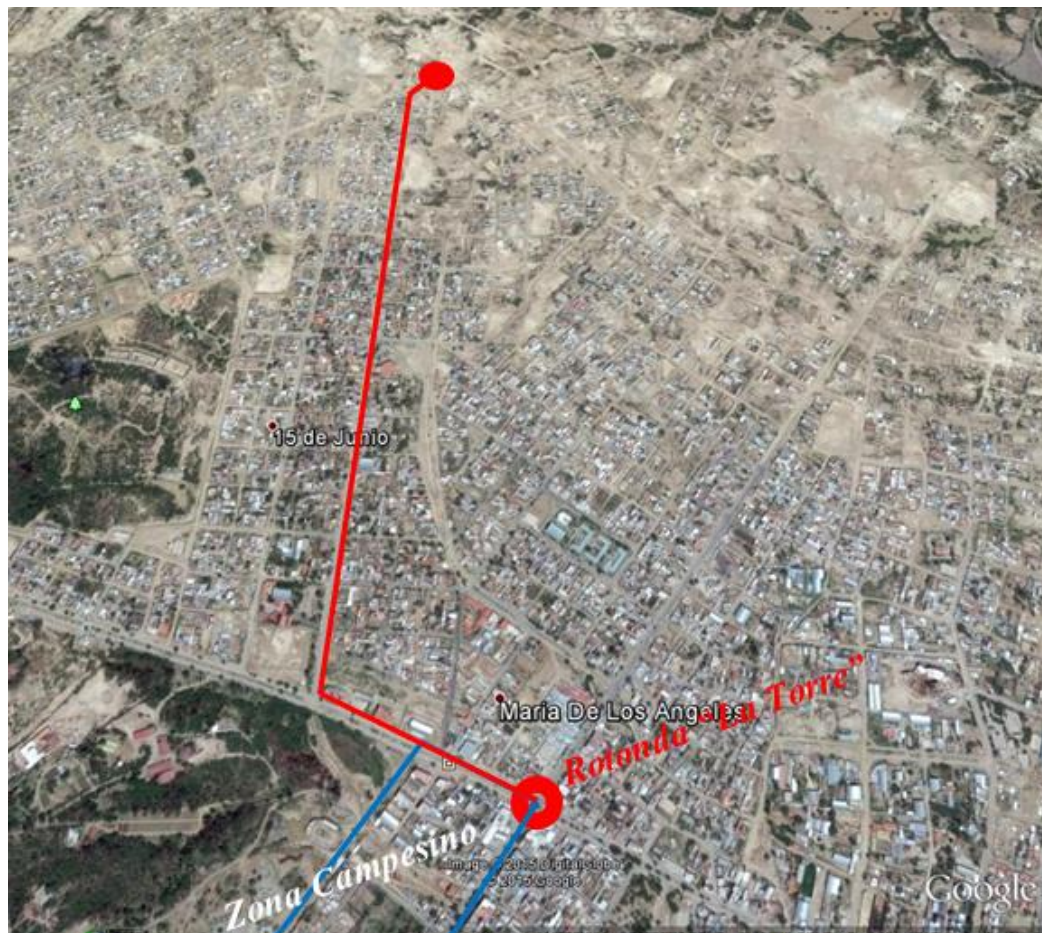


Imagen 21. Barrio Los Chapacos

3.2. Tabla de Resúmenes

3.2.1. Resumen de Clasificación

La caracterización de los suelos es muy importante en la presente investigación para poder terminar un comportamiento en los diferentes tipos de suelos utilizados se procedió a realizar el ensayo correspondiente para poder clasificarlos como ser: Granulometría, Hidrómetro, Límites de Attemberg, Peso Específico.

Tabla 5. Resumen de Clasificación.

PROCEDENCIA		Av. Integración	Constructor	Monte Cristo	Nueva Terminal	3 de Mayo	Turumayo	Paraíso	Los Chapacos	Tejar	San Gerónimo	San Bernardo	Andaluz	Luis Espinal
Humedad Natural (%)		2,1	3,7	6,9	4,9	3,7	3,64	3,94	3,13	3,42	3,39	3,07	2,27	3,36
Gravedad Especifica		2,60	2,62	2,68	2,72	2,62	2,70	2,63	2,78	2,66	2,61	2,63	2,65	2,67
Granulometría	% Pasa N° 40	99,83	90,52	99,74	99,85	92,51	99,80	99,09	96,61	99,41	97,39	92,51	91,17	90,52
	% Pasa N° 200	87,22	83,06	94,82	97,30	61,69	93,23	94,88	96,61	83,00	65,95	61,69	79,47	83,06
	% Limos	93,46	89,08	76,66	56,81	92,30	63,50	63,48	41,51	66,04	83,72	84,11	73,84	68,94
	% Arcilla	6,54	10,92	23,34	43,19	7,70	36,50	36,52	58,49	33,96	16,28	15,89	26,16	31,06
Límites	L. Líquido (%)	29	25	38	49	20	60	29	55	39	20	22	31	37
	L. Plástico (%)	27	19	21	36	17	38	21	26	27	16	18	15	25
	I. de Plasticidad (%)	2	6	18	13	3	23	7	29	11	3	4	16	12
Clasificación	AASHTO	A-4(8)	A-4(8)	A-6(11)	A-7-5 (11)	A-4 (5)	A-7-5(17)	A-4(8)	A-7-6(19)	A-6(8)	A-4(6)	A-4(5)	A-6(10)	A-6(9)
	SUCS	ML	ML	CL	CL	ML	CH	ML	OH	CL	ML	OL	CL	CL

3.2.2. Resumen de Compactación

En la presente tabla se realiza un resumen de los resultados obtenidos para distintos tipos de suelo, Proctor T-180.

Tabla 6. Resumen de Compactación.

PROCEDENCIA	Densidad Máxima (gr/cm³)	Humedad Óptima (%)
Av. Integración	1,89	12,70
Constructor	1,94	12,71
Paraíso	1,95	13,82
San Gerónimo	1,90	9,58
3 de Mayo	1,88	11,02
San Bernardo	1,91	11,76
Tejar	1,93	14,75
Andaluz	1,97	12,22
Monte Cristo	1,81	15,83
Luis Espinal	1,96	14,93
Nueva Terminal	1,70	15,92
Turumayo	1,67	17,71
Los Chapacos	1,86	14,33

3.2.3. Resumen de Resultados de C.B.R. y P.A.C.*

En la siguiente tabla se presenta un resumen de los resultados con el equipo de Penetrómetro con Anillo de Carga y el California Bearing Ratio (C.B.R.), para una condición saturada y no saturada.

Tabla 7. Resumen de Resultados de C.B.R. y P.A.C.

Clasificación	P.A.C.* seco (kg/cm ²) 56 golpes	P.A.C.* saturado (kg/cm ²) 56 golpes	C.B.R. seco (%)		C.B.R. saturado (%)		PROCEDENCIA
			95% D. Max	100% D. Max	95% D. Max	100% D. Max	
A-4 (8)	55,69	15,19	19	26	5	6	Av. Integración
A-4 (8)	54,92	14,86	17	24	4	5	Constructor
A-4 (8)	54,11	13,87	16	20	3	4	Paraiso
A-4(6)	55,52	14,90	18	25	4	5	San Gerónimo
A-4(5)	54,94	14,69	17	23	4	4	3 de Mayo
A-4(4)	54,82	14,42	17	21	3	4	San Bernardo
A-6 (8)	53,49	12,98	15	19	3	3	Tejar
A-6 (10)	53,49	13,02	15	17	3	3	Andaluz
A-6(11)	51,93	12,34	12	15	2	2	Monte Cristo
A-6(9)	53,32	12,58	14	18	2	3	Luis Espinal
A-7-5 (11)	52,77	12,49	14	18	2	3	Nueva Terminal
A-7-5(17)	52,77	12,25	12	16	2	2	Turumayo
A-7-6(19)	52,75	12,22	13	17	2	2	Los Chapacos

*Penetrómetro con anillo de Carga.

3.2.4. Resumen de Resultados de P.A.C* in situ.

Se realizó el ensayo de P.A.C.* en el lugar de extracción de las muestras, obteniendo los siguientes resultados:

Tabla 8. Resumen de Resultados de P.A.C. in situ.

PROCEDECENCIA		Av. Integración	Constructor	Paraiso	San geronimo	3 de Mayo	San Bernardo	Tejar	Andaluz	Monte Cristo	Luis Espinal	Nueva Terminal	Turumayo	Los Chapacos
Clasificación	AASTHO	A-4 (8)	A-4 (8)	A-4 (8)	A-4(6)	A-4(5)	A-4(4)	A-6 (8)	A-6 (10)	A-6(11)	A-6(9)	A-7-5 (11)	A-7-5(17)	A-7-6(19)
P.A.C. in situ (kg/cm2)	1	24,40	24,36	24,24	24,13	24,41	24,30	23,79	23,23	22,72	23,18	24,04	22,88	23,01
	2	24,65	23,47	24,24	24,00	24,08	23,26	24,48	23,49	23,33	23,09	24,07	22,36	21,98
	3	24,28	24,01	24,09	24,35	23,79	23,16	23,04	23,45	23,03	23,34	22,29	22,76	24,04
	4	24,34	24,36	24,00	23,87	23,30	24,40	23,67	23,26	23,47	22,21	22,70	22,58	22,35
	5	24,04	25,26	24,19	24,13	23,81	23,26	23,33	23,61	23,73	23,32	23,98	22,28	24,34
	6	24,19	24,29	24,17	24,43	22,83	23,85	23,27	23,45	23,03	23,33	23,94	22,66	23,77
	7	24,41	25,06	24,19	24,24	23,51	24,45	23,97	23,35	23,22	23,10	24,08	22,41	21,97
	8	24,70	23,70	24,24	24,00	24,01	24,40	23,50	22,90	23,20	23,00	23,77	23,20	22,73
	9	24,20	24,82	24,12	24,06	25,47	23,84	23,72	22,38	23,28	23,26	23,69	22,98	22,28
	10	24,32	25,37	23,98	24,20	23,95	24,41	23,86	24,08	22,89	23,23	23,51	22,72	22,43
	11	24,79	24,62	24,03	24,12	23,70	24,19	22,59	23,04	22,14	23,35	23,75	21,96	22,38
	12	24,38	25,15	23,11	23,87	24,85	24,15	24,12	23,18	22,72	23,44	23,18	22,75	23,20
	13	24,52	24,29	24,15	24,08	24,13	23,21	23,55	23,30	23,53	23,09	22,83	22,50	22,62
	14	24,18	23,23	23,95	24,11	23,01	23,28	24,46	23,72	22,90	23,20	23,91	22,83	22,38
	15	24,29	23,83	24,06	24,37	23,07	24,43	24,03	23,55	23,16	23,20	23,44	22,62	21,89
	16	24,53	24,04	24,23	24,36	22,84	24,30	23,98	23,38	22,98	23,49	23,30	23,23	22,31
	17	24,32	23,26	24,37	24,19	23,62	23,23	23,20	23,56	23,61	23,33	23,56	22,95	22,54
	18	24,35	24,15	24,06	24,12	23,91	24,35	23,58	23,23	23,24	23,33	22,84	22,79	22,81
	19	24,60	23,39	24,12	24,12	23,47	24,29	23,11	24,31	23,01	23,26	22,95	22,78	22,67
	20	24,18	24,60	24,04	24,23	23,28	23,74	23,26	23,23	22,93	23,44	22,39	23,06	22,90
	21	24,01	23,69	24,00	24,34	24,03	23,16	23,35	23,28	23,39	23,24	22,86	22,84	23,18
	22	24,64	24,09	24,01	23,14	24,14	24,28	23,28	22,87	23,01	23,04	22,45	23,07	22,25
	23	24,28	24,01	24,12	24,34	24,06	22,89	23,40	23,03	23,07	23,20	23,23	23,22	22,71
	24	23,96	24,26	24,09	24,04	23,87	24,07	23,24	23,84	22,84	23,03	23,17	23,01	22,61
	25	24,71	23,16	24,00	24,01	23,92	24,30	23,61	23,67	23,62	23,26	23,06	22,92	22,44
	26	23,37	24,52	24,32	24,11	24,06	24,12	24,15	23,39	23,47	23,15	22,71	23,04	23,20
	27	24,31	24,19	24,18	24,15	23,87	24,15	23,56	23,45	23,26	23,24	22,98	22,93	22,44
	28	24,93	23,63	23,98	24,31	23,21	23,98	23,24	23,26	22,83	23,26	22,83	22,67	23,46
	29	24,48	23,98	23,96	24,12	24,24	24,31	23,80	23,11	23,04	23,22	23,23	22,88	23,63
	30	24,52	24,03	24,25	24,00	24,42	24,34	23,16	23,49	23,21	22,92	23,50	22,49	22,71
Promedio		24,36	24,16	24,08	24,12	23,83	23,94	23,58	23,37	23,13	23,1897	23,28	22,78	22,77
Desviación estándar		0,298	0,594	0,215	0,234	0,573	0,499	0,432	0,365	0,328	0,228	0,531	0,293	0,605
Coef. de variación		1,22%	2,46%	0,89%	0,97%	2,41%	2,08%	1,83%	1,56%	1,42%	0,98%	2,28%	1,29%	2,65%
Error estándar		0,0544	0,1085	0,0393	0,0428	0,1047	0,0911	0,0788	0,0667	0,0599	0,0417	0,0969	0,0535	0,1104
Mínimo		23,37	23,16	23,11	23,14	22,83	22,89	22,59	22,38	22,14	22,21	22,29	21,96	21,89
Máximo		24,93	25,37	24,37	24,43	25,47	24,45	24,48	24,31	23,73	23,49	24,08	23,23	24,34

*Penetrómetro con Anillo de Carga

3.2.5. Cálculo del Índice de Ajuste (Ia)

Para determinar una relación entre el ensayo de P.A.C.* in situ y P.A.C.* en laboratorio, se consideró el valor mínimo de cada ensayo, como resultado se obtiene un índice de ajuste (Ia); que permitirá estimar valores de C.B.R. en función a estos nuevos datos ajustados.

PROCEDENCIA		Av. Integración	Constructor	Paraíso	San Gerónimo	3 de Mayo	San Bernardo	Tejar	Andaluz	Monte Cristo	Luis Espinal	Nueva Terminal	Turumayo	Los Chapacos
P.A.C. in situ (kg/cm ²)	Valor mínimo	23,37	23,16	23,11	23,14	22,83	22,89	22,59	22,38	22,14	22,21	22,29	21,96	21,89

Promedio P. A. C. in situ (valor minimo) = 22,61 kg/cm²

- **Ensayo de P.A.C.* en laboratorio en condición saturada.**

PROCEDENCIA		Av. Integración	Constructor	Paraíso	San Gerónimo	3 de Mayo	San Bernardo	Tejar	Andaluz	Monte Cristo	Luis Espinal	Nueva Terminal	Turumayo	Los Chapacos
P.A.C en Lab. saturado (kg/cm ²)	56 golpes	15,19	14,86	13,87	14,90	14,69	14,42	12,98	13,02	12,34	12,58	12,49	12,25	12,22

Promedio P. A. C. en Lab. (saturada) = 13,52 kg/cm²

$$Ia = \frac{\overline{P.A.C. \text{ in situ}}}{P.A.C. \text{ laboratorio saturada}} = \frac{22.61}{13.52} = 1.672$$

$$P.A.C \text{ ajustado} = \frac{P.A.C \text{ in situ}}{Ia}$$

* Penetrómetro con Anillo de Carga

Valores de P.A.C.* ajustados

Valores ajustados del P.A.C. (EN LAB.) en relación al P.A.C. (in situ)	Av. Integración	Constructor	Paraíso	San Gerónimo	3 de Mayo	San Bernardo	Tejar	Andaluz	Monte Cristo	Luis Espinal	Nueva Terminal	Turumayo	Los Chapacos
		13,98	13,85	13,82	13,84	13,65	13,69	13,51	13,38	13,24	13,28	13,33	13,13

- Ensayo de P.A.C.* en laboratorio en condición no saturada.

PROCEDENCIA		Av. Integración	Constructor	Paraíso	San Gerónimo	3 de Mayo	San Bernardo	Tejar	Andaluz	Monte Cristo	Luis Espinal	Nueva Terminal	Turumayo	Los Chapacos
P.A.C* seco (kg/cm2)	56 golpes	55,69	54,92	54,11	55,52	54,94	54,82	53,49	53,49	51,93	53,32	52,77	52,77	52,75

Promedio P. A. C. en Lab. (no saturada) = 53.89 kg/cm2

$$I_a = \frac{\overline{P.A.C. \text{ in situ}}}{\overline{P.A.C. \text{ laboratorio no saturada}}} = \frac{22.61}{53.89} = 0.420$$

$$P.A.C \text{ ajustado} = \frac{P.A.C \text{ in situ}}{I_a}$$

Valores de P.A.C.* ajustados

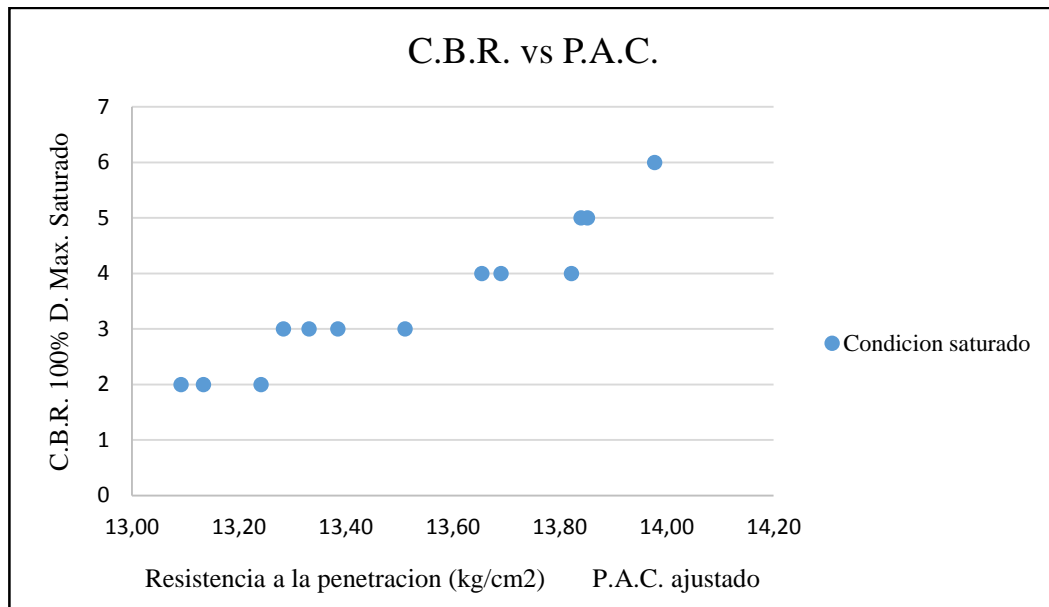
Valores ajustados del P.A.C. (EN LAB.) en relación al P.A.C. (in situ)	Av. Integración	Constructor	Paraíso	San Gerónimo	3 de Mayo	San Bernardo	Tejar	Andaluz	Monte Cristo	Luis Espinal	Nueva Terminal	Turumayo	Los Chapacos
		55,69	55,19	55,07	55,14	54,40	54,55	53,83	53,33	52,76	52,93	53,12	52,33

3.2.6. Selección del Mejor Modelo de Ajuste

3.2.6.1. Determinación de la ecuación de correlación de C.B.R. al 100% de densidad máxima y Penetrómetro con Anillo de Carga ajustado, en condición Saturada.

Datos:

C.B.R. saturado 100% D. Max	P.A.C. 56 golpes (kg/cm ²)
%	
6	13,98
5	13,85
4	13,82
5	13,84
4	13,65
4	13,69
3	13,51
3	13,38
2	13,24
3	13,28
3	13,33
2	13,13
2	13,09



Introduciendo los datos a un modelo estadístico, se obtienen los siguientes resultados.

Comparación de Modelos Alternos		
Modelo	Correlación (R)	R²
Raíz Cuadrada-Y Cuadrado-X	0,9614	92,43%
Raíz Cuadrada de Y	0,9609	92,34%
Raíz Cuadrada Doble	0,9607	92,29%
Raíz Cuadrada-Y Log-X	0,9604	92,24%
Raíz Cuadrada-Y Inversa de X	-0,9598	92,13%
Curva S	-0,9598	92,13%
Multiplicativa	0,9598	92,12%
Logarítmico-Y Raíz Cuadrada-X	0,9597	92,11%
Exponencial	0,9597	92,10%
Log-Y Cuadrado-X	0,9595	92,07%
Cuadrado de X	0,9554	91,27%
Lineal	0,9543	91,06%
Raíz Cuadrada de X	0,9537	90,96%
Logaritmo de X	0,9531	90,85%
Inversa de X	-0,9519	90,62%

Esta tabla muestra los resultados de ajustar varios modelos a los datos. De los modelos ajustados, el modelo Raíz Cuadrada-Y Cuadrado-X es el que arroja el valor más alto de R² con 92.43%. Este es el modelo actualmente seleccionado.

- Variable dependiente: C.B.R. 100% D. Max. Saturado.
- Variable independiente: P.A.C. ajustado Saturada.

Raíz Cuadrada-Y Cuadrado-X:
$$Y = (a + b * X^2)^2$$

	Mínimos Cuadrados	Valor-P
Parámetro	Estimado	
Intercepto	-5,3909	0
Pendiente	0.0396	0

Coefficiente de correlación (R) = 0,9614

$R^2 = 92,43 \%$

La ecuación al modelo ajustado es:

$$\mathbf{C. B. R. 100\% D. Max. Saturado} = (-5,3909 + 0,0396 * \mathbf{P. A. C. ajustado}^2)^2$$

El estadístico R^2 indica que el modelo ajustado explica 92,43% de la variabilidad en “C.B.R. 100% D. Max. Saturado.”

El coeficiente de correlación es igual a 0,9614, indicando una relación alta positiva entre las variables.

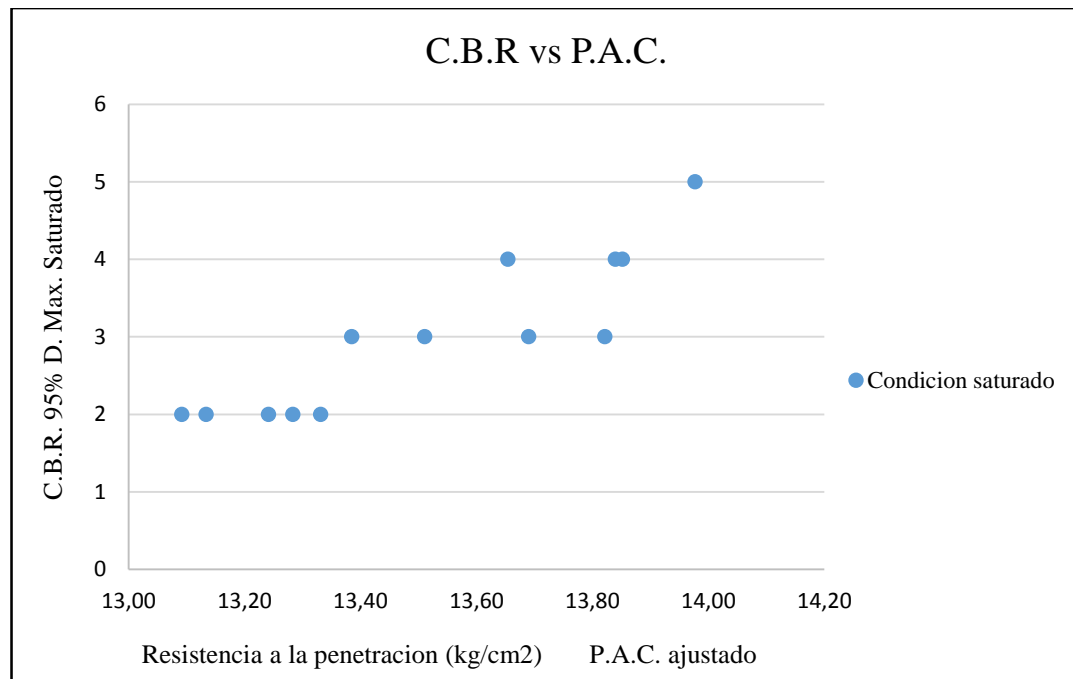
Dado que el valor-P en la tabla ANOVA es menor que 0,05, existe una relación estadísticamente significativa entre “C.B.R. 100% D. Max. Saturado” y “P.A.C. ajustado” con un nivel de confianza del 95,0%.

A cualquier nivel de significancia, incluso al 0,001%, los coeficientes de regresión estimados son representativos al modelo ya que el valor-P es cero.

3.2.6.2. **Determinación de la ecuación de correlación de C.B.R. al 95% de densidad máxima y Penetrómetro con Anillo de Carga ajustado, en condición Saturada.**

Datos:

C.B.R. saturado 95% D. Max	P.A.C. 56 golpes
%	(kg/cm ²)
5	13,98
4	13,85
3	13,82
4	13,84
4	13,65
3	13,69
3	13,51
3	13,38
2	13,24
2	13,28
2	13,33
2	13,13
2	13,09



Introduciendo los datos a un modelo estadístico, se obtienen los siguientes resultados.

Comparación de Modelos Alternos		
Modelo	Correlación (R)	R²
Doble Inverso	0,9119	83,16%
Inversa-Y Log-X	-0,9116	83,10%
Inversa-Y Raíz Cuadrada-X	-0,9114	83,07%
Inversa de Y	-0,9112	83,04%
Inversa-Y Cuadrado-X	-0,9108	82,95%
Log-Y Cuadrado-X	0,9102	82,84%
Exponencial	0,91	82,80%
Logarítmico-Y Raíz Cuadrada-X	0,9098	82,78%
Multipliativa	0,9097	82,75%
Curva S	-0,9093	82,68%
Raíz Cuadrada-X Cuadrado-X	0,9047	81,85%
Raíz Cuadrada de Y	0,9041	81,74%
Raíz Cuadrada Doble	0,9038	81,68%
Raíz Cuadrada-Y Log-X	0,9034	81,62%
Raíz Cuadrada-Y Inversa de X	-0,9027	81,48%
Cuadrado de X	0,8952	80,13%
Lineal	0,8942	79,95%

Esta tabla muestra los resultados de ajustar varios modelos a los datos. De los modelos ajustados, el modelo Doble Inverso es el que arroja el valor más alto de R² con 83,16%. Este es el modelo actualmente seleccionado.

- Variable dependiente: C.B.R. 95% D. Max. Saturado.
- Variable independiente: P.A.C. ajustado Saturada.

Doble Inverso:
$$Y = \frac{1}{\left(a + \frac{b}{X}\right)}$$

	Mínimos Cuadrados	Valor-P
Parámetro	Estimado	
Intercepto	-4,3912	0
Pendiente	64.3262	0

Coefficiente de correlación (R) = 0,9119

$R^2 = 83,16 \%$

La ecuación al modelo ajustado es:

$$C. B. R. 95\% D. Max. Saturado = \frac{1}{\left(-4,3912 + \frac{64.3262}{P.A.C. \text{ ajustado}}\right)}$$

El estadístico R^2 indica que el modelo ajustado explica 83.16% de la variabilidad en “C.B.R. 95% D. Max. Saturado.”

El coeficiente de correlación es igual a 0,9119, indicando una relación alta negativa entre las variables.

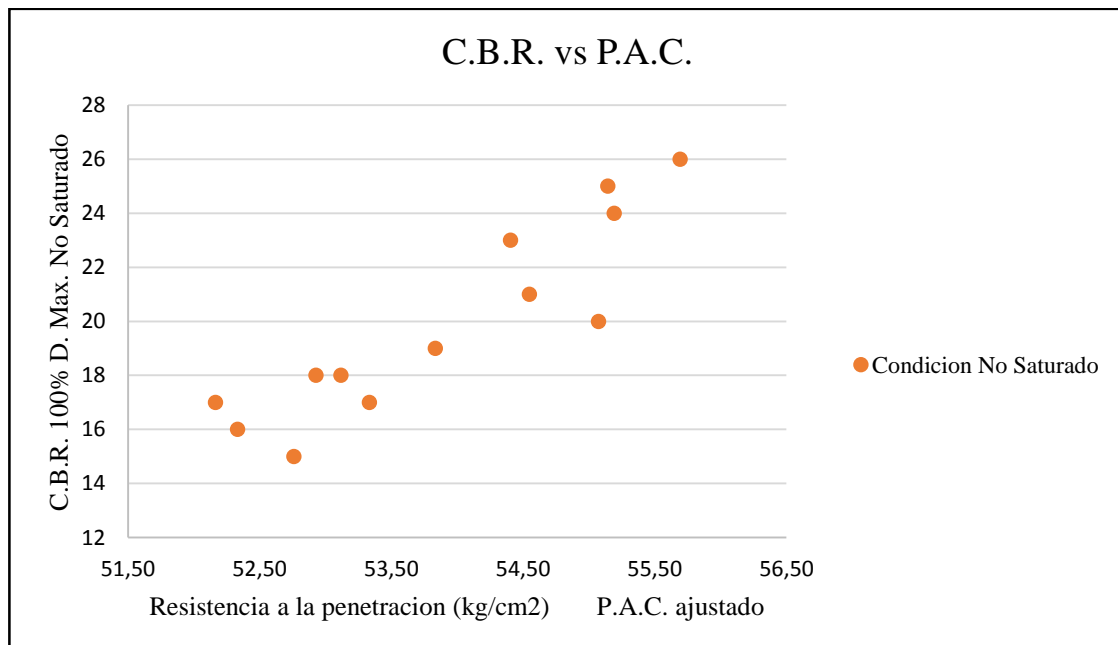
Dado que el valor-P en la tabla ANOVA es menor que 0,05, existe una relación estadísticamente significativa entre “C.B.R. 95% D. Max. Saturado” y “P.A.C. ajustado” con un nivel de confianza del 95,0%.

A cualquier nivel de significancia, incluso al 0,001%, los coeficientes de regresión estimados son representativos al modelo ya que el valor-P es cero.

3.2.6.3. **Determinación de la ecuación de correlación de C.B.R. al 100% de densidad máxima y Penetrómetro con Anillo de Carga ajustado, en condición No Saturada.**

Datos:

C.B.R. No Saturado 100% D. Max	P.A.C. 56 golpes
%	(kg/cm ²)
26	55,69
24	55,19
20	55,07
25	55,14
23	54,40
21	54,55
19	53,83
17	53,33
15	52,76
18	52,93
18	53,12
16	52,33
17	52,16



Introduciendo los datos a un modelo estadístico, se obtienen los siguientes resultados.

Comparación de Modelos Alternos		
Modelo	Correlación (R)	R²
Log-Y Cuadrado-X	0,9116	83,10%
Exponencial	0,9107	82,94%
Raíz Cuadrada-X Cuadrado-X	0,9107	82,94%
Logarítmico-Y Raíz Cuadrada-X	0,9103	82,86%
Multiplicativa	0,9098	82,77%
Raíz Cuadrada de Y	0,9097	82,75%
Raíz Cuadrada Doble	0,9091	82,65%
Inversa-Y Cuadrado-X	-0,9088	82,59%
Curva S	-0,9088	82,59%
Raíz Cuadrada-Y Log-X	0,9085	82,55%
Cuadrado de X	0,9084	82,52%
Inversa de Y	-0,9083	82,50%
Inversa-Y Raíz Cuadrada-X	-0,9080	82,44%
Inversa-Y Log-X	-0,9077	82,39%
Raíz Cuadrada-Y Inversa de X	-0,9074	82,33%
Lineal	0,9072	82,30%
Doble Inverso	0,907	82,26%
Raíz Cuadrada de X	0,9066	82,19%
Logaritmo de X	0,9059	82,07%
Inversa de X	-0,9046	81,82%

Esta tabla muestra los resultados de ajustar varios modelos a los datos. De los modelos ajustados, el modelo Log-Y Cuadrado-X es el que arroja el valor más alto de R² con 83,10%. Este es el modelo actualmente seleccionado.

- Variable dependiente: C.B.R. 100% D. Max. No Saturado.
- Variable independiente: P.A.C. ajustado No Saturado.

Log-Y Cuadrado-X:
$$Y = e^{(a+b*X^2)}$$

Mínimos	Valor-P
----------------	----------------

	Cuadrados	
Parámetro	Estimado	
Intercepto	-0,6809	0,1987
Pendiente	0,00126	0

Coefficiente de correlación (R) = 0,9116

$R^2 = 83,10 \%$

La ecuación al modelo ajustado es:

$$\mathbf{C. B. R. 100\% D. Max. No Saturado} = e^{(-0,6809+0.00126*\mathbf{P.A.C.}^2)}$$

El estadístico R^2 indica que el modelo ajustado explica 83,10% de la variabilidad en “C.B.R. 100% D. Max. No Saturado.”

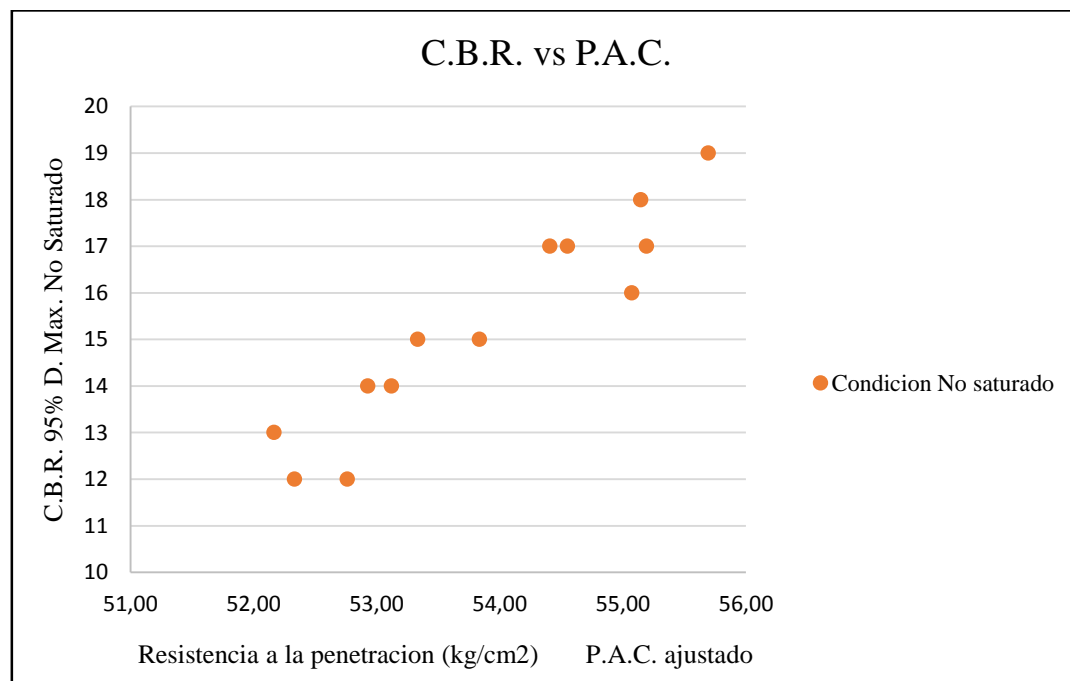
El coeficiente de correlación es igual a 0,9116, indicando una relación alta positiva entre las variables.

Dado que el valor-P en la tabla ANOVA es menor que 0,05, existe una relación estadísticamente significativa entre “C.B.R. 100% D. Max. No Saturado” y “P.A.C. ajustado” con un nivel de confianza del 95,0%.

3.2.6.4. **Determinación de la ecuación de correlación de C.B.R. al 95% de densidad máxima y Penetrómetro con Anillo de Carga ajustado, en condición No Saturada.**

Datos:

C.B.R. No Saturado 95% D. Max	P.A.C. 56 golpes
%	(kg/cm ²)
19	55,69
17	55,19
16	55,07
18	55,14
17	54,40
17	54,55
15	53,83
15	53,33
12	52,76
14	52,93
14	53,12
12	52,33
13	52,16



Introduciendo los datos a un modelo estadístico, se obtienen los siguientes resultados.

Comparación de Modelos Alternos		
Modelo	Correlación (R)	R²
Cuadrado Doble	0,9414	88,63%
Inversa de X	-0,9413	88,60%
Logaritmo de X	0,9412	88,59%
Cuadrado de Y	0,9412	88,59%
Raíz Cuadrada de X	0,9412	88,58%
Lineal	0,9411	88,57%
Cuadrado-Y Raíz Cuadrada-X	0,9411	88,56%
Cuadrado de X	0,941	88,54%
Cuadrado-Y Log-X	0,9409	88,53%
Cuadrado-Y Inversa de X	-0,9405	88,46%
Raíz Cuadrada-Y Inversa de X	-0,9397	88,30%
Raíz Cuadrada-Y Log-X	0,9395	88,26%
Raíz Cuadrada Doble	0,9393	88,23%
Raíz Cuadrada de Y	0,9392	88,21%
Raíz Cuadrada-X Cuadrado-X	0,9388	88,14%
Curva S	-0,9369	87,77%
Multiplicativa	0,9365	87,69%
Logarítmico-Y Raíz Cuadrada-X	0,9362	87,65%
Exponencial	0,936	87,60%
Log-Y Cuadrado-X	0,9354	87,50%

Esta tabla muestra los resultados de ajustar varios modelos a los datos. De los modelos ajustados, el modelo Cuadrado Doble es el que arroja el valor más alto de R² con 88,63%. Este es el modelo actualmente seleccionado.

- Variable dependiente: C.B.R. 95% D. Max. No Saturado.
- Variable independiente: P.A.C. ajustado No Saturado.

Cuadrado Doble:
$$Y = \sqrt{a + b * X^2}$$

	Mínimos Cuadrados	Valor-P
Parámetro	Estimado	
Intercepto	-1224,28	0
Pendiente	0,5037	0

Coefficiente de correlación (R) = 0,9414

$R^2 = 88,63 \%$

La ecuación al modelo ajustado es:

$$\text{C. B. R. 95\% D. Max. No Saturado} = \sqrt{-1224.28 + 0,5037 * P. A. C.^2}$$

El estadístico R^2 indica que el modelo ajustado explica 88,63% de la variabilidad en “C.B.R. 95% D. Max. No Saturado.”

El coeficiente de correlación es igual a 0,9414, indicando una relación alta positiva entre las variables.

Dado que el valor-P en la tabla ANOVA es menor que 0,05, existe una relación estadísticamente significativa entre “C.B.R. 95% D. Max. No Saturado” y “P.A.C. ajustado” con un nivel de confianza del 95,0%.

A cualquier nivel de significancia, incluso al 0,001%, los coeficientes de regresión estimados son representativos al modelo ya que el valor-P es cero.

CAPÍTULO IV

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1. Conclusiones

- Las muestras de suelos que se utilizaron para la elaboración de la investigación, son suelos finos, que cumplen con la condición de que pasa más del 35% el tamiz N°200; estos se extrajeron de las distintas zonas y barrios de la ciudad de Tarija como ser: Av. Integración, Constructor, Monte Cristo, Nueva Terminal, 3 de Mayo, Turumayo, Paraíso, Los Chapacos, Tejar, San Gerónimo, San Bernardo, Andaluz y Luis Espinal donde existe presencia de suelo fino.
- Los resultados obtenidos de C.B.R. son relativamente bajos de 2% a 6% haciendo un total de 13 muestras, los cuales se encuentran dentro de un rango aceptable, como lo indica el libro “Joseph E. Bowles”.
- Es importante recalcar, que al realizar el ensayo del Penetrómetro con Anillo de Cono en la muestra no saturada, no fue posible introducir por completo la punta del cono. Debido que la resistencia que presentaban las muestras, era mayor a la capacidad del anillo.

En este caso, el manual “H-4204 Penetrómetro con Anillo de Carga” recomienda realizar la lectura a $\frac{1}{4}$, $\frac{1}{2}$ y $\frac{3}{4}$ de la altura del cono, multiplicando la carga por el factor correspondiente.

La altura que se pudo introducir en los ensayos de laboratorio, fue de $\frac{1}{2}$ de la altura del cono. A diferencia de los ensayos “in situ” solo fue posible introducir a una altura de $\frac{3}{4}$ de la altura del cono.

Esta operación no es la más recomendada para realizar las lecturas de penetración; sin embargo, bajo esas condiciones críticas es la mejor aproximación.

Algunas veces fue necesario extraer la punta por medio de un movimiento brusco, ésto alteraba el área de la muestra con la que se contaba para la

realización del ensayo, donde cada vez que se introducía el cono se afectaba una porción alrededor de la punta.

- En los ensayos realizados en las muestras saturadas, sí fue posible introducir a su totalidad la punta del cono. La razón por la que se sumergen es para tener una condición similar a las muestras del C.B.R. saturado.
- Se realizó el ensayo de Penetrómetro con Anillo de Carga “in situ”, en cada uno de los lugares donde se extrajo las muestras, realizando 30 lecturas en cada lugar de extracción. Procediendo a los cálculos correspondientes para determinar la resistencia a la penetración adoptando el menor valor de cada una de las lecturas realizadas, de esta manera dar mayor confiabilidad a las ecuaciones determinadas.
- Para poder relacionar el ensayo de Penetrómetro con Anillo de Carga “in situ” y el Penetrómetro con Anillo de Carga en laboratorio, se estableció un índice de ajuste para poder estimar valores de C.B.R. en función a los resultados ajustados de Penetrómetro con Anillo de Carga.
- Después de realizar un análisis estadístico entre “C.B.R. a 100% de Densidad Máxima No Saturado” con el ”Penetrómetro con Anillo de Carga” nos dio el modelo matemático que se expresa de la siguiente manera:

$Y = (-5.3909 + 0.0396 * X^2)^2$ con un valor de ajuste $R^2 = 92.43 \%$, el cual tiene un coeficiente de correlación $r = 0.9614$ cuyo valor nos da una confiabilidad de 95%.

- En el análisis de “C.B.R. a 95% de Densidad Máxima No Saturado” con el ”Penetrómetro con Anillo de Carga” tenemos el siguiente modelo matemático:

$$Y = \frac{1}{(-4.3912 + \frac{64.3262}{X})}$$

con un ajuste $R^2 = 83.16 \%$, teniendo un coeficiente de correlación $r = 0.9119$ el cual nos da una confiabilidad del 95%.

- Después de analizar las variables “C.B.R. a 100% de Densidad Máxima Saturado” con el ”Penetrómetro con Anillo de Carga” tenemos como resultado el modelo matemático: $Y = e^{(-0.6809 + 0.00126 * X^2)}$ teniendo con un coeficiente

de ajuste $R^2 = 83.10 \%$, el valor del coeficiente de correlación es $r = 0.9116$ este nos da una confiabilidad del 95%.

- El análisis de las variables “C.B.R. a 95% de Densidad Máxima Saturado” con el ”Penetrómetro con Anillo de Carga” nos dio el siguiente modelo matemático:

$Y = \sqrt{-1224.28 + 0,5037 * X^2}$ con un valor de ajuste de $R^2 = 88.63 \%$, el coeficiente de correlación es $r = 0.9414$ reflejando una confiabilidad del 95%.

4.2. Recomendaciones

- Revisar el instrumento antes de su uso, para asegurarse de que todas las tuercas, pernos y juntas estén firmes, así proceder a la puesta a cero del instrumento.
- En la prueba de penetración, mantener el instrumento en posición vertical mientras se realiza el ensayo.
- Para el ensayo del “Penetrómetro con Anillo de Carga” se recomienda realizarlo en suelos con tamaño máximo de 2 mm, ya que la capacidad del anillo es de 1KN (101,97 Kg).
- No intentar lecturas superiores a la capacidad del anillo, ésto puede sobrecargar y descalibrar el anillo.
- Al momento de retirar la punta cónica al del suelo (después del ensayo de penetración), hacerlo siempre jalando desde el mango.
- También es importante recomendar, no retirar la punta del cono con movimientos bruscos, ya que ésto puede alterar el área del suelo en el molde, limitando el número de repeticiones del ensayo.
- El análisis contemplado en este proyecto cumplió con el objetivo del mismo, sin embargo, se recomienda haya una continuidad de este estudio por medio de otro proyecto.