

CAPITULO I

INTRODUCCIÓN

CAPITULO I

INTRODUCCIÓN

1.1. Introducción

Antes del desarrollo de la mecánica de suelos y gracias a las grandes contribuciones científicas de investigadores, los principales problemas de la ingeniería civil eran resueltos en forma intuitiva, ello traía serios riesgos en lo referente a seguridad y economía.

La geotecnia en la construcción es un apoyo fundamental para lograr, buenos resultados en la estabilización de suelos, ya que permite al responsable del proyecto anticipar la mayoría de los problemas que el suelo podría presentarle y permitir el cumplimiento de los objetivos para la que fue diseñada.

En toda construcción el suelo se usa como apoyo de la estructura de cimentación, es por eso que, para predecir el comportamiento de este ante los cambios de esfuerzos, es importante conocer sus propiedades y facilitar la selección de los procedimientos constructivos más idóneos, además de que se anticipan soluciones.

Cuando el suelo se ocupa como material de construcción se deben utilizar al máximo sus propiedades mecánicas, para obtener un mejor rendimiento y aprovechamiento en beneficio de la economía de la obra. Sin embargo, si el suelo por utilizar no tiene las propiedades idóneas, existen métodos de mejoramiento que pueden facilitar esa tarea.

El mejoramiento de suelos, se considera un método apropiado para el desarrollo de obras viales como lo son los pavimentos tanto rígidos como flexibles. Esto, debido a que proporcionan mejores condiciones del suelo de fundación y mejora la resistencia de los mismos.

Los materiales obtenidos en canteras y ríos utilizables en las construcciones, disminuyen su influencia gracias al uso de aditivos, optimizando los costos del desarrollo de obra, y obteniendo un impacto ambiental menor.

En este proyecto se investigará sobre la metodología de mejoramiento de suelo con ligante hidráulico AGROVIAL, observando el comportamiento del suelo mediante un

aumento porcentual del ligante hidráulico para que se pueda analizar el comportamiento de las propiedades mecánicas que aporta, esto con el análisis de ensayo de CBR, ya que este es un parámetro muy importante para el diseño de carreteras, además que analizaremos el costo del mejoramiento con este material frente a otros convencionales como la cal, el cemento, que son algunos materiales que ya se tienen los costos de aplicación y obtener la factibilidad del aditivo que se quiere implementar.

1.2. Referencias a trabajos realizados

Nahiazka Elizabeth Bravo Ormaza, estudiante de pregrado de ingeniería civil de la Escuela Superior Politécnica del Litoral de Ecuador, con la investigación titulada: “Propuestas de mejora para un camino terciario con mezcla suelo – cemento para el recinto La Frutilla y la comuna Bellavista del Cerro”, donde se tiene la siguiente conclusión: Se evidenció que la estabilización de suelo con AGROVIAL mejora de manera significativa las características físicas y mecánicas iniciales del suelo de subrasante, aumentando su valor CBR de 1% a un porcentaje mayor al 20% requerido, por lo que se concluye que el ligante hidráulico incrementa en gran medida el soporte del suelo.¹

1.3. Justificación

Para la obras civiles en general, el aspecto económico es un tema fundamental de discusión para llegar a la ejecución de las mismas, refiriéndonos a la construcción de carreteras, donde se tiene el problema de que la fundación no es la adecuada para realizar dicha obra, entonces se opta por una solución a este problema como el mejoramiento de este suelo con aditivos como el cemento, cal, y otros, que puede ser un poco caro desde la compra del mismo, ya que estos materiales no son considerados reciclados, más bien se considera que deben ser materiales nuevos para su aplicación, así que buscando una alternativa que pueda ser más barata y competir con estos, nos encontramos con el ligante hidráulico AGROVIAL de Holcim, que es un material más económico frente a los aditivos mencionados anteriormente y ya es utilizado en otros países como el país vecino de Argentina donde lo aplican en caminos rurales, es así

¹ Bravo Ormaza, Nahiazka Elizabeth, Cedeño Romero, Ricardo Andrés, (2019), *Propuesta de mejora para un camino terciario con mezcla suelo – cemento para el recinto “La Frutilla” y la comuna “Bellavista del cerro”*, Escuela Superior Politécnica del Litoral – Facultad de Ingeniería en Ciencias de la Tierra, Ecuador.

que podemos obtener este material por un costo más bajo y comprobar si con nuestros suelos es efectivo en su aplicación.

1.4. Aporte académico

El presente trabajo se basa en la estabilización de suelos que tenemos en el manual de ensayos y materiales de la ABC, que pertenece a nuestro país. En este manual tenemos las estabilizaciones de suelo-cemento y suelo-cal, los cuales nos muestra que en nuestro medio solo tenemos normadas estos 2 tipos de estabilizaciones, las cuales son utilizadas para mejorar las propiedades de un suelo que no llegue a cumplir ciertas condiciones o especificaciones técnicas para su utilización, entonces lo que se pretende es que con esta investigación, se pueda encontrar otra alternativa de estabilización o mejoramiento de suelo, y además se pretende dar a conocer la importancia de la implementación y conocimiento de nuevos materiales que se comercializan en países vecinos, además aplicarlo en nuestra rama de la ingeniería civil, y dar a conocer los efectos que tienen estos materiales en los suelos arcillosos de nuestro medio y posteriormente establecer si el material es factible para mejorar una subrasante.

1.5. Planteamiento del problema

1.5.1. Situación problémica

El problema del costo económico en obras es un tema fundamental que al momento de la ejecución de las mismas son muy observados tanto para los contratistas como para las entidades que requieren dichas obras.

Las obras viales son de gran importancia en nuestro medio ya que mediante los mismos conectamos a nuestros pueblos y ciudades de nuestro país, es por tanto que se tiene el problema de que en nuestra ciudad se tiene la presencia de suelos arcillosos en gran medida, y estos suelos suelen ser de gran problema tanto por su baja resistencia como por sus cambios de volumen que causan grandes problemas al pavimento como los baches, rajaduras, hundimientos de la plataforma, y demás problemas. Es por esto que se requiere antes de la construcción de la vía, un cambio de material en la subrasante o el mejoramiento del mismo, y esto supone un costo adicional, de esta manera se quiere implementar el ligante hidráulico AGROVIAL, el cual es un material que no se implementó en nuestro país, pero si en otros como Argentina, y de esta manera analizar

la influencia de la misma y observar si existe mejoras, mantiene o disminuye las propiedades mecánicas de un suelo.

Para la aplicación de este material se tendrá en cuenta la adición por porcentajes en peso del suelo para lograr llegar a un porcentaje óptimo de adición del aditivo, entonces tomaremos en cuenta 4 porcentajes en los cuales se pueda evaluar dichos efectos y llegar hasta el ensayo de CBR para ver en cuanto mejora el suelo en sus propiedades mecánicas.

1.5.2. Delimitación temporal

Este trabajo de investigación se realiza en tiempo presente ya que se quiere dar a conocer si el ligante hidráulico AGROVIAL, adicionado a un suelo arcilloso, tiene efectos positivos, negativos o nulos y establecer su factibilidad tanto técnicamente y económicamente.

1.5.3. Delimitación espacial

Se obtendrán muestras de suelo arcilloso de la ciudad de Tarija más propiamente del barrio Jardín y del barrio San Blas, que son ubicaciones conocidas por tener suelos con un gran contenido de arcilla y luego de haber recogido las muestras se trasladara al laboratorio de Mecánica de Suelos de la Universidad Autónoma Juan Misael Saracho para realizar las pruebas de laboratorio correspondientes.

1.5.4. Formulación del problema

¿Añadiendo ligante hidráulico AGROVIAL como aditivo a los suelos arcillosos, será posible mejorar su CBR?

1.6. Objetivos

1.6.1. Objetivo general

Mejorar el valor de CBR de suelos arcillosos encontrados en la ciudad de Tarija, utilizando como aditivo ligante hidráulico AGROVIAL, para encontrar sus ventajas y desventajas técnicas.

1.6.2. Objetivos específicos

- Encontrar suelos arcillosos de diferente plasticidad para analizar sus efectos del ligante hidráulico en los mismos.
- Clasificar los suelos arcillosos mediante el sistema de clasificación AASTHO y SUCS.
- Determinar el porcentaje de humedad óptima y densidad máxima para los suelos en estado natural.
- Obtener el valor del CBR de los suelos arcillosos en estado natural.
- Observar la evolución del CBR en los suelos arcillosos adicionados con ligante hidráulico.
- Determinar el porcentaje óptimo del aditivo ligante hidráulico en suelos arcillosos.
- Analizar los resultados de la influencia del ligante hidráulico en estos suelos arcillosos.

1.7. Hipótesis

1.7.1. Identificación de variables

“Si se añade ligante hidráulico AGROVIAL a los suelos arcillosos estos mejorarán su valor CBR”

1.7.2. Variable independiente

X = masa de ligante hidráulico (gr)

1.7.3. Variable dependiente

Y = Valor de Soporte de California (%)

Tabla 1. Variable independiente.

Variables independientes	Indicador	Conceptualización	Medición	Rango de variabilidad
Cantidad de ligante hidráulico	Resistencia modificada de suelo	Adicionar masa de ligante hidráulico respecto a la masa de suelo	Porcentaje de adición (%)	0% - 20%
			Gramos (gr)	Depende de la masa de suelo y el % de adición

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 2. Variable dependiente.

Variable dependiente	Indicador	Conceptualización	Medición	Rango de variabilidad
Valor de Soporte de California (2 suelos) (16 muestras por suelo)	CBR (%)	Indicador utilizado para medir la capacidad de soporte de explanadas, bases y subbases de firmes. El ensayo, normalmente, se realiza en condiciones de humedad y densidad controladas.	Porcentaje (%)	> valor

Fuente: Elaboración propia.

1.8. Criterios de diseño metodológico

1.8.1. Unidad de muestra

La unidad de muestra se considera los ensayos de laboratorio de caracterización de suelos y el ensayo de resistencia California Bearing Ratio, esto aplicado a suelos finos.

1.8.2. Población

La población tomada en cuenta para el presente trabajo se detalla en la siguiente tabla:

Tabla 3. Población.

N°	Etapa	Ensayo	Ni
1	Etapa de caracterización de los suelos	Granulometría del suelo 1	1
2		Granulometría del suelo 2	1
3		Limite liquido del suelo 1	1
4		Limite liquido del suelo 2	1
5		Limite plástico del suelo 1	1
6		Limite plástico del suelo 2	1
7		Ensayo de compactación Proctor del suelo 1	1
8		Ensayo de compactación Proctor del suelo 2	1
9		Ensayo CBR del suelo 1	1
10		Ensayo CBR del suelo 2	1
11	Ensayos con aditivo ligante hidráulico AGROVIAL	Limite liquido del suelo 1 + ligante hidráulico	4
12		Limite liquido del suelo 2 + ligante hidráulico	4
13		Limite plástico del suelo 1 + ligante hidráulico	4
14		Limite plástico del suelo 2 + ligante hidráulico	4
15		Ensayo de compactación del suelo 1 + ligante hidráulico	4
16		Ensayo de compactación del suelo 2 + ligante hidráulico	4
17		Ensayo de CBR del suelo 1 + ligante hidráulico	20
18		Ensayo de CBR del suelo 2 + ligante hidráulico	20
Total			74

Fuente: Elaboración propia.

1.8.3. Muestra

Tabla 4. Muestra.

N°	Etapa	Ensayo	Ni
1	Ensayos con aditivo ligante hidráulico AGROVIAL	Limite liquido del suelo 1 + ligante hidráulico	4
2		Limite liquido del suelo 2 + ligante hidráulico	4
3		Limite plástico del suelo 1 + ligante hidráulico	4
4		Limite plástico del suelo 2 + ligante hidráulico	4
5		Ensayo de compactación del suelo 1 + ligante hidráulico	4
6		Ensayo de compactación del suelo 2 + ligante hidráulico	4
7		Ensayo de CBR del suelo 1 + ligante hidráulico	15
8		Ensayo de CBR del suelo 2 + ligante hidráulico	15
Total			54

Fuente: Elaboración propia.

1.8.4. Tamaño de la muestra

Para el cálculo del tamaño de la muestra se tomará en cuenta la ecuación de muestreo aleatorio con población finita.

$$n = \frac{Z^2 * N * \sigma^2}{(N - 1) * e^2 + Z^2 * \sigma^2}$$

Donde se tomará en cuenta un nivel de confianza de 95% y de acuerdo a la variable estandarizada es $Z=1.96$, con un margen de error $e=0.05\%$ que es deducido del nivel de confianza, y por el corto tiempo establecido se asume una varianza de $\sigma^2=0.10$

Reemplazando se tiene:

$$n = \frac{1.96^2 * 54 * 0.10}{(54 - 1) * 0.05^2 + 1.96^2 * 0.10}$$

Tamaño de la muestra (n):

$$n = 39.33$$

Tomaremos como tamaño de la muestra $n=40$, esto nos da como resultado los siguientes ensayos que se realizaran:

Tabla 5. Ensayos a realizar.

Nº	Etapa	Ensayo	Ni
1	Etapa de caracterización de los suelos	Granulometría del suelo 1	1
2		Granulometría del suelo 2	1
3		Limite liquido del suelo 1	1
4		Limite liquido del suelo 2	1
5		Limite plástico del suelo 1	1
6		Limite plástico del suelo 2	1
7		Ensayo de compactación Proctor del suelo 1	1
8		Ensayo de compactación Proctor del suelo 2	1
9		Ensayo CBR del suelo 1	1
10		Ensayo CBR del suelo 2	1
11	Ensayos con aditivo ligante hidráulico AGROVIAL	Limite liquido del suelo 1 + ligante hidráulico	4
12		Limite liquido del suelo 2 + ligante hidráulico	4
13		Limite plástico del suelo 1 + ligante hidráulico	4
14		Limite plástico del suelo 2 + ligante hidráulico	4
15		Ensayo de compactación del suelo 1 + ligante hidráulico	4
16		Ensayo de compactación del suelo 2 + ligante hidráulico	4
17		Ensayo de CBR del suelo 1 + ligante hidráulico	16
18		Ensayo de CBR del suelo 2 + ligante hidráulico	16
Total			66

Fuente: Elaboración propia.

1.9. Marco referencial

En este punto se puede recalcar una tesis doctoral referida al método de elección del estabilizante óptimo, donde se puede citar los siguientes párrafos:

La construcción con tierra actual, sobre todo si hablamos de BTC (bloques de tierra comprimida), necesita de procesos de estabilización, para conseguir un material durable y que responda a las actuales necesidades constructivas. En base a ello y a la falta de método en este sentido se desarrolla a continuación el siguiente capítulo de la Tesis.

Para que el ingeniero o cualquier otro técnico, pueda decidirse por el mejor método de estabilización de la tierra, que vaya a utilizarse, hay que reunir suficiente información sobre los estabilizantes disponibles. Ésta se deberá cribar por los siguientes criterios de elección:

- Disponibilidad regional. Se priorizarán los productos autóctonos.
- Minimización del impacto ambiental. La evaluación de éste englobará todo el ACV del estabilizante (Análisis del Ciclo de vida).
- Consumo mínimo de energía, agua y recursos no renovables, y emisión mínima de sustancias tóxicas al entorno desde su extracción, fabricación, transporte, aplicación y vida útil.
- Procesos tecnológicos apropiables y apropiados a la gente del lugar.
- La evaluación económica.
- Condiciones de mantenimiento y uso.

Otro artículo que refiere a otro tipo de mejoramiento de suelo utilizando suelo – cemento y cascaras de arroz, un trabajo que es interesante y fue publicado por la Revista de Ingeniería de Construcción publicado por Doctor Guillermo Thenoux, Pontificia Universidad Católica de Chile, donde mostraremos una parte de las conclusiones de dicho trabajo de investigación:

Puede afirmarse que, independiente del contenido de cemento y de la cáscara de arroz adicionados, el suelo arenoso fue siempre superior al suelo arcilloso en términos de

desempeño físico-mecánico, evaluado por resistencia a la compresión simple, resistencia a la tracción en la compresión diametral y capacidad de absorción de agua.

Se supone que la cáscara de arroz utilizada en la presente pesquisa presenta contenido de SiO₂ con estructura física (forma cristalina) inadecuada para la ocurrencia de reacciones puzolánicas en presencia de Ca (OH)₂. La misma sólo actuó como relleno afectando negativamente el comportamiento mecánico de ambos suelos. Sin embargo, su utilización combinada con el cemento mostró que las reacciones de estabilización química que ocurrieran entre el suelo y el cemento fueran más significativas del que los efectos negativos (ocurrencia de vacíos) provocados por la presencia de la cáscara de arroz.

De modo general, los valores de masa específica aparente seca máxima, de resistencia a la compresión simple y de tracción en la compresión diametral de las mezclas de suelo cemento - cáscara de arroz, disminuyeron con el aumento del contenido de cáscara de arroz.

Los valores de humedad óptima y absorción de agua aumentaron en la medida del crecimiento del contenido de cáscara de arroz. En todos los tratamientos de suelo-cemento - cáscara de arroz, los valores de resistencia mecánica fueron siempre mayores a los 60 días que a los 7 y 28 días de edad.

1.10. Marco normativo

Las normas a utilizar son:

- Ensayo de Análisis Granulométrico por Tamizado ASTM D 422
- Ensayo de Límites de Atteberg ASTM D 4318
- Ensayo de Proctor Modificado ASTM D 1557
- Ensayo CBR (California Bearing Ratio) – ASTM D 1883

1.11. Análisis de la teoría por parte del autor

Es cierto que existen muchos trabajos de investigación sobre materiales que ayudan a mejorar el suelo de manera que sea apta para la construcción, nos enfocamos en una tesis que trata sobre el ligante hidráulico AGROVIAL de la Escuela Superior Politécnica del Litoral (ECUADOR) la cual habla sobre el uso del ligante hidráulico

AGROVIAL como material de mejora de un camino terciario, y sus conclusiones son las siguientes:

- Se evidenció que la estabilización de suelo con ligante AGROVIAL mejora de manera significativa las características físicas y mecánicas iniciales del suelo de subrasante, aumentando su valor CBR de 1% a un porcentaje mayor al 20% requerido, por lo que se concluye que el ligante hidráulico AGROVIAL incrementa en gran medida el soporte del suelo.
- En el ensayo de Proctor Modificado las tres muestras de suelo con ligante superaron la densidad mínima requerida de 1,400 kg/m³ como era de esperarse debido a que los ensayos solamente de terreno natural ya cumplían con este objetivo.
- Se demostró que la estabilización de los suelos en sitio con ligante hidráulico es un método de aprovechamiento del terreno ya que evita acarreo de materiales importados.
- Esta alternativa de construcción de vías podría ser la forma más efectiva para la recuperación de caminos de la red vial secundaria y terciaria debido a que requiere de mano de obra no necesariamente calificada ya que con una instrucción inicial y con un acompañamiento de una persona profesional facilita la elaboración del suelo – ligante transformando este procedimiento en sencillo y económico en zonas del país donde no hay acceso a tecnologías o mucha capacitación.

Entonces en nuestras propias palabras, según este autor, se refleja que los resultados obtenidos con ligante hidráulico AGROVIAL de Holcim optimizaron y mejoraron las propiedades del suelo para poder ser utilizados como material estabilizante de subrasante de una carretera.

1.12. Posición del autor

En esta investigación se pretende abarcar el mejoramiento de suelos en base a materiales no conocidos en nuestro medio, como es el ligante hidráulico AGROVIAL de Holcim que tiene su fábrica y base de ventas principal en el país de Argentina, este se lo obtiene por un costo bajo en comparación con los materiales comercializados en

nuestro medio como el cemento, este ligante hidráulico se tenía a la venta en nuestra ciudad, pero por la desinformación, desconocimiento y el poco marketing de este producto, se dejó de importar el material a nuestra ciudad y ya no se comercializa, entonces con este trabajo de investigación queremos dar a conocer los beneficios tanto técnicos como económicos que podrían aportar a nuestro medio de ser aplicados a nuestras carreteras y caminos, y mediante ensayos de laboratorio, queremos mostrar esta alternativa de mejoramiento, ya que en nuestra ciudad y también en nuestro país, existen suelos inestables y son necesarias su mejoramiento para el uso no solo de carreteras, sino también para estructuras, es por esto que se requiere nuevas técnicas de mejoramiento y mejor aún con materiales que se puedan reciclar y en un futuro poder ser usados para ciertos caminos en donde el suelo sea arcilloso y se necesite un aumento de su valor de CBR, debido a las cargas que se requieran para vehículos tipo.

1.13. Alcance de la investigación

La investigación presenta una variable manipulable, como lo es el ligante hidráulico AGROVIAL de Holcim, expresado en porcentaje, el mismo que es definido por el investigador.

Presenta una variable dependiente (CBR), que motivada por la variable independiente cambian su valor en tal sentido se trata de una investigación con alcance “causal/explicativo”, con diseño experimental en la categoría cuasiexperimento.

Para cumplir con los objetivos propuestos y que posteriormente este trabajo sirva como un documento de consulta para los interesados en esta temática que trata generalmente sobre el mejoramiento de suelos, se debe obtener primeramente la caracterización de dos suelos arcillosos que uno será de baja plasticidad y el otro de alta plasticidad para observar el comportamiento del ligante frente a estos dos tipos de suelos, y además de su valor de CBR en estado natural, posteriormente de la misma manera obtenerlos combinando estos suelos con el aditivo de ligante hidráulico para obtener los resultados con los mismos y realizar una posterior comparación entre estos.

CAPITULO II
MARCO TEÓRICO

CAPITULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. Suelos arcillosos

En mecánica de suelos se define como arcilla a las partículas de cualquier sustancia inorgánica menores a 0,02 mm, tamaño para el cual empiezan a tener influencia las acciones fisicoquímicas. Los terrenos arcillosos son en principio, los más peligrosos para cimentar. En ellos se pueden producir grandes asentamientos en un largo o aun larguísimo plazo de tiempo, y es en los que el conocimiento de su comportamiento bajo cargas ha progresado más en los últimos años.

2.2. Arcillas

Las arcillas son partículas muy finas y forman barro cuando están saturadas de agua. Los suelos arcillosos son pesados, no drenan ni se desecan fácilmente y contienen buenas reservas de nutrientes. Son fértiles, pero difíciles de trabajar cuando están muy secos.

2.3. Plasticidad de arcillas

La plasticidad es la capacidad de un material para ser deformado sin ruptura durante la aplicación de una fuerza externa, y conservar la deformación tras el cese de la fuerza deformadora.

El comportamiento plástico de una arcilla puede resumirse del siguiente modo: supón que dispones de una cierta cantidad de arcilla en polvo y que vas añadiéndole agua, y amasando, poco a poco. Llega un momento en el que la cantidad de agua que has añadido permite el moldeo de la mezcla, es decir, que al aplicar una fuerza a la mezcla arcilla - agua aparece una deformación que permanece incluso después de ceder la fuerza que la produjo. Se dice entonces que la arcilla es moldeable a partir de esa humedad, que se conoce con el nombre de “agua de moldeo”. Sin embargo, si continuas añadiendo agua a la mezcla, llega un momento en el que el moldeo se hace cada vez más difícil, porque la mezcla se vuelve cada vez más pegajosa, hasta que se llega a un contenido de agua en la que el moldeo es ya imposible.

2.3.1. Arcillas de alta plasticidad

Los suelos con contenido significativo de material arcilloso y alta plasticidad poseen un comportamiento particular que los hace susceptibles de presentar problemas asociados a baja resistencia al corte, excesivos cambios volumétricos y alta deformabilidad.

2.3.2. Arcillas de baja plasticidad

Los suelos finos inorgánicos de baja plasticidad (por debajo de la línea A) muestran unos rollitos frágiles cuando están cerca del límite plástico y una pérdida rápida de cohesión de del suelo al disminuir su humedad por debajo del límite plástico.

2.4. Suelos expansivos

Los suelos expansivos son un tipo de arcilla que tienen la propiedad de incorporar moléculas de agua y generan cambios volumétricos de su estado natural del suelo de cimentación. Dichos suelos pueden dividirse en dos categorías:

- Depósitos arcillosos, de origen residual, altamente reactivos a los cambios de humedad; presentan expansión bajo saturación, y contracción en ambiente seco.
- Depósitos arcillosos no saturados, de origen eólico cuyos grumos alcanzan el tamaño de los limos. Son susceptibles de expansión bajo humedecimiento y de asentamientos bajo carga y saturación.

2.5. Comportamiento de suelos expansivos

- Contracción de las arcillas debido al secado.
- Expansión de las arcillas al humedecerse.
- Disminución de su resistencia al corte y de sus capacidades de soporte al expandirse.

2.6. Causas de la expansión

- Inundación localizada.
- Elevación capilar del agua proveniente de un nivel freático.
- Periodos concentrados de alta precipitación combinados con drenajes deficientes.

- Variación del contenido de humedad de las arcillas por construcción de una estructura sobre ella.

2.7. Problemas de la expansión o contracción

- El problema más grave en este tipo de suelos ocurre en las construcciones ligeras, pavimentos, taludes, etc. que no se estudian a fondo.
- Problemas causados por suelos expansivos es por asentamientos y levantamientos.
- Es importante que el ingeniero civil disponga de criterios inmediatos sencillos, simples y económicos para detectar la presencia de este tipo de suelos.

2.8. Daños en suelos expansivos

- Hinchamiento del suelo bajo el edificio por aumento de humedad (no existe evaporación).
- Retracción periférica del terreno (construido en poca humedad).
- Variación de volumen debido a modificaciones del nivel freático (por bombeo, drenajes, etc.)
- Escasa profundidad de fundación (dentro de zona activa).
- Hinchamientos por eliminación de árboles.
- Rotura de tuberías de agua.
- Defectos de drenajes periféricos.

2.9. Soluciones para fundaciones en suelos expansivos

- Alterar el suelo, por ejemplo, agregando limos, cales, u otras mezclas que reducirían o eliminarían la contracción o expansión.
- Control de expansión, permitiendo que el suelo se expanda dentro de las cavidades de la cimentación, los movimientos de una cimentación pueden ser reducidos a un nivel tolerable, para el control de la humedad debe ser excavado a la misma o similar profundidad que el peso del suelo contrarreste el

levantamiento del mismo, se pondrá un material plástico sobre toda la superficie de la excavación.

- Ignorar el levantamiento, acomodando zapatas a una suficiente profundidad y/o levantamiento del material en la zona de expansión entre la superficie del terreno y la base de la construcción, puede ocurrir hinchamiento sin causar movimientos perjudiciales.

2.10. Capa de subrasante

Subrasante se denomina al suelo que sirve como fundación para todo el paquete estructural de un pavimento. En la década del 40, el concepto de diseño de pavimentos estaba basado en las propiedades ingenieriles de la subrasante. Estas propiedades eran la clasificación de suelos, plasticidad, resistencia al corte, susceptibilidad a las heladas y drenaje.

Desde las postrimerías de la década del 50, se puso más énfasis en las propiedades fundamentales de la subrasante y se idearon ensayos para caracterizar mejor a estos suelos. Ensayos usando cargas estáticas o de baja velocidad de deformación tales como el CBR, que representan mucho mejor lo que sucede bajo un pavimento en lo concerniente a tensiones y deformaciones.

Las propiedades de los suelos pueden dividirse en dos categorías:

- Propiedades físicas: son usadas para selección de materiales, especificaciones constructivas y control de calidad.
- Propiedades ingenieriles: dan una estimación de la calidad de los materiales para caminos. La calidad de los suelos para subrasantes se puede relacionar con el módulo resiliente, el módulo de Poisson, el valor soporte del suelo y el módulo de reacción de la subrasante.

2.10.1. Requerimientos de la subrasante

Entre las propiedades requeridas para estos suelos tenemos:

- Resistencia
- Drenaje

- Fácil compactación
- Conservación de la compactación
- Estabilidad volumétrica

El material deberá cumplir con las normas y características de calidad, a continuación, presentamos tablas en las cuales clasificamos de acuerdo al CBR, el tipo de terracerías y subrasantes:

Tabla 6. Especificaciones de subrasante.

Características	Suelos tolerables	Suelos adecuados	Suelos seleccionados
Tamaño máximo	25 % > 15 cm	< 10 cm	< 8 cm
Contenido de finos, %	.....	≤ 35	≤ 25
Límite líquido, %	≥ 40	≤ 40	≤ 30
Índice de plasticidad, %	.....	.....	≤ 10
Peso vol. Máximo. Kg/m ³	≥ 1450	≥ 1750	.....
CBR. %	> 3	> 6	> 10
Expansión, %	.....	< 2	0

Fuente: Instituto Mexicano del cemento y concreto IMCYC.

Las propiedades de los suelos pueden dividirse en dos categorías:

- Propiedades físicas: Son usadas para selección de materiales, especificaciones constructivas y control de calidad.
- Propiedades ingenieriles: Dan una estimación de la calidad de los materiales para caminos.

2.10.2. Clasificación de la subrasante

Se considerarán como materiales aptos para la coronación de la subrasante suelos con CBR igual o mayor de 6%. En caso de ser menor, se procederá a eliminar esa capa de material inadecuado y se colocará un material granular con CBR mayor a 6%; para su estabilización.

Tabla 7. Clasificación de la subrasante.

Categoría de subrasante	CBR
Subrasante muy pobre	< 3%
Subrasante pobre	3% - 5%
Subrasante regular	6% - 10%
Subrasante buena	11% - 19%
Subrasante muy buena	> 20%

Fuente: José Rafael Menéndez Acurio, 2015.

2.10.3. Funciones de la subrasante

Las principales funciones de la capa subrasante son:

- Recibir y resistir las cargas del tránsito que le son permitidas por el pavimento.
- Transmitir y distribuir de modo adecuado las cargas del tránsito al cuerpo del terraplén.

Estas dos funciones son estructurales y comunes a todas las capas de las secciones transversales de un pavimento.

Entre las cualidades de una subrasante, que generalmente son deseables por los ingenieros de vías, se tienen las siguientes:

- Una alta resistencia.
- Permanencia de la resistencia por lo menos durante la vida útil del pavimento.
- Una buena uniformidad en todas las direcciones.
- Una alta densidad.
- Poco susceptibles a los cambios volumétricos.
- Poco susceptibles a la acción del agua.
- Buena trabajabilidad durante el proceso de compactación.
- Permanencia de las propiedades inducidas mediante la compactación.

La parte superior de la capa subrasante coincide con la línea subrasante del proyecto geométrico la cual debe cumplir con las especificaciones de pendiente longitudinal para la obra. Esta línea marca la altura de las terracerías y por tanto su espesor, que la mayor de las veces es mayor que el necesario en la estructura.

En los procedimientos de construcción, los materiales se deben compactar con el equipo más adecuado, de acuerdo con sus características. Cuando los materiales encontrados en las zonas cercanas a la obra no cumplen con las características marcadas en las normas, se requiere estabilizarlos mecánica y químicamente.

2.11. Mejoramiento de suelos

2.11.1. Que es el mejoramiento de los suelos

El mejoramiento de suelos es el proceso al que se ven sometidos los suelos naturales arcilloso para mejorar sus cualidades. Las técnicas de mejoramiento de suelos consisten en modificar las características de un suelo por una acción física (vibraciones, por ejemplo) o por la inclusión en el suelo de una la mezcla del suelo con un material más resistente, con el fin de:

- Aumentar la capacidad y/o la resistencia al corte
- Disminuir los asentamientos, tanto absolutos como diferenciales, y acelerarlos cuando sucedan
- Disminuir o eliminar el riesgo de licuefacción en caso de terremoto o de vibraciones importantes

Los ámbitos de aplicación de las distintas técnicas dependen esencialmente de la naturaleza y la granulometría de los terrenos que se desea mejorar, aumentar su resistencia, reducir su plasticidad, facilitar los trabajos de construcción o aumentar su estabilidad reduciendo problemas en estructuras y pavimentos.

2.12. Aplicación a suelos arcillosos utilizando aditivos

Antes de construir una edificación en un terreno, es necesario verificar mediante un estudio de suelos, caracterizando el terreno donde vamos a construir. Muchas veces se adopta generalmente el tipo de fundación de una edificación aledaña próxima. Esa decisión no es del todo segura debido a que el suelo suele cambiar su composición

metro a metro. El mejoramiento de un suelo consiste en modificar algunas de sus características indeseables para el propósito de uso que queremos darle a dicho suelo.

El problema se presenta cuando el suelo va a ser empleado para apoyar a una cimentación, ya sea para cimentación de una edificación o bien de un pavimento, las principales características indeseables de una arcilla plástica serán: un índice plástico demasiado alto que significa un alto valor de expansión (o bien su opuesta contracción), así como una capacidad para soportar carga estructural que será demasiado baja. El suelo arcilloso tiene la capacidad de modificar su volumen cuando absorbe o deja de absorber agua produciendo hinchazones sobre el asentamiento de la obra que deriva en ciertas rajaduras que muchas veces pueden visualizarse desde la fachada con grietas horizontales y en un pavimento con grietas verticales.

Existen diferentes formas de tratar de estabilizar un suelo con arcilla plástica. Una de ellas es la de retirar dependiendo la profundidad de captación de las arcillas hasta 2 metros de tierra y reponer el nivel con tierra mejorada. Este proceso es costoso y muchas veces poco práctico, en especial en obras de pequeña envergadura como es el caso de una vivienda.

La segunda opción que es motivo de explicación es la de desactivar las arcillas expansivas mediante un proceso químico con apagado mediante agua de cal. En primer lugar, se debe aclarar que el emplear la llamada cal viva con dicho propósito, no presenta ventajas y si presenta las concernientes desventajas de su manejo. La cal recomendada para tal fin es la cal hidratada, del tipo más comercial y de calidad más uniforme.

2.13. Ensayo del valor de Soporte de California

El Ensayo CBR (California Bearing Ratio: Ensayo de Relación de Soporte de California) es un parámetro del suelo que cuantifica su capacidad resistente como subrasante, sub base y base en el diseño de pavimentos. Es un ensayo empírico que se efectúa bajo condiciones controladas de humedad y densidad. Este es uno de los parámetros necesarios obtenidos en los estudios geotécnicos previos al diseño y la construcción de carreteras. Aunque los nuevos métodos de diseño de pavimentos

incluyen parámetros más representativos de la resistencia del suelo, el CBR sigue siendo usado por su sencillez y simplicidad en su ejecución.

2.13.1. Valor de CBR

El valor del CBR es un indicador del esfuerzo cortante o de punzonamiento en subrasantes, subbases y bases. El ensayo del CBR fue introducido por el Departamento de Carreteras de California durante la Segunda Guerra Mundial (1930) y posteriormente fue adoptado en varias partes del mundo como un método estándar. En Bolivia, los métodos de diseño de pavimentos comúnmente usados son los de AASTHO 93 y PCA, para los cuales se requiere del valor del CBR.

Los valores de CBR cercanos a 0% representan, los suelos de pobre calidad (es decir que no poseen una buena resistencia a esfuerzos cortantes), mientras que los más cercanos a 100% son indicativos de la mejor calidad (Sánchez, 2012). En la práctica se utiliza el número de CBR omitiendo el porcentaje (%) y se presenta como un número entero.

2.13.2. Expansión en el ensayo CBR

La prueba de expansión consiste de un plato perforado (placa para medir expansión) con una barra ajustable, manómetro dial y trípode para montar el manómetro dial de expansión en posición en el collar del molde CBR.

2.14. Ligante hidráulico AGROVIAL

2.14.1. Ligante hidráulico AGROVIAL como aditivo

Es una solución rentable e innovadora, que permite dotar al suelo existente de las propiedades físicas, químicas y mecánicas requeridas para su uso, adecuándose para las aplicaciones más exigentes, asegurando a la capa tratada una durabilidad prolongada y ahorrándole al cliente costos tanto en la fase de ejecución como de mantenimiento a medio y largo plazo.

Los ligantes hidráulicos de Holcim están especialmente desarrollados para la estabilización de suelos y caminos agrícolas. Representan una solución rentable, innovadora y eco amigable.

AGROVIAL es un ligante hidráulico desarrollado especialmente para la estabilización de suelos y caminos agrícolas. Es una solución rentable, innovadora y eco amigable, que permite estabilizar suelos agrícolas incrementando la resistencia y durabilidad de los caminos, sean estos para uso peatonal, animal o vehicular; generando un mejor comportamiento ante el desgaste por el tránsito, evitando la formación de baches y mejorando la transitabilidad de los caminos en la temporada de lluvias.

2.14.2. Ventajas del ligante hidráulico

2.14.2.1. Económico

- Contribuye a la optimización de costos, ya que caminos intervenidos con AGROVIAL requieren poco mantenimiento.
- Esta solución no requiere la compra de materiales de cantera, ni su transporte.
- Disminuye los días perdidos por inaccesibilidad al campo y por mantenimiento de los caminos.
- Hace más segura la circulación dentro del campo.
- Disminuye los costos de mantenimiento de los vehículos y máquinas.
- Los caminos tratados con AGROVIAL generan menos polvo, esto reduce la erosión de los caminos, protegiendo así a los cultivos y la hacienda.
- Mejora la productividad del personal, consecuencia de las mejores condiciones de trabajo.

2.14.2.2. Técnico

- Producto de fabricación industrial, con altos estándares de calidad, entregado listo para utilizar.
- Mejora el comportamiento ante el desgaste por el tránsito, evitando la formación de baches y mejorando la transitabilidad de los caminos en la temporada de lluvias.
- Menor tendencia a la fisuración de la capa tratada en relación a otros conglomerantes.
- Reduce la plasticidad del suelo.
- Disminución de la frecuencia de tratamientos de conservación, en el caso de uso como estabilizador de caminos de tierra.

2.14.2.3. Ambiental

Los caminos estabilizados con AGROVIAL reducen emisión de CO₂ en el ambiente generado por el transporte, debido a que se utiliza el mismo suelo del lugar. Los ligantes hidráulicos como AGROVIAL tienen menor huella de carbono que otros conglomerantes utilizados actualmente en el mercado. Reducción del daño en las vías circundantes al proyecto que se destruyen con el transporte de material de préstamo.

2.15. Composición del ligante hidráulico

El ligante hidráulico AGROVIAL comprende:

- Un activador provisto de óxido y/o hidróxido de magnesio.
- Un material puzolánico que comprende óxidos de calcio, silicio y aluminio; en el que el activador tiene un tamaño de partícula inferior a 150 µm.
- Un contenido en óxido y/o hidróxido de magnesio entre el 60 y el 77%.
- Un contenido en óxido y/o hidróxido de calcio de hasta el 15% y una relación óxido y/o hidróxido de magnesio/óxido y/o hidróxido de calcio mayor o igual a 4:1.
- Un material puzolánico tiene un tamaño de partícula inferior a 50 µm, teniendo además al menos un 60% de las partículas de material puzolánico un tamaño el rango entre 3 y 30 µm.

En otras palabras, propiamente menos técnicas que sirvan para su entendimiento, el ligante hidráulico este hecho a base de clínker de cemento portland, adiciones minerales y regulador de fraguado además de incorporar cal, es por esto que entra en la clasificación de conglomerante mixto.

Este es un producto fabricado mediante molienda y mezcla en fábrica y listo para su uso.

Formulados especialmente para su aplicación en tratamientos de suelos sometidos a cargas de tráfico (caminos, carreteras, explanadas de aparcamientos, etc.).

- Resistencias adecuadas a las necesidades reales.
- Fraguados más adaptados a los tratamientos de suelos.
- Condiciones de hidratación y curado ideales.

El ligante hidráulico está desarrollado especialmente para la estabilización de suelos. Es aplicable a bases, subbases y subrasantes de pavimentos tanto rígidos como flexibles. Es una solución rentable e innovadora, que permite dotar al suelo existente de las propiedades físicas, químicas y mecánicas requeridas para su uso, adecuándolo para las aplicaciones más exigentes, asegurando a la capa tratada una durabilidad prolongada y ahorrándole al cliente costos tanto en la fase de ejecución como de mantenimiento a medio y largo plazo.

El fraguado es similar al del cemento en cuanto a los productos de hidratación, pero con una velocidad de desarrollo más adecuada a los tratamientos de suelo.

2.16. Aplicaciones del ligante hidráulico AGROVIAL

- Estabilización de caminos vecinales, caminos internos de los campos, entrada de haciendas, caminos peatonales, etc.
- Mejoramiento de terraplenes en general.
- Aplicaciones en feedlot, mejoramiento de suelos en corrales, bases de apoyo para comederos, plataformas para bebederos, estabilización de suelos en calles de acceso y alimentación.
- Estabilización de suelos en estacionamientos de vehículos livianos, máquinas rurales, calles entre graneros, pavimentos, etc.
- Estabilización de calles peatonales internas en corrales, galpones de cría.
- Estabilización en pisos de silos horizontales para forraje.
- Estabilización de plataformas de asiento para tanques del tipo australiano.

CAPITULO III
RELEVAMIENTO DE LA
INFORMACIÓN

CAPITULO III

RELEVAMIENTO DE LA INFORMACIÓN

3.1. Métodos y técnicas empleadas

3.1.1. Ubicación de la zona de aplicación

Se obtendrán muestras de dos canteras, ambas de suelos arcillosos, una cantera se ubica en el barrio San Blas de la ciudad de Tarija, y la segunda cantera se encuentra en el barrio Jardín también de la ciudad de Tarija, que luego de haber recogido las muestras se las trasladara al laboratorio de Mecánica de Suelos de la Universidad Autónoma Juan Misael Saracho, donde se realizara las pruebas de laboratorio correspondientes y el trabajo de gabinete se la realizara de manera posterior.

3.1.2. Mapa con coordenadas geográficas y UTM

Figura 1. Ubicación de la extracción en zona San Blas.



Fuente: Google Earth.

La primera cantera de arcilla se encuentra en el barrio San Blas en la provincia Cercado del departamento de Tarija, este barrio se encuentra aún en desarrollo y el cual es conocido por tener un gran contenido de arcilla, la ubicación del punto de extracción se encuentra en las coordenadas siguientes:

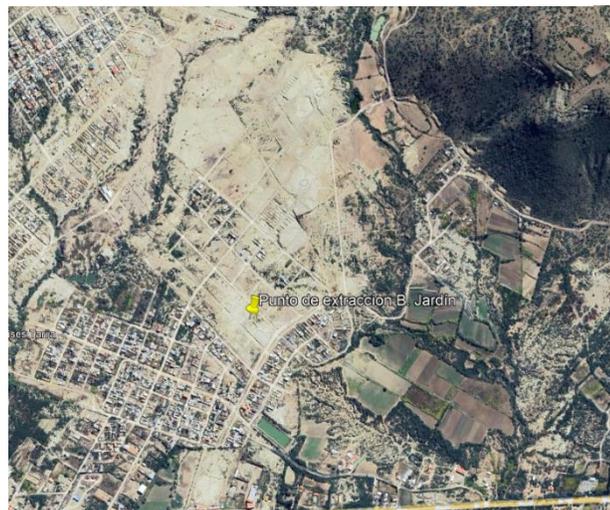
Tabla 8. Coordenadas de punto de extracción barrio San Blas.

Punto de extracción B. San Blas	
Coordenadas Geográficas	
Latitud	21°34'7.10"S
Longitud	64°43'21.60"O
Coordenadas UTM	
Coordenada X	321632.42 m E
Coordenada Y	7613931.49 m S

Fuente: Google Earth.

Figura 2. Extracción de la muestra de suelo en barrio San Blas.

Fuente: Elaboración propia.

Figura 3. Ubicación de la extracción en el barrio Jardín.

Fuente: Google Earth.

La segunda cantera de arcilla se encuentra en el barrio Jardín en la provincia Cercado del departamento de Tarija, este barrio de igual manera se encuentra en desarrollo ya que se encuentra en las afueras de la ciudad, propiamente muy cerca de la zona del Portillo o zona de la extranca, y no es muy conocido este barrio, la ubicación del punto de extracción se encuentra en las coordenadas siguientes:

Tabla 9. Coordenadas de extracción barrio Jardín.

Punto de extracción B. Jardín	
Coordenadas Geográficas	
Latitud	21°33'31.90"S
Longitud	64°39'45.00"O
Coordenadas UTM	
Coordenada X	327851.93 m E
Coordenada Y	7615081.71 m S

Fuente: Google Earth.

Figura 4. Extracción de la muestra de suelo en barrio Jardín.



Fuente: Elaboración propia.

3.1.3. Descripción de las características físicas y naturales de la zona

El municipio de Cercado, se encuentra ubicado en el departamento de Tarija, limita al norte con el municipio de San Lorenzo, al sur con el Municipio de Padcaya del Departamento de Tarija y la República Argentina si nos referimos a países vecinos, al este con el Municipio de O' Connor, y al oeste con el municipio de El Puente.

La extensión territorial del barrio San Blas es aproximadamente de 4 km², es un barrio de la ciudad de Tarija que se encuentra en crecimiento poblacional, los servicios básicos son de existencia intermedia, y es notable la erosión que se tiene en el lugar y en barrios aledaños como Miraflores.

Se tiene el barrio Jardín que tiene una extensión aproximadamente de 1.15 km², este barrio no se encuentra dentro de la mancha urbana, y de igual manera se encuentra en crecimiento poblacional, los servicios básicos están en proceso de adquisición por parte de la junta vecinal del barrio, se tiene una erosión más notable también por la poca existencia de casas y la poca vegetación, se puede ubicar el barrio cerca de la zona el Portillo.

3.1.4. Ubicación de la zona de adquisición del aditivo

Figura 5. Ubicación de la zona de adquisición del material.



Fuente: Google Earth.

El aditivo se adquirió en una ferretería de la ciudad de Oran - Argentina, este material no se encuentra disponible en nuestro medio por el no conocimiento sobre este material, se adquirió 2 bolsas de 50 kg, esto para realizar todos los ensayos, los cuales fueron suficientes, las coordenadas de ubicación de la ferretería son las siguientes:

Tabla 10. Coordenadas de la ferretería.

Punto de adquisición del aditivo	
Coordenadas Geográficas	
Latitud	23° 8'17.00"S
Longitud	64°19'31.00"O
Coordenadas UTM	
Coordenada X	364313.60 m E
Coordenada Y	7440580.69 m S

Fuente: Google Earth.

Figura 6. Ferreteria ubicada en la ciudad de Oran - Argentina.



Fuente: Elaboración propia.

3.2. Caracterización del suelo arcilloso

3.2.1. Ensayo de granulometría

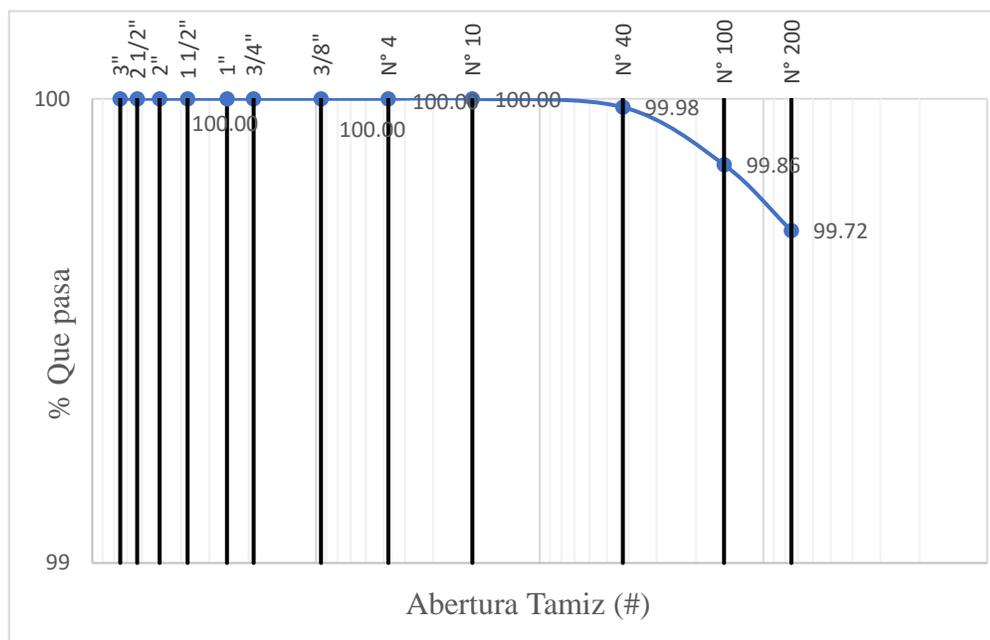
Se realizó el ensayo de granulometría por el método del lavado ya que nuestro suelo es fino, entonces según ASTM D422 AASTHO T88, del “Manual de ensayos de suelos y materiales” de la Administradora Boliviana de Carreteras, obtuvimos los siguientes resultados:

Tabla 11. Granulometría del barrio San Blas.

Denominación	Abertura (mm)	Masa Retenida (gr)	Masa Retenida Acumulada (gr)	% Retenido	% Retenido Acumulado	% Que Pasa
3"	75.00	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00
2 1/2"	63.00	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00
2"	50.00	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00
1 1/2"	37.50	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00
1"	25.00	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00
3/4"	19.00	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00
3/8"	9.50	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00
N° 4	4.75	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00
N° 10	2.00	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00
N° 40	0.425	0.09	0.09	0.02	0.02	99.98
N° 100	0.150	0.62	0.71	0.12	0.14	99.86
N° 200	0.075	0.71	1.42	0.14	0.28	99.72
Base		498.58		99.72	100.00	
TOTAL		500.00		100.00		

Fuente: Elaboración propia.

Primeramente, se realizó la granulometría del barrio San Blas, el cual dio como resultado la tabla anterior, con un gran contenido de suelo fino, propiamente paso el 99.72% de suelo fino, esta granulometría se realizó con el método del lavado, el cual es utilizado para suelos finos, a continuación, se presenta la gráfica de la curva granulométrica para la muestra de suelo arcilloso del barrio San Blas:

Gráfico 1. Curva granulométrica barrio San Blas.

Fuente: Elaboración propia.

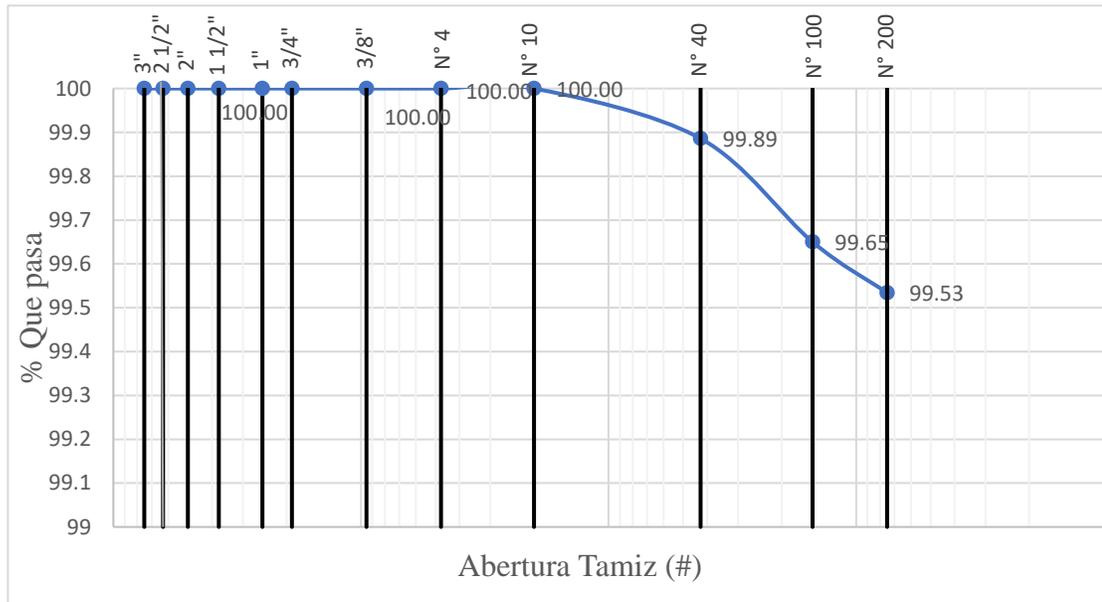
Tabla 12. Curva granulométrica barrio Jardín.

Denominación	Abertura (mm)	Masa Retenida (gr)	Masa Retenida Acumulada (gr)	% Retenido	% Retenido Acumulado	% Que Pasa
3"	75.00	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00
2 1/2"	63.00	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00
2"	50.00	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00
1 1/2"	37.50	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00
1"	25.00	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00
3/4"	19.00	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00
3/8"	9.50	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00
N° 4	4.75	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00
N° 10	2.00	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00
N° 40	0.425	0.57	0.57	0.11	0.11	99.89
N° 100	0.150	1.18	1.75	0.24	0.35	99.65
N° 200	0.075	0.58	2.33	0.12	0.47	99.53
Base		497.67		99.53	100.00	
TOTAL		500.00		100.00		

Fuente: Elaboración propia.

Se presenta la granulometría del suelo arcilloso del barrio Jardín en la tabla anterior el cual tiene un gran contenido de suelo fino con un valor de 99.53% que pasa el tamiz N° 200, esta granulometría se realizó con el método del lavado, el cual es utilizado para suelos finos, a continuación, se presenta la gráfica de la curva granulométrica:

Gráfico 2. Curva granulométrica barrio Jardín.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 7. Método del lavado para granulometría de suelos finos.



Fuente: Elaboración propia.

3.2.2. Limite liquido del suelo arcilloso

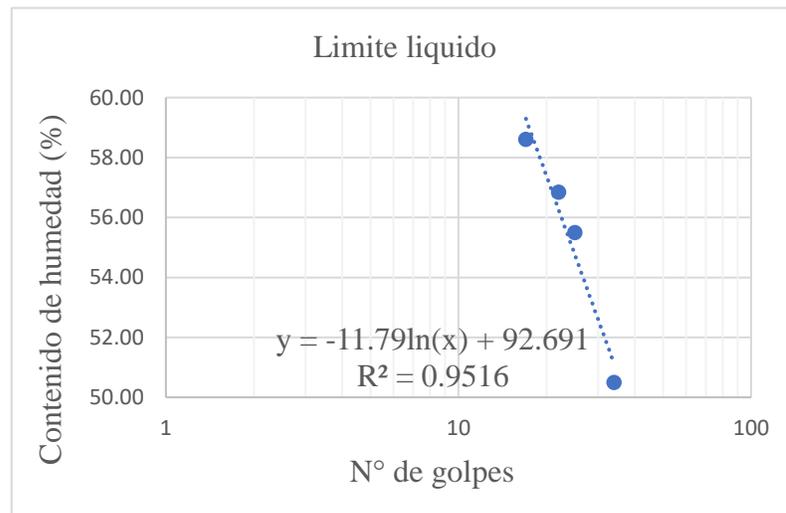
Se realizo el ensayo de limite liquido según ASTM D431 AASHTO T89 del “Manual de ensayos de suelos y materiales” de la Administradora Boliviana de Carreteras, teniendo los siguientes resultados:

Tabla 13. Planilla de limite líquido barrio San Blas.

Capsula:	1	2	3	4
N° de golpes:	17	22	25	34
Suelo húmedo + capsula (gr):	26.52	26.21	23.53	26.71
Suelo Seco + capsula (gr):	21.41	21.47	19.79	22.12
Peso del agua (gr):	5.11	4.74	3.74	4.59
Peso de la capsula:	12.69	13.13	13.05	13.03
Peso del suelo seco (gr):	8.72	8.34	6.74	9.09
Contenido de humedad (%):	58.60	56.83	55.49	50.50

Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 3. Limite liquido barrio San Blas.



Fuente: Elaboración propia.

$$y = -11.79 * \ln(x) + 92.691$$

Donde:

y = Contenido de humedad (%)

x = N° de golpes (adimensional)

$$\text{Limite liquido} = 54.74\%$$

Para complementar el ensayo se registró imágenes del proceso del ensayo de límite líquido según norma ASTM D431 AASHTO T89 del “Manual de ensayos de suelos y materiales” de la Administradora Boliviana de Carreteras el cual nos dio como resultado un límite líquido de 54.74 %, el cual relacionaremos más adelante con el límite plástico y posteriormente el índice de plasticidad y así clasificar nuestro suelo:

Figura 8. Suelo fino del barrio San Blas.



Fuente: Elaboración propia.

Con la ayuda del tamiz N° 40 se obtuvo el suelo para realizar el ensayo en el aparato de Casagrande y así poder obtener nuestro líquido con este ensayo en el laboratorio de suelos de la Universidad Autónoma Juan Misael Saracho.

Luego se procedió a humedecer la muestra hasta tener una masa donde se observe que las partículas se hayan unido entre sí entonces se procede a colocar la muestra en la cuchara del aparato de Casagrande y hacer la ranura de acuerdo a especificaciones de la norma dicha anteriormente el cual queda de la siguiente manera:

Figura 9. Método de Casagrande para limite líquido.



Fuente: Elaboración propia.

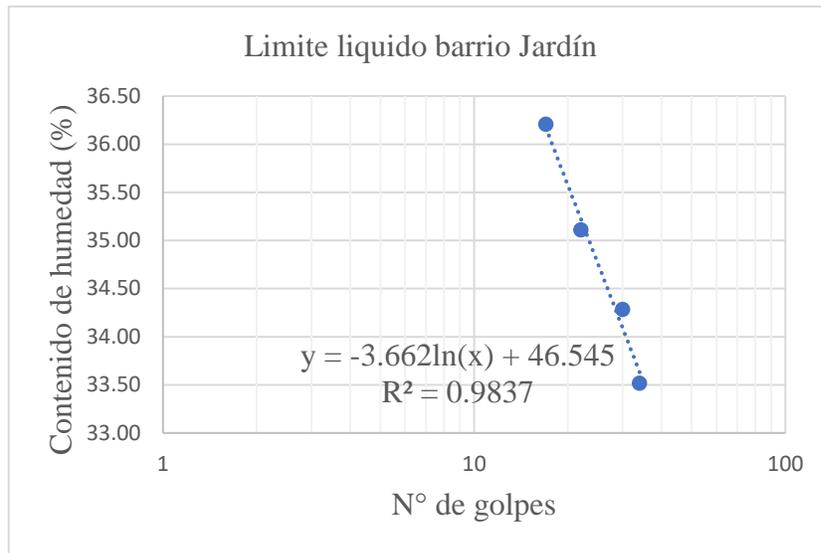
Luego de operar el aparato de Casagrande y que cierre la ranura, se procedió a obtener el número de golpes con el contador que cuenta dicho aparato también ayudando con la cuenta manual y a su vez las muestras para obtener el contenido de humedad para colocarlas en el horno contenidas en taras y así después de 24 horas tener los datos finales y proceder con el llenado de la planilla de limite líquido.

De la misma manera se realizó para la muestra de suelo del barrio Jardín:

Tabla 14. Planilla de limite liquido barrio Jardín.

Capsula:	1	2	3	4
N° de golpes:	17	22	30	34
Suelo húmedo + capsula (gr):	31.76	32.10	33.28	28.42
Suelo Seco + capsula (gr):	25.84	26.37	27.38	22.95
Peso del agua (gr):	5.92	5.73	5.90	5.47
Peso de la capsula (gr):	12.99	13.47	13.79	10.12
Peso del suelo seco (gr):	16.35	16.32	17.21	16.32
Contenido de humedad (%):	36.21	35.11	34.28	33.52

Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 4. Limite liquido barrio Jardín.

Fuente: Elaboración propia.

$$y = -3.662 * \ln(x) + 46.545$$

Donde:

y = Contenido de humedad (%)

x = Nº de golpes (adimensional)

$$\text{Limite liquido} = 34.76\%$$

Figura 10. Ensayo de limite líquido para el barrio jardín.

Fuente: Elaboración propia.

3.2.3. Ensayo de limite plástico

El ensayo de limite plástico se realizó de acuerdo a la norma ASTM D4318 AASHTO T90, del “Manual de ensayos de suelos y materiales” de la Administradora Boliviana de Carreteras, obtuvimos los siguientes resultados:

Tabla 15. Planilla limite plástico barrio Jardín.

Capsula	1	2	3
Suelo húmedo + capsula (gr):	16	14.55	15.13
Suelo Seco + capsula (gr):	15.58	14.21	14.7
Peso del agua (gr):	0.42	0.34	0.43
Peso de la capsula (gr):	13.71	12.59	12.85
Peso del suelo seco (gr):	1.87	1.62	1.85
Contenido de humedad (%):	22.46	20.99	23.24
Limite Plástico (%):	22.23		

Fuente: Elaboración propia.

Figura 11. Ensayo de limite plástico barrio Jardín.



Fuente: Elaboración propia.

$$IP = LL - LP$$

IP = Índice de plasticidad (%)

LL= Límite líquido (%)

LP = Límite Plástico (%)

$$IP = 12.53 \%$$

Según el resultado obtenido se tiene que el índice de plasticidad del barrio Jardín es de 12.53%, el cual posteriormente nos dará una clasificación del suelo tanto en el método SUCS y AASTHO.

Tabla 16. Planilla limite plástico barrio San Blas.

Capsula:	1	2	3
Suelo húmedo + capsula (gr):	14.49	14.28	13.46
Suelo Seco + capsula (gr):	14.18	13.96	13.1
Peso del agua (gr):	0.31	0.32	0.36
Peso de la capsula (gr):	13.06	12.83	11.86
Peso del suelo seco (gr):	1.12	1.13	1.24
Contenido de humedad (%):	27.68	28.32	29.03
Límite Plástico (%):	28.34		

Fuente: Elaboración propia.

Figura 12. Ensayo limite plástico barrio San Blas.



Fuente: Elaboración propia.

$$IP = LL - LP$$

IP = Índice de plasticidad (%)

LL= Límite líquido (%)

LP = Límite Plástico (%)

$$IP = 26.40 \%$$

Según el resultado obtenido se tiene que el índice de plasticidad del barrio San Blas es de 26.40%, el cual posteriormente nos dará una clasificación del suelo tanto en el método SUCS y AASTHO.

3.2.4. Clasificación de suelos (SUCS)

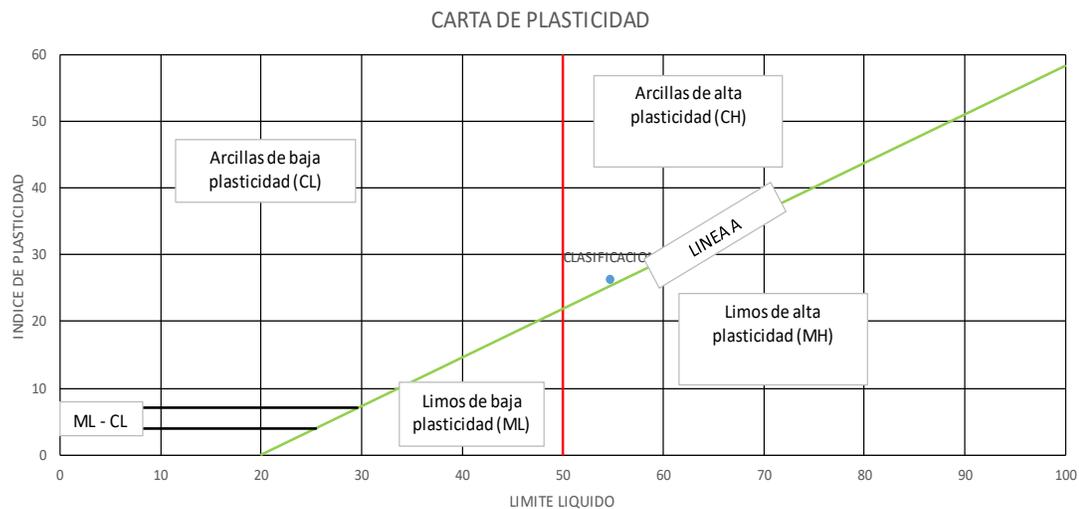
Para la clasificación de suelos del barrio San Blas por el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos, el cual es necesario los datos siguientes:

Tabla 17. Parámetros de clasificación SUCS barrio San Blas.

Parámetros de clasificación barrio San Blas	
Pasa tamiz N°200:	99.72%
Límite líquido:	54.74%
Índice de plasticidad:	26.40%

Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 5. Carta de plasticidad SUCS barrio San Blas.



Fuente: Elaboración propia.

Tipo de suelo: **Arcillas de alta plasticidad (CH)**

Según nuestros ensayos se evidencio que según el método SUCS la muestra del barrio San Blas es un suelo tipo arcilloso de baja plasticidad según SUCS.

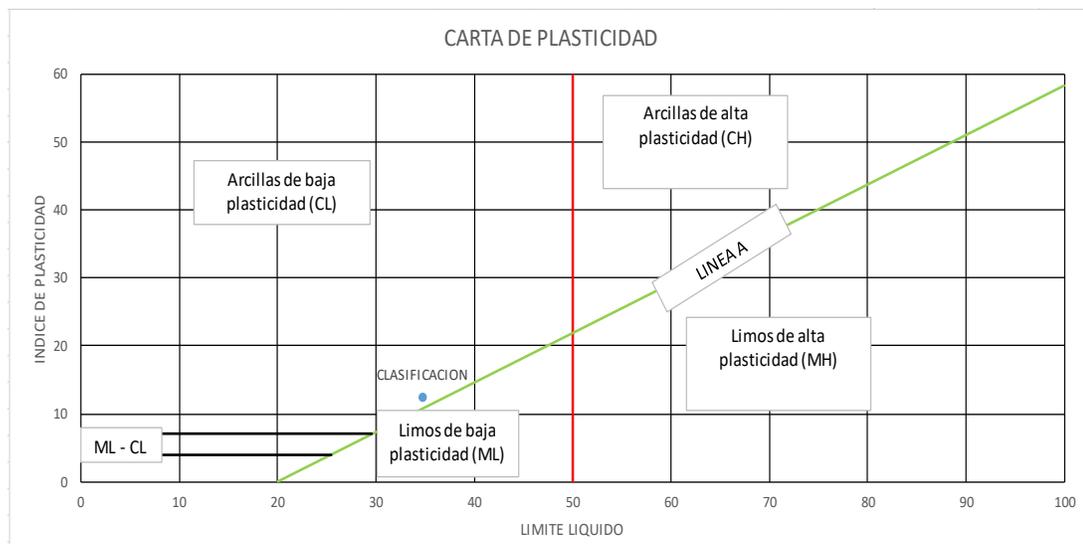
La clasificación de suelos mediante el método SUCS para el barrio Jardín se procedió a evaluar de la misma manera:

Tabla 18. Parámetros de clasificación SUCS barrio Jardín.

Parámetros de clasificación barrio Jardín	
Pasa tamiz N°200	99.53%
Limite liquido	34.76%
Índice de plasticidad	12.56%

Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 6. Carta de plasticidad SUCS barrio Jardín.



Fuente: Elaboración propia.

Tipo de suelo: **Arcillas de baja plasticidad (CL)**

3.2.5. Clasificación de suelos (AASTHO)

Para la clasificación de suelos del barrio San Blas por la Asociación Americana de Funcionarios de Carreteras y Transportes Estatales (AASTHO), el cual es necesario los datos siguientes:

Tabla 19. Parámetros de clasificación AASTHO barrio San Blas.

Parámetros de clasificación barrio San Blas	
Pasa tamiz N°200:	99.72%
Limite liquido:	54.74%
Índice de plasticidad:	26.40%

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 20. Clasificación de suelo barrio San Blas método AASTHO.

DIVISIÓN GENERAL	Materiales Granulares (pasa menos del 35% por el tamiz ASTM #200)							Materiales Limo-arcillosos (más del 35% por el tamiz ASTM #200)				
	A-1		A-3	A-2				A-4	A-5	A-6	A-7	
Subgrupo	A-1 ^a	A-1-b		A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7				A-7-5	A-7-6
ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO (% que pasa por cada tamiz)												
Serie ASTM	#10	≤50										
	#40	≤30	≤50	≥51								
	#200	≤15	≤25	≤10	≤35	≤35	≤35	≤35	≥36	≥36	≥36	≥36
ESTADO DE CONSISTENCIA (de la fracción de suelo que pasa por el tamiz ASTM #40)												
Limite liquido			NP	≤40	≥41	≤40	≥41	≤40	≥41	≤40	>41 (IP < LL - 30)	>41 (IP > LL - 30)
Índice de plasticidad	≤6			≤10	≤10	≥11	≥11	≤10	≤10	≥11	≥11	≥11	≥11
ÍNDICE DE GRUPO	0	0	0	≤4		≤8	≤12	≤20	≤0			
TIPOLOGÍA	Fragmentos de piedra, grava y arena	Arena fina	Gravas y arenas limosas o arcillosas				Suelos limosos		Suelos arcillosos			
CALIDAD	EXCELENTE A BUENA							ACEPTABLE A MALA				

Fuente: AASTHO.

$$IG = 0.2 * a + 0.005 * a * c + 0.01 * b * d$$

$$a = 40$$

$$b = 40$$

$$c = 54.74 - 40 = 14.74$$

$$d = 26.40 - 10 = 16.40$$

$$IG = 0.2 * 40 + 0.005 * 40 * 14.74 + 0.01 * 40 * 16.40$$

$$IG = 17.51$$

$$IG = 18$$

Según los datos se obtiene que se tiene un suelo arcilloso en el grupo A-7, y a la vez el subgrupo A-7-6.

De la misma manera se procedió para el suelo del barrio Jardín:

Tabla 21. Parámetros de clasificación barrio Jardín.

Parámetros de clasificación barrio Jardín	
Pasa tamiz N°200	99.53%
Límite líquido	34.76%
Índice de plasticidad	12.53%

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 22. Clasificación de suelo del barrio Jardín método AASTHO.

DIVISIÓN GENERAL	Materiales Granulares (pasa menos del 35% por el tamiz ASTM #200)							Materiales Limo-arcillosos (más del 35% por el tamiz ASTM #200)					
GRUPO	A-1		A-3	A-2				A-4	A-5	A-6	A-7		
Subgrupo	A-1a	A-1-b		A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7				A-7-5	A-7-6	
ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO (% que pasa por cada tamiz)													
Serie ASTM	#10	≤50											
	#40	≤30	≤50	≥51									
	#200	≤15	≤25	≤10	≤35	≤35	≤35	≤35	≥36	≥36	≥36	≥36	
ESTADO DE CONSISTENCIA (de la fracción de suelo que pasa por el tamiz ASTM #40)													
Límite líquido			NP	≤40	≥41	≤40	≥41	≤40	≥41	≤40		>41 (IP < LL - 30)	>41 (IP > LL - 30)
Índice de plasticidad	≤6			≤10	≤10	≥11	≥11	≤10	≤10	≥11		≥11	≥11
ÍNDICE DE GRUPO	0	0	0	≤4		≤8	≤12	≤20		≤20			
TIPOLOGÍA	Fragmentos de piedra, grava y arena		Arena fina	Gravas y arenas limosas o arcillosas				Suelos limosos		Suelos arcillosos			
CALIDAD	EXCELENTE A BUENA							ACEPTABLE A MALA					

Fuente: AASTHO.

$$IG = 0.2 * a + 0.005 * a * c + 0.01 * b * d$$

$$a = 40$$

$$b = 40$$

$$c = 34.76 - 40 = 0$$

$$d = 12.53 - 10 = 2.53$$

$$IG = 0.2 * 40 + 0.005 * 40 * 0 + 0.01 * 40 * 2.53$$

$$IG = 9.01$$

$$IG = 9$$

Se obtiene que se tiene un suelo arcilloso en el grupo A-6 (suelos arcillosos).

3.2.6. Ensayo de compactación “Proctor modificado T-180”

El ensayo de compactación se la realizó de acuerdo a la norma ASTM D22 AASHTO T180, del “Manual de ensayos de suelos y materiales” de la ABC:

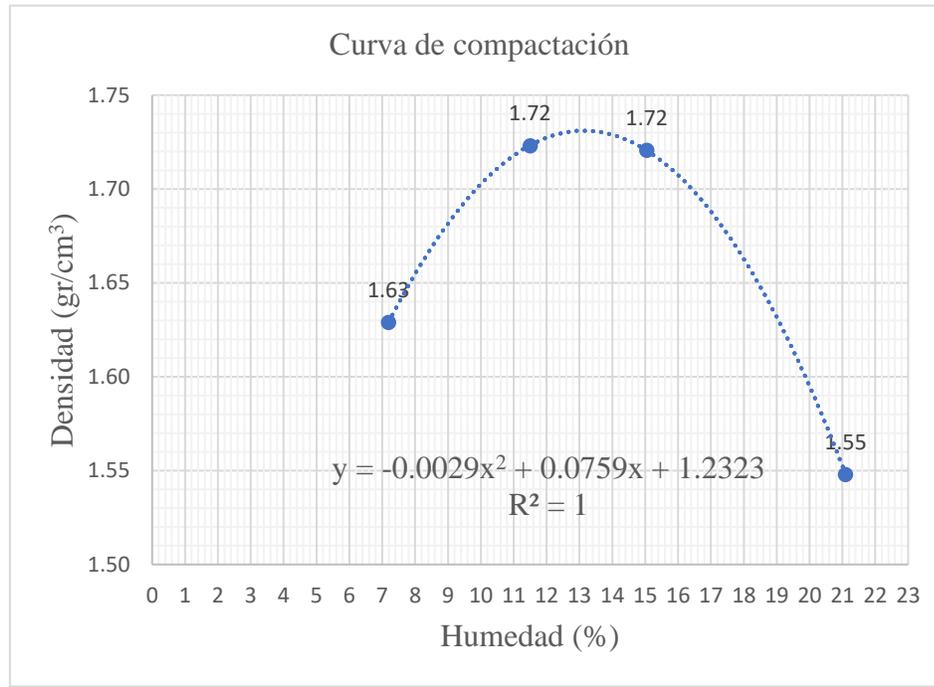
Tabla 23. Planilla de compactación T-180 barrio San Blas.

N° de capas:	5.00	5.00	5.00	5.00
N° de golpes por capa:	56.00	56.00	56.00	56.00
Peso suelo húmedo + molde (gr):	10240.00	10615.00	10740.00	10515.00
Capsula N°:	1.00	2.00	3.00	4.00
Peso suelo húmedo + capsula (gr):	102.16	101.80	102.32	107.86
Peso suelo seco + capsula (gr):	96.20	92.72	90.73	91.46
Peso de la capsula (gr):	13.35	13.76	13.71	13.73
Peso del molde (gr):	6500.00			
V. de la muestra (cm³):	2141.80			
N° de capas:	5.00	5.00	5.00	5.00
N° de golpes por capa:	56.00	56.00	56.00	56.00
Peso suelo húmedo + molde (gr):	10240.00	10615.00	10740.00	10515.00
Peso del molde (gr):	6500.00	6500.00	6500.00	6500.00
Peso suelo húmedo (gr):	3740.00	4115.00	4240.00	4015.00
Volumen de la muestra (cm³):	2141.80	2141.80	2141.80	2141.80
Densidad suelo húmedo (gr/cm³):	1.75	1.92	1.98	1.87
Capsula N°:	1.00	2.00	3.00	4.00
Peso suelo húmedo + capsula (gr):	102.16	101.80	102.32	107.86
Peso suelo seco + capsula (gr):	96.20	92.72	90.73	91.46
Peso del agua (gr):	5.96	9.08	11.59	16.40
Peso de la capsula (gr):	13.35	13.76	13.71	13.73
Peso suelo seco (gr):	82.85	78.96	77.02	77.73
Contenido de humedad (%):	7.19	11.50	15.05	21.10
Densidad suelo seco (gr/cm³):	1.63	1.72	1.72	1.55

Fuente: Elaboración propia.

Como resultado de este ensayo de compactación se obtuvo la gráfica de relación de peso unitario – humedad en los suelos, método modificado, mostrado a continuación:

Gráfico 7. Curva de compactación barrio San Blas.



Fuente: Elaboración propia.

De esta curva se obtiene una ecuación, el cual nos indicará la humedad óptima y por consiguiente la densidad máxima a la que el suelo es capaz de llegar con dicha humedad:

$$y = -0.0029 * x^2 + 0.0759 * x + 1.2323$$

Donde:

y= Densidad (gr/cm³)

x= Humedad (%)

Para encontrar la humedad óptima se debe obtener la derivada de la ecuación anterior, entonces la ecuación derivada es como sigue:

$$0 = -2 * 0.0029 * x + 0.0759$$

$$x = \frac{0.0759}{0.0029 * 2}$$

$$x = 13.09\%$$

Con la humedad óptima, hallamos la densidad correspondiente a esta humedad q seria

denominada densidad máxima:

$$y = 1.73 \text{ gr/cm}^3$$

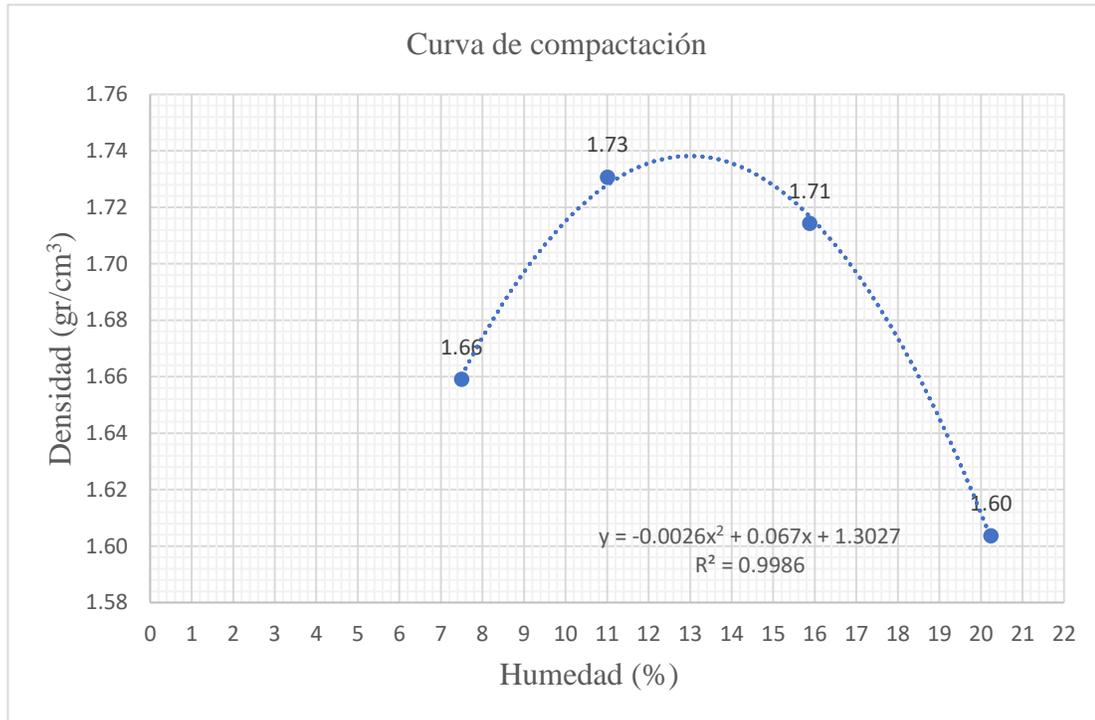
Se procedió de la misma manera para el barrio Jardín:

Tabla 24. Planilla de compactación T-180 barrio Jardín.

N° de capas:	5.00	5.00	5.00	5.00
N° de golpes por capa:	56.00	56.00	56.00	56.00
Peso suelo húmedo + molde (gr):	10320.00	10615.00	10755.00	10630.00
Capsula N°:	1.00	2.00	3.00	4.00
Peso suelo húmedo + capsula (gr):	119.11	123.07	103.53	80.77
Peso suelo seco + capsula (gr):	111.71	112.16	91.20	68.90
Peso de la capsula (gr):	13.01	13.09	13.56	10.25
Peso del molde (gr):	6500.00			
V. de la muestra (cm³):	2141.80			
N° de capas:	5.00	5.00	5.00	5.00
N° de golpes por capa:	56.00	56.00	56.00	56.00
Peso suelo húmedo + molde (gr):	10320.00	10615.00	10755.00	10630.00
Peso del molde (gr):	6500.00	6500.00	6500.00	6500.00
Peso suelo húmedo (gr):	3820.00	4115.00	4255.00	4130.00
Volumen de la muestra (cm³):	2141.80	2141.80	2141.80	2141.80
Densidad suelo húmedo (gr/cm³):	1.78	1.92	1.99	1.93
Capsula N°:	1.00	2.00	3.00	4.00
Peso suelo húmedo + capsula (gr):	119.11	123.07	103.53	80.77
Peso suelo seco + capsula (gr):	111.71	112.16	91.20	68.90
Peso del agua (gr):	7.40	10.91	12.33	11.87
Peso de la capsula (gr):	13.01	13.09	13.56	10.25
Peso suelo seco (gr):	98.70	99.07	77.64	58.65
Contenido de humedad (%):	7.50	11.01	15.88	20.24
Densidad suelo seco (gr/cm³):	1.66	1.73	1.71	1.60

Fuente: Elaboración propia.

Como resultado de este ensayo de compactación se obtuvo la gráfica de relación de peso unitario – humedad en los suelos, método modificado, mostrado a continuación:

Gráfico 8. Curva de compactación T-180 barrio Jardín.

Fuente: Elaboración propia.

De esta curva se obtiene una ecuación, el cual nos indicará la humedad óptima y por consiguiente la densidad máxima a la que el suelo es capaz de llegar con dicha humedad:

$$y = -0.0026 * x^2 + 0.067x + 1.3027$$

Donde:

y= Densidad (gr/cm³)

x= Humedad (%)

Para encontrar la humedad óptima se debe obtener la derivada de la ecuación anterior, entonces la ecuación derivada es como sigue:

$$0 = -2 * 0.0026 * x + 0.067$$

$$x = \frac{0.067}{0.0026 * 2}$$

$$x = 12.88 \%$$

Con la humedad óptima, hallamos la densidad correspondiente a esta humedad q sería

denominada densidad máxima:

$$y = 1.73 \text{ gr/cm}^3$$

3.2.7. Ensayo de california bearing ratio (CBR)

Se realizo el ensayo de CBR para nuestro suelo de acuerdo a nuestra densidad máxima y humedad óptima obtenida en el ensayo de compactación T180, aquí solamente se incluirá los resultados obtenidos, las planillas de ensayo se encontrarán en el apartado de anexos.

Ecuación del anillo de CBR:

$$y = (305.59 * x) + 44.513$$

Donde:

y = Carga (kg)

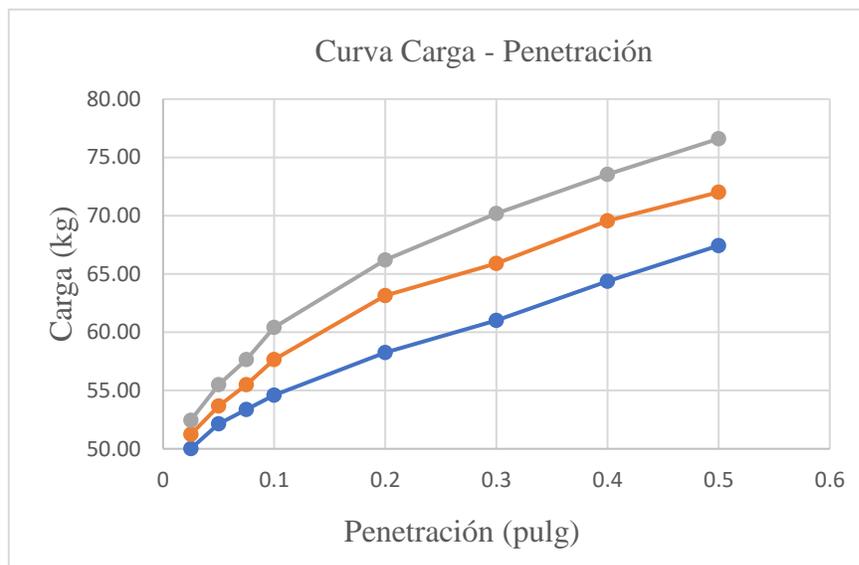
x = Penetración (mm)

Área del pistón de carga: 19.3548 cm²

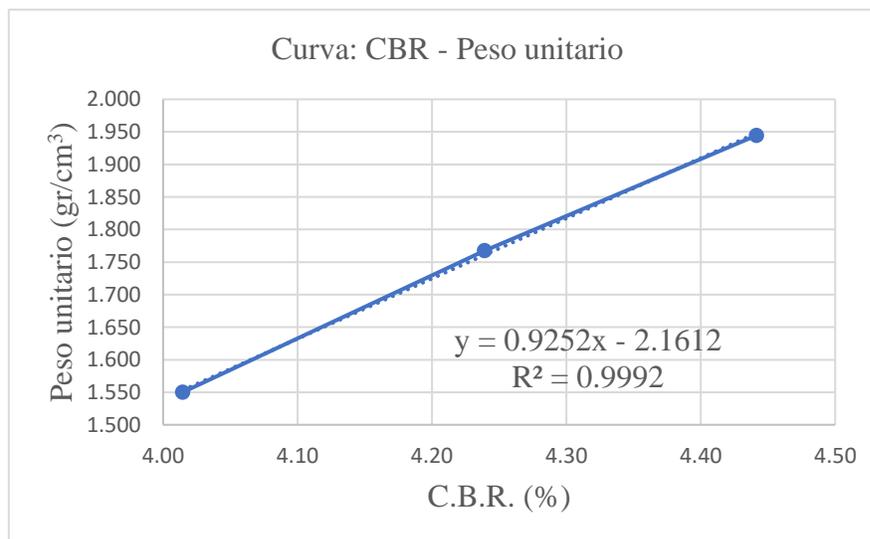
Tabla 25. Resultados CBR suelo barrio Jardín.

CBR (%)	Peso Unitario (gr/cm³)
4.01	1.550
4.24	1.768
4.44	1.945

Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 9. Curva carga penetración.

Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 10. Curva: CBR-Peso unitario barrio Jardín.

Fuente: Elaboración propia.

Se obtuvo los siguientes resultados de CBR para el suelo del barrio Jardín:

Tabla 26. CBR barrio Jardín.

CBR Barrio Jardín		
CBR 100%:	4.82	%
CBR 95%	4.58	%

Fuente: Elaboración propia.

De la misma manera se procedió a la obtención del CBR del barrio San Blas:

Ecuación del anillo de CBR:

$$y = (305.59 * x) + 44.513$$

Donde:

y = Carga (kg)

x = Penetración (mm)

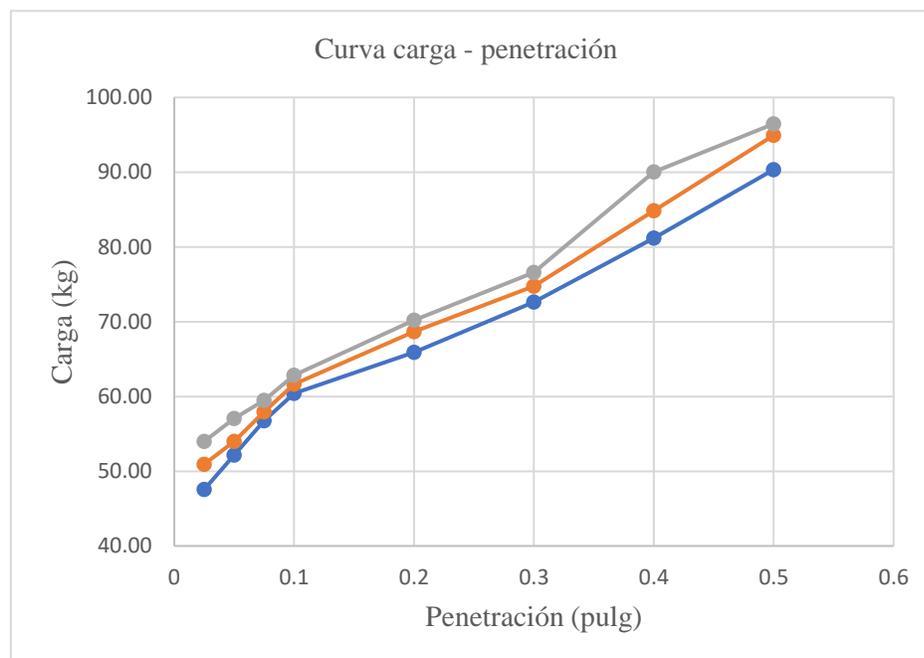
Área del pistón de carga: 19.3548 cm²

Tabla 27. Resultados CBR barrio San Blas.

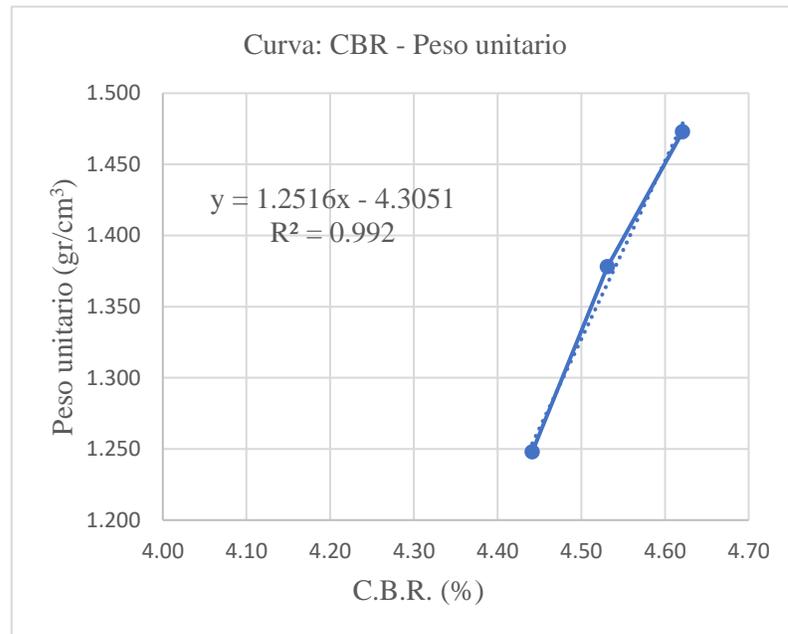
CBR (%)	Peso Unitario (gr/cm³)
4.44	1.248
4.53	1.378
4.62	1.473

Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 11. Curva Carga – Penetración barrio San Blas.



Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 12. Curva CBR – Peso unitario barrio San Blas.

Fuente: Elaboración propia.

Se obtuvo los siguientes resultados de CBR para el suelo del barrio San Blas:

Tabla 28. CBR barrio San Blas.

CBR Barrio San Blas		
CBR 100%:	4.82	%
CBR 95%	4.58	%

Fuente: Elaboración propia.

3.3. Ensayos de suelo arcilloso + ligante hidráulico

3.3.1. Limite liquido + ligante hidráulico

Para el primer ensayo se hizo la mezcla de suelo y ligante hidráulico de acuerdo a la norma ASTM D431 AASHTO T89 del “Manual de ensayos de suelos y materiales” de la Administradora Boliviana de Carreteras, respetando el número de tamiz y demás consideraciones que son las mismas para el suelo fino:

- **Suelo + ligante hidráulico 5%:**

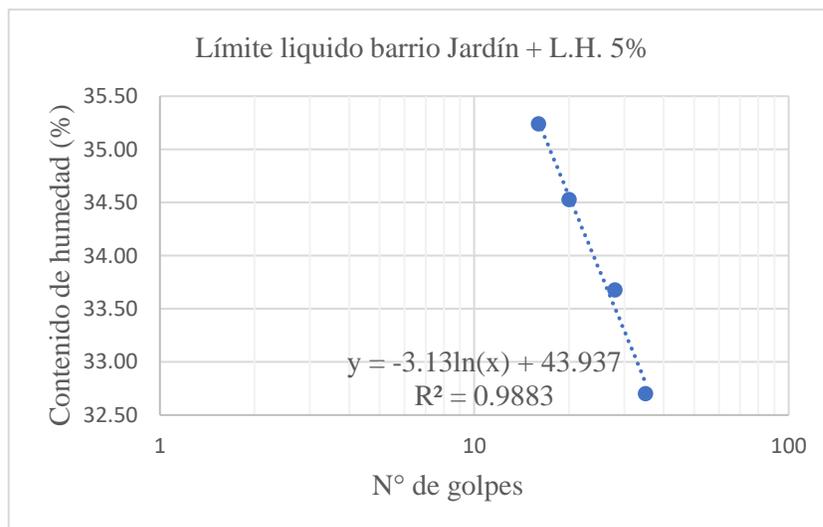
Tabla 29. Limite liquido barrio Jardín + ligante hidráulico 5%.

Capsula:	1	2	3	4
N° de golpes:	35	28	20	16
Suelo húmedo + capsula (gr):	24.85	24.19	25.36	29.28
Suelo Seco + capsula (gr):	21.92	21.25	22.08	25.21
Peso del agua (gr):	2.93	2.94	3.28	4.07
Peso de la capsula (gr):	12.96	12.52	12.58	13.66
Peso del suelo seco (gr):	8.96	8.73	9.50	11.55
Contenido de humedad (%):	32.70	33.68	34.53	35.24

Fuente: Elaboración propia.

Al obtener esta planilla se procedió a obtener la gráfica de límite líquido y obtener el contenido de humedad a los 25 golpes, así de esta manera se obtuvo el primer resultado de comportamiento del límite líquido frente a un aumento del ligante hidráulico al 5 %.

Gráfico 13. Limite liquido barrio Jardín + ligante hidráulico 5%.



Fuente: Elaboración propia.

$$y = -3.13 * \ln(x) + 43.937$$

y = Contenido de humedad (%)

x = N° de golpes (adimensional)

$$y = -3.13 * \ln(25) + 43.937$$

$$\text{Limite liquido}_{5\%} = 33.86 \%$$

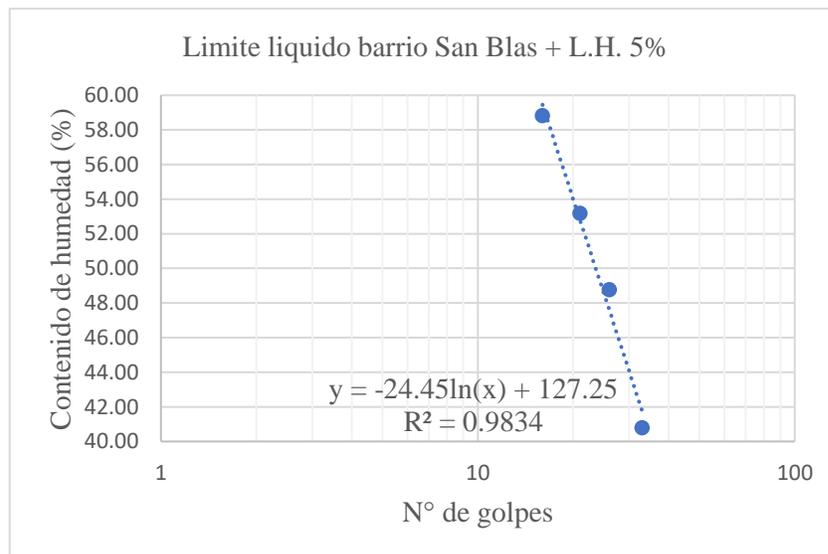
Tabla 30. Limite liquido barrio San Blas + ligante hidráulico 5%.

Capsula:	1	2	3	4
N° de golpes:	33	26	21	16
Suelo húmedo + capsula (gr):	31.21	30.14	31.02	30.60
Suelo Seco + capsula (gr):	25.84	24.33	24.92	24.40
Peso del agua (gr):	5.37	5.81	6.10	6.20
Peso de la capsula (gr):	12.68	12.42	13.45	13.86
Peso del suelo seco (gr):	13.16	11.91	11.47	10.54
Contenido de humedad (%):	40.81	48.78	53.18	58.82

Fuente: Elaboración propia.

Al obtener esta planilla se procedió a obtener la gráfica de límite líquido y obtener el contenido de humedad a los 25 golpes, así de esta manera se obtuvo el primer resultado de comportamiento del límite líquido frente a un aumento del ligante hidráulico al 5 %.

Gráfico 14. Limite liquido barrio San Blas + ligante hidráulico 5%.



Fuente: Elaboración propia.

$$y = -24.45 * \ln(x) + 127.25$$

y = Contenido de humedad (%)

x = N° de golpes (adimensional)

$$y = -24.45 * \ln(25) + 127.25$$

$$\text{Limite liquido}_{5\%} = 48.55 \%$$

- **Suelo + ligante hidráulico 10%:**

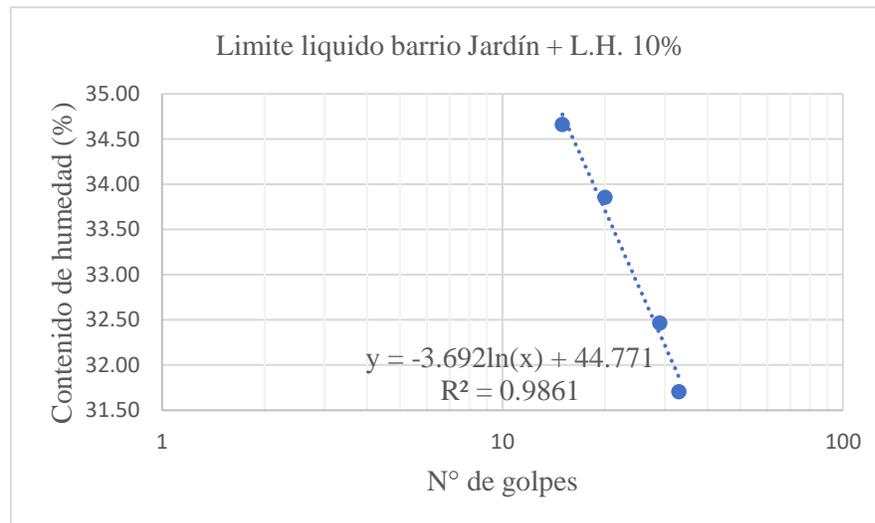
Tabla 31. Limite liquido barrio Jardín + ligante hidráulico 10%.

Capsula:	1	2	3	4
N° de golpes:	15	20	29	33
Suelo húmedo + capsula (gr):	27.30	27.14	26.74	27.92
Suelo Seco + capsula (gr):	23.56	23.90	23.12	24.22
Peso del agua (gr):	3.74	3.24	3.62	3.70
Peso de la capsula (gr):	12.77	14.33	11.97	12.55
Peso del suelo seco (gr):	10.79	9.57	11.15	11.67
Contenido de humedad (%):	34.66	33.86	32.47	31.71

Fuente: Elaboración propia.

Al obtener la planilla se procedió a obtener la gráfica de límite líquido y obtener el contenido de humedad a los 25 golpes, así de esta manera se obtuvo el primer resultado de comportamiento del límite líquido frente al aumento del ligante hidráulico al 10 %.

Gráfico 15. Limite liquido barrio Jardín + ligante hidráulico 10%.



Fuente: Elaboración propia.

$$y = -3.692 * \ln(x) + 44.771$$

y = Contenido de humedad (%)

x = N° de golpes (adimensional)

$$y = -3.692 * \ln(25) + 44.771$$

$$\text{Limite liquido}_{10\%} = 32.89 \%$$

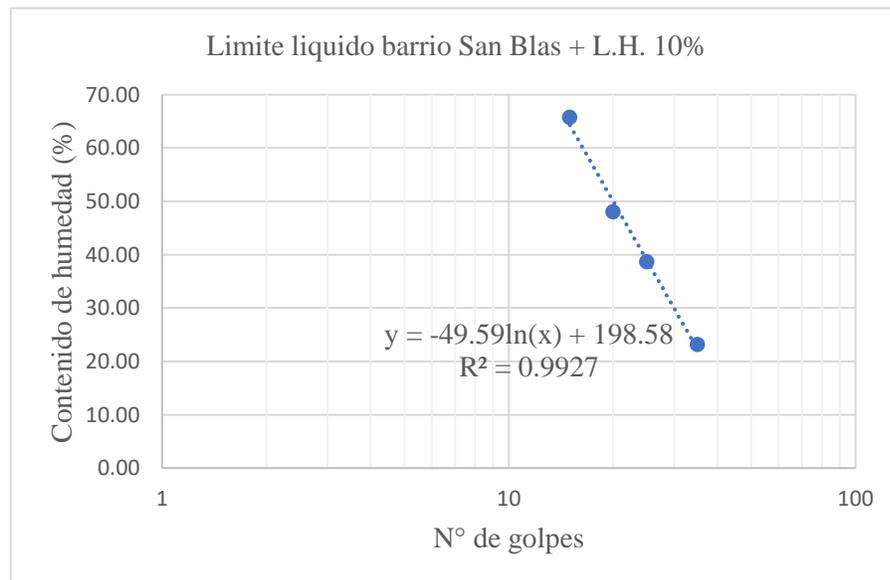
Tabla 32. Limite liquido barrio San Blas + ligante hidráulico 10%.

Capsula:	1	2	3	4
N° de golpes:	35	25	20	15
Suelo húmedo + capsula (gr):	32.33	31.50	30.81	32.97
Suelo Seco + capsula (gr):	28.52	26.25	25.00	24.95
Peso del agua (gr):	3.81	5.25	5.81	8.02
Peso de la capsula (gr):	12.05	12.68	12.90	12.75
Peso del suelo seco (gr):	16.47	13.57	12.10	12.20
Contenido de humedad (%):	23.13	38.69	48.02	65.74

Fuente: Elaboración propia.

Al obtener la planilla se procedió a obtener la gráfica de límite líquido y obtener el contenido de humedad a los 25 golpes, así de esta manera se obtuvo el primer resultado de comportamiento del límite líquido frente al aumento del ligante hidráulico al 10 %.

Gráfico 16. Limite liquido barrio San Blas + ligante hidráulico 10%.



Fuente: Elaboración propia.

$$y = -49.59 * \ln(x) + 198.58$$

y = Contenido de humedad (%)

x = N° de golpes (adimensional)

$$y = -49.59 * \ln(25) + 198.58$$

$$\text{Limite liquido}_{10\%} = 38.96 \%$$

- **Suelo + ligante hidráulico 15%:**

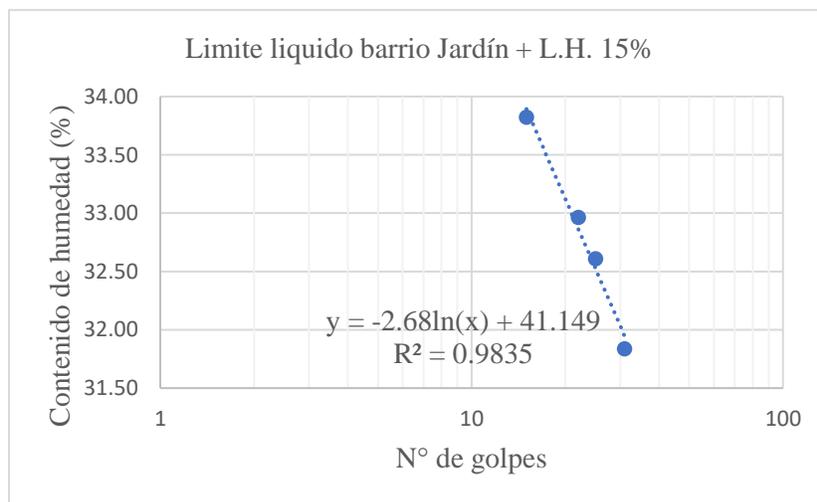
Tabla 33. Limite liquido barrio Jardín + ligante hidráulico 15%.

Capsula:	1	2	3	4
N° de golpes:	31	25	22	15
Suelo húmedo + capsula (gr):	28.52	28.43	29.57	29.78
Suelo Seco + capsula (gr):	24.76	24.53	25.42	25.40
Peso del agua (gr):	3.76	3.90	4.15	4.38
Peso de la capsula (gr):	12.95	12.57	12.83	12.45
Peso del suelo seco (gr):	11.81	11.96	12.59	12.95
Contenido de humedad (%):	31.84	32.61	32.96	33.82

Fuente: Elaboración propia.

Al obtener la planilla se procedió a obtener la gráfica de límite líquido y obtener el contenido de humedad a los 25 golpes, así de esta manera se obtuvo el primer resultado de comportamiento del límite líquido frente al aumento del ligante hidráulico al 15 %.

Gráfico 17. Limite liquido barrio Jardín + ligante hidráulico 15%.



Fuente: Elaboración propia.

$$y = -2.68 * \ln(x) + 41.149$$

y = Contenido de humedad (%)

x = N° de golpes (adimensional)

$$y = -2.68 * \ln(25) + 41.149$$

$$\text{Limite liquido}_{15\%} = 32.52 \%$$

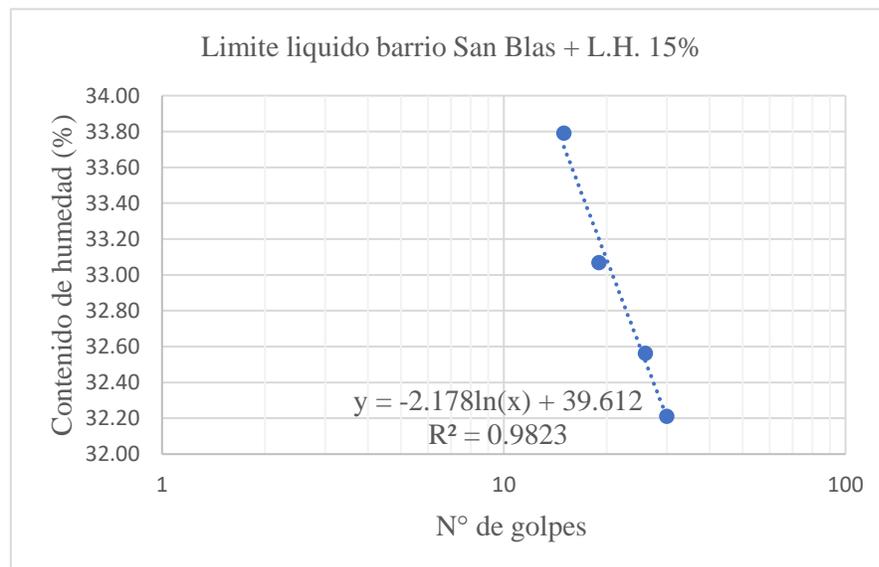
Tabla 34. Limite liquido barrio San Blas + ligante hidráulico 15%.

Capsula:	1	2	3	4
N° de golpes:	30	26	19	15
Suelo húmedo + capsula (gr):	35.56	35.62	34.61	33.12
Suelo Seco + capsula (gr):	29.91	29.99	29.19	28.19
Peso del agua (gr):	5.65	5.63	5.42	4.93
Peso de la capsula (gr):	12.37	12.70	12.80	13.60
Peso del suelo seco (gr):	17.54	17.29	16.39	14.59
Contenido de humedad (%):	32.21	32.56	33.07	33.79

Fuente: Elaboración propia.

Al obtener la planilla se procedió a obtener la gráfica de límite líquido y obtener el contenido de humedad a los 25 golpes, así de esta manera se obtuvo el primer resultado de comportamiento del límite líquido frente al aumento del ligante hidráulico al 15 %.

Gráfico 18. Limite liquido barrio San Blas + ligante hidráulico 15%.



Fuente: Elaboración propia.

$$y = -2.178 * \ln(x) + 39.612$$

y = Contenido de humedad (%)

x = N° de golpes (adimensional)

$$y = -2.178 * \ln(x) + 39.612$$

$$\text{Limite liquido}_{15\%} = 32.60 \%$$

- **Suelo + ligante hidráulico 20%:**

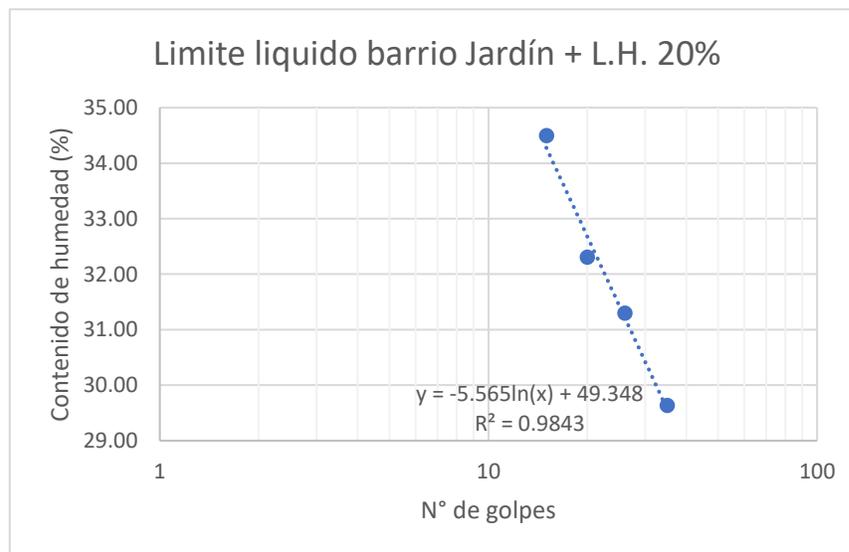
Tabla 35. Limite liquido barrio Jardín + ligante hidráulico 20%.

Capsula:	1	2	3	4
N° de golpes:	35	26	20	15
Suelo húmedo + capsula (gr):	26.11	27.54	27.91	29.62
Suelo Seco + capsula (gr):	23.01	23.75	24.23	25.26
Peso del agua (gr):	3.10	3.79	3.68	4.36
Peso de la capsula (gr):	12.55	11.64	12.84	12.62
Peso del suelo seco (gr):	10.46	12.11	11.39	12.64
Contenido de humedad (%):	29.64	31.30	32.31	34.49

Fuente: Elaboración propia.

Al obtener la planilla se procedió a obtener la gráfica de límite líquido y obtener el contenido de humedad a los 25 golpes, así de esta manera se obtuvo el primer resultado de comportamiento del límite líquido frente al aumento del ligante hidráulico al 20 %.

Gráfico 19. Limite liquido barrio Jardín + ligante hidráulico 20%.



Fuente: Elaboración propia.

$$y = -5.565 * \ln(x) + 49.348$$

y = Contenido de humedad (%)

x = N° de golpes (adimensional)

$$y = -5.565 * \ln(25) + 49.348$$

$$\text{Limite liquido}_{20\%} = 31.43 \%$$

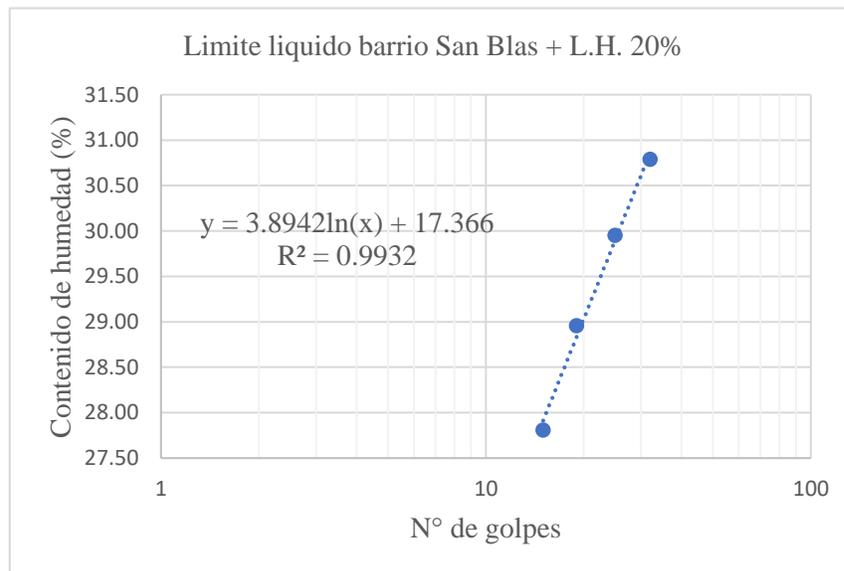
Tabla 36. Limite liquido barrio San Blas + ligante hidráulico 20%.

Capsula:	1	2	3	4
N° de golpes:	32	25	19	15
Suelo húmedo + capsula (gr):	34.81	34.30	34.28	30.28
Suelo Seco + capsula (gr):	30.05	29.46	29.45	26.32
Peso del agua (gr):	4.76	4.84	4.83	3.96
Peso de la capsula (gr):	14.59	13.30	12.77	12.08
Peso del suelo seco (gr):	15.46	16.16	16.68	14.24
Contenido de humedad (%):	30.79	29.95	28.96	27.81

Fuente: Elaboración propia.

Al obtener la planilla se procedió a obtener la gráfica de límite líquido y obtener el contenido de humedad a los 25 golpes, así de esta manera se obtuvo el primer resultado de comportamiento del límite líquido frente al aumento del ligante hidráulico al 20 %.

Gráfico 20. Limite liquido barrio San Blas + ligante hidráulico 20%.



Fuente: Elaboración propia.

$$y = 3.8942 * \ln(x) + 17.366$$

y = Contenido de humedad (%)

x = N° de golpes (adimensional)

$$y = 3.8942 * \ln(25) + 17.366$$

$$\text{Limite liquido}_{20\%} = 29.90 \%$$

3.3.2. Limite plástico + ligante hidráulico

El ensayo de límite plástico de suelo adicionado con ligante hidráulico se lo hizo según la norma ASTM D4318 AASHTO T90, del “Manual de ensayos de suelos y materiales” de la Administradora Boliviana de Carreteras, donde se tiene la siguiente planilla:

- **Suelo + ligante hidráulico 5%:**

Tabla 37. Limite plástico barrio San Blas + ligante hidráulico 5%.

Capsula:	1	2	3
Suelo húmedo + capsula (gr):	15.83	15.42	15.52
Suelo Seco + capsula (gr):	15.23	14.79	14.99
Peso del agua (gr):	0.60	0.63	0.53
Peso de la capsula (gr):	13.13	12.60	13.13
Peso del suelo seco (gr):	2.10	2.19	1.86
Contenido de humedad (%):	28.57	28.77	28.49
Promedio Limite Plástico (%):	28.61		

Fuente: Elaboración propia.

$$\text{Limite plástico}_{5\%} = 28.61\%$$

Donde:

IP: Índice de plasticidad (%)

LL: Límite líquido (%)

IP: Límite plástico (%)

$$IP = 48.55 - 28.61$$

$$IP = 19.94 \%$$

Tabla 38. Limite plástico barrio Jardín + ligante hidráulico 5%.

Capsula:	1	2	3
Suelo húmedo + capsula (gr):	16.41	17.18	15.51
Suelo Seco + capsula (gr):	15.69	16.28	14.81
Peso del agua (gr):	0.72	0.9	0.7
Peso de la capsula (gr):	13.11	13.08	12.24
Peso del suelo seco (gr):	2.58	3.2	2.57
Contenido de humedad (%):	27.91	28.12	27.24
Promedio Limite Plástico (%):	27.76		

Fuente: Elaboración propia.

$$\text{Limite plástico}_{5\%} = 27.76\%$$

$$IP = LL - LP$$

Donde:

IP: Índice de plasticidad (%)

LL: Límite líquido (%)

LP: Límite plástico (%)

$$IP = 33.86 - 27.76$$

$$IP = 6.11 \%$$

- **Suelo + ligante hidráulico 10%:**

Tabla 39. Limite plástico barrio San Blas + ligante hidráulico 10%.

Capsula:	1	2	3
Suelo húmedo + capsula (gr):	16.11	15.81	15.00
Suelo Seco + capsula (gr):	15.49	15.08	14.55
Peso del agua (gr):	0.62	0.73	0.45
Peso de la capsula (gr):	13.30	12.54	12.87
Peso del suelo seco (gr):	2.19	2.54	1.68
Contenido de humedad (%):	28.31	28.74	26.79
Promedio Limite Plástico (%):	27.95		

Fuente: Elaboración propia.

$$\text{Limite plástico}_{10\%} = 27.95\%$$

$$IP = LL - LP$$

Donde:

IP: Índice de plasticidad (%)

LL: Límite líquido (%)

LP: Límite plástico (%)

$$IP = 38.96 - 27.95$$

$$IP = 11.01 \%$$

Tabla 40. Limite plástico barrio Jardín + ligante hidráulico 10%.

Capsula:	1	2	3
Suelo húmedo + capsula (gr):	17.11	16.62	16.83
Suelo Seco + capsula (gr):	16.30	15.89	16.02
Peso del agua (gr):	0.81	0.73	0.81
Peso de la capsula (gr):	13.33	13.21	13.09
Peso del suelo seco (gr):	2.97	2.68	2.93
Contenido de humedad (%):	27.27	27.24	27.65
Promedio Limite Plástico (%):	27.39		

Fuente: Elaboración propia.

$$\text{Limite plástico}_{10\%} = 27.39\%$$

$$IP = LL - LP$$

Donde:

IP: Índice de plasticidad (%)

LL: Límite líquido (%)

LP: Límite plástico (%)

$$IP = 32.89 - 27.39$$

$$IP = 5.50 \%$$

- **Suelo + ligante hidráulico 15%:**

Tabla 41. Limite plástico barrio San Blas + ligante hidráulico 15%.

Capsula:	1	2	3
Suelo húmedo + capsula (gr):	15.40	16.11	15.96
Suelo Seco + capsula (gr):	14.98	15.44	15.38
Peso del agua (gr):	0.42	0.67	0.58
Peso de la capsula (gr):	13.18	12.54	12.87
Peso del suelo seco (gr):	1.80	2.90	2.51
Contenido de humedad (%):	23.33	23.10	23.11
Promedio Limite Plástico (%):	23.18		

Fuente: Elaboración propia.

$$\text{Limite plástico}_{15\%} = 23.18\%$$

$$IP = LL - LP$$

Donde:

IP: Índice de plasticidad (%)

LL: Límite líquido (%)

IP: Límite plástico (%)

$$IP = 32.60 - 23.18$$

$$IP = 9.42 \%$$

Tabla 42. Limite plástico barrio Jardín + ligante hidráulico 15%.

Capsula:	1	2	3
Suelo húmedo + capsula (gr):	15.92	15.69	15.92
Suelo Seco + capsula (gr):	15.17	14.95	15.11
Peso del agua (gr):	0.75	0.74	0.81
Peso de la capsula (gr):	12.56	12.31	12.29
Peso del suelo seco (gr):	2.61	2.64	2.82
Contenido de humedad (%):	28.74	28.03	28.72
Promedio Limite Plástico (%):	28.50		

Fuente: Elaboración propia.

$$\text{Limite plástico}_{15\%} = 28.50\%$$

$$IP = LL - LP$$

Donde:

IP: Índice de plasticidad (%)

LL: Límite líquido (%)

IP: Límite plástico (%)

$$IP = 32.52 - 28.50$$

$$IP = 4.03 \%$$

- **Suelo + ligante hidráulico 20%:**

Tabla 43. Limite plástico barrio San Blas + ligante hidráulico 20%.

Capsula:	1	2	3
Suelo húmedo + capsula (gr):	12.65	16.21	15.97
Suelo Seco + capsula (gr):	12.14	15.66	15.44
Peso del agua (gr):	0.51	0.55	0.53
Peso de la capsula (gr):	10.16	13.51	13.36
Peso del suelo seco (gr):	1.98	2.15	2.08
Contenido de humedad (%):	25.76	25.58	25.48
Promedio Limite Plástico (%):	25.61		

Fuente: Elaboración propia.

$$\text{Limite plástico}_{20\%} = 25.61 \%$$

$$IP = LL - LP$$

Donde:

IP: Índice de plasticidad (%)

LL: Límite líquido (%)

LP: Límite plástico (%)

$$IP = 29.90 - 25.61$$

$$IP = 4.29 \%$$

Tabla 44. Limite plástico barrio Jardín + ligante hidráulico 20%.

Capsula:	1	2	3
Suelo húmedo + capsula (gr):	16.63	16.43	17.05
Suelo Seco + capsula (gr):	15.84	15.57	16.23
Peso del agua (gr):	0.79	0.86	0.82
Peso de la capsula (gr):	12.84	12.70	13.38
Peso del suelo seco (gr):	3.00	2.87	2.85
Contenido de humedad (%):	26.33	29.97	28.77
Promedio Limite Plástico (%):	28.36		

Fuente: Elaboración propia.

$$\text{Limite plástico}_{20\%} = 28.36 \%$$

$$IP = LL - LP$$

Donde:

IP: Índice de plasticidad (%)

LL: Límite líquido (%)

LP: Límite plástico (%)

$$IP = 31.43 - 28.36$$

$$IP = 3.08 \%$$

3.3.3. Ensayo de compactación suelo arcilloso + ligante hidráulico

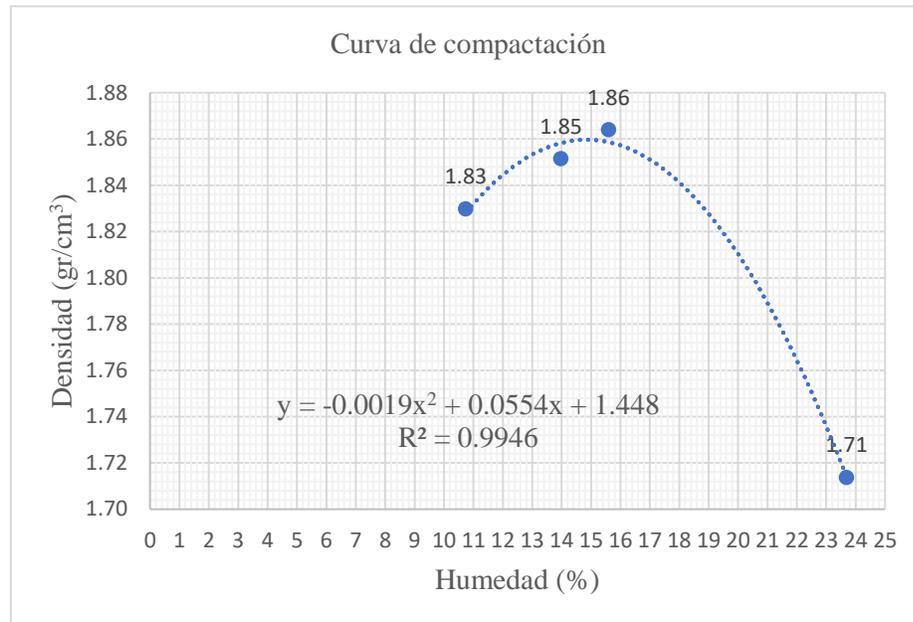
- Suelo arcilloso + ligante hidráulico 5%

Tabla 45. Suelo barrio Jardín + ligante hidráulico 5%.

Nº de capas:	5	5	5	5
Nº de golpes por capa:	56	56	56	56
Peso suelo húmedo + molde (gr):	10840.00	11020.00	11115.00	11040.00
Capsula N°:	1	2	3	4
Peso suelo húmedo + capsula (gr):	109.27	136.11	101.63	106.61
Peso suelo seco + capsula (gr):	99.95	120.96	89.65	88.58
Peso de la capsula (gr):	13.17	12.56	12.83	12.46
Peso del molde (gr):	6500.00			
V. de la muestra (cm ³):	2141.80			
Nº de capas:	5	5	5	5
Nº de golpes por capa:	56	56	56	56
Peso suelo húmedo + molde (gr):	10840.00	11020.00	11115.00	11040.00
Peso del molde (gr):	6500.00	6500.00	6500.00	6500.00
Peso suelo húmedo (gr):	4340.00	4520.00	4615.00	4540.00
Volumen de la muestra (cm ³):	2141.80	2141.80	2141.80	2141.80
Densidad suelo húmedo (gr/cm ³):	2.03	2.11	2.15	2.12
Capsula N°:	1.00	2.00	3.00	4.00
Peso suelo húmedo + capsula (gr):	109.27	136.11	101.63	106.61
Peso suelo seco + capsula (gr):	99.95	120.96	89.65	88.58
Peso del agua (gr):	9.32	15.15	11.98	18.03
Peso de la capsula (gr):	13.17	12.56	12.83	12.46
Peso suelo seco (gr):	86.78	108.40	76.82	76.12
Contenido de humedad (%):	10.74	13.98	15.59	23.69
Densidad suelo seco (gr/cm ³):	1.83	1.85	1.86	1.71

Fuente: Elaboración propia.

Como resultado de este ensayo de compactación se obtuvo la gráfica de relación de peso unitario – humedad en los suelos, método modificado, mostrado a continuación:

Gráfico 21. Curva de compactación suelo barrio Jardín + ligante hidráulico 5%.

Fuente: Elaboración propia.

De esta curva se obtiene una ecuación, el cual nos indicará la humedad óptima y por consiguiente la densidad máxima a la que el suelo es capaz de llegar con dicha humedad:

$$y = -0.0019 * x^2 + 0.0554 * x + 1.448$$

Donde:

y= Densidad (gr/cm³)

x= Humedad (%)

Para encontrar la humedad óptima se debe obtener la derivada de la ecuación anterior, entonces la ecuación derivada es como sigue:

$$0 = -2 * 0.0019 * x + 0.0554$$

$$x = \frac{0.0554}{0.0019 * 2}$$

$$x = 14.58\%$$

Con la humedad óptima, hallamos la densidad correspondiente a esta humedad q sería denominada densidad máxima:

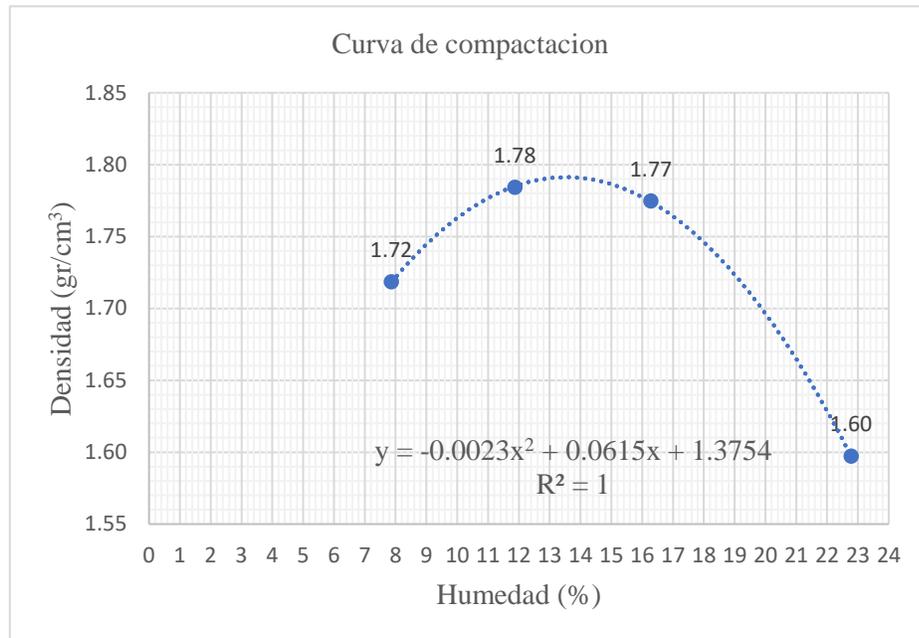
$$y = 1.85 \text{ gr/cm}^3$$

Tabla 46. Suelo barrio San Blas + ligante hidráulico 5%.

Nº de capas:	5.00	5.00	5.00	5.00
Nº de golpes por capa:	56.00	56.00	56.00	56.00
Peso suelo húmedo + molde (gr):	10470.00	10775.00	10920.00	10700.00
Capsula Nº:	1.00	2.00	3.00	4.00
Peso suelo húmedo + capsula (gr):	99.76	129.96	108.63	101.83
Peso suelo seco + capsula (gr):	93.40	117.51	95.22	85.29
Peso de la capsula (gr):	12.50	12.59	12.88	12.68
Peso del molde (gr):	6500.00			
V. de la muestra (cm³):	2141.80			
Nº de capas:	5.00	5.00	5.00	5.00
Nº de golpes por capa:	56.00	56.00	56.00	56.00
Peso suelo húmedo + molde (gr):	10470.00	10775.00	10920.00	10700.00
Peso del molde (gr):	6500.00	6500.00	6500.00	6500.00
Peso suelo húmedo (gr):	3970.00	4275.00	4420.00	4200.00
Volumen de la muestra (cm³):	2141.80	2141.80	2141.80	2141.80
Densidad suelo húmedo (gr/cm³):	1.85	2.00	2.06	1.96
Capsula Nº:	1.00	2.00	3.00	4.00
Peso suelo húmedo + capsula (gr):	99.76	129.96	108.63	101.83
Peso suelo seco + capsula (gr):	93.40	117.51	95.22	85.29
Peso del agua (gr):	6.36	12.45	13.41	16.54
Peso de la capsula (gr):	12.50	12.59	12.88	12.68
Peso suelo seco (gr):	80.90	104.92	82.34	72.61
Contenido de humedad (%):	7.86	11.87	16.29	22.78
Densidad suelo seco (gr/cm³):	1.72	1.78	1.77	1.60

Fuente: Elaboración propia.

Como resultado de este ensayo de compactación se obtuvo la gráfica de relación de peso unitario – humedad en los suelos, método modificado, mostrado a continuación:

Gráfico 22. Curva de compactación barrio San Blas + ligante hidráulico 5%.

Fuente: Elaboración propia.

De esta curva se obtiene una ecuación, el cual nos indicará la humedad óptima y por consiguiente la densidad máxima a la que el suelo es capaz de llegar con dicha humedad:

$$y = -0.0023 * x^2 + 0.0615 * x + 1.3754$$

Donde:

y= Densidad (gr/cm³)

x= Humedad (%)

Para encontrar la humedad óptima se debe obtener la derivada de la ecuación anterior, entonces la ecuación derivada es como sigue:

$$0 = -2 * 0.0023x + 0.0615$$

$$x = \frac{0.0615}{0.0023 * 2}$$

$$x = 13.37\%$$

Con la humedad óptima, hallamos la densidad correspondiente a esta humedad q seria denominada densidad máxima:

$$y = 1.79 \text{ gr/cm}^3$$

- **Suelo arcilloso + ligante hidráulico 10%**

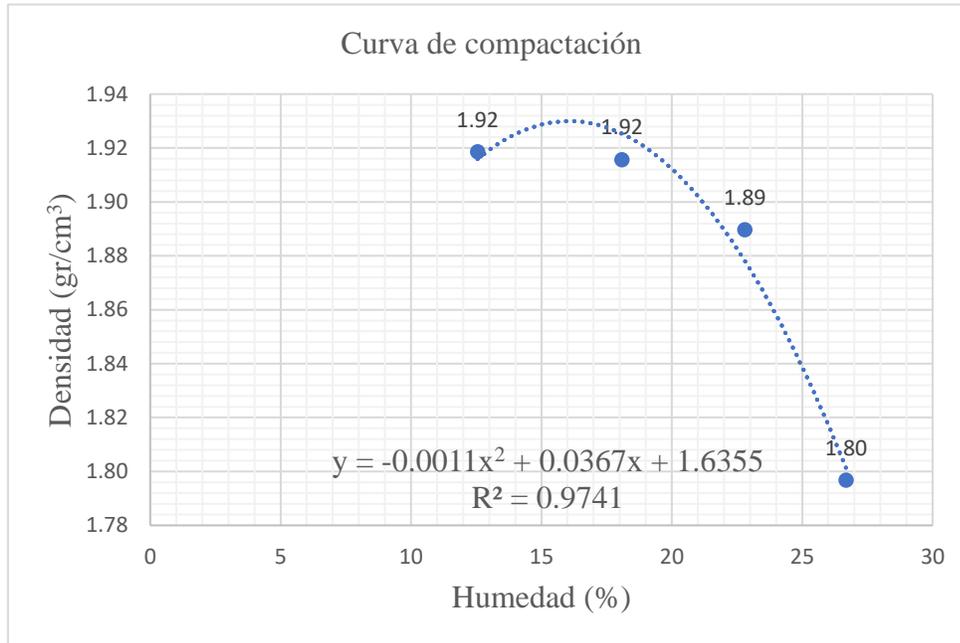
Tabla 47. Planilla de compactación suelo barrio Jardín + ligante hidráulico 10%.

N° de capas:	5	5	5	5
N° de golpes por capa:	56	56	56	56
Peso suelo húmedo + molde (gr):	11125.00	11345.00	11470.00	11375.00
Capsula N°:	1	2	3	4
Peso suelo húmedo + capsula (gr):	110.88	107.22	102.35	111.96
Peso suelo seco + capsula (gr):	100.12	93.58	86.29	91.05
Peso de la capsula (gr):	14.39	18.15	15.84	12.66
Peso del molde (gr):	6500			
V. de la muestra (cm³):	2141.8			
N° de capas:	5.00	5.00	5.00	5.00
N° de golpes por capa:	56.00	56.00	56.00	56.00
Peso suelo húmedo + molde (gr):	11125.00	11345.00	11470.00	11375.00
Peso del molde (gr):	6500.00	6500.00	6500.00	6500.00
Peso suelo húmedo (gr):	4625.00	4845.00	4970.00	4875.00
Volumen de la muestra (cm³):	2141.80	2141.80	2141.80	2141.80
Densidad suelo húmedo (gr/cm³):	2.16	2.26	2.32	2.28
Capsula N°:	1.00	2.00	3.00	4.00
Peso suelo húmedo + capsula (gr):	110.88	107.22	102.35	111.96
Peso suelo seco + capsula (gr):	100.12	93.58	86.29	91.05
Peso del agua (gr):	10.76	13.64	16.06	20.91
Peso de la capsula (gr):	14.39	18.15	15.84	12.66
Peso suelo seco (gr):	85.73	75.43	70.45	78.39
Contenido de humedad (%):	12.55	18.08	22.80	26.67
Densidad suelo seco (gr/cm³):	1.92	1.92	1.89	1.80

Fuente: Elaboración propia.

Como resultado de este ensayo de compactación se obtuvo la gráfica de relación de peso unitario – humedad en los suelos, método modificado, mostrado a continuación:

Gráfico 23. Curva de compactación suelo barrio Jardín + ligante hidraulico10%.



Fuente: Elaboración propia.

De esta curva se obtiene una ecuación, el cual nos indicará la humedad óptima y por consiguiente la densidad máxima a la que el suelo es capaz de llegar con dicha humedad:

$$y = -0.0011 * x^2 + 0.0367 * x + 1.6355$$

Donde:

y= Densidad (gr/cm³)

x= Humedad (%)

Para encontrar la humedad óptima se debe obtener la derivada de la ecuación anterior, entonces la ecuación derivada es como sigue:

$$0 = -2 * 0.0011 * x + 0.0367$$

$$x = \frac{0.0367}{0.0011 * 2}$$

$$x = 16.68\%$$

Con la humedad óptima, hallamos la densidad correspondiente a esta humedad q seria

denominada densidad máxima:

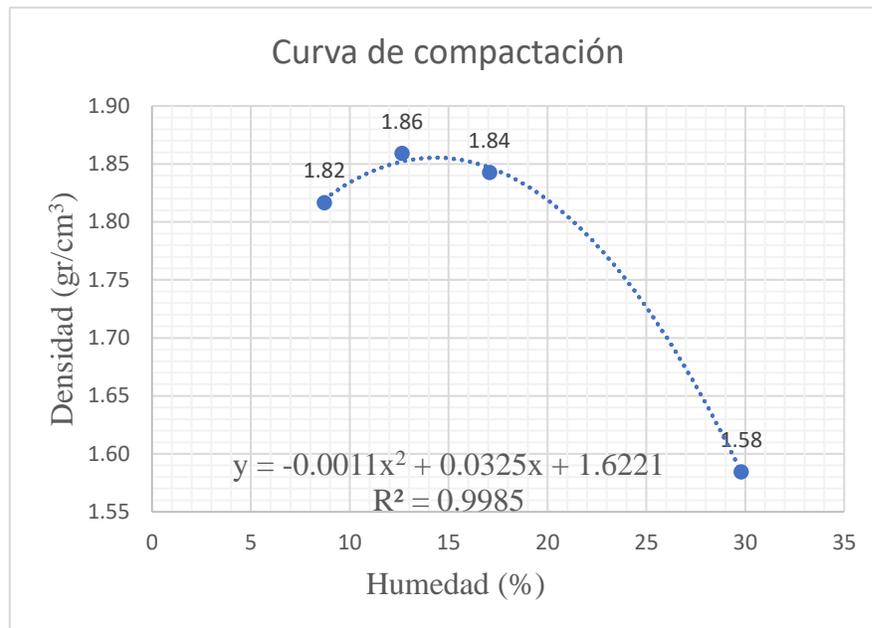
$$y = 1.94 \text{ gr/cm}^3$$

Tabla 48. Planilla de compactación barrio San Blas + ligante hidráulico 10%.

N° de capas:	5.00	5.00	5.00	5.00
N° de golpes por capa:	56.00	56.00	56.00	56.00
Peso suelo húmedo + molde (gr):	10730.00	10985.00	11120.00	10905.00
Capsula N°:	1.00	2.00	3.00	4.00
Peso suelo húmedo + capsula (gr):	96.90	99.11	124.23	123.33
Peso suelo seco + capsula (gr):	90.12	89.48	108.27	98.03
Peso de la capsula (gr):	12.35	13.34	14.74	13.13
Peso del molde (gr):	6500.00			
V. de la muestra (cm³):	2141.80			
N° de capas:	5.00	5.00	5.00	5.00
N° de golpes por capa:	56.00	56.00	56.00	56.00
Peso suelo húmedo + molde (gr):	10730.00	10985.00	11120.00	10905.00
Peso del molde (gr):	6500.00	6500.00	6500.00	6500.00
Peso suelo húmedo (gr):	4230.00	4485.00	4620.00	4405.00
Volumen de la muestra (cm³):	2141.80	2141.80	2141.80	2141.80
Densidad suelo húmedo (gr/cm³):	1.97	2.09	2.16	2.06
Capsula N°:	1.00	2.00	3.00	4.00
Peso suelo húmedo + capsula (gr):	96.90	99.11	124.23	123.33
Peso suelo seco + capsula (gr):	90.12	89.48	108.27	98.03
Peso del agua (gr):	6.78	9.63	15.96	25.30
Peso de la capsula (gr):	12.35	13.34	14.74	13.13
Peso suelo seco (gr):	77.77	76.14	93.53	84.90
Contenido de humedad (%):	8.72	12.65	17.06	29.80
Densidad suelo seco (gr/cm³):	1.82	1.86	1.84	1.58

Fuente: Elaboración propia.

Como resultado de este ensayo de compactación se obtuvo la gráfica de relación de peso unitario – humedad en los suelos, método modificado, mostrado a continuación:

Gráfico 24. Curva de compactación suelo barrio San Blas + L.H. 10%.

Fuente: Elaboración propia.

De esta curva se obtiene una ecuación, el cual nos indicará la humedad óptima y por consiguiente la densidad máxima a la que el suelo es capaz de llegar con dicha humedad:

$$y = -0.0011 * x^2 + 0.0325 * x + 1.6221$$

Donde:

y= Densidad (gr/cm³)

x= Humedad (%)

Para encontrar la humedad óptima se debe obtener la derivada de la ecuación anterior, entonces la ecuación derivada es como sigue:

$$0 = -2 * 0.0011x + 0.0325$$

$$x = \frac{0.0325}{0.0011 * 2}$$

$$x = 14.77 \%$$

Con la humedad óptima, hallamos la densidad correspondiente a esta humedad q sería denominada densidad máxima:

$$y = 1.86 \text{ gr/cm}^3$$

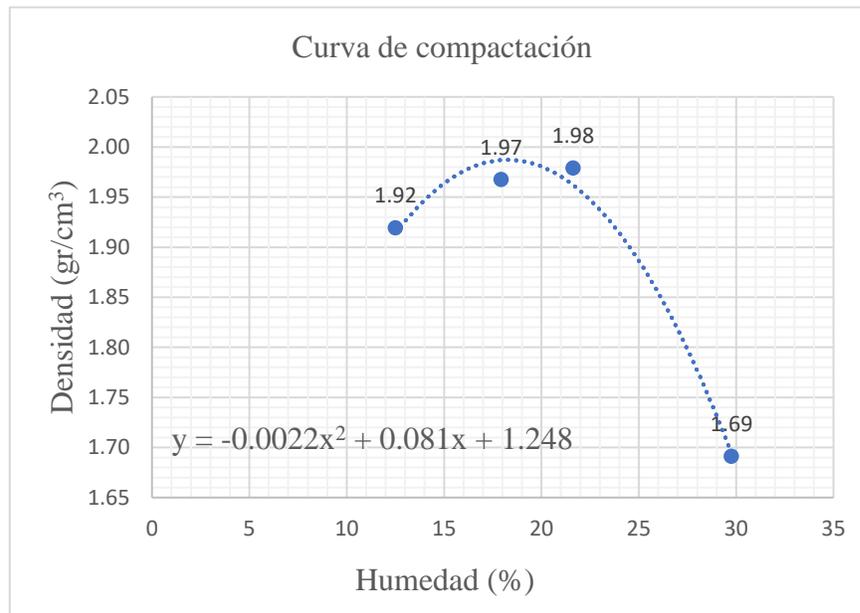
- **Suelo arcilloso + ligante hidráulico 15%**

Tabla 49. Planilla de suelo barrio Jardín + ligante hidráulico 15%.

N° de capas:	5.00	5.00	5.00	5.00
N° de golpes por capa:	56.00	56.00	56.00	56.00
Peso suelo húmedo + molde (gr):	11125.00	11470.00	11655.00	11200.00
Capsula N°:	1.00	2.00	3.00	4.00
Peso suelo húmedo + capsula (gr):	110.55	105.54	121.20	125.99
Peso suelo seco + capsula (gr):	99.63	91.50	101.94	100.05
Peso de la capsula (gr):	12.34	13.24	12.88	12.89
Peso del molde (gr):	6500.00			
V. de la muestra (cm³):	2141.80			
N° de capas:	5.00	5.00	5.00	5.00
N° de golpes por capa:	56.00	56.00	56.00	56.00
Peso suelo húmedo + molde (gr):	11125.00	11470.00	11655.00	11200.00
Peso del molde (gr):	6500.00	6500.00	6500.00	6500.00
Peso suelo húmedo (gr):	4625.00	4970.00	5155.00	4700.00
Volumen de la muestra (cm³):	2141.80	2141.80	2141.80	2141.80
Densidad suelo húmedo (gr/cm³):	2.16	2.32	2.41	2.19
Capsula N°:	1.00	2.00	3.00	4.00
Peso suelo húmedo + capsula (gr):	110.55	105.54	121.20	125.99
Peso suelo seco + capsula (gr):	99.63	91.50	101.94	100.05
Peso del agua (gr):	10.92	14.04	19.26	25.94
Peso de la capsula (gr):	12.34	13.24	12.88	12.89
Peso suelo seco (gr):	87.29	78.26	89.06	87.16
Contenido de humedad (%):	12.51	17.94	21.63	29.76
Densidad suelo seco (gr/cm³):	1.92	1.97	1.98	1.69

Fuente: Elaboración propia.

Como resultado de este ensayo de compactación se obtuvo la gráfica de relación de peso unitario – humedad en los suelos, método modificado, mostrado a continuación:

Gráfico 25. Curva de compactación barrio Jardín + ligante hidráulico 15%.

Fuente: Elaboración propia.

De esta curva se obtiene una ecuación, el cual nos indicará la humedad óptima y por consiguiente la densidad máxima a la que el suelo es capaz de llegar con dicha humedad:

$$y = -0.0022 * x^2 + 0.081 * x + 1.248$$

Donde:

y= Densidad (gr/cm³)

x= Humedad (%)

Para encontrar la humedad óptima se debe obtener la derivada de la ecuación anterior, entonces la ecuación derivada es como sigue:

$$0 = -2 * 0.0022 * x + 0.081$$

$$x = \frac{0.081}{0.0022 * 2}$$

$$x = 18.41 \%$$

Con la humedad óptima, hallamos la densidad correspondiente a esta humedad q sería denominada densidad máxima:

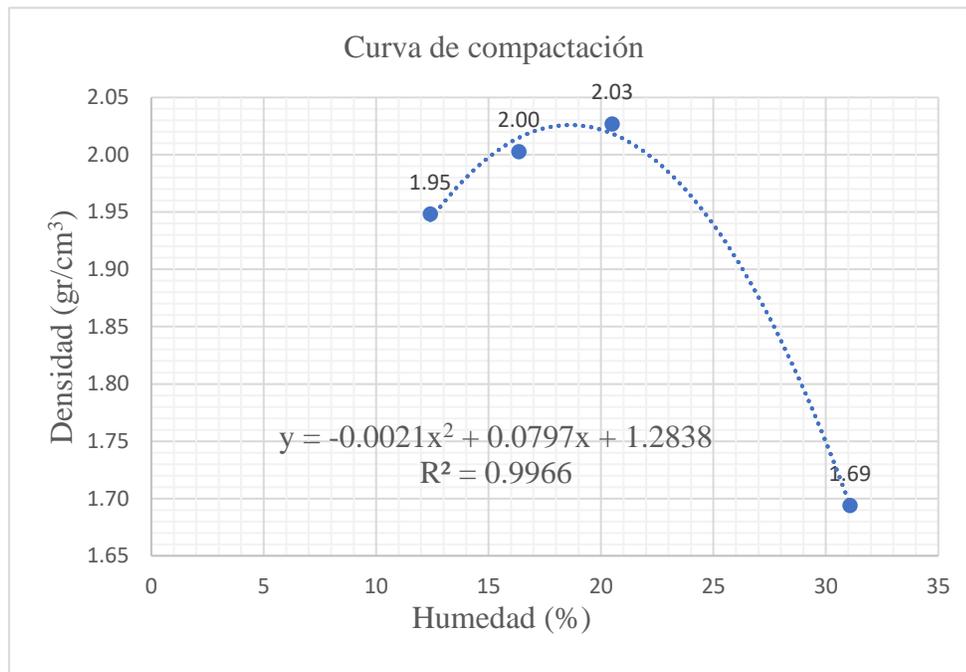
$$y = 1.99 \text{ gr/cm}^3$$

Tabla 50. Planilla de compactación suelo barrio San Blas + L.H. 15%.

N° de capas:	5.00	5.00	5.00	5.00
N° de golpes por capa:	56.00	56.00	56.00	56.00
Peso suelo húmedo + molde (gr):	11190.00	11490.00	11730.00	11255.00
Capsula N°:	1.00	2.00	3.00	4.00
Peso suelo húmedo + capsula (gr):	154.47	166.92	160.65	152.22
Peso suelo seco + capsula (gr):	139.42	146.60	136.34	120.42
Peso de la capsula (gr):	18.12	22.21	17.70	18.06
Peso del molde (gr):	6500.00			
V. de la muestra (cm³):	2141.80			
N° de capas:	5.00	5.00	5.00	5.00
N° de golpes por capa:	56.00	56.00	56.00	56.00
Peso suelo húmedo + molde (gr):	11190.00	11490.00	11730.00	11255.00
Peso del molde (gr):	6500.00	6500.00	6500.00	6500.00
Peso suelo húmedo (gr):	4690.00	4990.00	5230.00	4755.00
Volumen de la muestra (cm³):	2141.80	2141.80	2141.80	2141.80
Densidad suelo húmedo (gr/cm³):	2.19	2.33	2.44	2.22
Capsula N°:	1.00	2.00	3.00	4.00
Peso suelo húmedo + capsula (gr):	154.47	166.92	160.65	152.22
Peso suelo seco + capsula (gr):	139.42	146.60	136.34	120.42
Peso del agua (gr):	15.05	20.32	24.31	31.80
Peso de la capsula (gr):	18.12	22.21	17.70	18.06
Peso suelo seco (gr):	121.30	124.39	118.64	102.36
Contenido de humedad (%):	12.41	16.34	20.49	31.07
Densidad suelo seco (gr/cm³):	1.95	2.00	2.03	1.69

Fuente: Elaboración propia.

Como resultado de este ensayo de compactación se obtuvo la gráfica de relación de peso unitario – humedad en los suelos, método modificado, mostrado a continuación:

Gráfico 26. Curva de compactación suelo barrio San Blas + L.H. 15%.

Fuente: Elaboración propia.

De esta curva se obtiene una ecuación, el cual nos indicará la humedad óptima y por consiguiente la densidad máxima a la que el suelo es capaz de llegar con dicha humedad:

$$y = -0.0021 * x^2 + 0.0797 * x + 1.2838$$

Donde:

y= Densidad (gr/cm³)

x= Humedad (%)

Para encontrar la humedad óptima se debe obtener la derivada de la ecuación anterior, entonces la ecuación derivada es como sigue:

$$0 = -2 * 0.0021 * x + 0.0797$$

$$x = \frac{0.0797}{0.0021 * 2}$$

$$x = 18.98 \%$$

Con la humedad óptima, hallamos la densidad correspondiente a esta humedad q sería denominada densidad máxima:

$$y = 2.04 \text{ gr/cm}^3$$

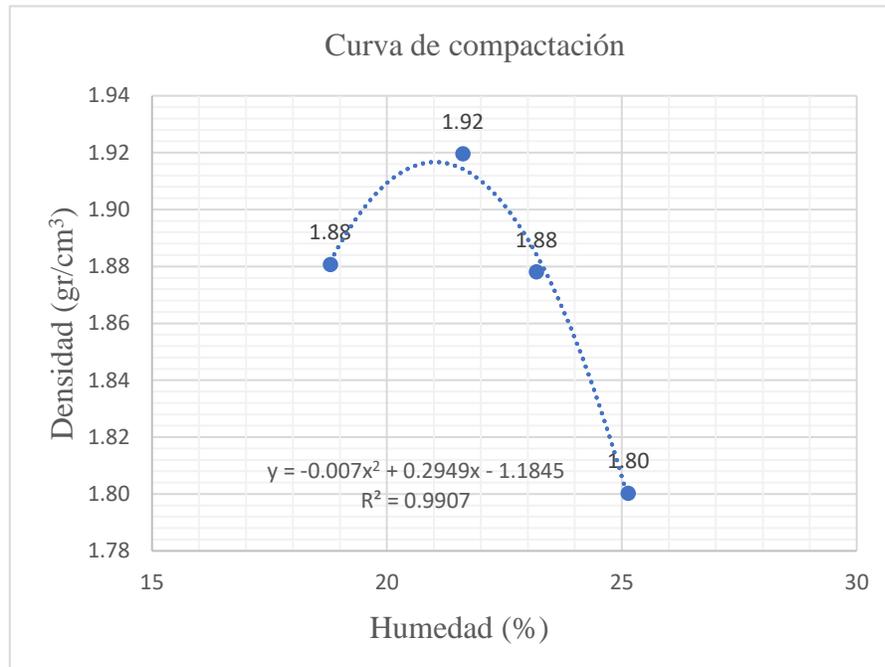
- **Suelo arcilloso + ligante hidráulico 20%**

Tabla 51. Planilla de compactación suelo barrio San Blas + L.H. 20%.

N° de capas:	5	5	5	5
N° de golpes por capa:	56	56	56	56
Peso suelo húmedo + molde (gr):	11300.00	11515.00	11470.00	11340.00
Capsula N°:	1	2	3	4
Peso suelo húmedo + capsula (gr):	107.21	117.62	113.28	113.25
Peso suelo seco + capsula (gr):	92.33	99.01	94.47	93.08
Peso de la capsula (gr):	13.16	12.92	13.33	12.84
Peso del molde (gr):	6515			
V. de la muestra (cm³):	2141.8			
N° de capas:	5	5	5	5
N° de golpes por capa:	56	56	56	56
Peso suelo húmedo + molde (gr):	11300.00	11515.00	11470.00	11340.00
Peso del molde (gr):	6515.00	6515.00	6515.00	6515.00
Peso suelo húmedo (gr):	4785.00	5000.00	4955.00	4825.00
Volumen de la muestra (cm³):	2141.80	2141.80	2141.80	2141.80
Densidad suelo húmedo (gr/cm³):	2.23	2.33	2.31	2.25
Capsula N°:	1.00	2.00	3.00	4.00
Peso suelo húmedo + capsula (gr):	107.21	117.62	113.28	113.25
Peso suelo seco + capsula (gr):	92.33	99.01	94.47	93.08
Peso del agua (gr):	14.88	18.61	18.81	20.17
Peso de la capsula (gr):	13.16	12.92	13.33	12.84
Peso suelo seco (gr):	79.17	86.09	81.14	80.24
Contenido de humedad (%):	18.79	21.62	23.18	25.14
Densidad suelo seco (gr/cm³):	1.88	1.92	1.88	1.80

Fuente: Elaboración propia.

Como resultado de este ensayo de compactación se obtuvo la gráfica de relación de peso unitario – humedad en los suelos, método modificado, mostrado a continuación:

Gráfico 27. Curva de compactación barrio San Blas + ligante hidráulico 20%.

Fuente: Elaboración propia.

De esta curva se obtiene una ecuación, el cual nos indicará la humedad óptima y por consiguiente la densidad máxima a la que el suelo es capaz de llegar con dicha humedad:

$$y = -0.007 * x^2 + 0.2949 * x - 1.1845$$

Donde:

y= Densidad (gr/cm³)

x= Humedad (%)

Para encontrar la humedad óptima se debe obtener la derivada de la ecuación anterior, entonces la ecuación derivada es como sigue:

$$0 = -2 * 0.007 * x + 0.2949$$

$$x = \frac{0.007}{0.2949 * 2}$$

$$x = 21.06 \%$$

Con la humedad óptima, hallamos la densidad correspondiente a esta humedad q sería denominada densidad máxima:

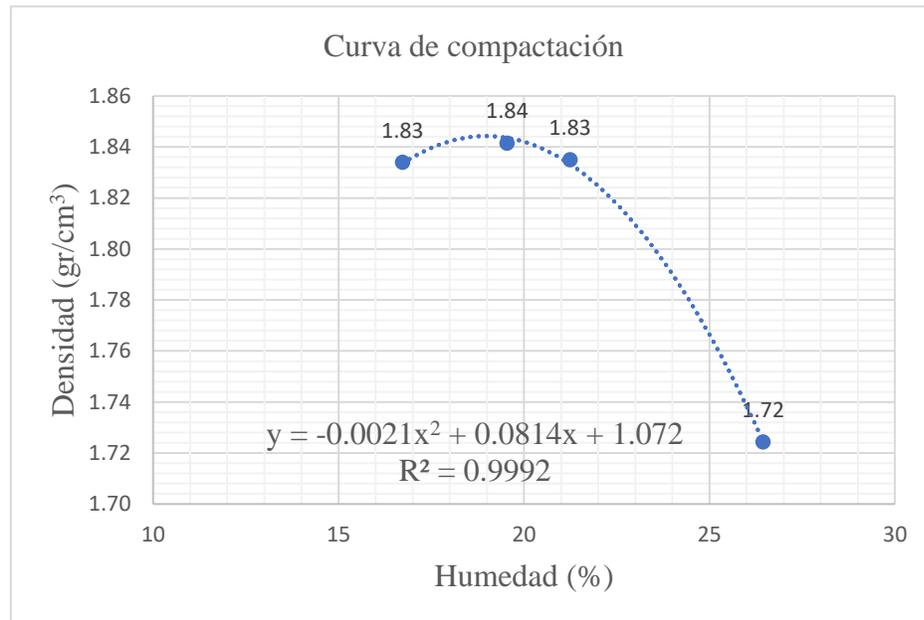
$$y = 1.92 \text{ gr/cm}^3$$

Tabla 52. Planilla de compactación suelo barrio Jardín + ligante hidráulico 20%.

N° de capas:	5	5	5	5
N° de golpes por capa:	56	56	56	56
Peso suelo húmedo + molde (gr):	11125	11255	11305	11210
Capsula N°:	1	2	3	4
Peso suelo húmedo + capsula (gr):	117.75	113.27	104.64	124.66
Peso suelo seco + capsula (gr):	102.54	96.84	88.56	101.11
Peso de la capsula (gr):	11.6	12.77	12.86	12.06
Peso del molde (gr):	6540			
V. de la muestra (cm³):	2141.8			
N° de capas:	5	5	5	5
N° de golpes por capa:	56	56	56	56
Peso suelo húmedo + molde (gr):	11125.00	11255.00	11305.00	11210.00
Peso del molde (gr):	6540.00	6540.00	6540.00	6540.00
Peso suelo húmedo (gr):	4585.00	4715.00	4765.00	4670.00
Volumen de la muestra (cm³):	2141.80	2141.80	2141.80	2141.80
Densidad suelo húmedo (gr/cm³):	2.14	2.20	2.22	2.18
Capsula N°:	1.00	2.00	3.00	4.00
Peso suelo húmedo + capsula (gr):	117.75	113.27	104.64	124.66
Peso suelo seco + capsula (gr):	102.54	96.84	88.56	101.11
Peso del agua (gr):	15.21	16.43	16.08	23.55
Peso de la capsula (gr):	11.60	12.77	12.86	12.06
Peso suelo seco (gr):	90.94	84.07	75.70	89.05
Contenido de humedad (%):	16.73	19.54	21.24	26.45
Densidad suelo seco (gr/cm³):	1.83	1.84	1.83	1.72

Fuente: Elaboración propia.

Como resultado de este ensayo de compactación se obtuvo la gráfica de relación de peso unitario – humedad en los suelos, método modificado, mostrado a continuación:

Gráfico 28. Curva de compactación suelo barrio Jardín + ligante hidráulico 20%

Fuente: Elaboración propia.

De esta curva se obtiene una ecuación, el cual nos indicará la humedad óptima y por consiguiente la densidad máxima a la que el suelo es capaz de llegar con dicha humedad:

$$y = -0.0021 * x^2 + 0.0814 * x + 1.072$$

Donde:

y= Densidad (gr/cm³)

x= Humedad (%)

Para encontrar la humedad óptima se debe obtener la derivada de la ecuación anterior, entonces la ecuación derivada es como sigue:

$$0 = -2 * 0.0021 * x + 0.0814$$

$$x = \frac{0.0814}{0.0021 * 2}$$

$$x = 19.38 \%$$

Con la humedad óptima, hallamos la densidad correspondiente a esta humedad q sería denominada densidad máxima:

$$y = 1.86 \text{ gr/cm}^3$$

3.3.4. Ensayo de CBR suelo arcilloso + ligante hidráulico

- **Suelo arcilloso + ligante hidráulico 5 %**

Se realizó el ensayo de CBR para nuestro suelo de acuerdo a nuestra densidad máxima y humedad óptima obtenida en el ensayo de compactación T180, aquí solamente se incluirá los resultados obtenidos, las planillas de ensayo se encontrarán en el apartado de anexos.

Ecuación del anillo de CBR:

$$y = (305.59 * x) + 44.513$$

Donde:

y = Carga (kg)

x = Penetración (mm)

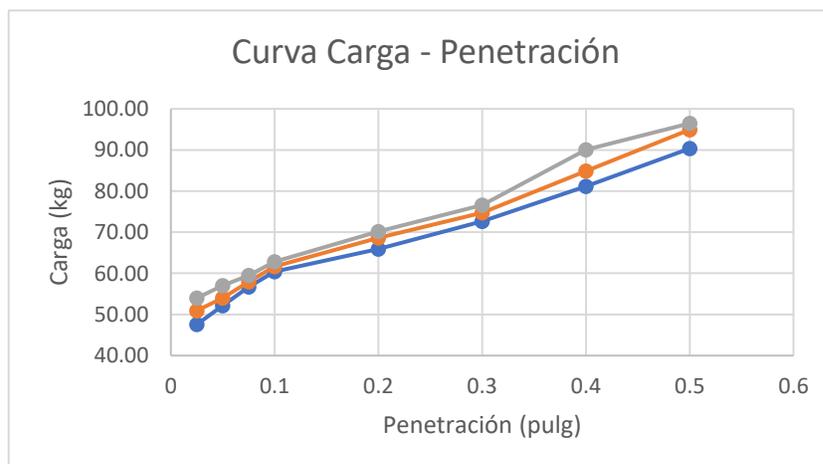
Área del pistón de carga: 19.3548 cm²

Tabla 53. Resultados CBR barrio San Blas + ligante hidráulico 5%.

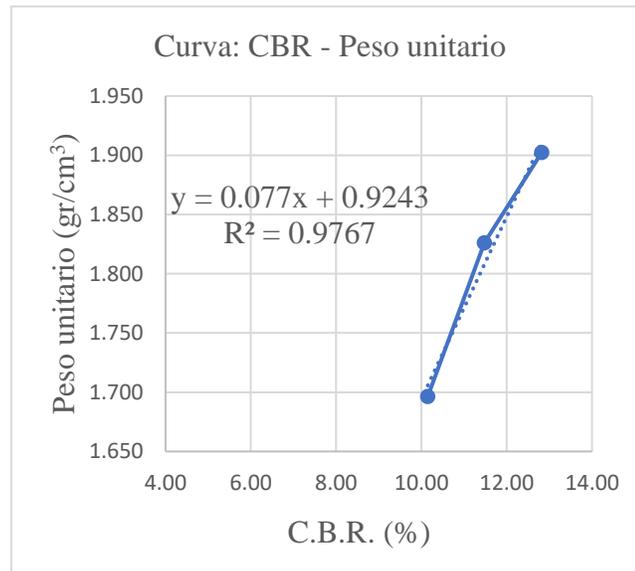
CBR (%)	Peso Unitario (gr/cm ³)
10.15	1.696
11.47	1.826
12.82	1.903

Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 29. Curva Carga – Penetración suelo barrio San Blas + L.H. 5%.



Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 30. Curva CBR – Peso Unitario suelo barrio San Blas + L.H. 5%.

Fuente: Elaboración propia.

Se obtuvo los siguientes resultados de CBR para el suelo del barrio San Blas + ligante hidráulico con un porcentaje de adición al 5%:

Tabla 54. Resultados CBR barrio San Blas + ligante hidráulico 5%.

CBR Barrio San Blas + ligante hidráulico 5%		
CBR 100%:	11.24	%
CBR 95%	10.68	%

Fuente: Elaboración propia.

Anteriormente se mostró el procedimiento resumido para la obtención de los valores de CBR de un suelo, de esta manera se procedió para las 4 muestras que se realizó para el mismo porcentaje obteniendo los siguientes resultados:

Tabla 55. Resultados finales CBR barrio San Blas + ligante hidráulico 5%.

CBR Barrio San Blas + ligante hidráulico 5%		
CBR 100% M-1:	11.24	%
CBR 100% M-2:	11.31	%
CBR 100% M-3:	11.25	%
CBR 100% M-4:	11.28	%

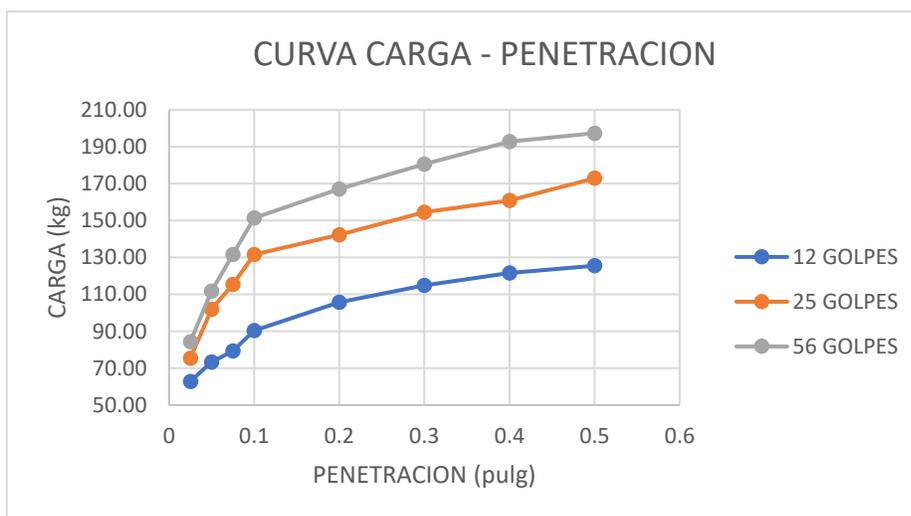
Fuente: Elaboración propia.

De la misma manera se procedió a la realización de los ensayos de California Bearing Ratio con el suelo obtenido del barrio Jardín + ligante hidráulico al 5% de adición:

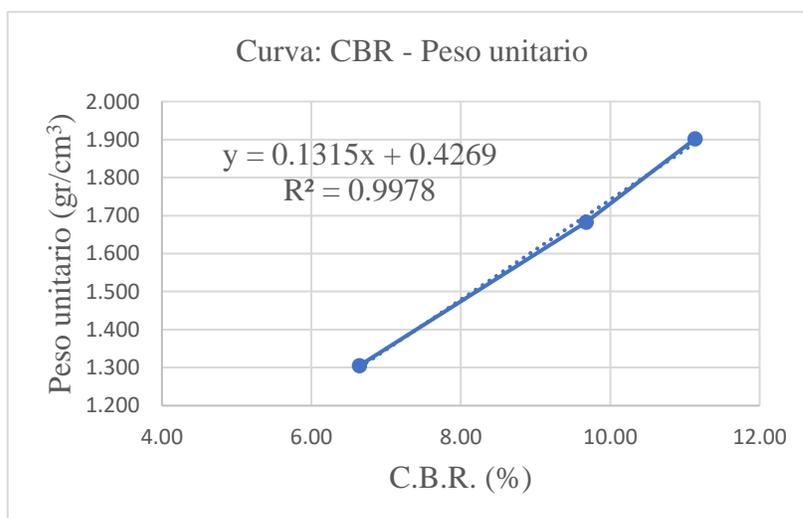
Tabla 56. Resultados CBR suelo barrio Jardín + ligante hidráulico 5%.

CBR (%)	Peso Unitario (gr/cm ³)
6.64	1.306
9.68	1.683
11.14	1.902

Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 31. Curva Carga Penetración suelo barrio Jardín + L.H. 5%.

Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 32. Curva CBR – Peso Unitario suelo barrio Jardín + L.H. 5%.

Fuente: Elaboración propia.

Se obtuvo los siguientes resultados de CBR para el suelo del barrio Jardín + ligante hidráulico con un porcentaje de adición al 5%:

Tabla 57. Resultados CBR barrio Jardín + ligante hidráulico 5%.

CBR Barrio Jardín + ligante hidráulico 5%		
CBR 100%:	10.82	%
CBR 95%	10.28	%

Fuente: Elaboración propia.

Anteriormente se mostró el procedimiento resumido para la obtención de los valores de CBR de un suelo, de esta manera se procedió para las 4 muestras que se realizó para el mismo porcentaje obteniendo los siguientes resultados:

Tabla 58. Resultados finales CBR suelo barrio Jardín + ligante hidráulico 5%.

CBR Barrio Jardín + ligante hidráulico 5%		
CBR 100% M-1:	10.82	%
CBR 100% M-2:	10.85	%
CBR 100% M-3:	10.77	%
CBR 100% M-4:	10.79	%

Fuente: Elaboración propia.

- **Suelo arcilloso + ligante hidráulico 10 %**

Se realizó el ensayo de CBR para nuestros suelos de acuerdo a nuestra densidad máxima y humedad óptima obtenida en el ensayo de compactación T180, aquí solamente se incluirá los resultados obtenidos, las planillas de ensayo se encontrarán en el apartado de anexos.

Ecuación del anillo de CBR:

$$y = (305.59 * x) + 44.513$$

Donde:

y = Carga (kg)

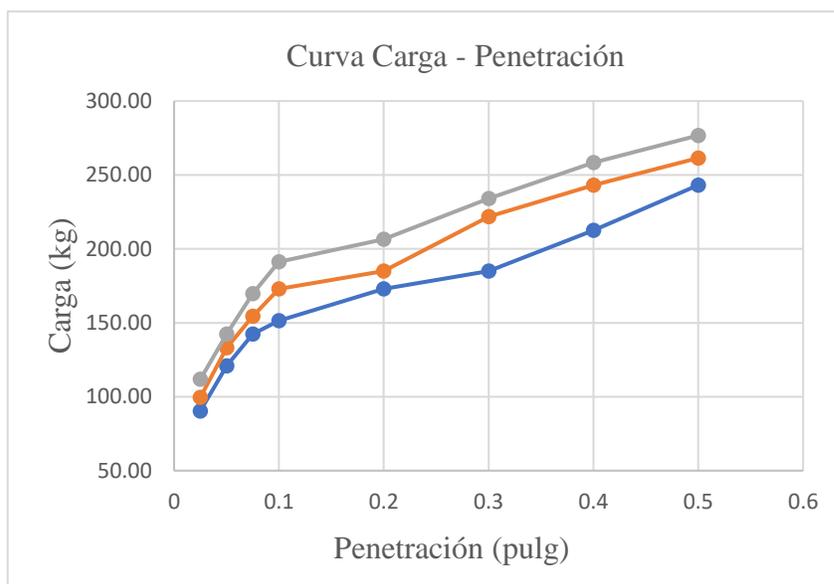
x = Penetración (mm)

Área del pistón de carga: 19.3548 cm²

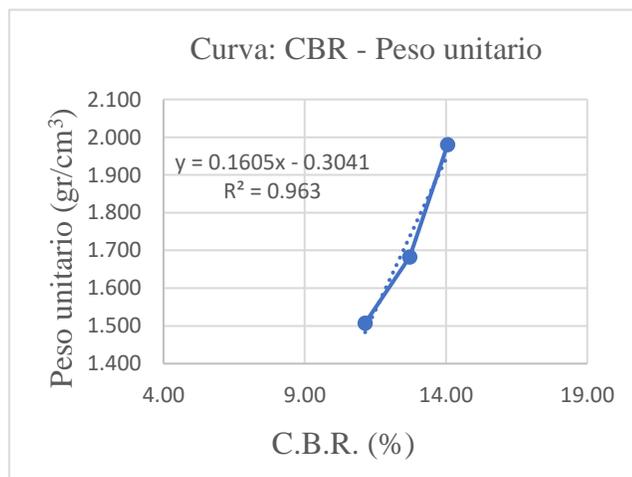
Tabla 59. Resultados CBR suelo barrio Jardín + ligante hidráulico 10%.

CBR (%)	Peso Unitario (gr/cm³)
11.14	1.508
12.71	1.683
14.06	1.981

Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 33. Curva Carga – Penetración suelo barrio Jardín + L.H. 10%.

Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 34. Curva: CBR – Peso Unitario suelo barrio Jardín + L.H. 10%.

Fuente: Elaboración propia.

Se obtuvo los siguientes resultados de CBR para el suelo del barrio Jardín + ligante hidráulico con un porcentaje de adición al 10%:

Tabla 60. CBR suelo barrio Jardín + ligante hidráulico 10%.

CBR Barrio Jardín + ligante hidráulico 10%		
CBR 100%:	13.98	%
CBR 95%	13.28	%

Fuente: Elaboración propia.

Anteriormente se mostró el procedimiento resumido para la obtención de los valores de CBR de un suelo, de esta manera se procedió para las 4 muestras que se realizó para el mismo porcentaje obteniendo los siguientes resultados:

Tabla 61. Resultados finales CBR suelo barrio Jardín + ligante hidráulico 10%.

CBR Barrio Jardín + ligante hidráulico 10%		
CBR 100% M-1:	13.98	%
CBR 100% M-2:	14.05	%
CBR 100% M-3:	13.95	%
CBR 100% M-4:	13.92	%

Fuente: Elaboración propia.

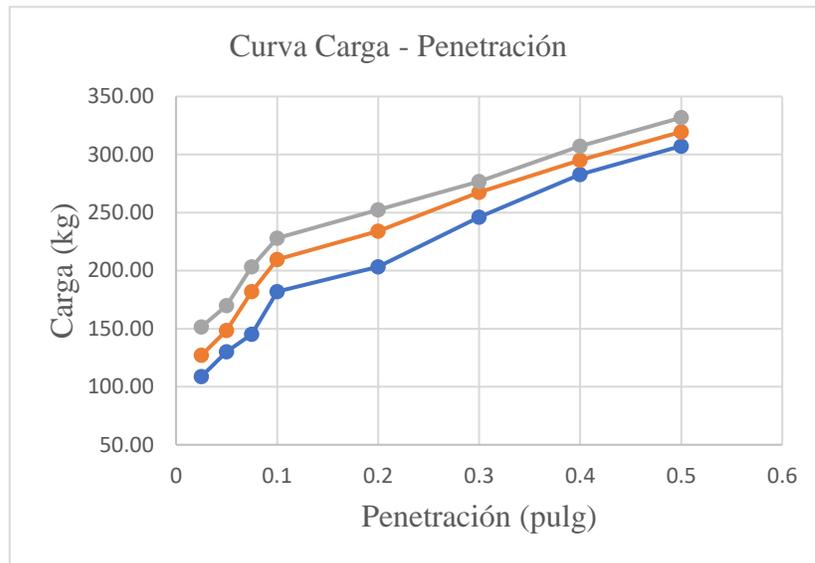
De la misma manera se procedió a la realización de los ensayos de California Bearing Ratio con el suelo obtenido del barrio San Blas + ligante hidráulico al 10% de adición:

Tabla 62. Resultados CBR suelo barrio San Blas + ligante hidráulico 10%.

CBR (%)	Peso Unitario (gr/cm³)
13.38	1.360
15.41	1.533
16.75	1.681

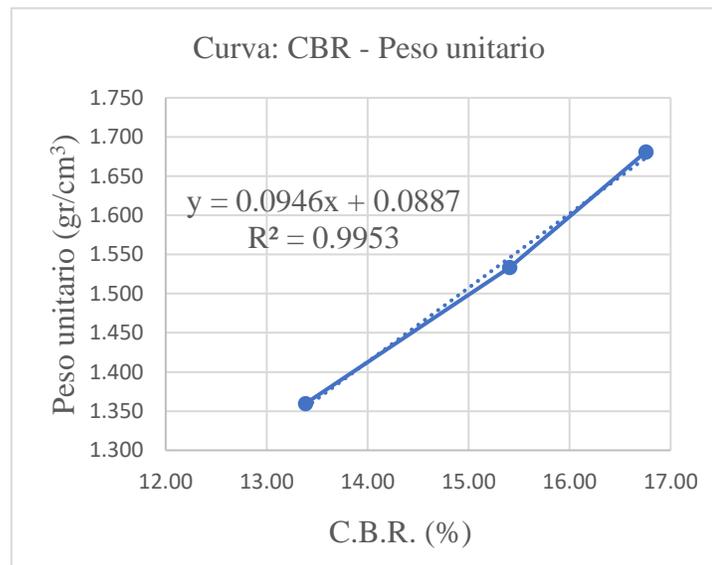
Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 35. Curva Carga – Penetración suelo barrio San Blas + L.H. 10%.



Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 36. Curva CBR – Peso Unitario suelo barrio San Blas + L.H. 10%.



Fuente: Elaboración propia.

Se obtuvo los siguientes resultados de CBR para el suelo del barrio San Blas + ligante hidráulico con un porcentaje de adición al 10%:

Tabla 63. CBR suelo barrio San Blas + ligante hidráulico 10%.

CBR Barrio San Blas + ligante hidráulico 10%		
CBR 100%:	18.72	%
CBR 95%	17.79	%

Fuente: Elaboración propia.

Anteriormente se mostró el procedimiento resumido para la obtención de los valores de CBR de un suelo, de esta manera se procedió para las 4 muestras que se realizó para el mismo porcentaje obteniendo los siguientes resultados:

Gráfico 37. Resultados finales CBR suelo barrio San Blas + L.H. 10%.

CBR Barrio San Blas + ligante hidráulico 10%		
CBR 100% M-1:	18.72	%
CBR 100% M-2:	18.75	%
CBR 100% M-3:	18.71	%
CBR 100% M-4:	18.69	%

Fuente: Elaboración propia.

- **Suelo arcilloso + ligante hidráulico 15 %**

Se realizó el ensayo de CBR para nuestros suelos de acuerdo a nuestra densidad máxima y humedad óptima obtenida en el ensayo de compactación T180, aquí solamente se incluirá los resultados obtenidos, las planillas de ensayo se encontrarán en el apartado de anexos.

Ecuación del anillo de CBR:

$$y = (305.59 * x) + 44.513$$

Donde:

y = Carga (kg)

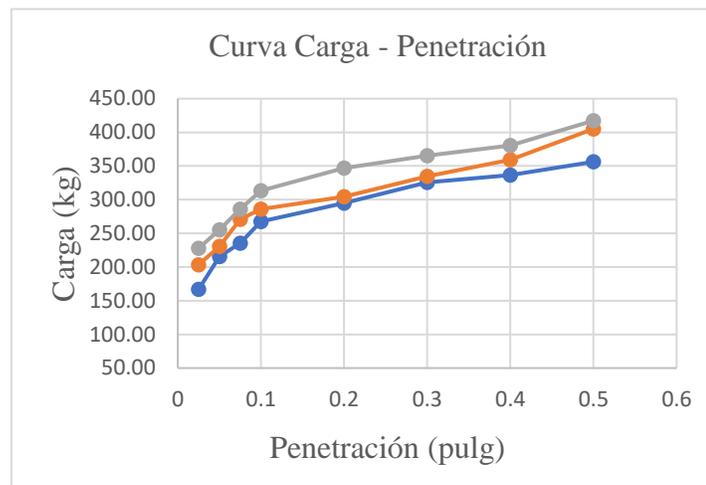
x = Penetración (mm)

Área del pistón de carga: 19.3548 cm²

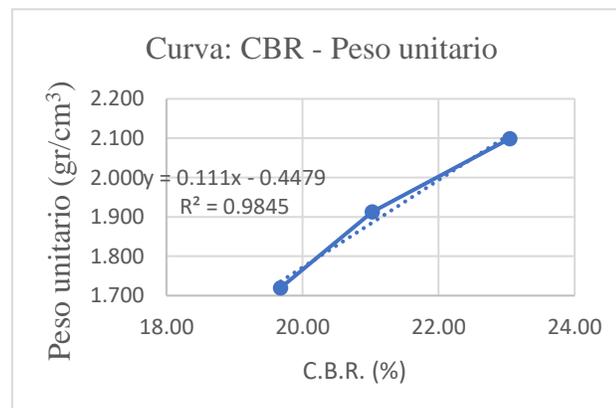
Tabla 64. Resultados CBR suelo barrio San Blas + ligante hidráulico 15%.

CBR (%)	Peso Unitario (gr/cm³)
19.68	1.720
21.02	1.913
23.05	2.099

Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 38. Curva Carga Penetración suelo barrio San Blas + L.H. 15%.

Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 39. Curva CBR – Peso Unitario suelo barrio San Blas + L.H. 15%.

Fuente: Elaboración propia.

Se obtuvo los siguientes resultados de CBR para el suelo del barrio San Blas + ligante hidráulico con un porcentaje de adición al 10%:

Tabla 65. CBR suelo barrio San Blas + ligante hidráulico 15%.

CBR Barrio San Blas + ligante hidráulico 15%		
CBR 100%:	22.41	%
CBR 95%	21.29	%

Fuente: Elaboración propia.

Anteriormente se mostró el procedimiento resumido para la obtención de los valores de CBR de un suelo, de esta manera se procedió para las 4 muestras que se realizó para el mismo porcentaje obteniendo los siguientes resultados:

Tabla 66. Resultados finales CBR suelo barrio San Blas + ligante hidráulico 15%.

CBR Barrio San Blas + ligante hidráulico 15%		
CBR 100% M-1:	22.41	%
CBR 100% M-2:	22.45	%
CBR 100% M-3:	22.39	%
CBR 100% M-4:	22.38	%

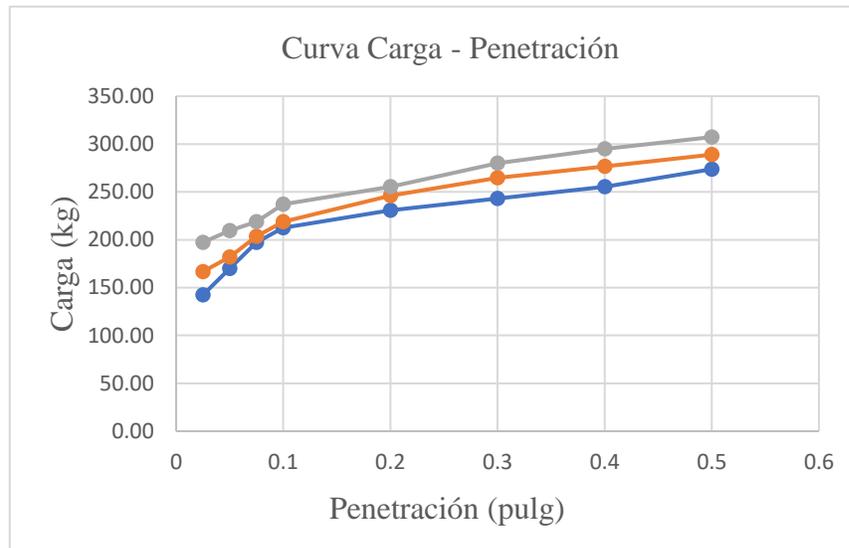
Fuente: Elaboración propia.

De la misma manera se procedió a la realización de los ensayos de California Bearing Ratio con el suelo obtenido del barrio Jardín + ligante hidráulico al 15% de adición:

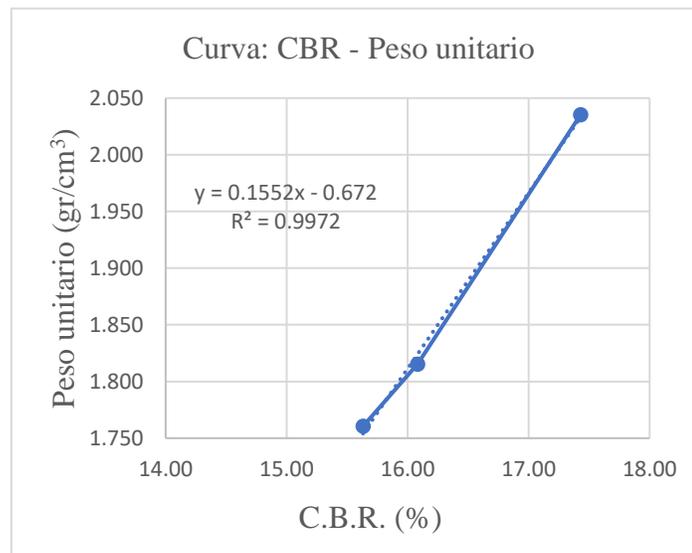
Tabla 67. Resultados CBR suelo barrio Jardín + ligante hidráulico 15%.

CBR (%)	Peso Unitario (gr/cm³)
15.63	1.761
16.08	1.815
17.43	2.035

Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 40. Curva Carga Penetración suelo barrio Jardín + L.H. 15%.

Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 41. Curva CBR – Peso Unitario suelo barrio Jardín + L.H. 15%.

Fuente: Elaboración propia.

Se obtuvo los siguientes resultados de CBR para el suelo del barrio San Blas + ligante hidráulico con un porcentaje de adición al 15%:

Tabla 68. CBR suelo barrio Jardín + ligante hidráulico 15%.

CBR Barrio Jardín + ligante hidráulico 15%		
CBR 100%:	17.15	%
CBR 95%	16.29	%

Fuente: Elaboración propia.

Anteriormente se mostró el procedimiento resumido para la obtención de los valores de CBR de un suelo, de esta manera se procedió para las 4 muestras que se realizó para el mismo porcentaje obteniendo los siguientes resultados:

Tabla 69. Resultados finales CBR suelo barrio Jardín + ligante hidráulico 15%.

CBR Barrio Jardín + ligante hidráulico 15%		
CBR 100% M-1:	17.15	%
CBR 100% M-2:	17.11	%
CBR 100% M-3:	17.19	%
CBR 100% M-4:	17.13	%

Fuente: Elaboración propia.

- **Suelo arcilloso + ligante hidráulico 20 %**

Se realizó el ensayo de CBR para nuestros suelos de acuerdo a nuestra densidad máxima y humedad óptima obtenida en el ensayo de compactación T180, aquí solamente se incluirá los resultados obtenidos, las planillas de ensayo se encontrarán en el apartado de anexos.

Ecuación del anillo de CBR:

$$y = (305.59 * x) + 44.513$$

Donde:

y = Carga (kg)

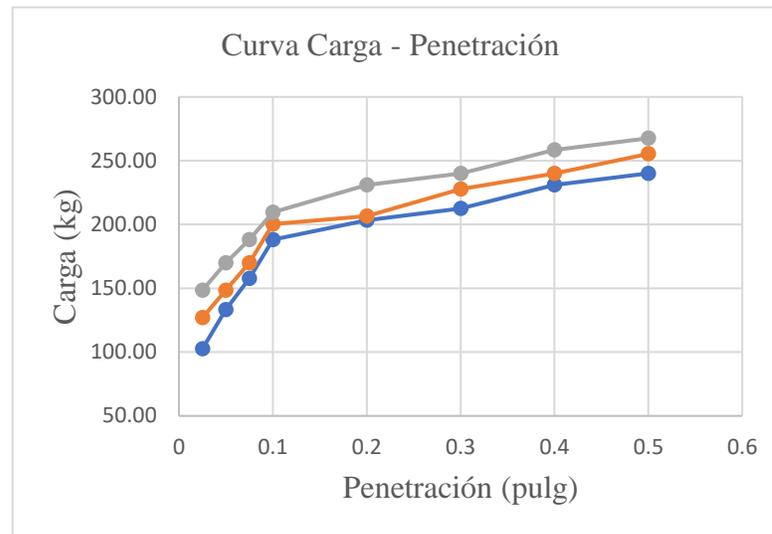
x = Penetración (mm)

Área del pistón de carga: 19.3548 cm²

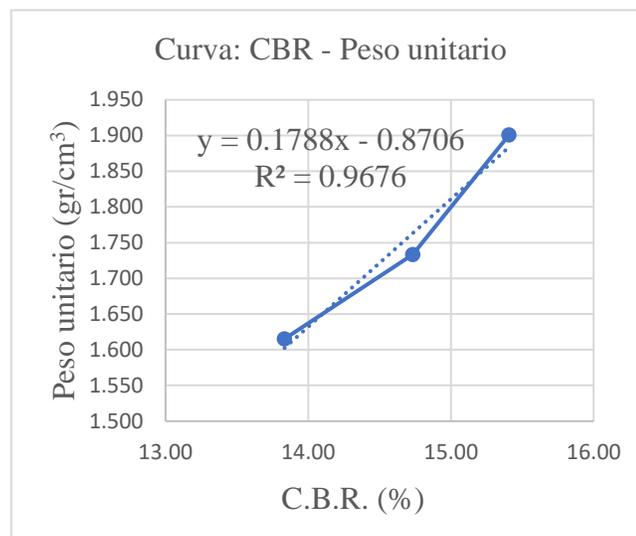
Tabla 70. Resultados CBR suelo barrio Jardín + ligante hidráulico 20%.

CBR (%)	Peso Unitario (gr/cm³)
13.83	1.615
14.73	1.733
15.41	1.901

Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 42. Curva Carga Penetración suelo barrio Jardín + L.H. 20%.

Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 43. Curva CBR Peso Unitario suelo barrio Jardín + L.H. 20%.

Fuente: Elaboración propia.

Se obtuvo los siguientes resultados de CBR para el suelo del barrio Jardín + ligante hidráulico con un porcentaje de adición al 20%:

Tabla 71. CBR suelo barrio Jardín + ligante hidráulico 20%.

CBR Barrio Jardín + ligante hidráulico 20%		
CBR 100%:	15.27	%
CBR 95%	14.51	%

Fuente: Elaboración propia.

Anteriormente se mostró el procedimiento resumido para la obtención de los valores de CBR de un suelo, de esta manera se procedió para las 4 muestras que se realizó para el mismo porcentaje obteniendo los siguientes resultados:

Tabla 72. Resultados finales CBR suelo barrio Jardín + ligante hidráulico 20%.

CBR Barrio Jardín + ligante hidráulico 20%		
CBR 100% M-1:	15.27	%
CBR 100% M-2:	15.31	%
CBR 100% M-3:	15.25	%
CBR 100% M-4:	15.27	%

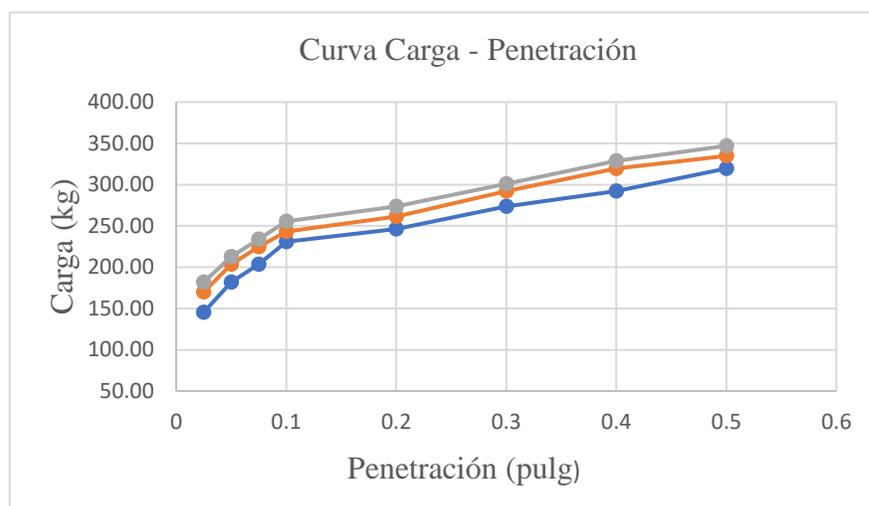
Fuente: Elaboración propia.

Tabla 73. Resultados CBR barrio San Blas + ligante hidráulico 20%.

CBR (%)	Peso Unitario (gr/cm³)
16.98	1.875
17.88	1.912
18.78	1.976

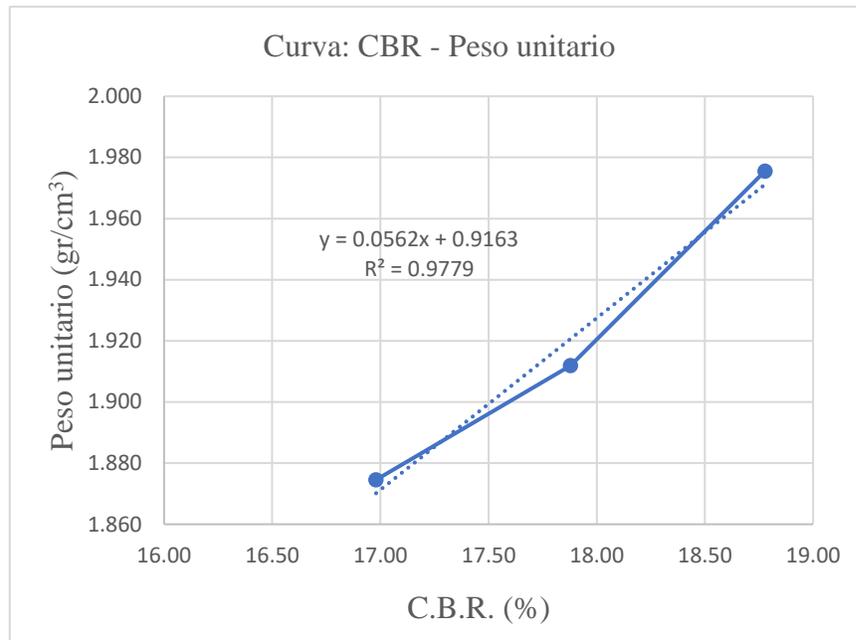
Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 44. Curva Carga Penetración suelo barrio San Blas + L.H. 20%.



Fuente: Elaboración propia.

Se obtuvo los siguientes resultados de CBR para el suelo del barrio San Blas + ligante hidráulico con un porcentaje de adición al 20%:

Gráfico 45. CBR Peso Unitario suelo barrio San Blas + L.H. 20%.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 74. CBR suelo barrio San Blas + ligante hidráulico 20%.

CBR Barrio San Blas + ligante hidráulico 20%		
CBR 100%:	17.86	%
CBR 95%	16.97	%

Fuente: Elaboración propia.

Anteriormente se mostró el procedimiento resumido para la obtención de los valores de CBR de un suelo, de esta manera se procedió para las 4 muestras que se realizó para el mismo porcentaje obteniendo los siguientes resultados:

Tabla 75. Resultados finales CBR suelo barrio San Blas + ligante hidráulico 20%.

CBR Barrio San Blas + ligante hidráulico 15%		
CBR 100% M-1:	17.86	%
CBR 100% M-2:	17.92	%
CBR 100% M-3:	17.95	%
CBR 100% M-4:	17.89	%

Fuente: Elaboración propia.

CAPITULO 4

PROCESAMIENTO Y

VALIDACIÓN DE

RESULTADOS

CAPITULO IV

PROCESAMIENTO Y VALIDACIÓN DE RESULTADOS

4.1. Resultados para el inicio del tratamiento estadístico correspondiente

Tabla 76. Resultados de ensayos CBR.

	N°	Porcentajes de adición (%)	CBR (%)
Suelo barrio Jardín	1	5	10.82
	2		10.85
	3		10.77
	4		10.79
	5	10	13.98
	6		14.05
	7		13.95
	8		13.92
	9	15	17.15
	10		17.11
	11		17.19
	12		17.13
	13	20	15.27
	14		15.31
	15		15.25
	16		15.27
Suelo barrio San Blas	17	5	11.24
	18		11.31
	19		11.25
	20		11.28
	21	10	18.72
	22		18.75
	23		18.71
	24		18.69
	25	15	22.41
	26		22.45
	27		22.39
	28		22.38
	29	20	17.86
	30		17.92
	31		17.95
	32		17.89

Fuente: Elaboración propia

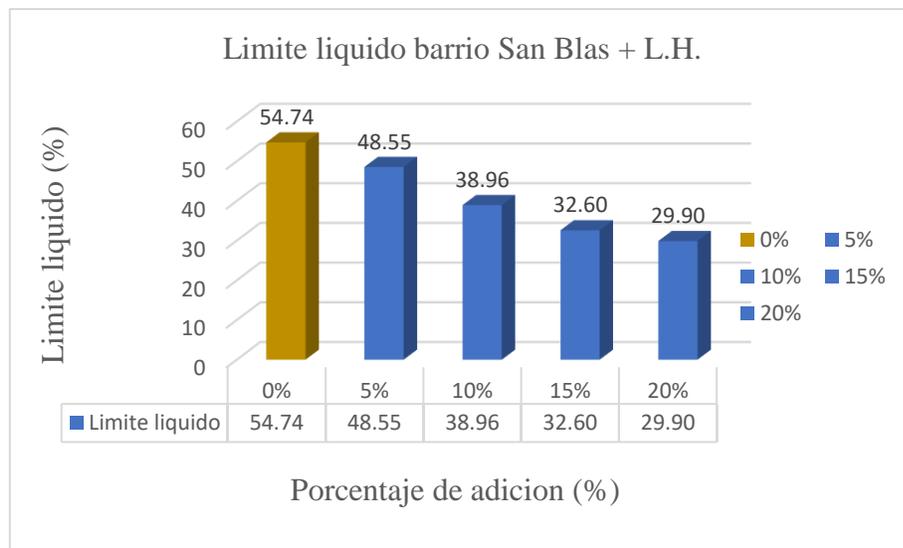
Se realizará el análisis estadístico de los resultados reflejados en la tabla anterior que nos llevará a la confiabilidad de los resultados del valor CBR donde usamos como aditivos el ligante hidráulico.

Para dicha validación tomaremos el método de “diferencias de medias muestrales”, más propiamente el modelo de distribución “t de student”.

4.2. Gráficos de comparación

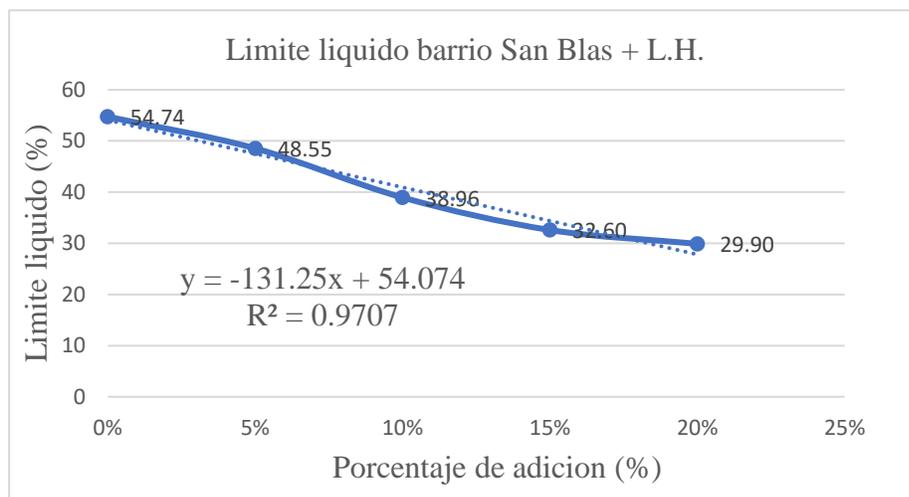
4.2.1. Limite liquido

Gráfico 46. Limite liquido barrio San Blas + ligante hidráulico.



Fuente: Elaboración propia

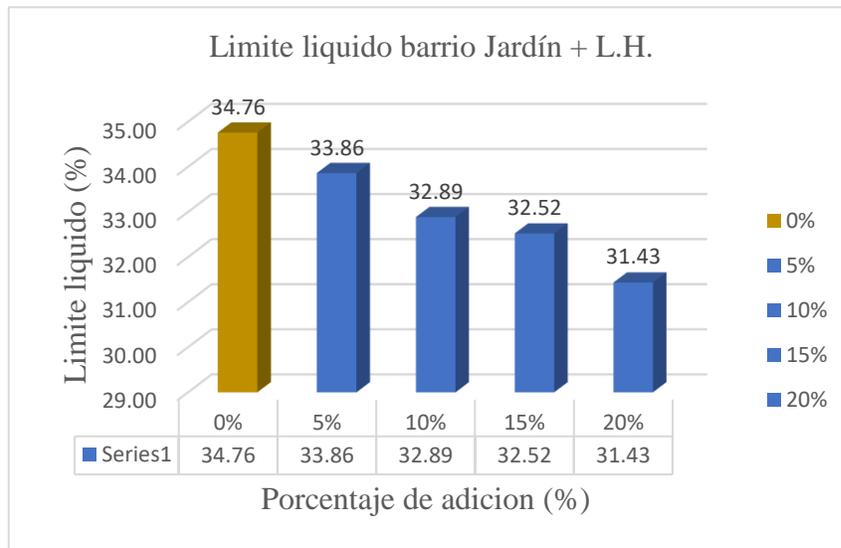
Gráfico 47. Tendencia limite liquido barrio San Blas + ligante hidráulico.



Fuente: Elaboración propia

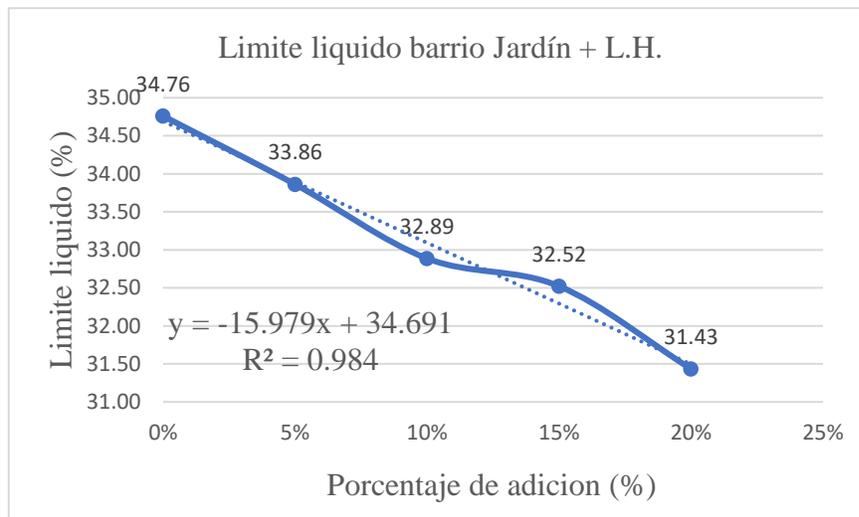
$$y = -131.25x + 54.074$$

Gráfico 48. Limite liquido barrio Jardín + L.H.



Fuente: Elaboración propia

Gráfico 49. Tendencia limite liquido barrio Jardín + ligante hidráulico.



Fuente: Elaboración propia

Se tiene una tendencia lineal de comportamiento del aditivo ligante hidráulico utilizado tanto en un suelo tipo CH de alta plasticidad como en un suelo tipo CL de baja plasticidad, teniendo una reducción lineal a medida que se aumenta la cantidad de ligante hidráulico.

Entonces como sabemos el límite líquido es uno de los Límites de Atterberg más utilizados en la ingeniería geotécnica. Se define como el contenido de humedad en el suelo en el que el mismo comienza a comportarse como un líquido bajo la aplicación de una fuerza. Este límite se determina utilizando el ensayo de Casagrande, que consiste en la medición de la penetración de una pequeña abertura en una muestra de suelo a medida que se va cerrando.

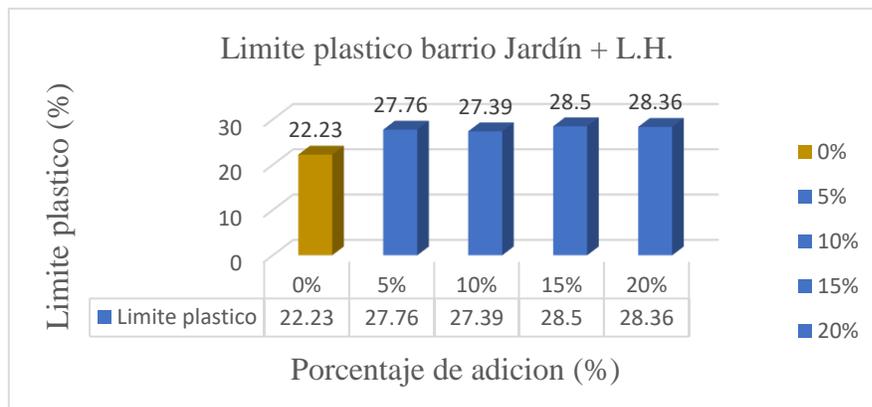
El límite líquido es un parámetro importante para clasificar los suelos y determinar su plasticidad. Los suelos con un límite líquido alto tienden a ser más plásticos y tienen mayor capacidad de deformación bajo cargas. Por otro lado, los suelos con un límite líquido bajo son menos plásticos y tienden a ser más rígidos.

Entonces observando las gráficas anteriores podemos observar el decremento del límite líquido en el suelo, de esta manera podemos considerar que se está teniendo un comportamiento de “rigidización” del suelo, es decir que está aumentando su rigidez de manera que se aumenta el límite líquido, también se puede observar que de tener el tipo de suelo CH, en la gráfica de clasificación mediante el método SUCS, llego al punto de clasificarse como un suelo ML, como limos de baja plasticidad.

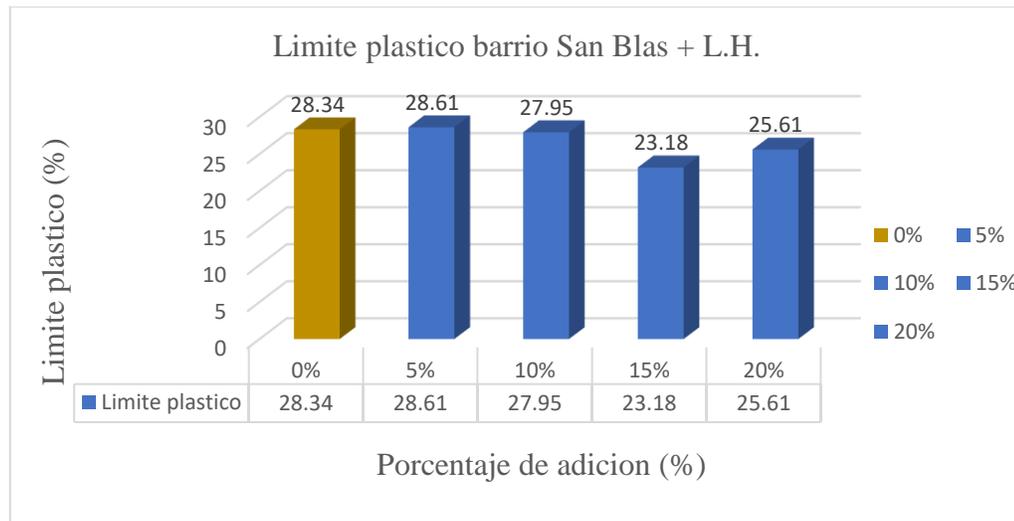
Por otro lado, si bien se reduce linealmente en ambos suelos, también se observa que el comportamiento de reducción de límite líquido se da con mayor fuerza en el suelo tipo CH de alta plasticidad, en comparación con el suelo tipo CL de baja plasticidad.

4.2.2. Límite plástico

Gráfico 50. Límite plástico barrio Jardín + ligante hidráulico.



Fuente: Elaboración propia

Gráfico 51. Limite plástico barrio San Blas + ligante hidráulico.

Fuente: Elaboración propia

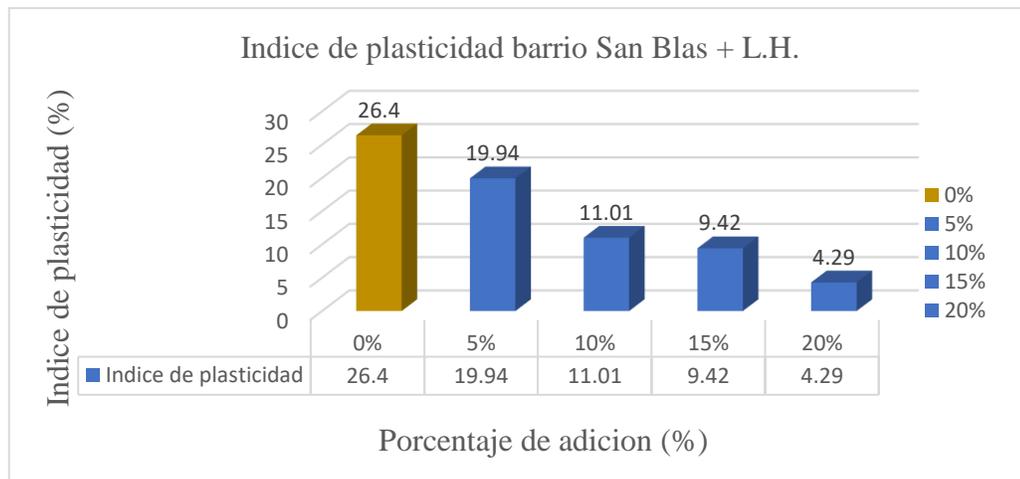
El límite plástico es otro de los Límites de Atterberg que se utiliza en la ingeniería geotécnica. Se define como el contenido de humedad en el suelo en el que el mismo cambia de un estado plástico a un estado semisólido. Este límite se determina utilizando el ensayo de roll-off, que consiste en la formación de una pequeña bola de suelo y su posterior rodadura sobre una superficie plana hasta que se rompe.

El límite plástico es un indicador de la cohesión del suelo y de su capacidad para mantener su forma sin romperse. Los suelos con un límite plástico alto tienen mayor cohesión y tienden a ser más resistentes al corte. Por otro lado, los suelos con un límite plástico bajo son menos cohesivos y tienden a ser más frágiles.

Por tanto, se tiene un aumento en los valores de limite plástico en ambos tipos de suelos, teniendo en cuenta que están adquiriendo mayor resistencia al corte, de esta manera se puede observar en las gráficas que se tiene este comportamiento.

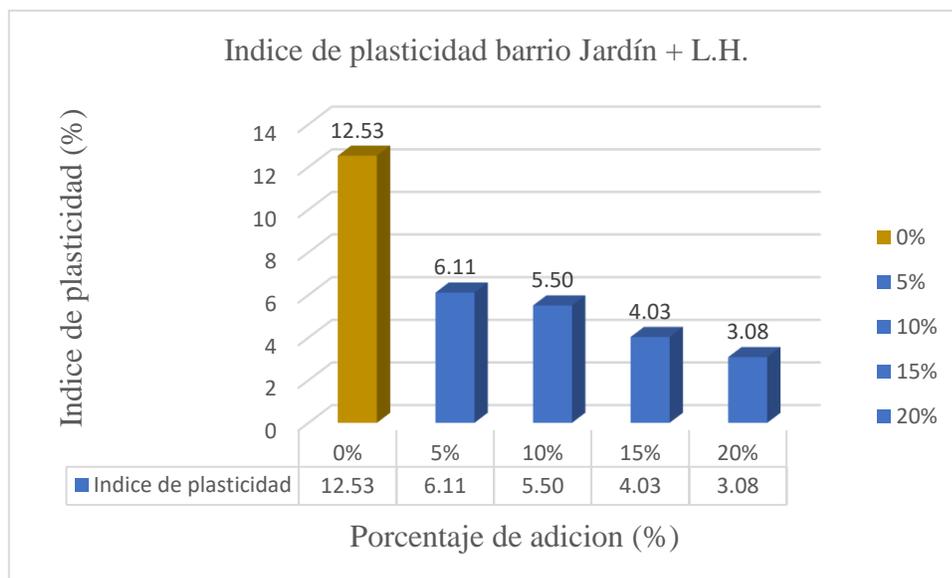
4.2.3. Índice de plasticidad

Gráfico 52. Índice de plasticidad barrio San Blas + ligante hidráulico.



Fuente: Elaboración propia

Gráfico 53. Índice de plasticidad barrio Jardín + ligante hidráulico.



Fuente: Elaboración propia

El índice de plasticidad es un parámetro derivado de los Límites de Atterberg que se utiliza en la ingeniería geotécnica. Se define como la diferencia entre el límite líquido y el límite plástico de un suelo. Este índice proporciona información sobre la plasticidad del suelo y su capacidad de deformación bajo cargas.

El índice de plasticidad es un indicador importante para clasificar los suelos y determinar su comportamiento frente a las cargas. Los suelos con un índice de

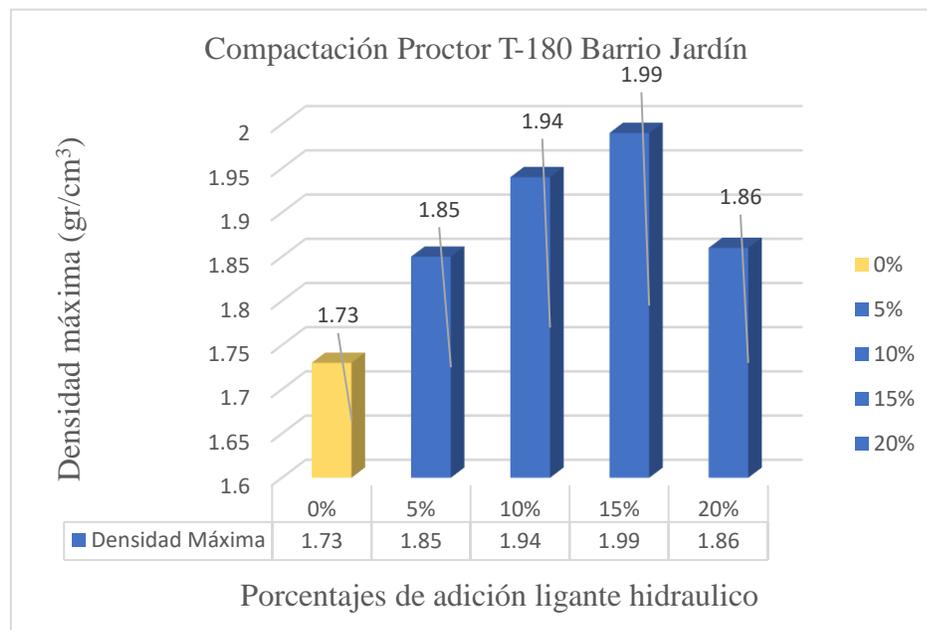
plasticidad alto son más propensos a sufrir grandes deformaciones bajo cargas y requieren un mayor cuidado en el diseño de estructuras. Por otro lado, los suelos con un índice de plasticidad bajo son menos deformables y más estables.

Entonces en conclusión con este parámetro se puede observar que en ambos tipos de suelos se tiene una mejoría, obteniendo menos deformabilidad y mayor estabilidad a los suelos que bajo la acción de cargas tenga una mejor respuesta y también un mejor diseño de las capas siguientes que conforman un pavimento tanto rígido como flexible.

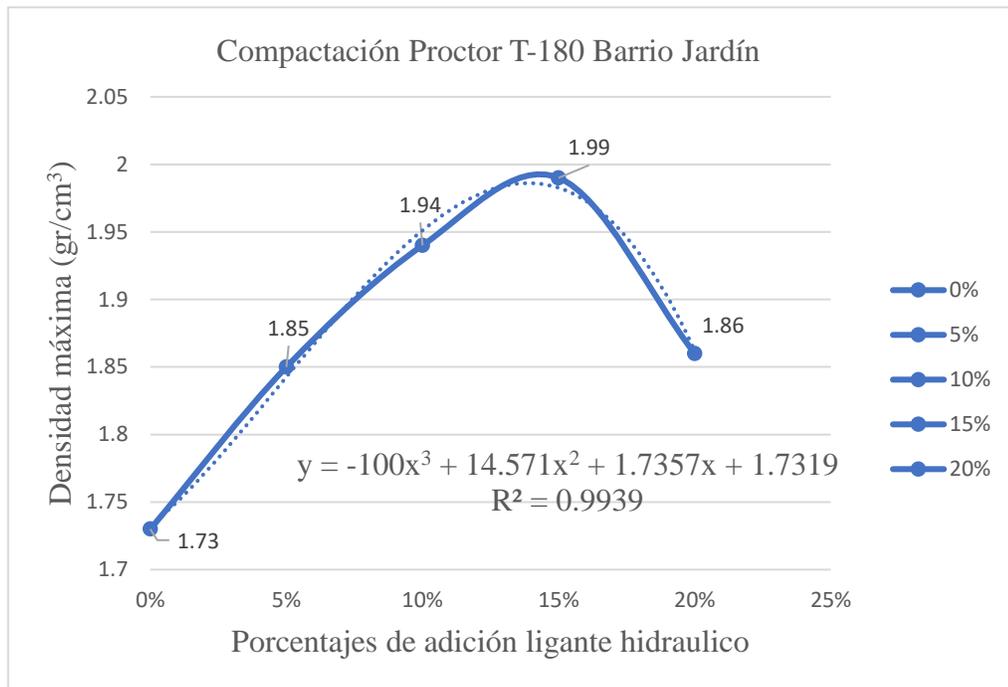
4.2.4. Compactación Proctor T-180

Para la densidad máxima obtenida con el ensayo de compactación T180, se tiene que el ligante hidráulico aporta a aumentar la densidad del suelo en base al ensayo realizado para el suelo en estado natural, esto aplica a los 2 barrios que fueron tomados en cuenta, es así que se tiene un gráfico con la representación de las densidades de acuerdo a sus porcentajes de adición:

Gráfico 54. Ensayos compactación Proctor T-180 barrio Jardín.



Fuente: Elaboración propia

Gráfico 55. Tendencia de densidades del suelo barrio Jardín.

Fuente: Elaboración propia

$$y = -100 * x^3 + 14.571 * x^2 + 1.7357x + 1.7319$$

Donde:

Y= Densidad máxima (gr/cm³)

X= Porcentaje de adición (%)

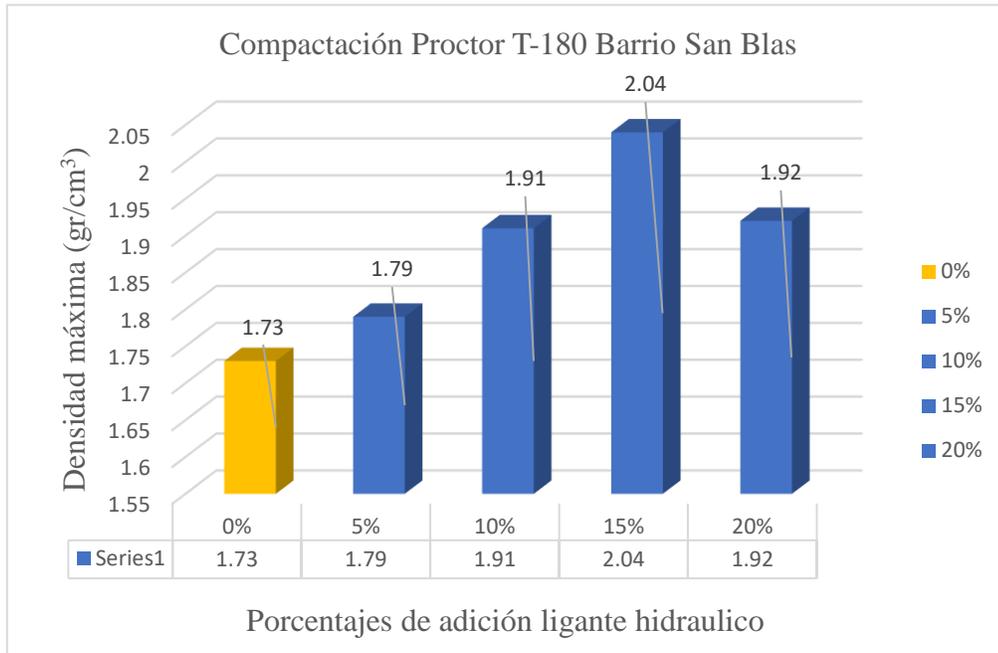
Resolviendo la ecuación de tercer grado se obtiene una de las raíces de dicha ecuación con el valor de:

$$y = 13.88 \%$$

El valor anterior corresponde a un valor máximo de adición para obtener la densidad máxima, donde corresponde a la densidad de:

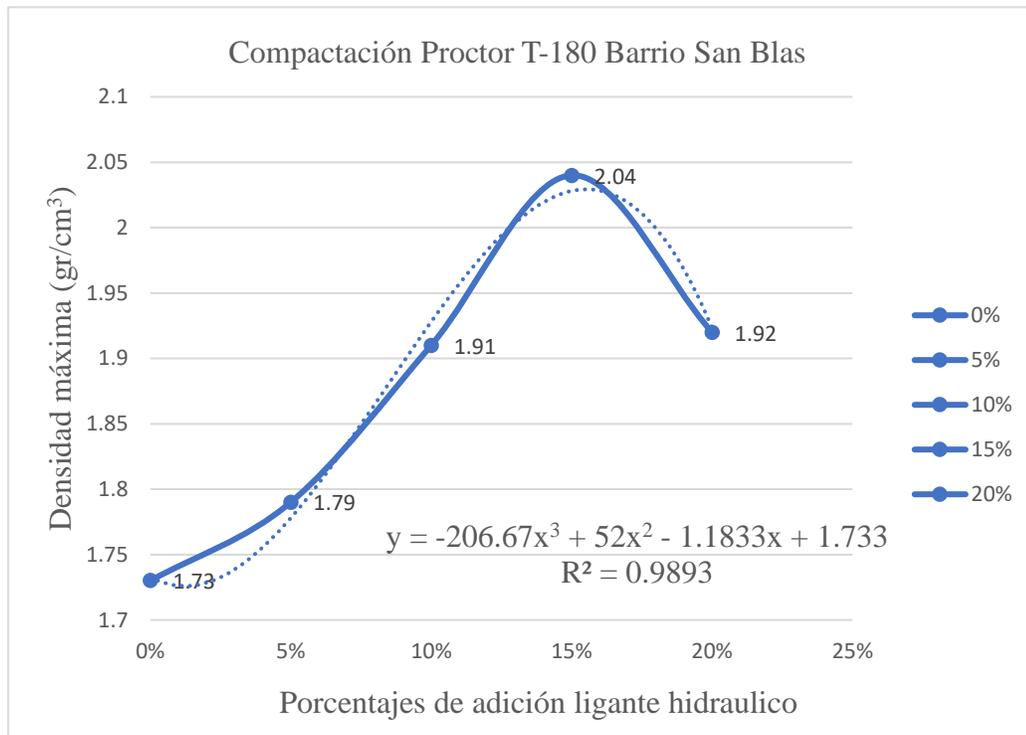
$$x = 1.99 \text{ gr/cm}^3$$

Gráfico 56. Ensayos compactación Proctor T-180 barrio San Blas.



Fuente: Elaboración propia

Gráfico 57. Tendencia de densidades del suelo barrio San Blas.



Fuente: Elaboración propia

$$y = -206.67 * x^3 + 52 * x^2 - 1.1833 * x + 1.733$$

Donde:

Y= Densidad máxima (gr/cm³)

X= Porcentaje de adición (%)

Resolviendo la ecuación de tercer grado se obtiene una de las raíces de dicha ecuación con el valor de:

$$y = 15.55 \%$$

El valor anterior corresponde a un valor máximo de adición para obtener la densidad máxima, donde corresponde a la densidad de:

$$x = 2.03 \%$$

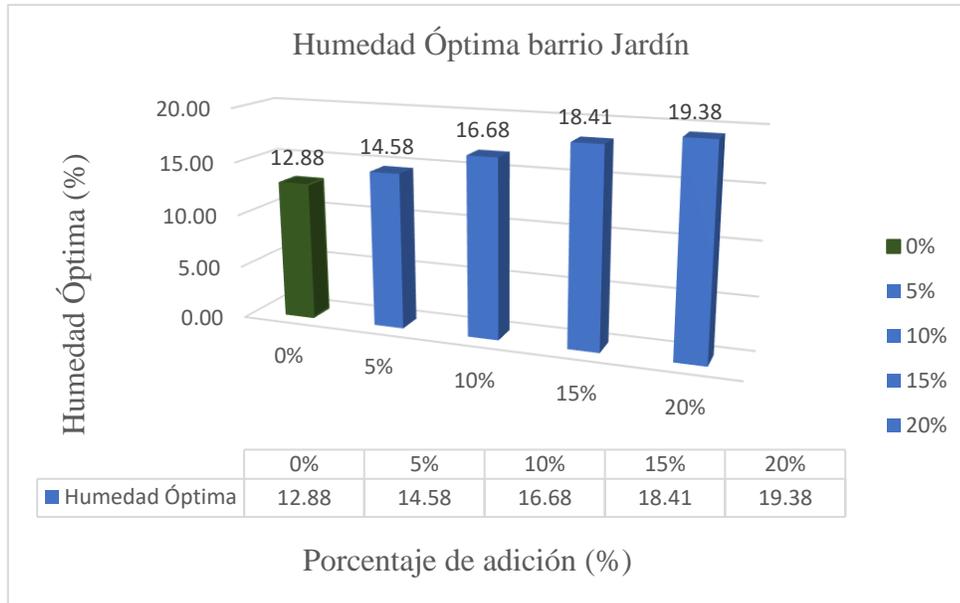
Como sabemos la compactación de un suelo produce un incremento en la densidad del material, produciendo importantes beneficios sobre el mismo, y al observar el aumento gradual del mismo se puede afirmar lo siguiente:

- Los suelos están incrementando su resistencia al corte a medida que se llega a su porcentaje óptimo de adición, esto significa que produce mayor unión entre las partículas, obteniéndose así, mayor resistencia del conjunto.
- También se tiene una disminución de la permeabilidad, dado que se dificulta la penetración de agua en el material. La presencia de agua en materiales granulares puede provocar su deterioro, tanto por el arrastre de partículas como por las posibles variaciones volumétricas ante la presencia de heladas.
- También se reduce su compresibilidad y, por tanto, el número de huecos presentes en el suelo (sobre los que el agua podría acumularse).
- Impide el hundimiento del suelo. Una mala compactación del suelo puede dar lugar a asientos diferenciales, y a hundimientos localizados en el firme, provocando a largo plazo, la aparición de patologías.

Para la humedad óptima se tiene la observación que en los dos suelos de los barrios tienden a subir, este es un comportamiento inusual ya que al aumentar la densidad, estamos también diciendo que el porcentaje de vacíos se disminuye y se tiene menor

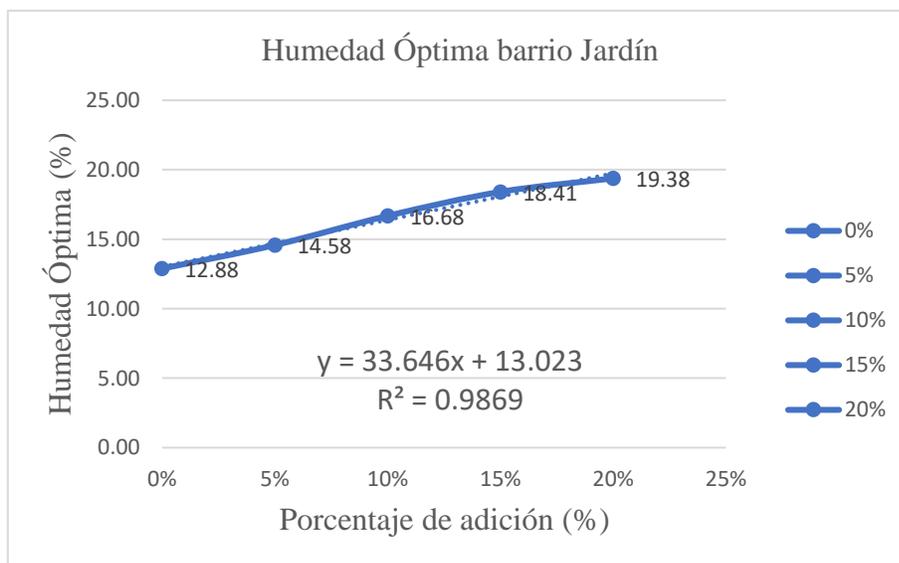
presencia de humedad, de esta manera se consultó con el encargado que nos proporcionó el aditivo para saber sobre el porqué de la situación, y de esta forma nos dijo que es por la necesidad de aumentar la cantidad de agua para la reacción química que debe tener el ligante hidráulico para su accionar en el suelo, de esta manera se tuvo los siguientes resultados:

Gráfico 58. Humedad óptima barrio Jardín.



Fuente: Elaboración propia

Gráfico 59. Tendencia humedad óptima barrio Jardín.

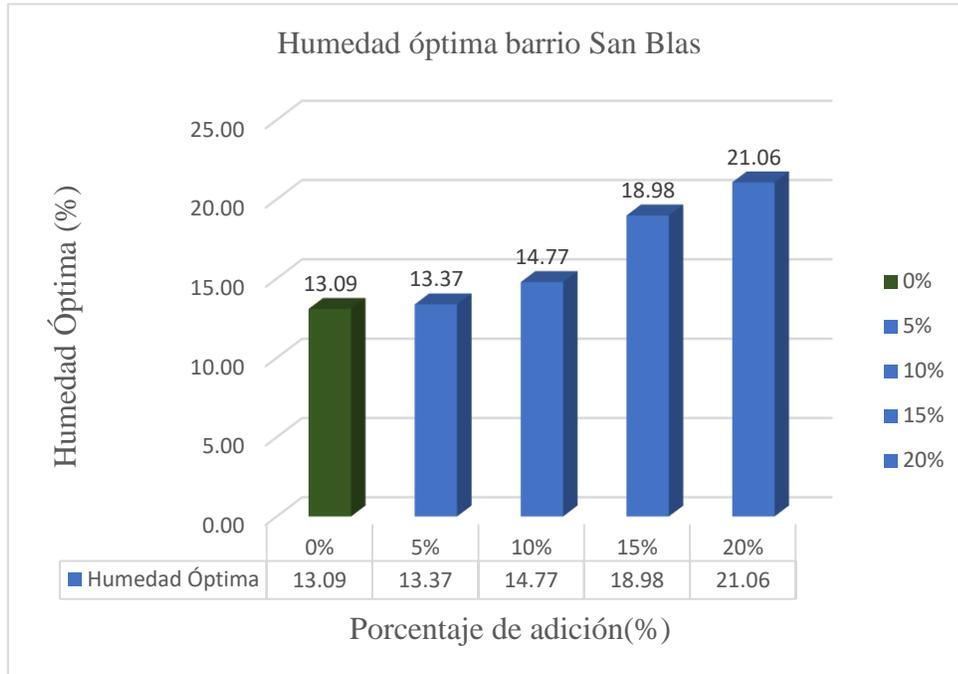


Fuente: Elaboración propia.

$$y = 33.646 * x + 13.023$$

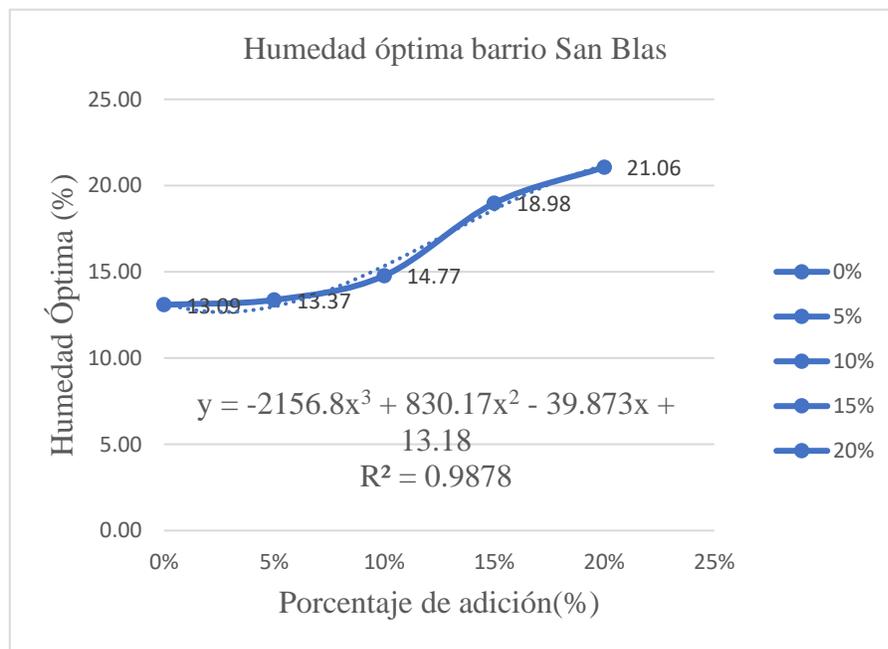
De la misma manera se realizó para el suelo del barrio San Blas:

Gráfico 60. Humedad óptima barrio San Blas.



Fuente: Elaboración propia

Gráfico 61. Tendencia humedad óptima barrio San Blas.



Fuente: Elaboración propia

$$y = -2156.8 * x^3 + 830.17 * x^2 - 39.873 * x + 13.18$$

Como observamos la ecuación obtenida de la humedad óptima del suelo del barrio Jardín, tenemos una tendencia lineal de las humedades óptimas, esto nos dice que a mayor porcentaje de adición se necesita mayor porcentaje de humedad para la reacción química del aditivo ligante hidráulico, pero también se observa que al porcentaje de 20% de adición en la humedad óptima sigue en evolución pero en la densidad máxima tiene un descenso, es decir que la humedad sigue ayudando a reaccionar químicamente al ligante hidráulico, pero no aporta nada a la compactación del suelo, y eso reduce la densidad máxima del suelo.

De la misma manera sucede con la tendencia que tiene el suelo del barrio San Blas, aunque esta no representa una tendencia lineal, pero si una ecuación de 3er grado, de igual manera se tiene un aumento a mayor porcentaje de adición, pero también se tiene la misma observación que el suelo del barrio Jardín que al 20% de adición se tiene un descenso de la densidad máxima.

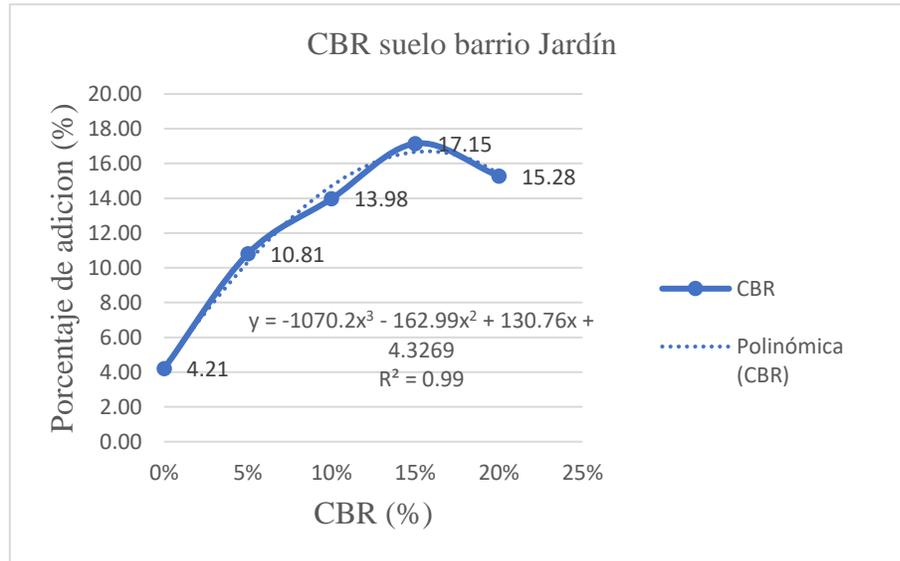
4.2.5. California Bearing Ratio

Para el ensayo CBR se tiene que los valores obtenidos, los cuales son procesados estadísticamente en el capítulo siguiente tiene como aditivo el ligante hidráulico aplicado en los porcentajes de 5%, 10%, 15%, 20%, el cual tiene el siguiente comportamiento:

Gráfico 62. CBR suelo barrio Jardín.



Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 63. Tendencia de ensayo CBR suelo del barrio Jardín.

Fuente: Elaboración propia.

Se tiene la ecuación obtenida por los resultados de los ensayos:

$$y = -1070.2 * x^3 - 162.99 * x^2 + 130.76 * x + 4.3269$$

Donde:

X= Porcentaje de adición (%)

Y= CBR máximo (%)

De la ecuación anterior se obtendrá el porcentaje óptimo de adición:

$$x = 15.73\%$$

Con este valor se encontrará el CBR máximo:

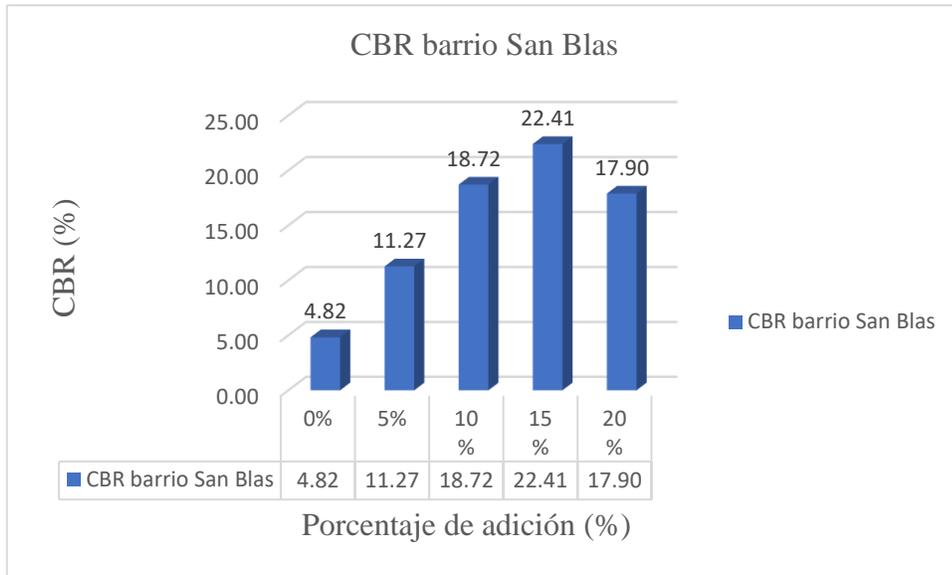
$$y = -1070.2 * x^3 - 162.99 * x^2 + 130.76 * x + 4.3269$$

$$y = 16.70\%$$

De esta manera tenemos que el valor máximo de CBR para el suelo del barrio Jardín es de 16.70% con un porcentaje óptimo de adición de 15.88%, luego de este valor se comienza a bajar el CBR máximo donde ya no es necesario la adición del ligante hidráulico.

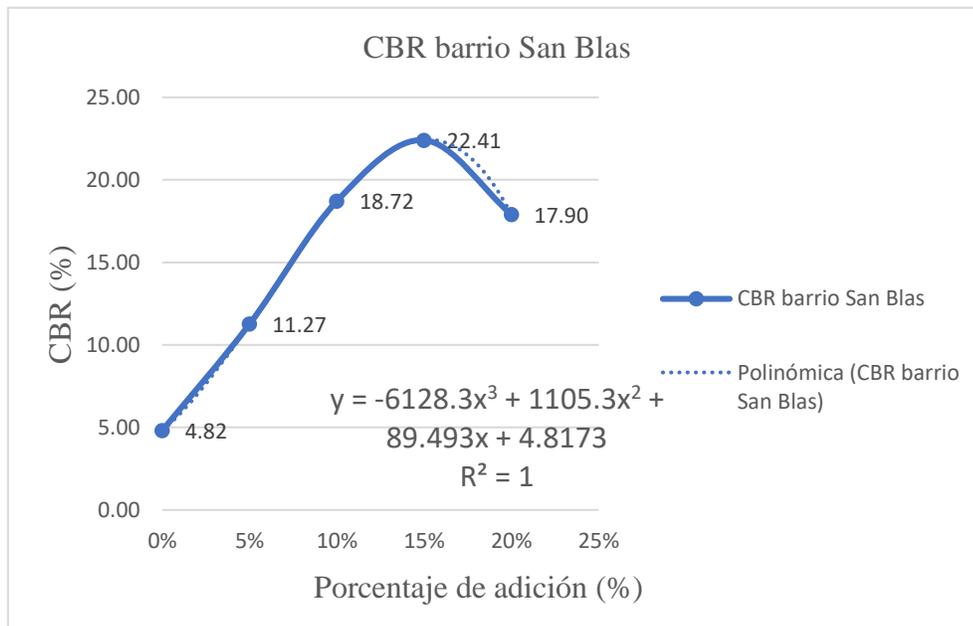
De la misma manera se procedió para el suelo del barrio San Blas:

Gráfico 64. CBR barrio San Blas.



Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 65. Tendencia CBR barrio San Blas.



Fuente: Elaboración propia.

Se tiene la ecuación obtenida por los resultados de los ensayos:

$$y = -6128.3 * x^3 + 1105.3 * x^2 + 89.493 * x + 4.8173$$

Donde:

X= Porcentaje de adición (%)

Y= CBR máximo (%)

De la ecuación anterior se obtendrá el porcentaje óptimo de adición:

$$x = 15.22\%$$

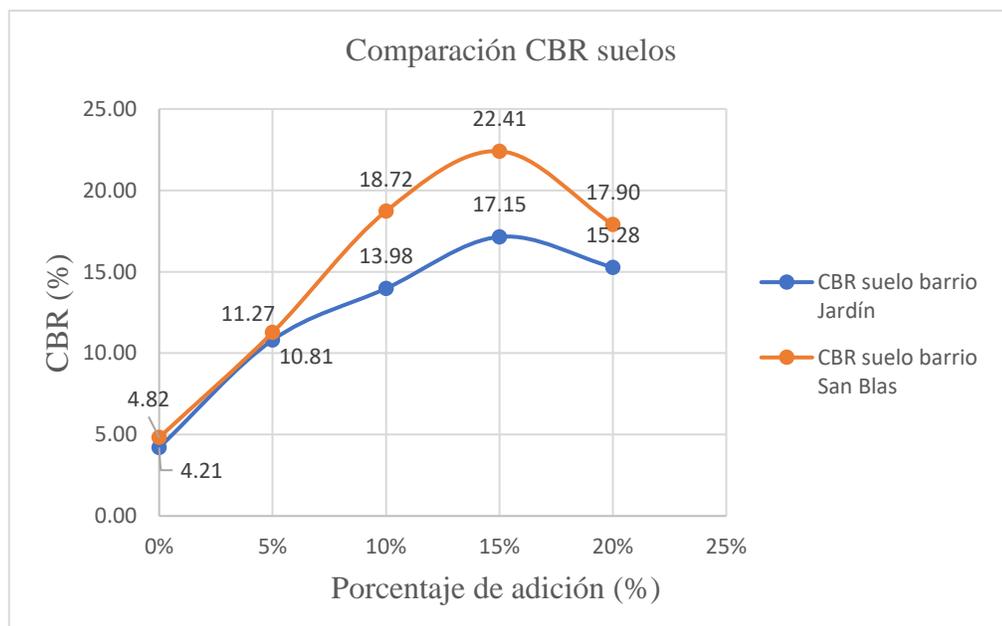
Con este valor se encontrará el CBR máximo:

$$y = -6128.3 * x^3 + 1105.3 * x^2 + 89.493 * x + 4.8173$$

$$y = 22.44 \%$$

De esta manera tenemos que el valor máximo de CBR para el suelo del barrio Jardín es de 22.44 % con un porcentaje óptimo de adición de 15.22 %, luego de este valor se comienza a bajar el CBR máximo donde ya no es necesario la adición del ligante hidráulico.

Gráfico 66. Comparación CBR suelos barrio Jardín y San Blas.



Fuente: Elaboración propia.

Comparando los CBR de ambos suelos, podemos ver que se tiene una diferencia en el aumento del valor del mismo, es así que el suelo del barrio San Blas el cual es un tipo

de suelo de alta plasticidad CH según SUCS, es el que tiene mayor aumento que el suelo del barrio Jardín que es un suelo de baja plasticidad CL.

Como sabemos según teoría, el CBR ayuda a determinar qué tan bien puede soportar un suelo o material el peso de las estructuras o vehículos que pasarán sobre él. Esto es esencial para diseñar carreteras, pavimentos y otras estructuras de manera segura y eficiente.

Además, que, en la construcción de carreteras y pavimentos, el CBR se utiliza para diseñar las capas de material que se necesitan para soportar las cargas esperadas. Un suelo con un CBR alto puede requerir menos capas o materiales más finos en comparación con un suelo con un CBR bajo.

Entonces conocer el CBR de un suelo permite a los ingenieros y constructores estimar los costos asociados con la preparación del terreno y los materiales necesarios. Esto puede influir en las decisiones de diseño y en la selección de métodos de construcción más económicos y eficientes.

Con esto podemos concluir que un CBR bajo indica que el suelo tiene una capacidad de carga deficiente, lo que podría llevar a problemas como hundimientos o deformaciones en la superficie construida. Evaluar el CBR ayuda a prevenir estos problemas mediante la selección de soluciones adecuadas.

Se tiene una tabla donde se observa la especificación de un valor CBR para subrasante:

Tabla 77. Clasificación de suelo según valor CBR.

CBR (%)	Clasificación cualitativa del suelo	Uso
2 - 5	Muy mala	Subrasante
5 - 8	Mala	Subrasante
8 - 20	Regular	Subrasante
20 - 30	Excelente	Subrasante
30 - 60	Buena	Subbase
60 - 80	Buena	Base
80 - 100	Excelente	Base

Fuente: Elaboración propia.

Según la tabla anterior podemos concluir que el valor CBR de ambos suelos en estado natural, tanto del barrio Jardín como del barrio San Blas con los valores de 4.21% y

4.82% respectivamente, los cuales los podemos clasificar cualitativamente como suelo “Muy Malo” para subrasante, se pudo aumentar su valor CBR con el ligante hidráulico y llevarlo a los valores óptimos para el barrio Jardín y el barrio San Blas con los valores CBR de 16.70% y 22.44% respectivamente, donde podemos clasificar al suelo mejorado del barrio Jardín a “Regular” para subrasante, y al suelo del barrio San Blas como “Excelente” para subrasante, de esta manera se tiene que el aumento es muy favorable para los suelos aplicados, ya que son más aptas para su aplicación en subrasantes y se pueda tener mejores resultados en la construcción de carreteras, además de optimizar costos ya que las siguientes capas no serán de gran espesor para su construcción y compensar la resistencia requerida para cierto tipo de carretera según el diseño que se deba tener.

4.3. Prueba de hipótesis

4.3.1. Prueba de “t de student”

- Hipótesis de la investigación

“Si se añade ligante hidráulico AGROVIAL a los suelos arcillosos estos mejorarán su valor CBR”

Se supone:

$$H_0 = CBR_{NAT} \geq CBR_{NAT+ADI}$$

$$H_1 = CBR_{NAT} \leq CBR_{NAT+ADI}$$

Donde:

H_0 =Hipótesis nula

H_1 =Hipótesis alternativa

CBR_{NAT} = CBR suelo natural

$CBR_{NAT+ADI}$ = CBR suelo natural + aditivo

- Estadístico de prueba:

$$t = \frac{CBR_{NAT} + CBR_{NAT+ADI}}{\sqrt{\frac{S_c^2}{n_1} + \frac{S_c^2}{n_2}}}$$

Donde:

t = Estadístico t calculado

CBR_{NAT} , $CBR_{NAT+ADI}$ = Medias muestrales

S_c^2 = Varianza común

n_1 , n_2 = Numero de muestras

- Varianza común:

$$S_c^2 = \frac{(n_1 - 1) * S_1^2 + (n_2 - 1) * S_2^2}{n_1 + n_2 - 2}$$

Donde:

S_1^2 , S_2^2 = Varianza muestral

- Grados de libertad:

$$Gl = (n_1 + n_2 - 2)$$

- Nivel de significancia:

$$\alpha = 5\% = 0.05$$

- Valor critico:

Se rechaza la hipótesis nula (H_0) si:

$$t > t_{(1-\frac{\alpha}{2}), (n_1+n_2-2)}$$

- Procedimiento de cálculo:

Se tabula los resultados de los ensayos CBR para obtener resultados posteriores que ayuden a identificar si la hipótesis nula o alternativa es la aceptada:

Tabla 78. Resultados CBR de suelos en estado natural.

	CBR suelo barrio San Blas	CBR suelo barrio Jardín
Estado natural	4.82%	4.21%

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 79. Resultados del ensayo CBR de suelo + aditivo.

	N°	Porcentajes de adición (%)	CBR (%)
Suelo barrio Jardín	1	5	10.82
	2		10.85
	3		10.77
	4		10.79
	1	10	13.98
	2		14.05
	3		13.95
	4		13.92
	1	15	17.15
	2		17.11
	3		17.19
	4		17.13
	1	20	15.27
	2		15.31
	3		15.25
	4		15.27
Suelo barrio San Blas	1	5	11.24
	2		11.31
	3		11.25
	4		11.28
	1	10	18.72
	2		18.75
	3		18.71
	4		18.69
	1	15	22.41
	2		22.45
	3		22.39
	4		22.38
	1	20	17.86
	2		17.92
	3		17.95
	4		17.89

Fuente: Elaboración propia.

Demostraremos el método de cálculo con los resultados de la muestra de suelo del barrio San Blas + el aditivo ligante hidráulico al 5%:

- Medias muestrales:

$$CBR_{NAT} = 4.82 \%$$

$$CBR_{NAT+ADI} = 11.27 \%$$

- Numero de muestras:

$$n_1, n_2 = 4$$

- Varianza muestral:

$$S_1^2 = 0.00$$

$$S_2^2 = 0.001$$

- Varianza común:

$$S_c^2 = 0.0005$$

- Estadístico de prueba:

$$t = -407.93$$

- Grados de libertad:

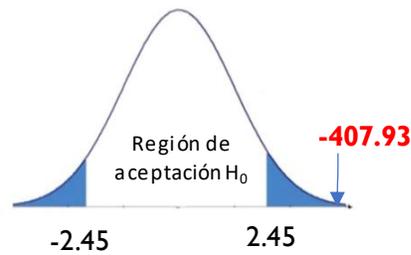
$$Gl = 6$$

- Nivel de significación:

$$\alpha = 5\%$$

- Valor crítico:

$$t_{(1-\frac{\alpha}{2}), (n_1+n_2-2)} = 2.45$$

Gráfico 67. Curva de Gauss.

Fuente: Elaboración propia.

4.3.2. Conclusión de la prueba de hipótesis

Como conclusión de todas las pruebas realizadas para cada porcentaje de aditivo para nuestro suelo arcilloso, se tiene que la hipótesis nula es rechazada y se acepta la hipótesis alternativa, es decir, que se confirma nuestra hipótesis planteada de que el ligante hidráulico produce una mejora en el valor de CBR en todos los porcentajes dados, la única observación es en el porcentaje de 20% donde se tiene una caída en el valor de CBR en ambos suelos, el cual nos dice que en este punto ya no es necesario el aumento de 20% ya que con un porcentaje mayor se puede llegar al mismo CBR.

4.4. Precio unitario de conformación de subrasante

Para el análisis de precios unitarios se optó por analizar por m³ de producción de aditivo para combinarlo con suelo, tomando en cuenta del porcentaje óptimo de adición, y con esto se obtendrá el costo de obtención del aditivo y además los costos de recolección, traslado y la puesta en obra del mismo.

Para una mayor comprensión, se optó por realizar una tabla con el total de precios unitarios, de esta manera el modelo del formulario de precios unitarios B-2 se encuentra en el apartado de anexos.

Tabla 80. Precio unitario por m3 de aplicación.

Suelo arcilloso + ligante hidráulico	
Descripción	
1.- Materiales	
Total materiales:	17.1
2.- Mano de obra	
Total mano de obra:	8.70
3.- Equipo maquinaria y herramienta	
Total equipo maquinaria y herramienta:	35.63
4.- Gastos generales	
Total gastos generales:	9.21
5.- Utilidad	
Total utilidades:	7.06
6.- Impuestos	
Total impuestos:	2.40
Total precio unitario:	80.10

Fuente: Elaboración propia.

4.5. Análisis de factibilidad

Para el análisis de factibilidad como anteriormente mencionamos que este trabajo se centra principalmente en el mejoramiento de suelos, donde podemos decir que efectivamente dicho material si aporta una mejoría al suelo en cuanto al valor de CBR, el aumento es un tanto significativo, ya que en el suelo del barrio San Blas clasificado como un suelo CH, aumento su valor en 17.59% y del barrio Jardín que está clasificado como un suelo CL en 12.94%, de esta manera llevo a que estos suelos tengan una mejor calificación en cuanto a subrasante se refiere.

De esta manera mencionar que este material es factible para ser aplicado en subrasantes donde se necesite un mejoramiento y que puedan ser carreteras primarias, caminos rurales, suelos agrícolas, caminos peatonales, donde previa identificación de un suelo con un valor bajo de subrasante, se necesite su mejoramiento.

4.6. Especificaciones técnicas

- **Definición: Mejoramiento de una subrasante**

Este ítem comprende el mejoramiento de una subrasante o terraplén que se compruebe mediante ensayos previos sea un suelo de tipo arcilloso, que puede ser, tanto de alta plasticidad como de baja plasticidad, o también de un suelo arcilloso tipo A-6 o A-7, esto con la finalidad de dar a conocer las clasificaciones mediante el método SUCS y AASHTO aplicables a este ítem.

Este mejoramiento de CBR en un suelo tipo CL será de 13%, y en un suelo CH será de 18% aproximadamente en ambos casos, este caso se dará al utilizar el porcentaje óptimo de adición de 15% de ligante hidráulico AGROVIAL, esto para mejorar su condición para una construcción de una subrasante o también considerado para un terraplén. Este ítem además mostrara la aplicación y conformación de una subrasante mejorada para que sea considerada como fundación para la construcción de una carretera.

- **Materiales, herramientas y equipo:**

Los materiales requeridos para la ejecución de este ítem son:

- ✓ Ligante hidráulico AGROVIAL

El equipo necesario para la ejecución de este ítem es:

- ✓ Pala cargadora
- ✓ Motoniveladora
- ✓ Compactador rodillo liso
- ✓ Camión Cisterna
- ✓ Volqueta

Las herramientas necesarias para la ejecución de este ítem:

En forma general todos los materiales que el Contratista se propone emplear en estos mejoramientos serán algunas herramientas menores como palas, picos, etc.

- **Procedimiento para la ejecución:**

Después de haber obtenido el sitio de mejoramiento o tramo de mejoramiento según resultados de ensayos previos al suelo, se determinará la cantidad de aditivo necesario para el mejoramiento de suelo con la fórmula que sigue:

Calculo total de AGROVIAL:

$$N^{\circ} \text{ de bolsas AGROVIAL} = \frac{(L * E * A) * 1.9 * (P\%)}{50}$$

Donde:

L= Largo total del tramo (metros)

E= Espesor del tramo en metros (espesor mínimo 0.20 metros para todas las aplicaciones a excepción de caminos peatonales que corresponde 0.10 metros)

A= Ancho del tramo (metros)

P= Porcentaje necesario de AGROVIAL para el tratamiento (%)

Pasos para la conformación y mejoramiento de la subrasante

1.- Analizar visualmente de las características del lugar y el suelo a tratar. Cálculo de la cantidad de Agrovial y el tiempo necesario para las tareas de colocación.

2.- Preparación del terreno. Limpieza de la cubierta orgánica y retiro de raíces, ramas, escombros y piedras grandes.

3.- Remover el suelo de la zona a tratar en la profundidad y el ancho necesario en el proyecto.

4.- Distribuir las bolsas de Agrovial en el terreno, de acuerdo a la dosificación recomendada para el tipo de aplicación y el suelo del lugar.

5.- Mezclar el suelo con Agrovial en todo el espesor, mediante rastra o motoniveladora, hasta lograr una mezcla de color uniforme.

6.- proporcionar la humedad necesaria para la conformación de la capa a mejorar para lo cual se hace una bola de la mezcla de suelo y Agrovial, si esta no se desmorona y no se pega en las manos, hemos logrado una humedad adecuada para compactar. Si no se

alcanzó este punto incorpore agua y mezcle repitiendo la operación de comprobación de la humedad.

7.- Mezclar el material humedecido hasta lograr un color uniforme.

8.- Nivelar para preparar la superficie para la compactación. Compactar la mezcla para alcanzar la densidad esperada (al menos 4 pasadas del compactador).

9.- Nivelar y regar con agua. Repetir la operación de riego durante los 7 días posteriores.

- **Medición:**

El mejoramiento de suelos con el aditivo ligante hidráulico AGROVIAL será medida en m^3 , considerando el espesor de subrasante que se tendrá que mejorar, el ancho de la plataforma, y además el largo del tramo o rango de progresivas que se tendrá en cuenta para el mejoramiento.

- **Forma de pago:**

El pago por este ítem se hará por el precio de m^3 que será adjuntado en el formulario de precios unitarios.

CAPITULO V

CONCLUSIONES Y

RECOMENDACIONES

CAPITULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones

- Como ventajas del mejoramiento del suelo arcilloso con ligante hidráulico AGROVIAL mencionaremos que este material si mejora las propiedades mecánicas del suelo de alta plasticidad y de baja plasticidad, en este caso recalcaremos nuestra variable CBR, que si tiene un aumento significativo, incluso le da una nueva clasificación, al suelo, haciéndolo más apto para su uso como subrasante, también su aplicación es fácil, ya que en laboratorio es notoria la adherencia al suelo, donde se siente el aumento de la rugosidad al tacto, y al realizar el compactado del material, se siente la dureza del mismo a medida que se va aumentando el aditivo.
- Como desventajas del mejoramiento del suelo con el ligante hidráulico AGROVIAL se tiene que la obtención del material se la realiza en el país vecino de Argentina lo que hace su aplicación difícil de realizar, ya que para aplicarlo se necesitaría un traslado de material en grandes cantidades lo que significaría un aumento económico significativo, lo que haría la aplicación de este producto no factible, ya que se tiene en nuestro medio el cemento, el cual es también un mejorador de suelos que se necesita incluso en menores cantidades, de esta manera se tiene una desventaja económica la cual haría descartar el uso de este material al menos para su utilización en subrasantes de carreteras primarias.
- En cuanto a los límites de Atteberg podemos decir que el aditivo ligante hidráulico AGROVIAL aporta a reducir la plasticidad del suelo, es decir que obviamente hacen que existe menor presencia de arcilla en el suelo y esta a su vez hace que su expansión sea menor, de esta manera se reduce el límite líquido y aumenta el límite plástico, y por tanto el índice de plasticidad se reduce, aportando mayor estabilidad y menos deformabilidad en el suelo.
- En el ensayo de compactación se tiene que el aditivo aporta a que su densidad máxima aumente, es por esto que también se reduce la cantidad de vacíos en el suelo, dando al suelo mayor impermeabilidad y mayor resistencia del mismo,

entonces esto tendrá un efecto en el valor de CBR, ya que es necesario tener estos valores para llegar a realizar dicho ensayo.

- Como se mencionó anteriormente que el ligante hidráulico tiene un efecto positivo en el valor de CBR, se llega hasta un valor de 17.59 % en un suelo arcilloso de alta plasticidad tipo CH o tipo A-7-6, este valor de aumento de CBR es independiente de su valor inicial de CBR, es decir de su valor CBR del suelo en estado natural, y además se tiene un aumento de 12.94 %, en un suelo tipo CL de baja plasticidad o A-6, también independiente de su CBR en estado natural. De estos valores podemos concluir que el ligante hidráulico actúa de mejor manera en un suelo tipo CH, el cual es un suelo más caótico en cuanto a su tratamiento se refiere, ya que este suelo es el que da más problemas de contracción y expansión al momento de su interacción con el agua, es de esta manera que se concluye con que el ligante hidráulico actúa de mejor manera en un suelo tipo CH, y está muy recomendado para este tipo de suelo, ya que particularmente para el proyecto, el suelo en estado natural tipo CH, tenía una clasificación de uso en subrasante de “mala”, y con el ligante hidráulico paso a ser un suelo para subrasante “excelente”.
- Finalmente, para la factibilidad técnica, se tiene que es un aditivo que actúa mejorando tanto un suelo arcilloso de baja plasticidad como de alta plasticidad, actuando de una manera que se llega desde una clasificación “mala” a una clasificación “buena o excelente”, entonces de esta manera se puede decir que técnicamente, este aditivo ligante hidráulico AGROVIAL, es factible para su aplicación en este tipo de suelos donde se necesite su mejoramiento en subrasantes.
- Además de lo mencionado anteriormente, nos atreveríamos a concluir que en otros tipos de suelos como los limosos arcillosos, por ejemplo, se puede tener buenos resultados, ya que, según la ficha técnica de la empresa, este aditivo se puede mezclar con suelos agrícolas, los cuales contienen buena cantidad de limo, y además de ser suelos orgánicos, entonces según este dato, se podría también obtener buenos resultados con este ligante aplicado a estos tipos de suelos.

5.2. Recomendaciones

- Se recomienda tener cuidado a la hora de extracción de la muestra del suelo para realizar los ensayos necesarios de caracterización del suelo y no haya un error posterior a la hora de realizar dicha clasificación del suelo del tramo de investigación.
- Se recomienda tener todo el equipo necesario a la hora de realizar los ensayos de laboratorio, tanto como los ensayos de caracterización del suelo como los ensayos de CBR y una piscina de saturación.
- Se debe tener en cuenta la cantidad de agua para la mezcla en cada variación de dosificación de acuerdo a su contenido de humedad óptimo para cada mezcla de suelo con ligante hidráulico.
- Se debe tomar en cuenta la disponibilidad de los materiales a utilizar como aditivos ya que no en cualquier lugar se encontrará los mismos, la elección del aditivo a utilizar tendrá mucha influencia en el costo.
- Tener en cuenta la norma que rige en nuestro país de ensayos de materiales para poder tener resultados fiables y realizar una buena adición de los aditivos al suelo que requiere el aumento de CBR.
- Tanto en los ensayos como en la construcción de una subrasante, tener en cuenta la distribución de partículas de los aditivos, ya que este factor es muy importante para lograr la estabilización deseada, ya que una mala distribución.