



**UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL**



**EVALUACIÓN EXPERIMENTAL DE LA INFLUENCIA DEL SUBPRODUCTO
INDUSTRIAL *DREGS* EN LAS PROPIEDADES GEOTÉCNICAS DE SUBBASES DE
CAMINOS FORESTALES EN LA REGIÓN DEL BIOBÍO**

POR

Pedro Ignacio Andía Vargas

Memoria de Título presentada a la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Concepción para
optar al título profesional de Ingeniero Civil

Profesor Guía
Luis Merino

Profesor Comisión
Daniella Escribano

16 de abril de 2026
Concepción (Chile)

© 2026 Pedro Ignacio Andía Vargas

© 2026 Pedro Ignacio Andía Vargas

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo la cita bibliográfica del documento.

DEDICATORIA

Este trabajo está dedicado a mis padres Dina y Pedro, quienes con mucho esfuerzo me han entregado todo para culminar esta etapa formativa.

Además, agradecer a mis hermanos quienes son mi inspiración y por brindarme siempre su apoyo y cariño.

A mis amigos, por sus risas, apoyo y paciencia durante esta etapa universitaria.

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, agradecer a la Compañía Manufacturera de Papeles y Cartones (CMPC) Celulosa S.A. por la facilitación del subproducto industrial *Dregs* y los suelos estudiados en la presente investigación.

Agradecer también al Laboratorio de Mecánica de Suelos de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Concepción por permitir el uso de las instalaciones y equipos, además, agradecer a los laboratoristas Sr. Alex González y Sr. Alex Muñoz por su disposición, paciencia, enseñanza y ayuda brindada en el desarrollo experimental de mi estudio.

Agradezco a mi profesor guía y jefe de Laboratorio de Hormigones de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Concepción, Sr. Luis Merino, por su gestión, confianza, apoyo, paciencia, y disposición durante este proceso.

Finalmente, agradecer a la profesora perteneciente a la comisión evaluadora, profesora Dra. Daniella Escribano del Departamento de Ingeniería Civil, por sus comentarios y tiempo dedicado a la lectura de mi trabajo.

RESUMEN

La industria de la celulosa genera anualmente grandes cantidades del residuo inorgánico *Dregs*, cuyo almacenamiento y disposición representan un desafío ambiental. En paralelo, los caminos forestales no pavimentados sufren de un rápido deterioro frente a las exigencias operativas. En este contexto, la presente investigación tiene como objetivo evaluar experimentalmente la viabilidad de utilizar el subproducto industrial *Dregs* como material estabilizador en subbases de caminos forestales en la Región del Biobío.

Para ello, se analizó el desempeño físico y mecánico de cuatro suelos base proveniente de distintos fundos (Los Barros, Nihuinco, Totoras S3 y El Encanto II). Estos materiales fueron evaluados tanto en su estado natural como en mezclas con adiciones de *Dregs* en proporciones del 5 % y 10 % respecto al peso seco. La metodología experimental contempló ensayos normados de granulometría, límites de consistencia, Proctor Modificado y Razón de Soporte de California (CBR).

Los resultados demostraron que la incorporación de *Dregs* altera de desfavorable la plasticidad de los materiales, el Índice de Plasticidad (IP) aumentó en los predios Totoras S3 (de 16 % a 23 %) y Nihuinco (de 7 % a 13 %), mientras que El Encanto disminuyó de un 23 % a un 14 %. En términos de compactación (Proctor Modificado), la adición del 10 % de *Dregs* provocó una reducción de la Densidad Máxima Compactada Seca (DMCS) en la mayoría de los suelos, bajando de 1,86 a 1,82 g/cm³ en Los Barros, y de 1,68 a 1,63 g/cm³ en Totoras S3. La única excepción fue el suelo Nihuinco, caracterizado por una baja densidad inicial, la cual permitió un aumento de la DMCS de 1,00 a 1,06 g/cm³ gracias a un efecto de relleno (*filler*).

Mecánicamente, los ensayos de Razón de Soporte de California (CBR) evidenciaron que la adición del subproducto genera una caída abrupta en la capacidad de soporte de la mayoría de los suelos en condición saturada, siendo nuevamente Nihuinco el único capaz de amortiguar el impacto y mantener una resistencia estable. Los Barros cayó de un 28 % a un 10 %, Totoras de un 12 % a un 5 %, y El Encanto bajó críticamente de un 11 % a un 3 %, en tanto Nihuinco, mantuvo un CBR estable de 24 % a 22 %. En conclusión, los ensayos realizados permitieron establecer que la incorporación del subproducto industrial *Dregs* no constituye una técnica de mejora estructural viable para los suelos analizados, debido a la comprobada disminución en su capacidad de soporte y a las alteraciones desfavorables en su comportamiento plástico.

ABSTRACT

The cellulose industry annually generates large quantities of the inorganic waste Dregs, whose storage and disposal represent an environmental challenge. In parallel, unpaved forest roads suffer from rapid deterioration due to operational demands. In this context, the present research aims to experimentally evaluate the feasibility of using the industrial byproduct Dregs as a stabilizing material in forest road subbases in the Biobío Region.

To this end, the physical and mechanical performance of four base soils from different estates (Los Barros, Nihuinco, Totoras S3, and El Encanto II) was analyzed. These materials were evaluated both in their natural state and in mixtures with Dregs additions in proportions of 5% and 10% by dry weight. The experimental methodology included standardized tests for particle size distribution, consistency limits, Modified Proctor, and California Bearing Ratio (CBR).

The results demonstrated that the incorporation of Dregs unfavorably alters the plasticity of the materials; the Plasticity Index (PI) increased in the Totoras S3 (from 16% to 23%) and Nihuinco (from 7% to 13%) estates, while in El Encanto it decreased from 23% to 14%. In terms of compaction (Modified Proctor), the addition of 10% Dregs caused a reduction in the Maximum Dry Density (MDD) in most soils, dropping from 1.86 to 1.82 g/cm³ in Los Barros, and from 1.68 to 1.63 g/cm³ in Totoras S3. The only exception was the Nihuinco soil, characterized by a low initial density, which allowed an increase in MDD from 1.00 to 1.06 g/cm³ thanks to a filler effect.

Mechanically, the California Bearing Ratio (CBR) tests evidenced that the addition of the byproduct generates an abrupt drop in the bearing capacity of most soils in a saturated condition, with Nihuinco being once again the only one capable of buffering the impact and maintaining a stable resistance. Los Barros fell from 28% to 10%, Totoras from 12% to 5%, and El Encanto critically dropped from 11% to 3%, while Nihuinco maintained a stable CBR from 24% to 22%. In conclusion, the tests conducted made it possible to establish that the incorporation of the industrial byproduct Dregs does not constitute a viable structural improvement technique for the analyzed soils, due to the proven decrease in their bearing capacity and the unfavorable alterations in their plastic behavior.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN	1
1.1. Motivación	1
1.2. Objetivo general	2
1.3. Objetivos específicos.....	2
1.4. Alcance del estudio	2
1.5. Plan de trabajo	3
1.6. Principales resultados	3
1.7. Organización de la memoria de título	4
CAPÍTULO 2: EL PROCESO KRAFT, ORIGEN DEL SUBPRODUCTO <i>DREGS</i> Y SUS APLICACIONES EN LA INGENIERÍA CIVIL	5
2.1. Introducción	5
2.2. La industria forestal en Chile	5
2.3. <i>Dregs</i> su origen y características.....	10
2.4. Subproducto <i>Dregs</i> en aplicaciones ingenieriles	11
2.5. Estabilización de caminos	13
2.6. Conclusiones	14
CAPÍTULO 3: METODOLOGÍA.....	16
3.1. Introducción	16
3.2. Estrategia de experimentación	16
3.3. Materiales	18
3.3.1 Suelo.....	18
3.3.2 Subproducto industrial <i>Dregs</i> Santa Fe.....	18
3.4. Caracterización de suelos	20
3.4.1 Densidad de Partículas Sólidas	20
3.4.2 Análisis granulométrico	21
3.4.3 Contenido de humedad.....	23

3.4.4	Límite líquido.....	23
3.4.5	Límite plástico.....	24
3.4.6	Clasificación de suelos mediante el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos .	25
3.4.7	Clasificación de suelos mediante Sistema Revisado de Clasificación de Suelos	25
3.5.	Proctor Modificado	26
3.6.	Razón de Soporte de California	27
3.7.	Conclusiones	28
CAPÍTULO 4: RESULTADOS		29
4.1.	Introducción	29
4.2.	Propiedades Físico-Mecánicas de los suelos base.....	29
4.2.1	Densidad de partículas sólidas	29
4.2.2	Análisis granulométrico	30
4.2.3	Contenido de Humedad de los suelos	31
4.2.4	Límites de consistencia	31
4.2.5	Clasificación de suelos mediante el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos .	32
4.2.6	Clasificación de suelos mediante el Sistema Revisado de Clasificación de Suelos...	33
4.2.7	Proctor modificado	34
4.2.8	Razón de Soporte de California (CBR).....	37
4.3.	Propiedades Físico-Mecánicas del <i>Dregs</i>	37
4.3.1	Análisis Granulométrico	37
4.3.2	Límites de consistencia	38
4.3.3	Clasificación de suelos mediante el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos .	38
4.3.4	Proctor modificado	39
4.3.5	Razón de Soporte de California (CBR).....	40
4.4.	Propiedades Físico-Mecánicas de las mezclas Suelo– <i>Dregs</i>	40
4.4.1	Límites de consistencia Suelo– <i>Dregs</i>	41

4.4.2	Proctor modificado Suelo – <i>Dregs</i>	44
4.5.	Razón de Soporte de California (CBR) Suelo- <i>Dregs</i>	48
4.6.	Conclusiones	52
CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES.....		54
REFERENCIAS		56
ANEXO 1.1 CONTRIBUCIÓN A LOS OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE....		59
ANEXO 3.1 DENSIDAD DE PARTÍCULAS SÓLIDAS		60
ANEXO 3.2 ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO.....		62
ANEXO 3.3 LÍMITES DE CONSISTENCIA		64
ANEXO 3.4 SISTEMA UNIFICADO DE CLASIFICACIÓN DE SUELOS		67
ANEXO 3.5 SISTEMA REVISADO DE CLASIFICACIÓN DE SUELOS		69
ANEXO 3.6 PROCTOR MODIFICADO		72
ANEXO 3.7 RAZÓN DE SOPORTE DE CALIFORNIA		74
ANEXO 4.1 RESULTADOS ENSAYO RAZÓN DE SOPORTE DE CALIFORNIA		77

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 Tipos de residuos generados en un proceso de producción de pulpa Kraft	9
Tabla 2.2 Resumen de literatura científica de la aplicación del subproducto industrial <i>Dregs</i> en aplicaciones ingenieriles	12
Tabla 2.3 Resumen de literatura científica de la estabilización de caminos utilizando residuos.....	14
Tabla 3.1 Ensayos y normativas utilizadas	17
Tabla 4.1 Gravedad específica de los sólidos	29
Tabla 4.2 Granulometría suelos de estudio	30
Tabla 4.3 Contenido de Humedad de los suelos	31
Tabla 4.4 Límites de consistencia determinados para cada suelo	31
Tabla 4.5 Parámetros para clasificar los suelos mediante USCS	33
Tabla 4.6 Cálculo de Límites de Consistencia Avanzados	34
Tabla 4.7 Densidad Máxima Compactada Seca y Humedad Óptima para cada suelo en estado natural	34
Tabla 4.8 Resumen de resultados CBR de suelos naturales.....	37
Tabla 4.9 Límites de consistencia del <i>Dregs</i>	38
Tabla 4.10 Densidad Máxima Compactada Seca y Humedad Óptima del <i>Dregs</i>	39
Tabla 4.11 Resumen de resultados CBR del <i>Dregs</i>	40
Tabla 4.12 Límites de consistencia para las distintas dosificaciones de <i>Dregs</i> en cada suelo estudiado	41
Tabla 4.13 Densidad Máxima Compactada Seca y Humedad Óptima para las mezclas estabilizadas	45
Tabla 4.14 Resumen de resultados CBR para mezclas suelo- <i>Dregs</i>	49

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 Superficie de plantaciones forestales por región	6
Figura 2.2 Superficie de plantaciones forestales en la Región del Biobío	6
Figura 2.3 Proceso de producción de celulosa Kraft.....	7
Figura 2.4 Esquema general del proceso Kraft: Línea de celulosa y Línea de recuperación.....	8
Figura 2.5 Diagrama de flujo de la generación típica de residuos (kg/ADT)	9
Figura 3.1 Proceso experimental llevado a cabo en el laboratorio.....	17
Figura 3.2 Suelos proporcionados por CMPC para análisis (Procedencia de izq a der): Totoras (cód. 29285), Los Barros (cód. 29190), Nihuinco (cód. 29286), El Encanto II (cód. 29274).	18
Figura 3.3 <i>Dregs</i> al momento de la recepción en el laboratorio	19
Figura 3.4 <i>Dregs</i> luego del proceso de acondicionamiento	20
Figura 3.5 Proceso de extracción de aire de los picnómetros mediante bomba de vacío	21
Figura 3.6 Juego de tamices para análisis granulométrico.....	22
Figura 3.7 Proceso de lavado de suelos para determinar la cantidad de finos	22
Figura 3.8 Analizador de partículas por difracción laser	23
Figura 3.9 Muestras de suelos en horno para determinar su humedad	23
Figura 3.10 Ejecución del ensayo de Límite Líquido mediante el aparato de Casagrande.....	24
Figura 3.11 Bastones de suelos obtenidos tras el amasado para obtener el Límite Plástico.....	25
Figura 3.12 Compactación molde Proctor Modificado	26
Figura 3.13 Ensayo de penetración a probetas de CBR	28
Figura 4.1 Curva granulométrica de suelos naturales	30
Figura 4.2 Carta de Plasticidad de Casagrande	32
Figura 4.3 Curva de Proctor Modificado suelo Los Barros	35
Figura 4.4 Curva de Proctor Modificado suelo Nihuinco	35
Figura 4.5 Curva de Proctor Modificado suelo El Encanto	36
Figura 4.6 Curva de Proctor Modificado suelo Totoras S3.....	36
Figura 4.7 Curva de distribución de tamaño de partículas del <i>Dregs</i>	38
Figura 4.8 Carta de plasticidad de Casagrande para el <i>Dregs</i>	39
Figura 4.9 Curva de Proctor Modificado del <i>Dregs</i>	40
Figura 4.10 Límites de consistencia suelo Los Barros.....	41
Figura 4.11 Límites de consistencia suelo Nihuinco.....	42
Figura 4.12 Límites de consistencia suelo Totoras S3	43

Figura 4.13 Límites de consistencia suelo El Encanto.....	44
Figura 4.14 Curva de Proctor Modificado suelo Los Barros + %Dregs	45
Figura 4.15 Curva de Proctor Modificado suelo Nihuinco + %Dregs.....	46
Figura 4.16 Curva de Proctor Modificado suelo Totoras + %Dregs	47
Figura 4.17 Curva de Proctor Modificado suelo El Encanto + %Dregs	48
Figura 4.18 Porcentaje de CBR al 95 % y 100 % Los Barros.....	50
Figura 4.19 Porcentaje de CBR al 95 % y 100 % Nihuinco	50
Figura 4.20 Porcentaje de CBR al 95 % y 100 % Totoras S3.....	51
Figura 4.21 Porcentaje de CBR al 95 % y 100 % El Encanto.....	52

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

1.1. Motivación

La gestión de residuos industriales es uno de los principales desafíos que enfrenta la industria forestal chilena en su transición hacia un modelo más sostenible. En particular, la industria de la celulosa en Chile produce millones de toneladas de celulosa anualmente, lo que conlleva la generación de residuos inorgánicos, como el *Dregs*, derivado del proceso Kraft. Este subproducto presenta características fisicoquímicas que dificultan su disposición y uso final, provocando que se almacene en grandes acopios. Según Vargas (2022), la empresa CMPC S.A. produce aproximadamente 10 kilogramos de *Dregs* por cada tonelada de celulosa, lo que equivale a 41.000 toneladas anuales. Esta gran cantidad de residuo genera una necesidad urgente de explorar alternativas de uso para lograr darle valor y evitar su acumulación en rellenos industriales.

Paralelamente, la infraestructura vial rural en Chile enfrenta grandes desafíos. De acuerdo con el Ministerio de Obras Públicas (2023), más del 52% de la red vial nacional corresponde a caminos no pavimentados, lo que equivale a 45.000 kilómetros. Estas vías presentan problemas recurrentes de transitabilidad y pérdida de capacidad de soporte, especialmente en zonas con climas lluviosos y suelos de baja calidad. En este escenario adverso, los caminos forestales cumplen un rol vital para el transporte de materias primas, maquinaria pesada y servicios logísticos.

A nivel nacional, la Región del Biobío destaca como una de las zonas con mayor densidad de actividad forestal y celulósica del país. La región cuenta con un porcentaje significativo de las plantaciones forestales nacionales, con extensas redes de caminos de ripio y tierra utilizados intensamente durante las diferentes temporadas del año. La actividad de camiones de alto tonelaje provoca un rápido deterioro de estas rutas, elevando los costos de mantenimiento y afectando la eficiencia operativa de las forestales. En este contexto, la estabilización de suelos con residuos industriales como el *Dregs* surge como una alternativa innovadora y ambientalmente responsable. Esta propuesta plantea el doble propósito de explorar su potencial para mejorar las propiedades físico-mecánicas de los suelos viales, y simultáneamente reducir el volumen de residuos destinados a vertederos industriales.

Por lo anterior, la presente investigación busca evaluar la viabilidad del uso de *Dregs* como material estabilizador, aportando conocimiento técnico y experimental sobre el comportamiento real de

mezclas suelo-*Dregs*. Esto no solo contribuiría a reducir el impacto ambiental del sector celulósico, sino que también promovería soluciones de bajo costo para la infraestructura vial en zonas forestales. El Anexo 1.1 muestra la contribución de la Memoria de Título a los Objetivos de Desarrollo Sostenible.

1.2. Objetivo general

Evaluar experimentalmente la influencia de la incorporación del subproducto industrial *Dregs* en las propiedades geotécnicas de subbases de caminos forestales en la Región del Biobío.

1.3. Objetivos específicos

1. Establecer las propiedades físicas y mecánicas de los suelos en estado natural de las zonas de estudio y del subproducto *Dregs*.
2. Determinar las propiedades físicas y mecánicas de las mezclas suelo - *Dregs*
3. Evaluar la influencia del *Dregs* sobre la plasticidad, densidad compactada máxima seca y capacidad de soporte de los suelos.
4. Determinar las dosificaciones de adición más favorables para cada tipo de suelo, evaluando qué mezclas logran atenuar deficiencias sin perjudicar la capacidad de soporte.

1.4. Alcance del estudio

Este estudio se limitó a la evaluación experimental de la incorporación del subproducto industrial *Dregs* en las propiedades geotécnicas de subbases de caminos forestales. El análisis abarcó cuatro tipos de suelos de distintos fundos de la región del Biobío, evaluados en su estado natural y mediante mezclas con adiciones de *Dregs* al 5 % y 10 % en peso seco.

El campo experimental incluyó ensayos normalizados de granulometría, límites de consistencia, Proctor modificado y Razón de Soporte de California (CBR, por sus siglas en inglés), los cuales permitieron evaluar la influencia del subproducto industrial en las propiedades físicas y mecánicas de cada suelo.

Finalmente, el alcance de esta investigación se delimitó exclusivamente al análisis del desempeño físico y mecánico de los materiales. Por lo tanto, no consideró la construcción de tramos de prueba a escala real, análisis de costos a nivel constructivo, ni evaluaciones químicas o ambientales del residuo.

1.5. Plan de trabajo

El plan de trabajo se dividió en diferentes etapas orientadas a evaluar el potencial del *Dregs* como material estabilizante de subbases de caminos.

En primer lugar, se llevó a cabo un estudio de normativa técnica aplicable y revisión bibliográfica de autores nacionales e internacionales que han realizado estudios sobre el uso de *Dregs* y residuos industriales en estabilización de suelos, técnicas de mejoramiento de caminos no pavimentados y comportamiento mecánico de suelos tratados con aditivos.

En paralelo, en el laboratorio se acondicionaron las distintas muestras de suelo y subproducto, mediante el proceso de secado y tamizado.

Luego, se realizó la caracterización en estado natural tanto de los suelos como del *Dregs* aplicando ensayos de granulometría según la norma internacional ASTM D6913 (*American Society for Testing and Materials* [ASTM], 2017), límites de consistencia (límites líquido y plástico) de acuerdo con la NCh1517 (Instituto de Normalización Nacional [INN], 1979), compactación mediante el ensayo Proctor modificado de la NCh1534/2 (INN, 2008), y por último ensayo de CBR según la NCh1852 (INN, 2010).

Posterior a ello, se prepararon mezclas homogéneas de cada suelo con *Dregs* en proporciones del 5 % Y 10 % en peso seco, homogeneizándolas bajo condiciones controladas y replicando los ensayos de la etapa anterior.

Finalmente, se analizaron e interpretaron los resultados obtenidos en la evaluación del efecto del *Dregs* sobre cada tipo de suelo, con el objetivo de identificar tendencias en capacidad de soporte (CBR), variaciones en la densidad máxima seca y humedad óptima de compactación (Proctor modificado), así como los cambios en la plasticidad (límites de consistencia).

1.6. Principales resultados

En términos de propiedades físicas, la incorporación de *Dregs* alteró el comportamiento plástico de los suelos, incrementando su demanda hídrica. Durante los ensayos de compactación, en suelos de densidades normales a altas (Los Barros, Totoras S3 y Encanto 2), el aditivo redujo progresivamente la Densidad Máxima Compactada Seca (DMCS). En contraste, la incorporación del subproducto al

suelo Nihuinco, el cual está caracterizado por tener una baja densidad, afectó positivamente logrando incrementar su densidad máxima.

Respecto a las propiedades mecánicas, los ensayos de Razón de Soporte de California (CBR) evidenciaron que la adición de *Dregs* genera una caída abrupta en la capacidad de soporte de la mayoría de los suelos, mostrando además una alta susceptibilidad a la falla por sobrecompactación frente a exceso de energía en condición saturada. La única excepción fue el suelo Nihuinco, el cual, en coherencia con su mejora en densificación, logró amortiguar el impacto del aditivo y mantener valores de capacidad de soporte elevados y estables.

En síntesis, los resultados globales demostraron que el *Dregs* no constituye una alternativa viable para la mejora estructural de los suelos estudiados.

1.7. Organización de la memoria de título

Este documento se organiza en cinco capítulos. El segundo capítulo desarrolla el marco teórico, presentando antecedentes técnicos sobre el residuo industrial *Dregs*, su origen y características, así como conceptos fundamentales sobre la estabilización de suelos, métodos de mejoramiento mecánico y criterios normativos vigentes en Chile y en el extranjero. El tercer capítulo detalla la metodología experimental empleada en el Laboratorio de Suelos de la Universidad de Concepción, describiendo materiales utilizados, incluyendo la procedencia de los suelos y del residuo *Dregs*, así como los procedimientos de preparación de muestras, proporciones de mezcla, y los ensayos realizados para evaluar las propiedades geotécnicas de las distintas combinaciones. El cuarto capítulo presenta los resultados obtenidos a partir de las pruebas de laboratorio, organizado por tipo de material y ensayo, permitiendo identificar tendencias en el comportamiento de las mezclas suelo-*Dregs*. Finalmente, el quinto capítulo expone las conclusiones acerca de la investigación realizada.

CAPÍTULO 2: EL PROCESO KRAFT, ORIGEN DEL SUBPRODUCTO *DREGS* Y SUS APLICACIONES EN LA INGENIERÍA CIVIL

2.1. Introducción

Este capítulo muestra la relevancia de la industria forestal en Chile, con especial foco en la producción de celulosa mediante el proceso Kraft y la generación del residuo sólido conocido como *Dregs*. Se describe el origen y características de este subproducto, actualmente con bajo uso, pero con potencial para aplicación en temas de ingeniería de suelos y hormigones.

Asimismo, se destaca la importancia de los caminos forestales, esenciales para la producción de la región del Biobío, y se revisan técnicas tradicionales y alternativas de mejoramiento de suelos con diferentes residuos.

2.2. La industria forestal en Chile

La industria forestal en Chile es uno de los pilares del comercio exterior nacional no minero, con un fuerte realce en la exportación de productos como celulosa, madera aserrada, tableros y papel. Según datos oficiales del Instituto Forestal (INFOR) el año 2023 las exportaciones totales del sector forestal alcanzaron los USD 5.556 millones, mientras que las importaciones se situaron en USD 1.510 millones, generando un superávit comercial para el país. Durante el primer trimestre de 2025 las exportaciones chilenas alcanzaron USD 1.602,5 millones, lo que representa un crecimiento del 4,9 % respecto al mismo periodo del año anterior.

De acuerdo con información del INFOR, la pulpa química (celulosa) lideró las exportaciones con USD 904,9 millones, lo que representa el 56,5 % del total exportado en el trimestre. Chile es uno de los principales exportadores mundiales de celulosa blanqueada de fibra larga y corta, en cuanto a los destinos de exportación, China se consolidó como el principal mercado con compras por USD 607,2 millones, seguido por Estados Unidos con USD 288,4 millones y Países Bajos con USD 61,8 millones. Este liderazgo exportador no sólo destaca a nivel latinoamericano, sino que también posiciona a Chile como un proveedor de materia prima confiable para la industria del papel en los principales mercados internacionales. Empresas como CMPC S.A. y Arauco S.A. cuentan con plantas de celulosa de última generación que abastecen estas exportaciones, con una capacidad de exportación que superan al millón de toneladas anuales.

La región del Biobío se posiciona como la región con más actividad forestal del país en donde se concentra aproximadamente el 28 % de las plantaciones forestales del país, según cifras del INFOR (2024), lo que equivale a 631.788 hectáreas. Estas superficies están compuestas mayoritariamente por *Pinus Radiata*, seguido por *Eucalyptus globulus* y *Eucalyptus nitens*.

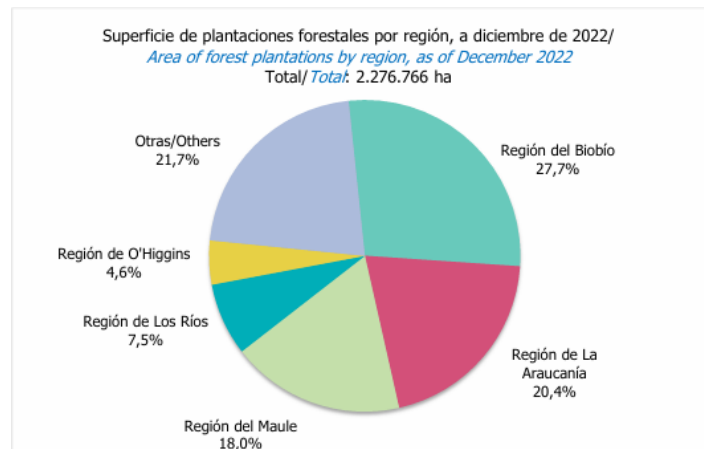


Figura 2.1 Superficie de plantaciones forestales por región

Fuente: INFOR (2024)

Región del Biobío

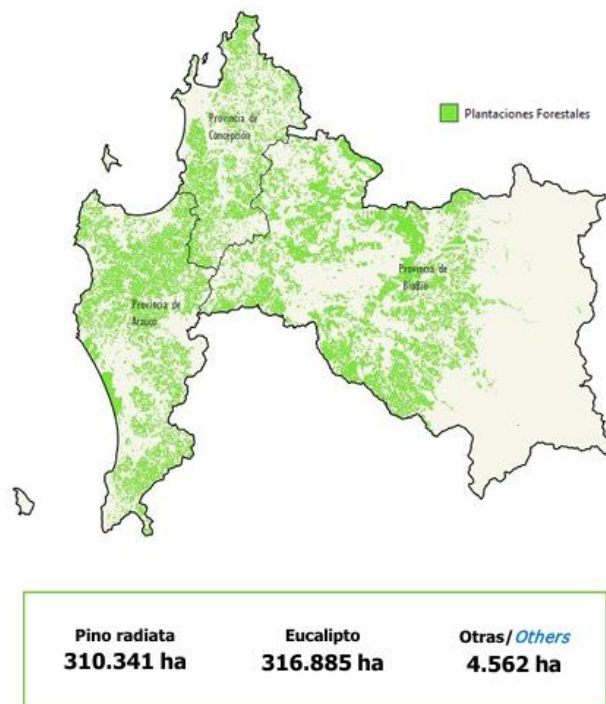


Figura 2.2 Superficie de plantaciones forestales en la Región del Biobío

Fuente: INFOR (2024)

El método más utilizado actualmente para la obtención de celulosa corresponde al método químico Kraft. Su amplia adopción se debe a la alta resistencia de la pulpa resultante, la capacidad del proceso para manejar prácticamente todas las especies de maderas blandas y duras, y la economía favorable gracias a una alta eficiencia de recuperación química. El proceso de cualquier empresa dedicada al rubro de la celulosa Kraft está compuesto por tres grandes áreas: línea de celulosa, línea de recuperación y línea de tratamiento de efluentes, siendo las primeras dos las principales.

Considerando que la madera posee una estructura fibrosa compuesta fundamentalmente por celulosa y lignina, el proceso en la línea de celulosa se inicia descortezando los troncos de madera y formando astillas o chips. Estas astillas son llevadas a digestores donde son sometidas a un proceso de cocción a alta temperatura y presión en presencia de una solución acuosa denominada licor blanco (mezcla de hidróxido de sodio, NaOH , y sulfuro de sodio, Na_2S) para solubilizar los componentes de la madera y poder recuperar la fibra de la celulosa y el licor negro, tal como se esquematiza en la Figura 2.3.

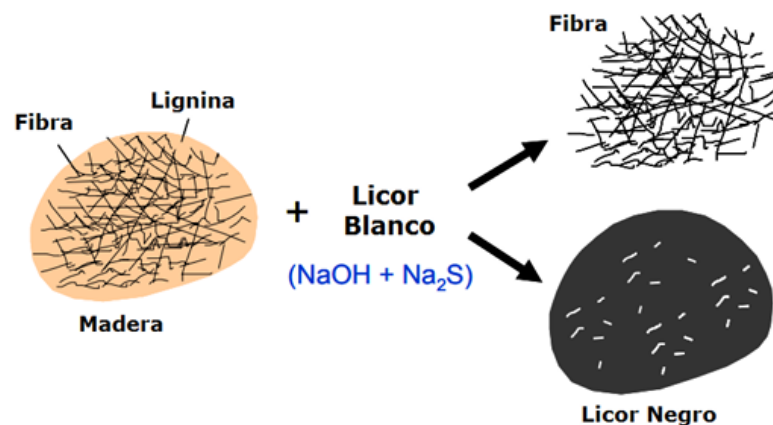


Figura 2.3 Proceso de producción de celulosa Kraft

Fuente: Meisenbichler (2020)

Del proceso de digestores se obtiene, por un lado, la pasta de celulosa pura, a la cual posteriormente se le remueve la humedad para conformar las planchas que forman el producto terminado. Por otro lado, se genera el denominado licor negro (lignina y licor blanco) que, debido a su alto poder calorífico se utiliza como combustible para generar energía eléctrica.

El propósito de la línea de recuperación es transformar el licor negro en licor blanco y lograr la calidad adecuada para que sea nuevamente utilizado en el proceso de cocción. Para ello, se toma la ceniza resultante de la combustión del licor negro, se le añade agua y con ello se obtiene el licor verde,

compuesto principalmente por carbonato de sodio (Na_2CO_3) y sulfuro de sodio (Na_2S). Por medio de varias operaciones de separación sólido-fluido, se obtiene licor verde clarificado. Es precisamente en esta etapa de clarificación donde se decantan y separan las impurezas sólidas insolubles, dando origen al residuo industrial protagonista en esta investigación. Una vez libre de estas impurezas, el licor verde clarificado se hace reaccionar con hidróxido de calcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) para formar hidróxido de sodio (NaOH), principal componente del licor blanco. Por otra parte, en esta etapa de caustificación se genera carbonato de calcio (CaCO_3) como subproducto, el cual se usa para alimentar un horno giratorio donde ocurre una reacción de calcinación para obtener nuevamente $\text{Ca}(\text{OH})_2$, cerrando el ciclo de recuperación de los reactivos.

En la Figura 2.4 se muestra un esquema general de las dos principales líneas del proceso Kraft.

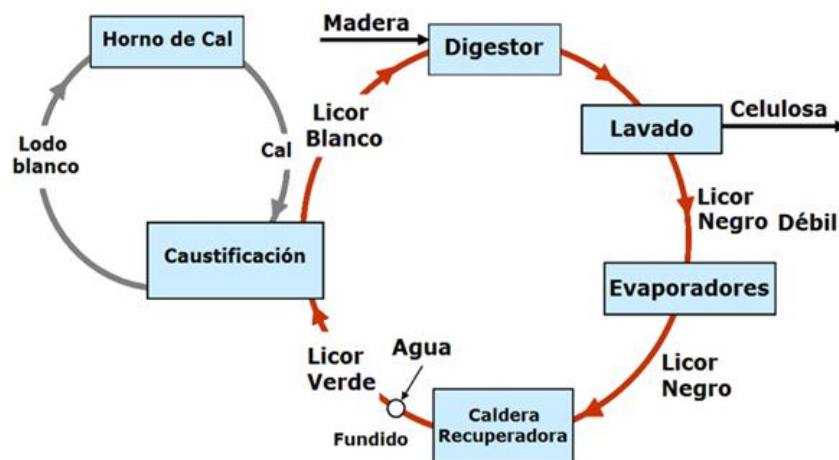


Figura 2.4 Esquema general del proceso Kraft: Línea de celulosa y Línea de recuperación

Fuente: Meisenbichler (2020)

La línea de tratamiento de efluentes tiene como objetivo tratar los residuos líquidos generados por las demás áreas. El proceso inicia con una etapa de neutralización y luego, por medio de un tratamiento primario, se separan los sólidos gruesos. Aquí el agua se envía a un sistema de estanques de ecualización, donde se verifica que el efluente sea apto para pasar al tratamiento biológico con bacterias. En esta etapa se requiere de una temperatura y composición adecuada para que los microorganismos puedan degradar la materia orgánica. Una vez terminada esta etapa, es necesario remover los lodos activados que se generaron por medio de clarificadores, el efluente tratado finalmente se retorna al medio ambiente.

A pesar de los intentos de contar con una cadena de procesos que logre mitigar el impacto ambiental, la Figura 2.5 muestra un esquema del proceso Kraft y la Tabla 2.1 los residuos generados en este.

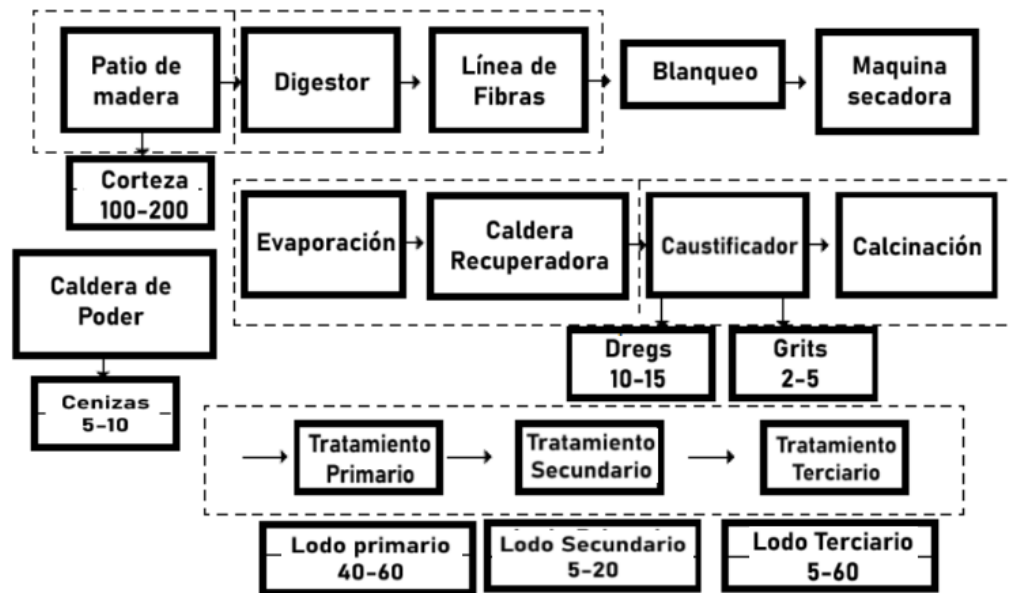


Figura 2.5 Diagrama de flujo de la generación típica de residuos (kg/ADT)

Fuente: Citado por Villar (2017)

Tabla 2.1 Tipos de residuos generados en un proceso de producción de pulpa Kraft

Residuo	Origen	Cantidad (Kg/ADT)	Componentes
Corteza	Patio	-	Restos de corteza, tierra y piedras
<i>Dregs</i>	Caustificación	10 a 15	Rechazos del proceso de recuperación de licor verde
<i>Grits</i>	Apagador de cal	2 a 5	Carbonato de calcio
Ceniza	Caldera de biomasa	5 a 10	Arenas y minerales de la madera
Lodo primario	Tratamiento de efluentes	40 a 60	Fibra de celulosa
Lodo secundario	Tratamiento de efluentes	5 a 20	Microorganismos
Lodo terciario	Tratamiento de efluentes	5 a 60	Restos de arcilla

Fuente: Citado por Villar (2017)

La abreviatura ADT hace referencia a *Air Dry Ton* (toneladas de aire seco) la cual es una medida de unidad de peso que corresponde a una tonelada métrica de celulosa que tiene como máximo un 10% de humedad.

2.3. *Dregs* su origen y características

Como ya se ha mencionado, uno de los principales residuos derivados de la producción de celulosa Kraft son los *Dregs*. Este subproducto no peligroso de acuerdo con la normativa chilena y brasileña (Villar, 2017), consiste en un lodo obtenido de la etapa de clarificación y filtrado del licor verde, conformado por los elementos inorgánicos resultantes de la cocción de la madera. Físicamente, se presenta como un material sólido, oscuro, de olor característico con propiedades alcalinas.

En Chile, la Ley 20.920, vigente desde 2016, establece como objetivo principal reducir la generación de residuos y fomentar su reutilización, reciclaje y valorización, mediante la implementación de la Responsabilidad Extendida del Productor y otros instrumentos de gestión de residuos, con el fin de proteger la salud de las personas y el medio ambiente (Ministerio del Medio Ambiente, 2016).

Para disminuir la generación de residuos, se prioriza la prevención o reducción en la fuente; cuando esto no es posible, se considera su reutilización, posteriormente el reciclaje y, en menor medida, la valorización. Como último recurso, los residuos se disponen de manera controlada.

En este marco, el *Dregs*, ha sido objeto de diversos estudios orientados a evaluar su potencial de aprovechamiento. Desde el punto de vista de su composición, una investigación realizada por la Universidad de la Frontera (2023) determinó la presencia de macronutrientes relevantes como fósforo (0,37 %), potasio (0,76 %), magnesio (1,4 %) y calcio (27 %), así como micronutrientes como hierro (0,46 %) y zinc (0,07 %).

Estos antecedentes han motivado investigaciones en el ámbito agrícola, explorando el uso del *Dregs* como enmienda de suelos, aditivo para compostaje y corrector de suelos ácidos. Los resultados obtenidos han sido favorables, tanto desde el punto de vista químico como biológico, indicando que, aplicado en proporciones adecuadas, el *Dregs* no genera efectos tóxicos significativos ni pérdidas relevantes de nutrientes, lo que refuerza su potencial como recurso sostenible de valorización.

A pesar de su potencial, la aplicación del *Dregs* en el ámbito de la ingeniería civil, y más específicamente en la estabilización de suelos o caminos no pavimentados, sigue siendo un área de escasa investigación, especialmente en regiones donde el residuo está disponible en grandes cantidades y donde se requiere de manera urgente soluciones sostenibles para la infraestructura vial, como es el caso de los sectores forestales en el sur de Chile.

En el siguiente ítem, se presentan diversas investigaciones que han explorado la utilización de este subproducto en ingeniería.

2.4. Subproducto *Dregs* en aplicaciones ingenieriles

La investigación sobre la revalorización de residuos industriales en obras civiles es un campo de rápida expansión impulsado por los principios de economía circular. Sin embargo, aunque la industria de la celulosa genera el subproducto *Dregs* en grandes volúmenes, existe una notable escasez de literatura específica sobre su aplicación directa como material de estabilización de suelos para infraestructura vial. Ante este vacío de conocimiento empírico, los estudios previos se han concentrado mayoritariamente en su incorporación en matrices cementicias (como hormigones y morteros), sentando las bases para comprender su reactividad y comportamiento mecánico.

En este contexto, estudios realizados en instituciones nacionales han evaluado el desempeño de estos residuos. Por ejemplo, Ruiz (2023) en su estudio evalúa como afecta la resistencia mecánica de probetas de mortero al reemplazar una parte del cemento por un residuo del proceso de la celulosa llamado *Grits*, el cual tiene características químicas similares al *Dregs* (Torres, et al 2017). Los resultados obtenidos muestran un descenso en la resistencia de las probetas con porcentajes de reemplazo de *Grits* por cemento. Por su parte, Oliveira et al. (2023) estudiaron la influencia de sustituir cal hidratada por *Dregs* en distintas proporciones dentro de mezclas de mortero. Sus hallazgos indicaron que no se veían alteradas las propiedades mecánicas en estado endurecido de sus probetas, lo que puede suponer un punto positivo al pensar en que al agregar el residuo a la mezcla y no reemplazarlo por cemento exista un aumento en la resistencia a la compresión del hormigón.

La trabajabilidad es un aspecto crítico que se toma en cuenta a la hora de utilizar el hormigón como material de construcción, es por esto que se estudia cómo afecta la utilización de subproducto en las mezclas de hormigón o mortero, en ese sentido Contreras (2024) realiza un estudio completo sobre la influencia del uso del subproducto de celulosa *Dregs-Grits* como reemplazo parcial de cemento en mezclas de hormigón, este midió la facilidad con la que el hormigón fresco es manejado, colocado y compactado en moldes. Para esto evaluó las mezclas frescas según el método del asentamiento del cono de Abrams siguiendo la norma NCh1019. Como resultado obtuvo que a medida que aumenta el porcentaje de reemplazo de cemento por *Dregs-Grits* la docilidad disminuía.

En la Tabla 2.2 se muestran diversos autores que han utilizado subproductos en la confección de hormigones y/o morteros junto a la metodología utilizada y sus resultados.

Tabla 2.2 Resumen de literatura científica de la aplicación del subproducto industrial *Dregs* en aplicaciones ingenieriles

Estudio	Metodología	Resultados
Uso de subproductos sólidos alcalinos del proceso de celulosa Kraft y fábricas de papel, <i>Dregs</i> y <i>Grits</i> en la producción de cemento (Torres., et al 2017)	Este trabajo consistió en la caracterización física y química de los subproductos <i>Dregs</i> y <i>Grits</i> con el fin de realizar una comparativa con el Clinker.	De los análisis realizados y posterior caracterización del residuo se observa que <i>Dregs</i> posee un 97% de calcio disponible, porcentaje más alto que el Clinker lo que demuestra un gran potencial para ser utilizado en la producción de hormigón.
Uso de subproductos sólidos alcalinos del proceso de celulosa Kraft y fábricas de papel, <i>Dregs</i> y <i>Grits</i> en la producción de cemento (Torres., et al 2017)	Confecciona probetas cilíndricas con reemplazo parcial de cemento por <i>Dregs</i> y <i>Grits</i> por separado en 2.5, 5 y 7.5 % ensayándolas a compresión a distintas edades.	Los resultados de estos ensayos arrojaron que ninguna probeta ensayada a 3, 7 y 28 días logró superar la resistencia a la compresión de la probeta control a la cual no se le realizó ningún reemplazo de cemento.
Evaluación de la influencia del reemplazo parcial de cemento por residuo <i>Dregs-Grits</i> en la resistencia a la compresión y flexión de morteros. (Ruiz S., 2023)	Utilizó la porción del residuo <i>Dregs-Grits</i> que pasa por el tamiz N°16 como reemplazo de cemento en un 5, 10, 15, 25 y 30% en la confección de probetas de mortero.	La mezcla con mejor desempeño sin considerar el patrón fue la que contenía un 5% de reemplazo de residuo por cemento con una resistencia a la compresión de 21,46 MPa. Sin embargo, ninguna probeta logró superar la resistencia de la muestra patrón.
Evaluación del uso del subproducto de celulosa <i>Dregs-Grits</i> como <i>filler</i> en mezclas de hormigón (Sepúlveda F., 2024)	Confecciona dos tipos de mezclas de hormigón, una con recuperación de cono y otra sin. Utiliza un porcentaje de adición de subproducto <i>Dregs</i> y <i>Grits</i> de 0%, 2%, 2,5% y 5%. Evalúa la docilidad de las mezclas en estado fresco y la propiedad mecánica de resistencia a la compresión en estado endurecido.	Lo que muestra su trabajo es que en su primera confección existe una tendencia de aumento de la resistencia de los porcentajes de adición del 2,5 y 5% a los 14 días de curado que va disminuyendo a medida que llega los 28 días de edad del hormigón. La verificación de esos resultados demuestra que a los 28 días no hay un porcentaje de adición que supere a la muestra patrón. Con una dosificación A/C 0,425 y con recuperación de cono existe un aumento de la resistencia en la adición del 2% de subproducto, dando un resultado de 34,40 MPa comparado a los 30,59 MPa de la muestra patrón.

2.5. Estabilización de caminos

La mayoría de los estudios existentes se han centrado en subproductos afines con composiciones químicas similares, como las cenizas volantes de alto contenido de calcio o los lodos de depuradora estabilizados con cal, pero el *Dregs* puro permanece en una fase de exploración inicial.

Bajo este contexto, Parra (2018) evaluó en un trabajo de laboratorio la resistencia mecánica bajo cargas monotónicas a tracción y a compresión de varios cuerpos de prueba de caolín, mediante adición de cal y ceniza volante al 2 %, 4 %, 6 % y 8 % del peso del suelo. Los resultados indicaron que los porcentajes de 2 % y 4 % de ceniza mantuvieron la resistencia post-ruptura, mientras que la adición de 6 % y 8 % de ceniza presentaron una pérdida brusca de resistencia. El porcentaje del 4 % resultó ser el más eficiente en términos de resistencia a compresión.

Por su parte, la investigación realizada por Mamanchura (2022) arrojó datos prometedores acerca del uso de ceniza volante. La investigación consistió en realizar tres calicatas para la exploración y toma de muestras de suelo, a las cuales les realizó ensayos de mecánica de suelo con fines de pavimentación, considerando dosificaciones controladas del 10 %, 15 % y 20 % de adición de ceniza volante del peso total de la muestra para determinar cómo influye esta en las propiedades físico-mecánicas del suelo. Bajo un suelo clasificado como arena arcillosa (SC según la clasificación USCS) se logró incrementar la capacidad de soporte del suelo desde un valor inicial de 13,51 % hasta alcanzar un 18,97 % con la adición del 22 % de ceniza volante, demostrando una notable mejora en el comportamiento del suelo.

Más allá de los subproductos con propiedades cementantes como el *Dregs*, se ha estudiado el uso de residuos para el refuerzo interno del suelo incorporando elementos fibrosos que actúan como micro refuerzos dispersos, mitigando la propagación de fisuras y aumentando la resistencia a la tracción y al corte del material, un mecanismo especialmente efectivo en suelos cohesivos y finos.

Un ejemplo notable y contemporáneo es la investigación de Ayala (2024) que trata sobre el mejoramiento de la capacidad de soporte en suelos finos mediante la incorporación de fibras resultantes del triturado de mascarillas quirúrgicas recicladas. Para ello se incorporó 1 %, 2 %, 3 % y 4 % de fibras en los suelos finos, procediendo a medir el CBR. Como resultados se encontró que a medida que se incrementaba el contenido de fibra, el contenido de humedad óptimo tendió a reducir hasta 22,86 % al igual que la densidad máxima seca en 8,76 %, en ambos casos con 4 % de fibras; no obstante, el mayor CBR al 95 % de la densidad máxima seca se encontró con 3 % de fibras, esto

superó en 323,56 % con 7,37 % de CBR al suelo natural que inicialmente presentó un CBR de 1,74 %. Este estudio destaca que la mejora de la capacidad de soporte no solo se puede lograr por vía química, sino también por vía mecánica

Tabla 2.3 Resumen de literatura científica de la estabilización de caminos utilizando residuos

Estudio	Metodología	Resultados
Estabilización de un suelo con cal y ceniza volante. (Parra M., 2018)	Este trabajo consistió en la evaluación de la resistencia bajo cargas monotónicas a tracción y compresión. Ensayo de probetas de caolín con 2 %, 4 %, 6 % y 8 % de adición de ceniza volante.	El 4 % de ceniza volante resultó ser el más eficiente en términos de resistencia a compresión. Los porcentajes de 2 % y 4 % mantuvieron la resistencia post-ruptura, mientras que 6 % y 8 % causaron pérdida brusca.
Influencia del uso de ceniza volante en la estabilización de suelos para la pavimentación en la Av. Alfonso Ugarte, distrito de San Antonio – Moquegua. (Mamanchura E., 2022)	Ensayos de mecánica de suelos para pavimentación (incluyendo clasificación y capacidad de soporte). Evaluó dosificaciones de ceniza volante del 10 %, 15 % y 20 % (con un resultado final reportado al 22 %).	En un suelo clasificado como arena arcillosa (SC), la adición del 22 % de ceniza volante incrementó la capacidad de soporte (CBR) desde un valor inicial de 13,52 % hasta alcanzar un 18,97 %, demostrando una notable mejora.
Mejoramiento de la capacidad de soporte del terreno de fundación vial conformado por suelos finos, incorporando fibras resultantes del triturado de mascarillas quirúrgicas recicladas – Región Ucayali. (Ayala S., 2024)	Realizó ensayos de capacidad de soporte (CBR) y parámetros de compactación (humedad óptima y densidad máxima seca) incorporando fibras de mascarilla al 1 %, 2 %, 3 % y 4 % del peso total del suelo.	El mayor CBR al 95 % de la densidad máxima seca se encontró con 3 % de fibras. Este valor (7,37 % superó en 323,56 % al CBR del suelo natural (1,74 %). La humedad óptima y la densidad máxima seca se redujeron al añadir 4 % de fibras.

2.6. Conclusiones

De los estudios analizados, se concluye que la incorporación de residuos industriales, como las cenizas volantes y aditivos a fines, en matrices de suelo tiene una influencia directa en la modificación de las propiedades físico-mecánicas. Estos subproductos, al interactuar con las partículas de suelo, permiten alterar la plasticidad y modificar la relación humedad-densidad, lo que puede incrementar la capacidad de soporte y volver los suelos menos susceptibles a deterioros cuando son sometidos a cargas vehiculares.

También, se evaluaron escenarios en la literatura donde el uso de aditivos alternativos mitigó deficiencias estructurales en caminos no pavimentados. Se observó que la estabilización con este tipo

de materiales altera parámetros de compactación fundamentales, modificando la densidad máxima compactada seca y la humedad óptima, factores claves para mejorar la respuesta mecánica de suelos frente a las exigencias operativas.

En relación con lo anterior, y considerando la escasez de literatura específica sobre el *Dregs*, se decidió emplear una batería de ensayos geotécnicos estandarizados para evaluar el desempeño de cuatro tipos de suelos representativos de la Región del Biobío, con adiciones de subproducto en proporciones del 5 % y 10 % en peso seco. Estas mezclas permitirán simular el comportamiento de los materiales ante solicitaciones en subbases de suelos forestales.

Tanto Parra (2018) como Mamanchura (2022) destacan que la incorporación de subproductos con propiedades similares al *Dregs*, como son las cenizas, logra modificaciones significativas en la capacidad de soporte en dosificaciones controladas. Dichos autores resaltan que la adición de estos materiales particulados modifica la matriz del suelo natural, rellenando vacíos intersticiales o interactuando con la fracción fina de este, lo que contribuye a la resistencia del material compactado. Por lo tanto, el *Dregs*, dadas sus propiedades podría desempeñar un papel importante en la microestructura del suelo, llevando a la necesidad de evaluar su efectividad como aditivo.

Además, se evaluará la variación en la plasticidad, el ensayo Proctor Modificado y la Razón de Soporte de California (CBR) de las muestras, con el objetivo de analizar como el *Dregs* afecta tanto las propiedades índices de los suelos como su capacidad de soporte. Esto permitirá estudiar las tendencias de comportamiento físico-mecánico de las mezclas suelo-*Dregs*, determinando su viabilidad técnica en infraestructura vial.

CAPÍTULO 3: METODOLOGÍA

3.1. Introducción

En el capítulo anterior se presentó una descripción detallada sobre los orígenes y características del *Dregs*, así como los diferentes métodos de diseño propuestos para su incorporación en trabajos de ingeniería civil. Teniendo en cuenta esta información, en este capítulo se describe la estrategia experimental llevada a cabo para evaluar el efecto del subproducto industrial *Dregs* sobre las propiedades físicas y mecánicas de distintos tipos de suelos.

La metodología establece el diseño experimental, los materiales utilizados, procedimientos ejecutados para la preparación de muestras, ensayos realizados siguiendo las normativas vigentes y las conclusiones obtenidas en cada etapa, las cuales contribuyen a evaluar el desempeño de las mezclas suelo-*Dregs*.

3.2. Estrategia de experimentación

La primera etapa del trabajo experimental se centró en analizar las propiedades de los distintos tipos de suelos y sus características, considerando los requerimientos normativos nacionales e internacionales y los antecedentes bibliográficos sobre estabilización vial con residuos industriales. A partir de esta información, se definieron los porcentajes de incorporación del subproducto *Dregs*, tipo Santa Fe, a los suelos en estado natural. Se establecieron proporciones de adición del 0 %, 5 % y 10 % con respecto al peso seco del suelo.

Con el objetivo de evaluar la influencia del uso de *Dregs* en las propiedades de las mezclas, se realizaron ensayos de Límites de Consistencia, Proctor modificado y Razón de Soporte de California. A continuación, la Figura 3.1 presenta un esquema general del proceso experimental llevado a cabo en el laboratorio.

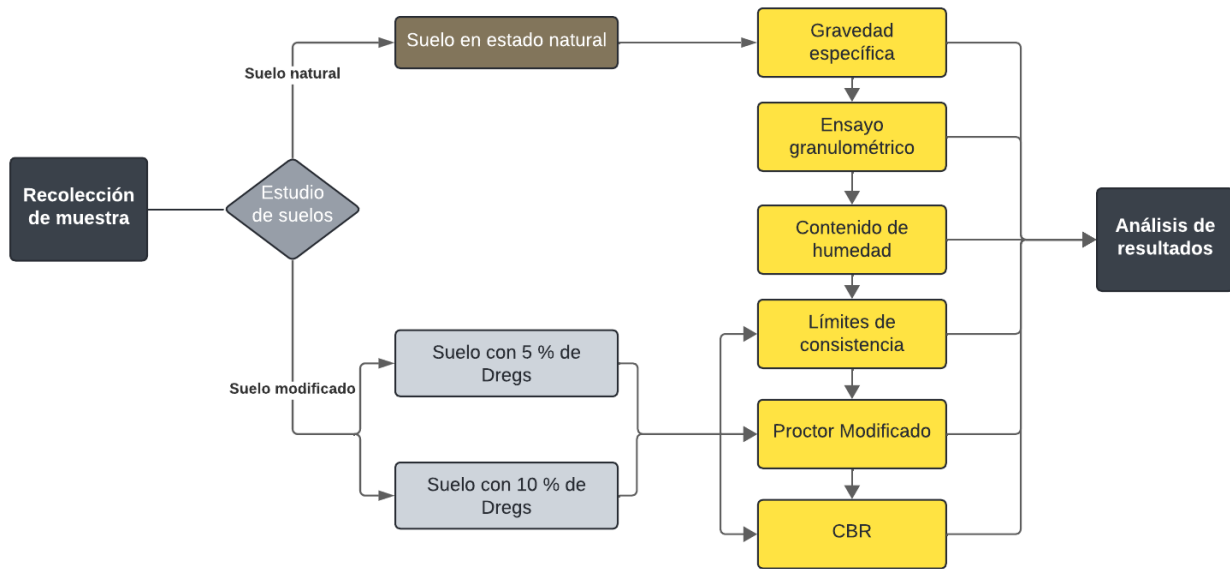


Figura 3.1 Proceso experimental llevado a cabo en el laboratorio

En este estudio, se utilizó normativas nacionales como internacionales con el fin de cumplir con las especificaciones de los métodos y procedimientos. Se puede apreciar las normativas citadas en la Tabla 3.1 como sustento de los ensayos de laboratorio realizados.

Tabla 3.1 Ensayos y normativas utilizadas

Ensayos	Normas
Densidad de Partículas Sólidas	NCh1532 (INN, 1980)
Análisis Granulométrico	ASTM D6913 (ASTM, 2017)
Contenido de Humedad	NCh1515 (INN, 1979)
Límites de Consistencia	NCh1517 (INN, 1979)
Clasificación USCS	ASTM D2487 (ASTM, 2017)
Proctor Modificado	NCh1534/2 (INN, 2008)
Razón de Soporte de California	NCh1852 (INN, 2010)

Adicionalmente a la clasificación tradicional, se realizó una clasificación revisada de suelos (*Revised Soil Classification System*, RSCS) utilizando el método propuesto por Park y Santamarina (2017) en donde se recopila información adicional respecto al comportamiento mecánico e hidráulico de los suelos.

3.3. Materiales

Para llevar a cabo los ensayos se requirió de materiales y equipos específicos para lograr las diferentes etapas de la investigación. A continuación, se presentan los materiales esenciales que fueron necesarios:

3.3.1 Suelo

Se recibieron muestras de cuatro tipos de suelos provenientes de ubicaciones estratégicas para la empresa CMPC en la región del Biobío, lo que sirvió como sustrato fundamental para llevar a cabo pruebas y comparaciones. El primer tipo de suelo proviene del fundo Totoras S3 el cual presentó un color marrón oscuro y fue etiquetado con el código 29285, el segundo suelo es del fundo Los Barros con un color marrón claro y tiene el código 29190, el tercer suelo corresponde al predio Nihuinco, donde su color es un marrón oscuro y presenta el código 29286, mientras que el último suelo es del fundo El Encanto, presentó un color marrón oscuro y fue etiquetado con el código 29274.

Para la clasificación de estos suelos se utilizó el método del Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (*Unified Soil Classification System*, USCS) reconocido a nivel mundial. El sistema de clasificación USCS, requiere de ciertos ensayos normados que se describirán más adelante. En la Figura 3.2 se expone el aspecto visual de los suelos proporcionados previo a su análisis de laboratorio.



Figura 3.2 Suelos proporcionados por CMPC para análisis (Procedencia de izq a der): Totoras (cód. 29285), Los Barros (cód. 29190), Nihuinco (cód. 29286), El Encanto II (cód. 29274).

3.3.2 Subproducto industrial *Dregs* Santa Fe

El *Dregs* se obtuvo de uno de los procesos de generación de celulosa de la planta Santa Fe de CMPC, ubicada en la comuna de Nacimiento, Región del Biobío. Este fue transportado al laboratorio por la

misma empresa dentro de un recipiente sellado para preservar su estado natural. Al momento de la recepción (Figura 3.3), el subproducto se presentó como un material de color gris oscuro, con una consistencia similar a una pasta y de olor característico con propiedades alcalinas.



Figura 3.3 Dregs al momento de la recepción en el laboratorio

Para asegurar la uniformidad en las mezclas y el proceso de tamizado, el *Dregs* fue sometido a un proceso de acondicionamiento. Inicialmente, el material fue extendido y secado a temperatura ambiente para reducir su humedad y luego se introdujo en horno de secado hasta alcanzar masa constante. Finalmente, el material seco fue disgregado de forma manual y tamizado a través de la malla N°4 para eliminar grumos y asegurar su distribución homogénea en las mezclas con los suelos base.



Figura 3.4 Dregs luego del proceso de acondicionamiento

3.4. Caracterización de suelos

Para entender el comportamiento de los materiales por separado y en conjunto, se realizó una caracterización inicial. El objetivo fue determinar las propiedades geotécnicas fundamentales de los suelos y subproducto en estudio, donde se busca comprender sus propiedades individuales, como la distribución de sus partículas, su plasticidad y su interacción con el agua.

3.4.1 Densidad de Partículas Sólidas

La determinación de la densidad de partículas sólidas (ρ_s), también conocida como Gravedad Específica (G_s) corresponde a un parámetro físico esencial para caracterizar los suelos, ya que permite el cálculo de las relaciones gravimétricas y volumétricas de los materiales.

El procedimiento se llevó a cabo utilizando picnómetro y siguiendo los lineamientos de la norma NCh1532 (INN,1980) aplicándose para los cuatro suelos base. En la Figura 3.5 se observa el proceso de extracción de aire de los picnómetros mediante la utilización de la bomba de vacío presente en el laboratorio

El detalle específico del procedimiento experimental llevado a cabo en el laboratorio, incluyendo la preparación de las muestras y la aplicación del método del picnómetro, se puede ver en el Anexo 3.1 Densidad de Partículas Sólidas.



Figura 3.5 Proceso de extracción de aire de los picnómetros mediante bomba de vacío

3.4.2 Análisis granulométrico

Se realizó un análisis granulométrico para determinar la distribución de las partículas de suelo según su tamaño, el cual se determinó mediante tamizado mecánico de acuerdo con la norma internacional ASTM D6913 (ASTM, 2017), pasando el suelo por tamices estandarizados de varios diámetros hasta el N°200 (diámetro 0,074 mm). Este procedimiento permitió clasificar los suelos según su contenido de grava, arena, limo y arcilla, información que resultó fundamental para su caracterización geotécnica.

A modo de resumen, el procedimiento contempló el lavado inicial de las muestras de cada suelo empleando el tamiz N°200 para determinar la cantidad de finos. Posteriormente, el material retenido fue secado al horno y sometido a un proceso de tamizado mecánico, registrando la masa retenida en cada uno de los tamices para la posterior construcción de la curva granulométrica.

En la Figura 3.6 se muestra una parte del juego de tamices utilizados para el ensayo, mientras que en la Figura 3.7 se ve el proceso de lavado para determinar la cantidad de finos.



Figura 3.6 Juego de tamices para análisis granulométrico



Figura 3.7 Proceso de lavado de suelos para determinar la cantidad de finos

El procedimiento detallado del análisis granulométrico se encuentra documentado en el Anexo 3.2 Análisis Granulométrico.

Para el *Dregs*, la distribución de tamaños de partícula se determinó mediante un *Liquid Particle Size Analyzer (Liquid PSA)* (Figura 3.8), el cual utiliza el principio de difracción láser en medio líquido para cuantificar la proporción de partículas según su diámetro equivalente. Este método es especialmente adecuado para materiales con granulometría fina, donde los métodos tradicionales de tamizado no resultan representativos.



Figura 3.8 Analizador de partículas por difracción láser

3.4.3 Contenido de humedad

El cálculo del contenido de humedad de los suelos y el *Dregs* se llevó a cabo siguiendo un procedimiento estandarizado por la norma chilena NCh1515 (INN, 1979). Este proceso permitió determinar con precisión la cantidad de agua presente en las muestras de los materiales.

Se pesaron las muestras en su estado natural y se registró su peso inicial. Luego, las muestras se secaron en horno a temperatura constante y conocida hasta que no exista variación en la masa. La diferencia entre la masa inicial y la masa seca permitió cuantificar el agua evaporada. La Figura 3.9 muestra los suelos en el horno de secado para determinar su humedad.



Figura 3.9 Muestras de suelos en horno para determinar su humedad

3.4.4 Límite líquido

El límite líquido (LL) representa el contenido de agua que separa el comportamiento de un suelo de un estado líquido a un estado plástico. Este ensayo se ejecutó siguiendo lo establecido en la norma chilena NCh1517/1 (INN, 1979).

La obtención del límite líquido de los suelos y *Dregs* se llevó a cabo utilizando el aparato de Casagrande. Para realizar este ensayo, el procedimiento consistió en preparar una pasta homogénea de cada suelo, ponerla en el centro de la cuchara del aparato y extenderla con la espátula, dividir la pasta pasando el acanalador cuidadosamente a lo largo del eje de simetría de la cuchara y someter el conjunto a caídas continuamente hasta que la ranura se cierre en un tramo de 10 mm. En la Figura 3.10 se presenta el equipo de Casagrande durante la ejecución del ensayo.



Figura 3.10 Ejecución del ensayo de Límite Líquido mediante el aparato de Casagrande

El procedimiento detallado tanto del límite líquido como plástico, además de la preparación de los materiales y la expresión de resultados para este ensayo se presentan en el Anexo 3.3 Límites de Consistencia.

3.4.5 Límite plástico

El límite plástico (LP) representa el contenido de humedad que define la transición del suelo desde un estado plástico a un estado semisólido, en este punto, el suelo pierde suficiente plasticidad para dejar de ser maleable, se empieza a agrietar y volverse quebradizo. El ensayo se rigió por lo establecido en la norma NCh1517/2 (INN, 1979).

Para obtener el límite plástico se tomaron porciones de la muestra previamente acondicionada y se amasaron sobre una placa de vidrio esmerilado, formando cilindros de suelo de unos 3 mm de diámetro sin que estos se desmoronen, es decir, el punto límite entre el estado plástico y semisólido. El punto en el cual los bastones se disgregaron en bastones de menor tamaño y no pudieron volver a ser moldeados se consideró el límite plástico de los suelos. Los bastones de suelos obtenidos tras el amasado se pueden ver en la Figura 3.11.



Figura 3.11 Bastones de suelos obtenidos tras el amasado para obtener el Límite Plástico

3.4.6 Clasificación de suelos mediante el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos

Esta etapa resultó fundamental para comprender la naturaleza y propiedades de los suelos que se trabajaron. El procedimiento para la clasificación se realizó siguiendo los lineamientos establecidos por el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos, según lo estipulado en la norma internacional ASTM D2487 (ASTM, 2017).

Con los resultados obtenidos en los ensayos previos de granulometría, límite líquido y límite plástico se procedió a la aplicación de los criterios del USCS presentes en el Anexo 3.4 Sistema Unificado de Clasificación de Suelos, en donde se presentan gráficos y tablas para determinar frente a qué tipo de suelo estamos tratando en función del porcentaje de finos que pasa por el tamiz N°200 y el grado de plasticidad de dichos finos.

Los resultados de la clasificación final para los suelos se presentarán detalladamente en la Sección IV de Resultados.

3.4.7 Clasificación de suelos mediante Sistema Revisado de Clasificación de Suelos

Además de la clasificación tradicional mediante el USCS, se realizó una clasificación complementaria de los cuatro suelos base utilizando el Sistema Revisado de Clasificación de Suelos (RSCS), propuesto por Park y Santamarina (2017).

Esta clasificación es esencial para profundizar el análisis geotécnico, ya que busca correlacionar las propiedades ingenieriles con los parámetros básicos del suelo de una forma más refinada que los sistemas convencionales.

A diferencia de los métodos tradicionales, Santamarina pone mayor énfasis en el rol que cumplen los finos dentro de una mezcla, definiendo que porción del suelo maneja el comportamiento mecánico y

cual maneja el comportamiento hidráulico. Como resultado, el RSCS nos entrega una doble denominación que refleja de mejor manera el comportamiento real del suelo.

Al igual que con el método tradicional, los parámetros de entrada utilizados y el procedimiento para la obtención de resultados se detallan en el Anexo 3.5 Sistema Revisado de Clasificación de Suelos.

3.5. Proctor Modificado

El ensayo Proctor Modificado se ejecutó como un paso crítico e indispensable para establecer las condiciones de compactación que simulan la alta energía requerida en la construcción de caminos. El objetivo principal fue construir la curva de compactación de cada material para determinar la relación entre el Contenido Óptimo de Humedad (HO) y la Densidad Máxima Compactada Seca (DMCS).

El ensayo se aplicó tanto para los cuatro suelos en estado natural como a las mezclas dosificadas con 5 % y 10 % de subproducto *Dregs* respecto al peso seco del suelo. La ejecución del ensayo siguió la metodología estipulada en la norma chilena NCh1534/2 (INN, 2008), que consistió en la compactación en un molde estandarizado con un pisón de 4,5 kg y una altura de caída de 460 mm, la compactación se hizo en 5 capas con 25 golpes cada una. Se repitió este procedimiento para distintos contenidos de humedad, con el fin de determinar la HO para alcanzar el valor de la DMCS, el cual es un parámetro fundamental para continuar con la elaboración de las probetas destinadas al ensayo CBR. En la Figura 3.12 se ilustra el proceso de compactación de un molde de Proctor.



Figura 3.12 Compactación molde Proctor Modificado

El detalle específico tanto del molde como del pisón, además de la preparación de los materiales y el procedimiento llevado a cabo para obtener las curvas de compactación están presentes en el Anexo 3.6 Proctor Modificado.

3.6. Razón de Soporte de California

La determinación de la Razón de Soporte de California fue un proceso clave en la investigación, destinado a evaluar la resistencia de los suelos antes y después de la adición del subproducto *Dregs*, comparando la carga de penetración de los suelos en estudio y otro suelo patrón normalizado. El procedimiento, el cual se detalla en el Anexo 3.7 Razón de Soporte de California, se realizó conforme a los métodos establecidos en la norma chilena NCh1852 (INN, 2010).

La confección de las probetas se realizó utilizando los valores de HO y DMCS obtenidos en el ensayo Proctor Modificado. Se prepararon muestras para las mezclas de los cuatro suelos las cuales fueron compactadas utilizando niveles de energía de 56, 25 y 10 golpes por capa.

Para simular las condiciones climáticas más desfavorables a la que pueden estar los caminos, las probetas fueron sumergidas en agua por un periodo de 96 horas. Durante esta etapa se registró el hinchamiento del material utilizando diales que miden la deformación.

Finalmente, las muestras saturadas fueron llevadas a la prensa de ensayo, donde se aplicó carga de penetración a velocidad constante mediante una prensa hidráulica, el registro de los datos y su procesamiento se realizó de manera digital mediante un sistema de sensores conectados a un notebook. El ensayo de penetración de las probetas de CBR mediante el uso de la prensa hidráulica se puede ver en la Figura 3.13.



Figura 3.13 Ensayo de penetración a probetas de CBR

3.7. Conclusiones

La metodología empleada permitió evaluar de manera objetiva la viabilidad del subproducto *Dregs* como material estabilizador de caminos forestales. El diseño experimental propuesto en este capítulo siguió una metodología sistemática cumpliendo con las normativas chilenas e internacionales, lo que garantiza la reproducibilidad, precisión y confiabilidad de los datos.

La secuencia del trabajo experimental inició con la ejecución de ensayos de densidad de partículas sólidas, granulometría y límites de consistencia, los cuales permitieron una caracterización geotécnica y la clasificación de los materiales de estudio.

Posteriormente, las distintas dosificaciones de mezcla (0 %, 5 % y 10 %) fueron sometidas a ensayos de compactación y capacidad de soporte. lo que permitió obtener una visión completa del comportamiento del subproducto y su efecto sobre las propiedades de los suelos analizados.

CAPÍTULO 4: RESULTADOS

4.1. Introducción

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos a partir de la experiencia desarrollada en laboratorio descrita en el capítulo 3, tanto para los suelos en estado natural como para aquellos tratados con adiciones de *Dregs* en proporciones del 5 % y 10 % en peso seco. Los resultados se organizan por tipo de ensayo, permitiendo tener una comparativa del comportamiento de cada tipo de suelo ante la adición del residuo.

Los datos se presentan mediante tablas y gráficos que resumen las principales propiedades evaluadas, tales como granulometría, límites de consistencia, la densidad seca máxima y humedad óptima de compactación, y el índice CBR. Esta información permite identificar tendencias y mejoras para poder establecer el porcentaje de *Dregs* que proporciona el mejor desempeño para cada suelo.

4.2. Propiedades Físico-Mecánicas de los suelos base

4.2.1 Densidad de partículas sólidas

Para la determinación de la gravedad específica de los sólidos se utilizaron distintos picnómetros calibrados, a los cuales mediante un termómetro se les fue midiendo la temperatura para dirigirse a los gráficos de temperatura del agua–masa picnómetro más agua para ver cómo se relacionan estas variables, obteniendo un valor de 2,48 para el suelo de Los Barros, 2,25 para Nihuinco, 2,57 para Totoras S3, y un valor de 2,52 para suelo Encanto 2, tal como se muestra en la Tabla 4.1

Tabla 4.1 Gravedad específica de los sólidos

Suelo	Los Barros	Nihuinco	Totoras S3	El Encanto
(ms) Masa suelo (g)	100,00	100,00	100,00	100,00
(Mm) Masa picnómetro con suelo + agua (g)	721,70	707,10	725,60	720,40
(Ma) Masa picnómetro con agua (g)	662,00	651,00	664,47	660,04
T° de ensayo (°C)	20,60	21,40	21,00	20,50
(pwtx) Densidad agua a T° de ensayo (Kg/m3)	998,16	997,99	998,08	998,19
(pw(20)) Densidad agua a 20°C (Kg/m3)	998,29	998,29	998,29	998,29
(ps) Densidad de partículas sólidas (Kg/m3)	2476,83	2244,69	2567,51	2518,36
(Gs) Gravedad específica	2,48	2,25	2,57	2,52

4.2.2 Análisis granulométrico

El análisis granulométrico realizado se resume en la Tabla 4.2, donde se muestran los resultados de este ensayo indicando los porcentajes que pasan los respectivos tamices, donde, en la Figura 4.1 se muestran las diferentes curvas granulométricas asociadas a cada muestra de suelo natural.

Tabla 4.2 Granulometría suelos de estudio

Malla ASTM	Tamiz (mm)	% Pasa			
		Los Barros (29190)	Nihuinco (29286)	Totoras S3 (29285)	Encanto 2 (29274)
N° 4	4,75	99	100	100	96,2
N° 10	2	93,8	100	99,8	86,6
N° 20	0,85	80	100	99,2	73
N° 40	0,425	68,1	100	98,3	63,8
N° 60	0,25	59,8	100	97,3	57,9
N° 200	0,075	41	98	92,2	47,8

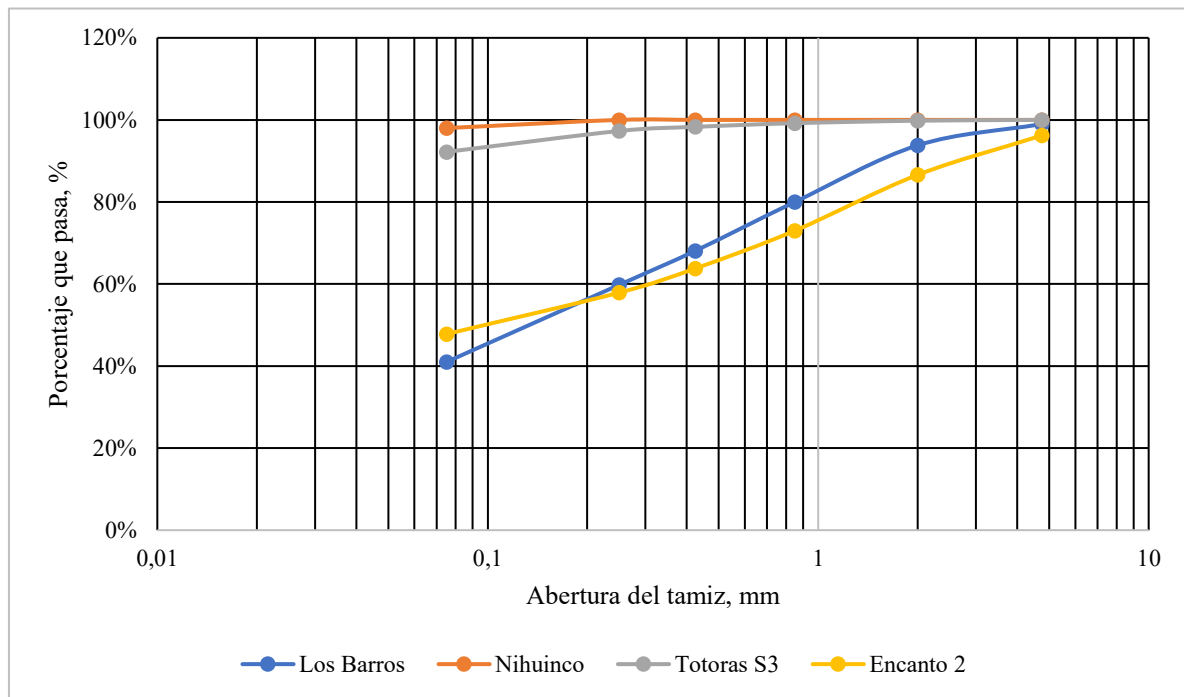


Figura 4.1 Curva granulométrica de suelos naturales

Los resultados muestran que los suelos Nihuinco y Totoras S3 presentan una granulometría muy fina, con prácticamente el 100 % del material pasando por los tamices más pequeños, lo que indica una composición predominante de limos o arcillas.

Por otro lado, los suelos Los Barros y Encanto 2 poseen una mayor proporción de partículas gruesas, especialmente en los tamices N°40, 60 y 200 con porcentajes de paso entre 41 % y 63 %, lo que sugiere suelos arenosos con presencia de finos. La curva granulométrica muestra estas diferencias, en donde se puede apreciar que Nihuinco y Totoras S3 tienen una curva más plana en comparación a Los Barros y Encanto 2 que muestran pendientes más marcadas y menor contenido de partículas finas.

4.2.3 Contenido de Humedad de los suelos

Se determinó el contenido de humedad de cada uno de los suelos base para evaluar la consistencia inicial del material al momento que llegó al laboratorio y así poder cuantificar la cantidad de agua adicional requerida para alcanzar los niveles óptimos de compactación definidos en los ensayos posteriores. Los resultados correspondientes al contenido de humedad de cada muestra analizada se resumen en la Tabla 4.3.

Tabla 4.3 Contenido de Humedad de los suelos

Suelo	Contenido de Humedad (%)
Los Barros (29190)	14
Nihuinco (29286)	47
Totoras S3 (29285)	24
Encanto 2 (29274)	9

Según lo registrado, el suelo Nihuinco presentó el valor más elevado con un 47 %, seguido por el predio Totoras S3 con un 24 %. En contraste, las muestras correspondientes a Los Barros y El Encanto presentaron humedades significativamente menores, alcanzando un 14 % y 9 %, respectivamente.

4.2.4 Límites de consistencia

Los resultados del Límite Líquido (LL) y el Límite Plástico (LP), junto con el cálculo del Índice de Plasticidad (IP), permiten caracterizar el rango de humedad en el que el suelo se comporta de manera plástica, los resultados obtenidos para los suelos en estado natural se presentan en la Tabla 4.4.

Tabla 4.4 Límites de consistencia determinados para cada suelo

Suelo	Los Barros	Nihuinco	Totoras S3	El Encanto
Límite Líquido (%)	37	73	40	37
Límite Plástico (%)	33	66	24	14
Índice de Plasticidad (%)	4	7	16	23

Se observa que el suelo El Encanto presenta el mayor Índice de Plasticidad (IP = 23 %), seguido por el suelo Totoras S3 (IP = 16 %). Estos valores indican una presencia significativa de minerales

arcillosos en su fracción fina, lo que les otorga cohesión y una mayor susceptibilidad a deformaciones en presencia de agua.

Por otro lado, los suelos Los Barros y Nihuinco presentan Índices de Plasticidad bajos, de 4 % y 7 % respectivamente. En el caso de Nihuinco se tiene un bajo rango plástico, a pesar de aquello presenta un Límite Líquido alto ($LL = 73$ %) y un Límite Plástico igualmente elevado ($LP = 66$ %). Esto indica que es un material que lo hace muy susceptible a cambios de humedad y necesita una gran cantidad de agua para pasar de un estado semisólido a uno plástico, y luego, más agua aún para volverse líquido.

4.2.5 Clasificación de suelos mediante el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos

A partir de los resultados granulométricos (Tabla 4.2) y los límites de consistencia (Tabla 4.4), se procede a clasificar los cuatro suelos base según el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (USCS).

El criterio de clasificación considera inicialmente el porcentaje pasante por el tamiz N°200 para diferenciar entre suelos de grano grueso y fino. Luego, en la Carta de Plasticidad de Casagrande (Figura 4.2) se ubican los suelos con sus coordenadas (LL, IP) respecto a la “Línea A” para definir la naturaleza de los suelos de grano fino y la fracción fina de los suelos de grano grueso.

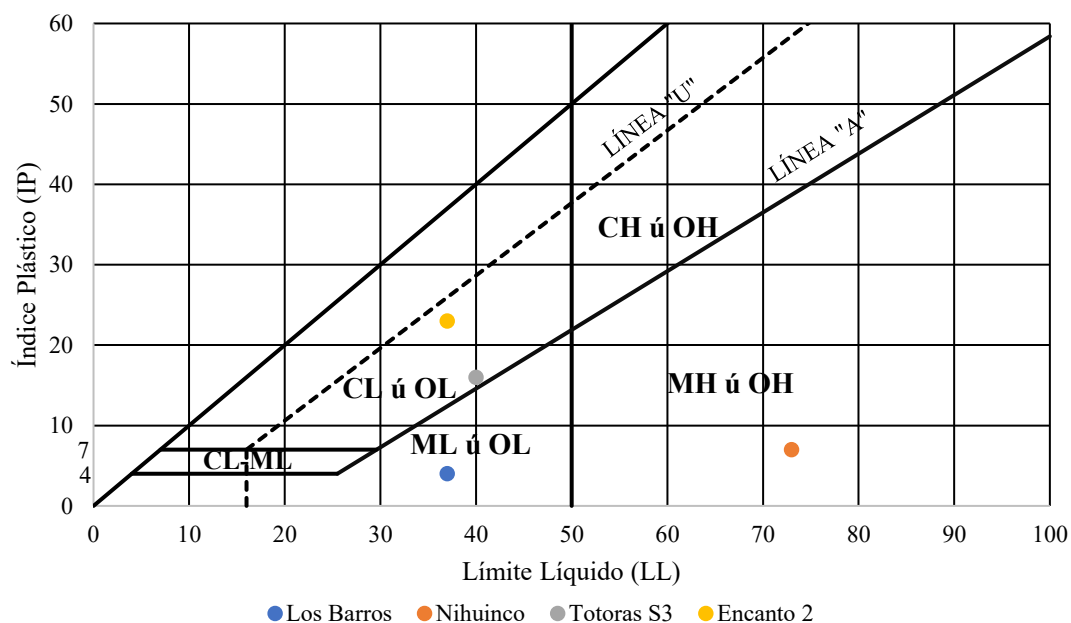


Figura 4.2 Carta de Plasticidad de Casagrande

La Tabla 4.5 presenta los parámetros de cada muestra de suelo para la clasificación mediante USCS.

Tabla 4.5 Parámetros para clasificar los suelos mediante USCS

Suelo	% Pasa N°200	Límite Líquido (%)	Índice de Plasticidad (%)	Ubicación Carta de Plasticidad	Clasificación USCS
Los Barros	41,0	37	4	Bajo Línea "A"	Arena Limosa (SM)
Nihuinco	98,0	73	7	Bajo Línea "A"	Limo de Alta Plasticidad (MH)
Totoras S3	92,2	40	16	Sobre Línea "A"	Arcilla de Baja Plasticidad (CL)
El Encanto	47,8	37	23	Sobre Línea "A"	Arena Arcillosa (SC)

Se puede observar que los suelos Los Barros y El Encanto se ubican en la categoría de Suelos de Grano Grueso, por retener más del 50 % de su peso en el tamiz N°200. Los Barros, aunque es un material granular, presenta un alto contenido de finos (41 %) los cuales resultan ser limo debido a su bajo Índice Plástico ($IP = 4\%$) ubicándolo debajo de la Línea “A” en la Carta de Plasticidad de Casagrande, de esta manera, el suelo queda definido como Arena Limosa. En tanto, el suelo Encanto 2, presenta un 47,8 % de material fino, a diferencia del anterior, su parte fina se clasifica como una arcilla al quedar por sobre la Línea “A” de la Carta de Plasticidad clasificándolo como una Arena Arcillosa.

Por otra parte, los suelos Nihuinco y Totoras S3 cuentan con más del 50 % del material pasante por el tamiz N°200, por lo que su comportamiento está gobernado por la fracción fina. El suelo Nihuinco se ubica por debajo de la Línea “A” indicando un comportamiento limoso, pero al tener un Límite Líquido muy alto (73 %) lo hace ser altamente plástico, clasificando como un Limo de Alta Plasticidad. Totoras S3 se ubica justo sobre la Línea “A” de la Carta de Plasticidad gracias a su Límite Líquido (40 %) y su Índice Plástico (16 %) lo que lo hace ser un suelo Arcilloso de Baja Plasticidad.

4.2.6 Clasificación de suelos mediante el Sistema Revisado de Clasificación de Suelos

Adicionalmente a la clasificación mediante el sistema USCS, se evaluaron los cuatro suelos en estado natural bajo los criterios del RSCS para determinar si el comportamiento mecánico e hidráulico está gobernado por la fracción fina o gruesa.

A continuación, en la Tabla 4.6 se entregan los valores de Límite Líquido (LL) para los cuatro suelos en su estado natural utilizando tres fluidos diferentes: agua desionizada, salmuera y parafina.

Tabla 4.6 Cálculo de Límites de Consistencia Avanzados

Suelo	Los Barros	Nihuinco	Totoras S3	El Encanto
LL Agua Desionizada (%)	63	89	47	47
LL Salmuera (%)	58	81	57	56
LL Parafina (%)	73	75	53	44

A partir de estos límites se obtuvo la siguiente clasificación para cada suelo. Los Barros se clasificó como F(F)-IL, indicando que la propiedad mecánica está controlada por la fracción fina, al igual que la conductividad hidráulica. Además, los finos tienen una plasticidad intermedia y baja sensibilidad. La misma clasificación resultó para El Encanto y Totoras S3.

Por otra parte, la propiedad mecánica en el suelo Nihuinco está controlada por la fracción fina, al igual que la conductividad hidráulica, sin embargo, los finos tienen alta plasticidad y baja sensibilidad, quedando clasificado como F(F)-HL.

4.2.7 Proctor modificado

El objetivo de esta etapa fue determinar la DMCS y la HO para cada suelo. A continuación, en la Tabla 4.7 se resume los resultados obtenidos para los cuatro suelos en estado natural. Asimismo, la Figura 4.3 a la 4.6 presentan las curvas de compactación resultantes, mostrando los cambios en la densidad seca mientras se varía el contenido de humedad.

Tabla 4.7 Densidad Máxima Compactada Seca y Humedad Óptima para cada suelo en estado natural

Suelo	HO (%)	DMCS (g/cm ³)	95% DMCS (g/cm ³)
Los Barros	14	1,86	1,77
Nihuinco	47	1,00	0,95
Totoras S3	21	1,68	1,60
El Encanto	12	1,96	1,86

Estos resultados demuestran diferencias significativas en el comportamiento de compactación entre cada uno de los suelos, asociadas principalmente a su composición granulométrica y contenido de finos.

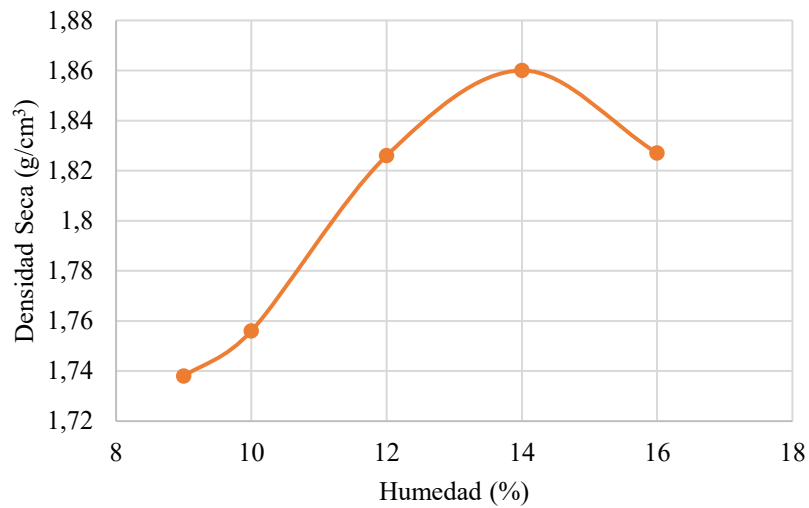


Figura 4.3 Curva de Proctor Modificado suelo Los Barros

El análisis de la curva evidenció un comportamiento parabólico bien definido, permitiendo establecer una DMCS intermedia a alta de $1,86 \text{ g/cm}^3$ y una HO del 14 % para el suelo Los Barros.

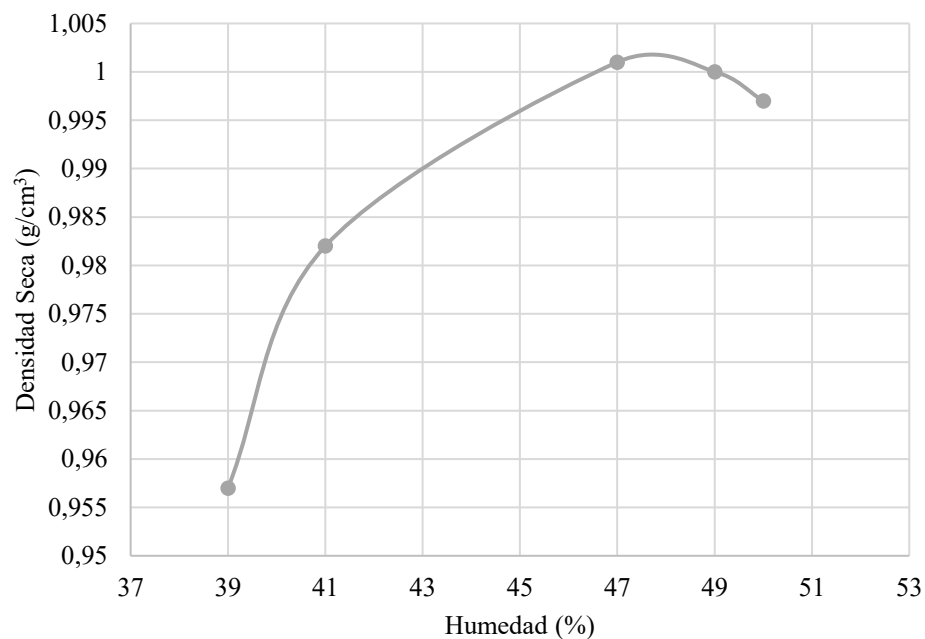


Figura 4.4 Curva de Proctor Modificado suelo Nihuinco

Este suelo evidenció una DMCS de $1,00 \text{ g/cm}^3$ y una HO de 47 %, lo que indica que trata de un material altamente poroso y con gran capacidad de retención hídrica, donde se requiere un volumen significativo de agua para lubricar el suelo antes de que la rama húmeda comience a descender.

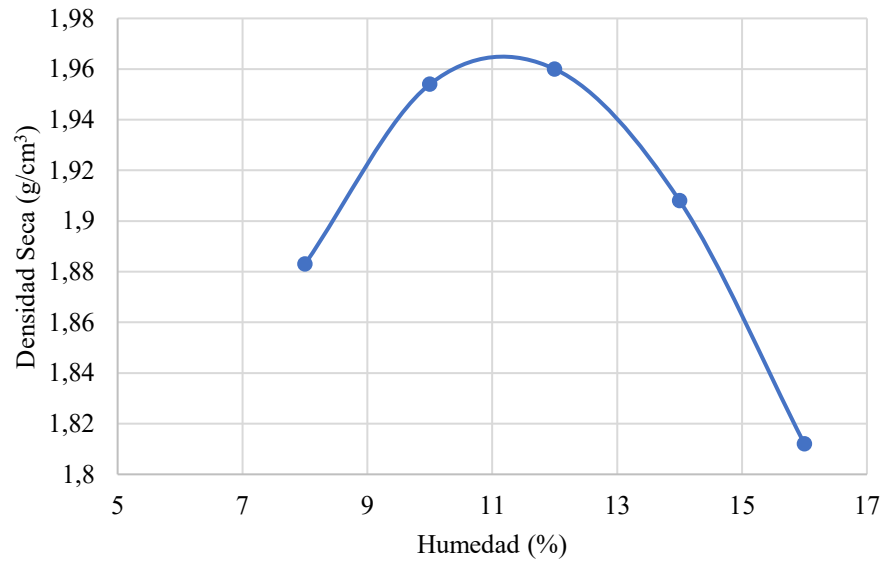


Figura 4.5 Curva de Proctor Modificado suelo El Encanto

Al igual que en el suelo Los Barros, El Encanto presentó un comportamiento parabólico muy bien definido, permitiendo establecer una DMCS de $1,96 \text{ g/cm}^3$ y una HO de 11 %. El valor de la DMCS se clasifica como una densidad alta, lo que indica que se trata de una matriz de suelo con buena distribución geométrica de sus partículas y una baja porosidad.

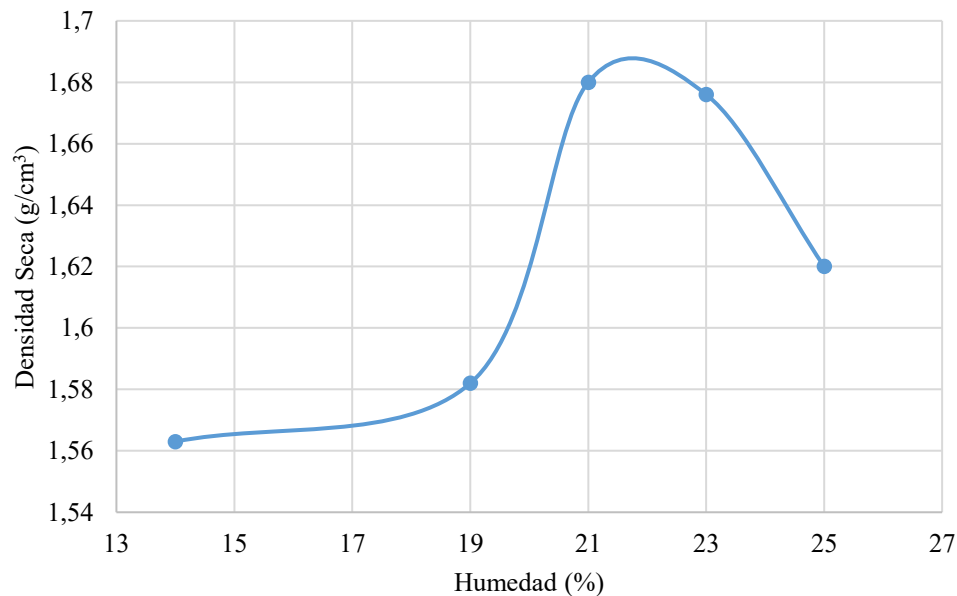


Figura 4.6 Curva de Proctor Modificado suelo Totoras S3

Finalmente, el suelo Totoras S3 presenta un comportamiento intermedio con una densidad seca máxima de $1,68 \text{ g/cm}^3$ y una humedad óptima del 21 %.

4.2.8 Razón de Soporte de California (CBR)

Para determinar la capacidad de soporte de los suelos en su estado natural, se realizaron ensayos CBR según lo indicado en la norma.

A continuación, la Tabla 4.8 presenta un resumen de los valores de diseño obtenidos, calculados para el 95 % de la Densidad Máxima Compactada Seca establecida en los ensayos Proctor Modificado respectivos.

Tabla 4.8 Resumen de resultados CBR de suelos naturales

Suelo	Clasificación	HO (%)	DMCS (g/cm ³)	CBR al 100% DMCS (%)	CBR al 95% DMCS (%)
Los Barros	SM	14	1,86	28	15
Nihuinco	MH	47	1,00	24	18
Totoras S3	CL	21	1,68	12	5
El Encanto	SC	12	1,96	11	6

La tabla muestra una notable variedad en la capacidad de soporte de los suelos en su estado natural. Por un lado, se tiene a los suelos Nihuinco y Los Barros, los cuales exhiben un CBR de diseño relativamente aceptable del 18 % y 15 % respectivamente, por lo contrario, los suelos Encanto 2 y Totoras S3 presentan deficiencias en su capacidad estructural. Específicamente, el suelo Totoras S3 es el más crítico, presentando un CBR al 95 % de la D.M.C.S. de 5 % seguido por Encanto 2 con un 6 %.

4.3. Propiedades Físico-Mecánicas del *Dregs*

4.3.1 Análisis Granulométrico

Debido a la naturaleza extremadamente fina del *Dregs*, la determinación de su distribución de tamaño de partículas se realizó mediante el método de difracción láser en medio líquido (*Liquid PSA*), el cual permite medir partículas en el rango micrométrico con alta precisión.

La Figura 4.7 presenta la curva de distribución granulométrica obtenida, en la que se puede observar una distribución unimodal muy pronunciada, indicando que la mayoría de las partículas se concentran fuertemente alrededor de los 20 μm , además, se ve que la curva Q3 alcanza el 100 % del porcentaje de material que pasa para un diámetro de partícula inferior a 75 μm (Tamiz N°200).

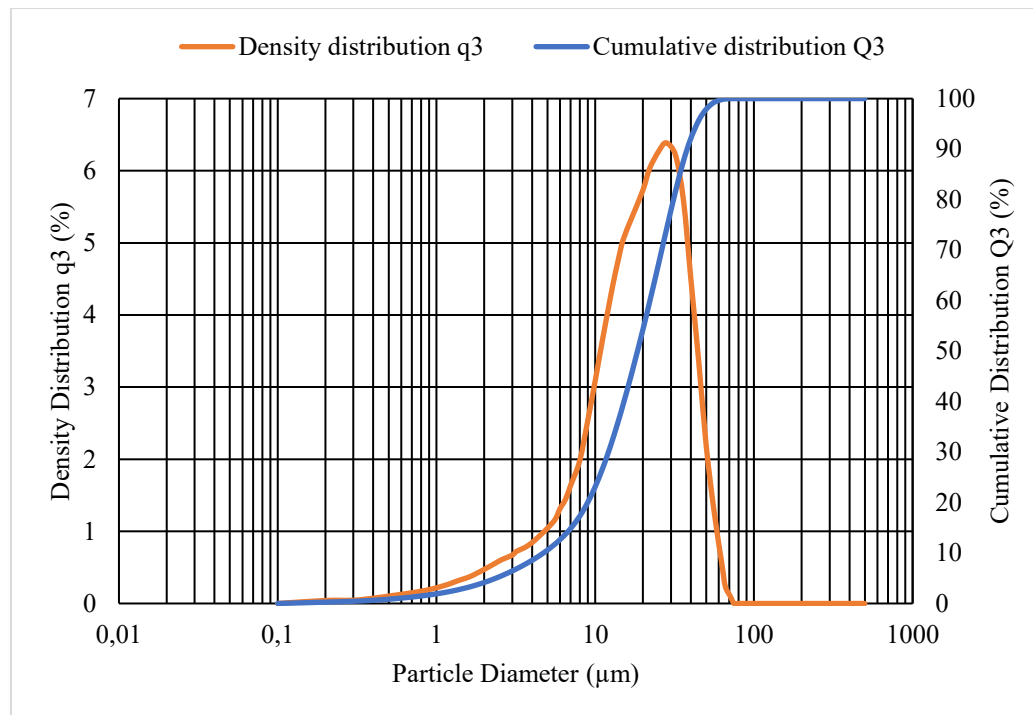


Figura 4.7 Curva de distribución de tamaño de partículas del *Dregs*

4.3.2 Límites de consistencia

Se determinaron los límites de consistencia para el subproducto *Dregs*, obteniéndose los parámetros presentes en la Tabla 4.9.

Tabla 4.9 Límites de consistencia del *Dregs*

Muestra	Límite Líquido (%)	Límite Plástico (%)	Índice de Plasticidad (%)
Dregs	35	34	1

La muestra correspondiente al 100 % de *Dregs* presentó un límite líquido de 43 % y un límite plástico de 26 %, siendo 17 % el índice de plasticidad.

4.3.3 Clasificación de suelos mediante el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos

Al considerar los resultados de granulometría y límites de consistencia, el material se posiciona inmediatamente por encima de la Línea “A” de la carta de plasticidad de Casagrande. Según el USCS, este tipo de *Dregs* clasifica como un Limo de Baja Plasticidad (ML), tal como se ve en la Figura 4.8.

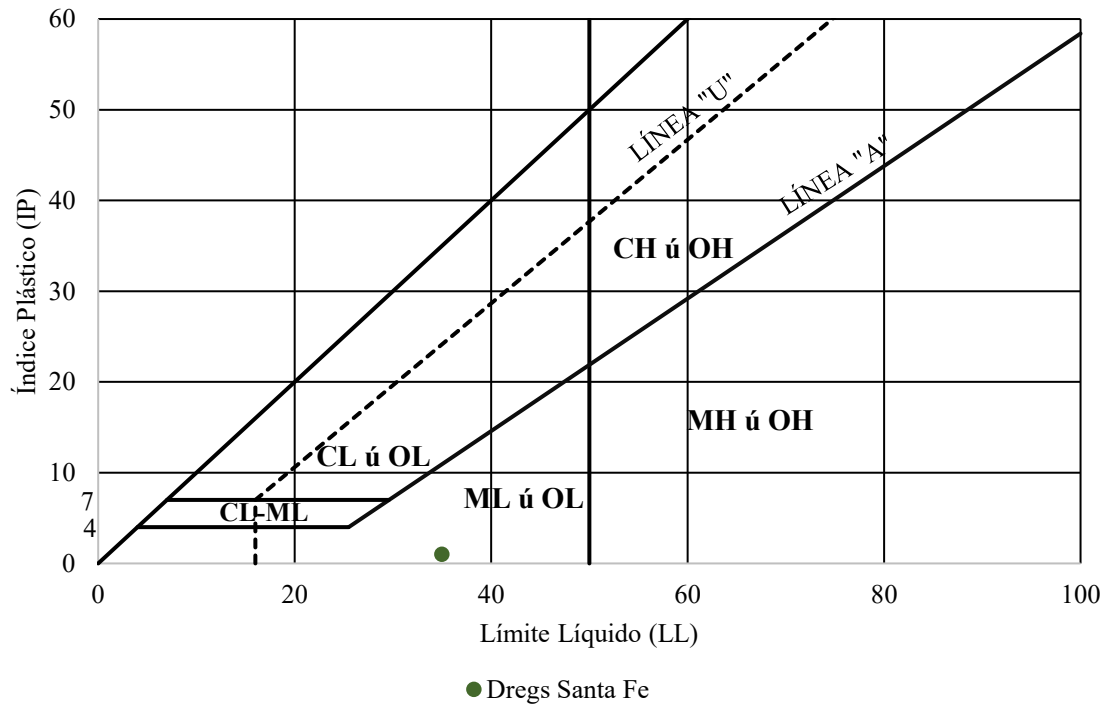


Figura 4.8 Carta de plasticidad de Casagrande para el *Dregs*

4.3.4 Proctor modificado

Se determinó la curva de compactación del subproducto mediante el ensayo Proctor Modificado, con el objetivo de establecer su DMCS y la HO. de compactación. La Tabla 4.10 muestra el valor de densidad máxima compactada seca y su humedad óptima, asimismo, la Figura 4.9 presenta la curva de compactación del *Dregs*.

Tabla 4.10 Densidad Máxima Compactada Seca y Humedad Óptima del *Dregs*

Muestra	HO (%)	DMCS (g/cm ³)	95% DMCS (g/cm ³)
<i>Dregs</i>	24	1,62	1,54

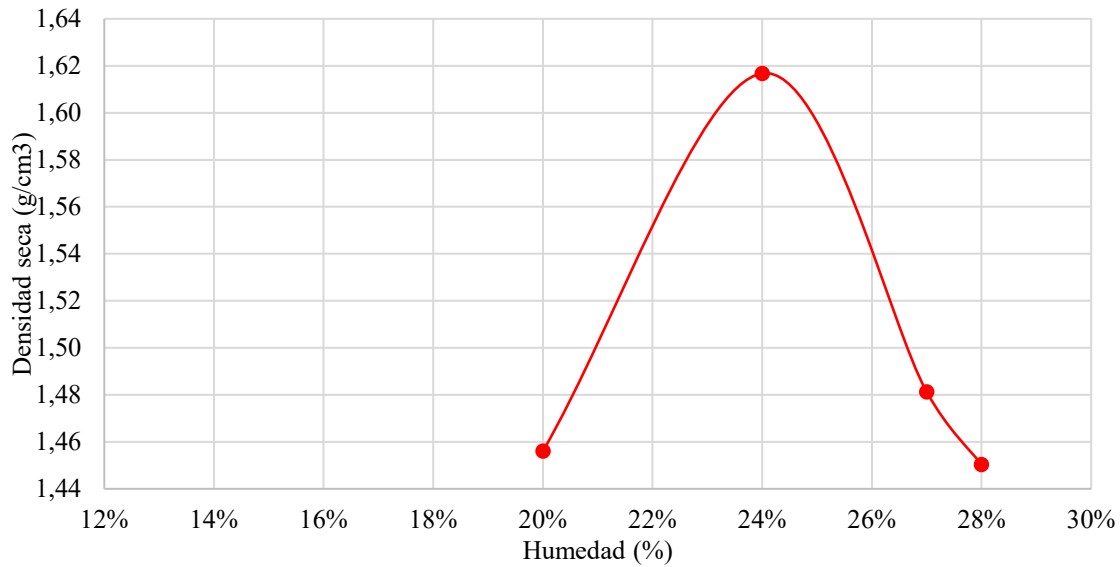


Figura 4.9 Curva de Proctor Modificado del Dregs

Del ensayo se obtuvo un valor de la densidad máxima compactada seca de $1,62 \text{ g/cm}^3$ con una humedad óptima de compactación del 24 %

4.3.5 Razón de Soporte de California (CBR)

Posterior a la elaboración de la curva humedad – densidad seca, se elaboró el ensayo CBR para el Dregs al 100 % obteniendo la capacidad de soporte que se presenta en la Tabla 4.11.

Tabla 4.11 Resumen de resultados CBR del Dregs

Material	Clasificación	H.O. (%)	D.M.C.S (g/cm³)	CBR (%)	CBR al 95% D.M.C.S (%)
Dregs	ML	24	1,62	6	2

Este resultado indica que el subproducto, en su estado puro, no posee la resistencia necesaria para soportar cargas, comportándose como un suelo fino de muy baja calidad.

Esta baja resistencia es coherente con la clasificación previa, al ser un material limoso y prácticamente con nula plasticidad, no cuenta tanto con la fricción interna de las arenas como de la cohesión fuerte que presentan las arcillas.

4.4. Propiedades Físico-Mecánicas de las mezclas Suelo–Dregs

Una vez establecidas las propiedades de los materiales individuales, en este ítem se exponen los resultados obtenidos tras la incorporación del subproducto industrial Dregs a los cuatro tipos de suelos.

4.4.1 Límites de consistencia Suelo–Dregs

La evaluación de la plasticidad de las mezclas es fundamental para determinar si la adición del subproducto logra mitigar la susceptibilidad del suelo frente a los cambios de humedad. La Tabla 4.12 muestra los valores de los límites de consistencia para las distintas dosificaciones (5 % y 10 %) de *Dregs* de los cuatro suelos evaluados.

Tabla 4.12 Límites de consistencia para las distintas dosificaciones de *Dregs* en cada suelo estudiado

Muestra	Límite Líquido (%)	Límite Plástico (%)	Índice de Plasticidad (%)
Los Barros	37	33	4
Los Barros + 5 % Dregs	35	22	13
Los Barros + 10 % Dregs	29	26	3
Nihuinco	73	66	7
Nihuinco + 5 % Dregs	62	53	9
Nihuinco + 10 % Dregs	63	50	13
Totoras S3	40	24	16
Totoras S3 + 5 % Dregs	40	17	23
Totoras S3 + 10 % Dregs	41	18	23
El Encanto	37	14	23
El Encanto + 5 % Dregs	33	19	14
El Encanto + 10 % Dregs	23	9	14

Para comprender fácilmente la evolución de la plasticidad mientras se añade *Dregs* a los suelos, las Figuras 4.10, 4.11, 4.12 y 4.13 ilustran gráficamente el comportamiento de la plasticidad para cada uno de los suelos en función del porcentaje de incorporación de *Dregs*.

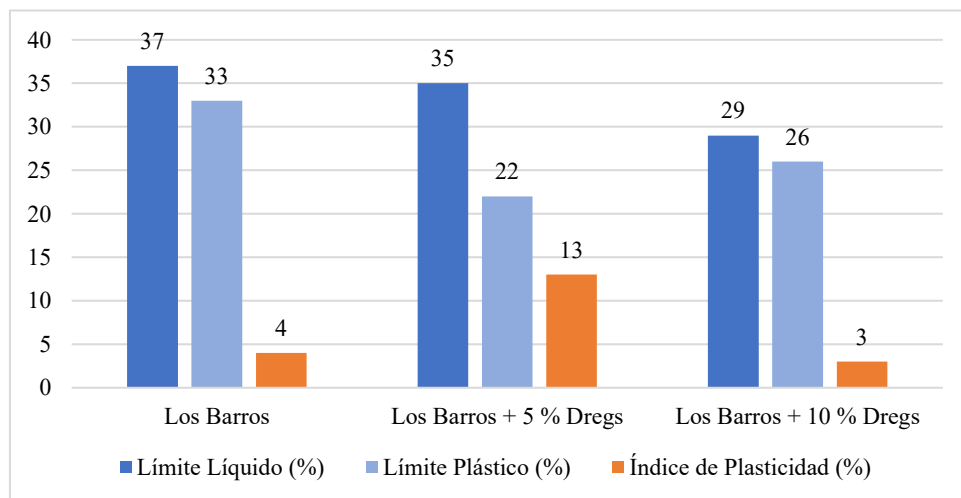


Figura 4.10 Límites de consistencia suelo Los Barros

La Figura 4.10 muestra la variación de los límites de consistencia del suelo Los Barros, comparando el material en su estado natural frente a dos mezclas dosificadas con un 5 % y un 10 % del subproducto *Dregs*. El gráfico muestra una evaluación fluctuante de los parámetros físicos a medida que se

incorpora el subproducto. Con el 0 % de incorporación de *Dregs*, el suelo presenta un LL de 37 % y un LP de 33 %, lo que arroja un IP de apenas 4 %. Con la adición del 5 % el LL experimenta una leve caída a 35 %, mientras que el LP sufre una caída de 11 % elevando el IP a un 13 %. Al adicionar 10 % de *Dregs*, el LL baja a 29 % y LP a 26 %. En consecuencia, se produce una disminución en la brecha entre ambos, logrando un IP del 3 %, incluso menor al del suelo en estado natural

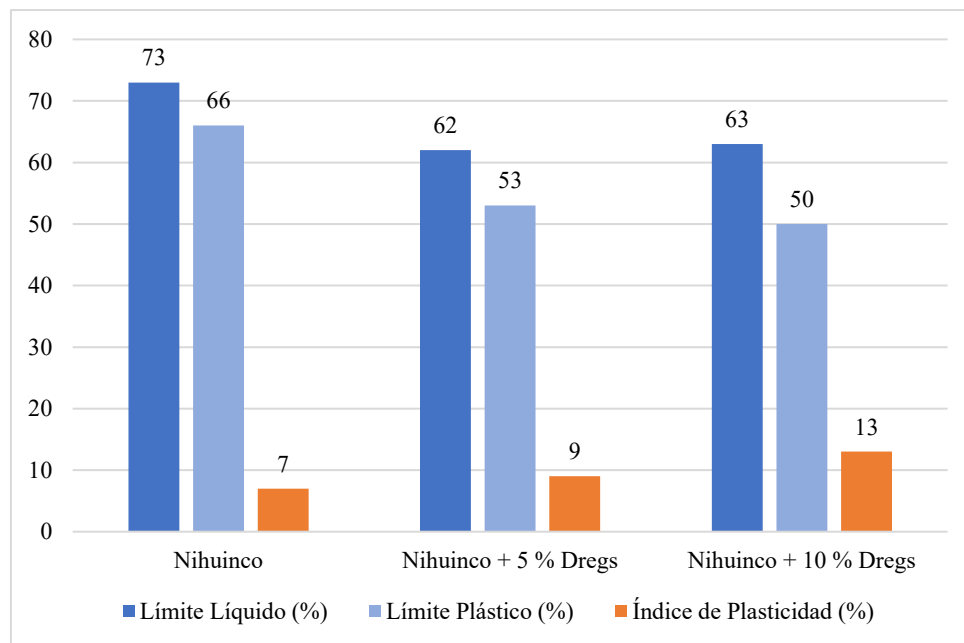


Figura 4.11 Límites de consistencia suelo Nihuinco

De la misma manera, en la Figura 4.11 se evidencia que el suelo Nihuinco en su condición original, exhibe un LL sumamente elevado de 73 % y un LP de 66 %, lo que resulta un IP base de 7 %. Al incorporar un 5 % de *Dregs*, se registra una disminución considerable tanto del LL como del LP (cayendo un 11 % y 13 %, respectivamente); debido a que la caída del LP es mayor, el IP experimenta un aumento hasta alcanzar un 9 %. Con relación al 10 % de adición, el LL se estabiliza en un rango de 63 %, sin embargo, el LP continúa su descenso hasta un 50 %, provocando que el IP se expanda hasta alcanzar su valor máximo de 13 %.

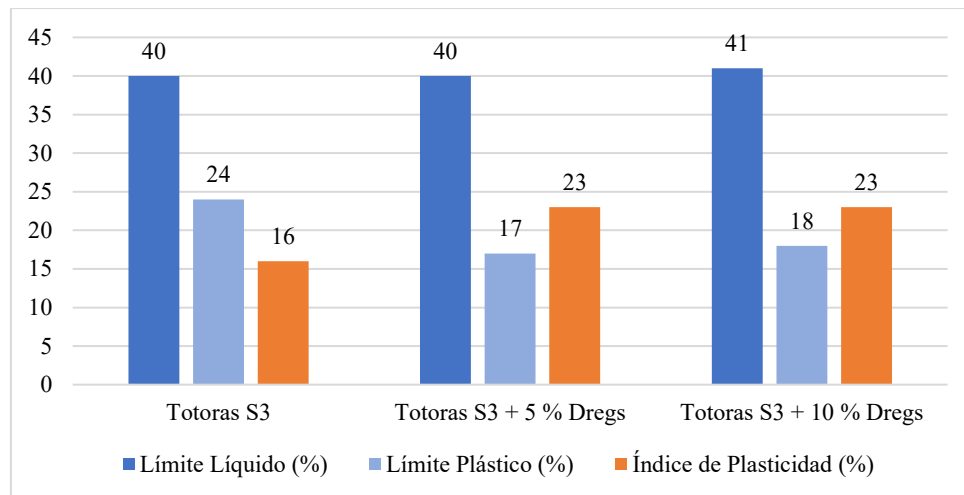


Figura 4.12 Límites de consistencia suelo Totoras S3

Por su parte, el análisis del suelo Totoras S3 evidencia un comportamiento de estabilización con los porcentajes de adición de *Dregs*. El suelo natural (0 % *Dregs*) registra un LL de 40 % y un LP de 24 %, arrojando un IP inicial de 16 %. Al dosificar con un 5 % de *Dregs*, la capacidad de retención hídrica en el estado entre plástico y líquido se mantiene inalterada en el 40 %, en cambio, el LP sufre una caída del 7 %. Esta alteración obliga a la mezcla alcanzar un estado deformable con mucho menos agua, lo que se traduce en un salto del IP a un 23 %. Al añadir un 10 % de *Dregs*, no se presenta una variación mayor con la dosificación anterior, manteniendo un IP del 23 %.

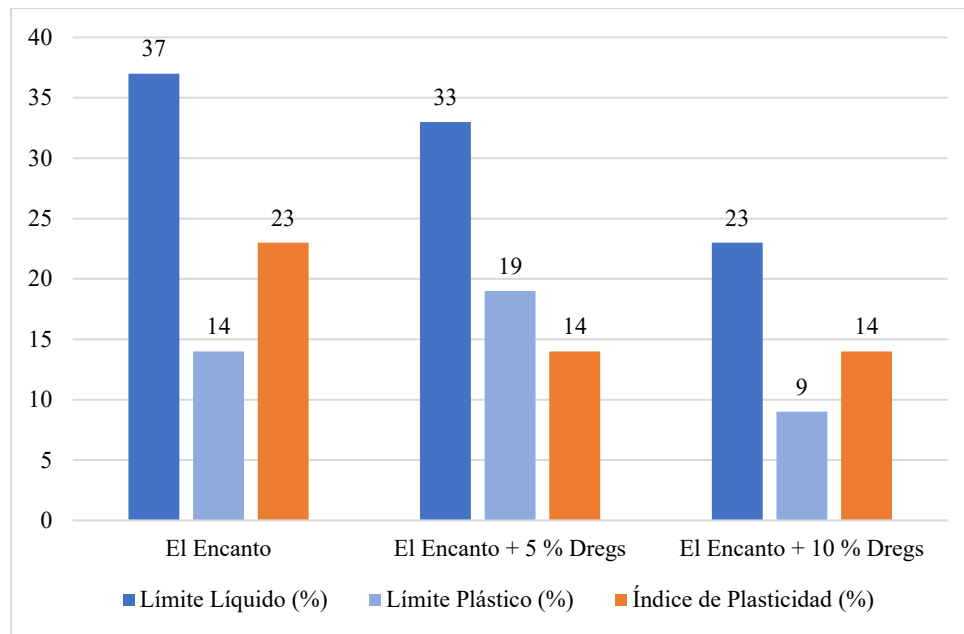


Figura 4.13 Límites de consistencia suelo El Encanto

La Figura 4.13 detalla los resultados de los límites de consistencia para El Encanto, evidenciando un comportamiento contrario en comparación al resto de los suelos. En su condición original, esta muestra presenta un LL de 37 % y un LP de 14 %, lo que se traduce en un IP correspondiente al 23 %, siendo este valor un tanto elevado. Al incorporar un 5 de *Dregs*, se produce una disminución de la brecha entre los estados del suelo, el LL experimenta un descenso a 33 %, mientras que el LP aumenta hasta el 19 %. Este efecto genera una disminución de la plasticidad de la mezcla, reduciendo el IP a un 14 %. Posteriormente, al ensayar la mezcla con un 10 % de subproducto, ambos umbrales caen de manera paralela, bajando el LL a un 23 % y el LP al 9 %, provocando que el IP se mantenga constante en un 14 %.

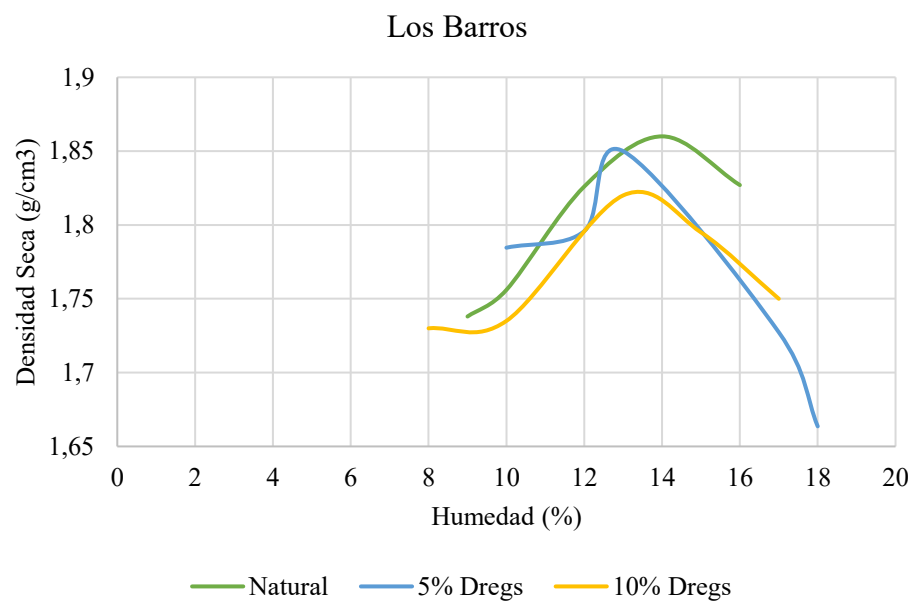
4.4.2 Proctor modificado Suelo – *Dregs*

El ensayo Proctor Modificado permitió identificar cómo la adición progresiva del residuo altera la demanda de agua y la capacidad de densificación de los materiales bases. A continuación, la Tabla 4.13 consolida los parámetros Proctor obtenidos para las matrices de los cuatro suelos, evaluadas bajo las dosificaciones antes mencionadas.

Tabla 4.13 Densidad Máxima Compactada Seca y Humedad Óptima para las mezclas estabilizadas

Suelo	% Dregs	HO (%)	DMCS (g/cm ³)	95% DMCS (g/cm ³)
Los Barros	0	14	1,86	1,77
	5	13	1,85	1,76
	10	13	1,82	1,73
Nihuinco	0	47	1,00	0,95
	5	42	1,03	0,98
	10	46	1,06	1,01
Totoras S3	0	21	1,68	1,60
	5	22	1,6	1,52
	10	21	1,63	1,55
Encanto 2	0	12	1,96	1,86
	5	11	1,98	1,88
	10	13	1,94	1,84

A continuación, las Figuras 4.14, 4.15, 4.16 y 4.17 permiten visualizar la variación en las curvas de compactación de cada suelo a medida que se incorpora el subproducto, contrastando el comportamiento del suelo en estado natural con las distintas dosificaciones de *Dregs*.

**Figura 4.14 Curva de Proctor Modificado suelo Los Barros + %Dregs**

Las curvas de compactación para el suelo Los Barros (Figura 4.14) indican que, en su estado natural, la matriz alcanza una DMCS de 1,86 g/cm³ con una HO del 14 %. Al incorporar el subproducto se

observa una reducción continua en la capacidad de densificación, con un 5 % de adición, la densidad desciende levemente a $1,85 \text{ g/cm}^3$, y con 10 % llega a un valor de $1,82 \text{ g/cm}^3$, estabilizando la demanda hídrica para lograr la mayor densidad seca en un 13 %.

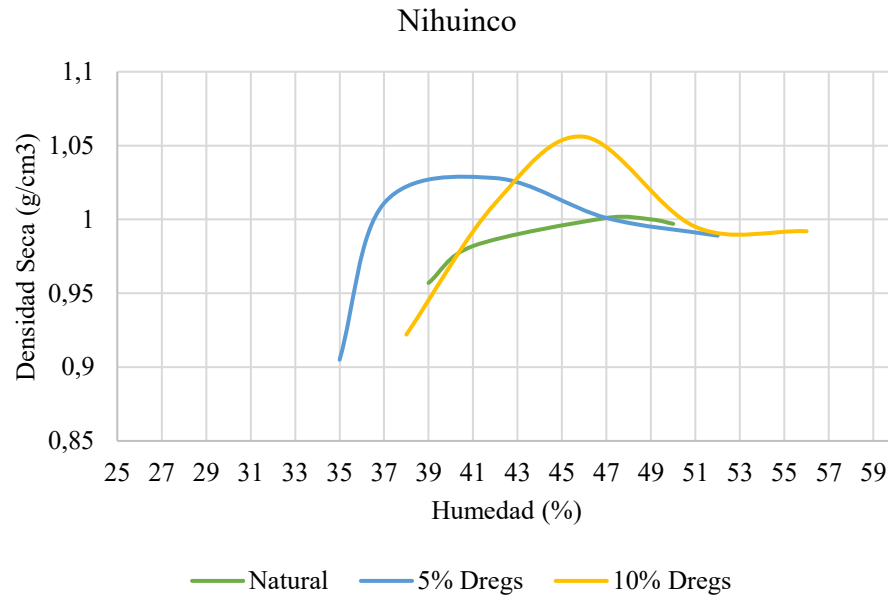


Figura 4.15 Curva de Proctor Modificado suelo Nihuinco + %Dregs

El predio Nihuinco presenta un comportamiento opuesto al resto de las muestras, caracterizado por un efecto de relleno (*filler*). El suelo natural posee una densidad excepcionalmente baja ($1,00 \text{ g/cm}^3$) y un alto contenido de humedad (47 %), lo que es indicativo de un suelo con un alto índice de vacíos. Al adicionar *Dregs*, la DMCS experimenta un aumento progresivo, elevándose a $1,03 \text{ g/cm}^3$ con el 5 % de dosificación, y alcanzando un máximo de $1,06 \text{ g/cm}^3$ con el 10 % de subproducto. De la Figura 4.15, se observa que la curva se desplaza alterando la humedad óptima, la cual cae a 42 % en la primera mezcla y repunta a 46 % en la segunda. Esta mejora en la densidad seca, aunque sea leve, demuestra que las partículas del aditivo logran infiltrarse eficientemente en los espacios vacíos del suelo natural sin necesidad de reemplazar a las partículas de suelo natural, logrando un empaquetamiento de la estructura de suelo introduciendo más masa en el mismo volumen.

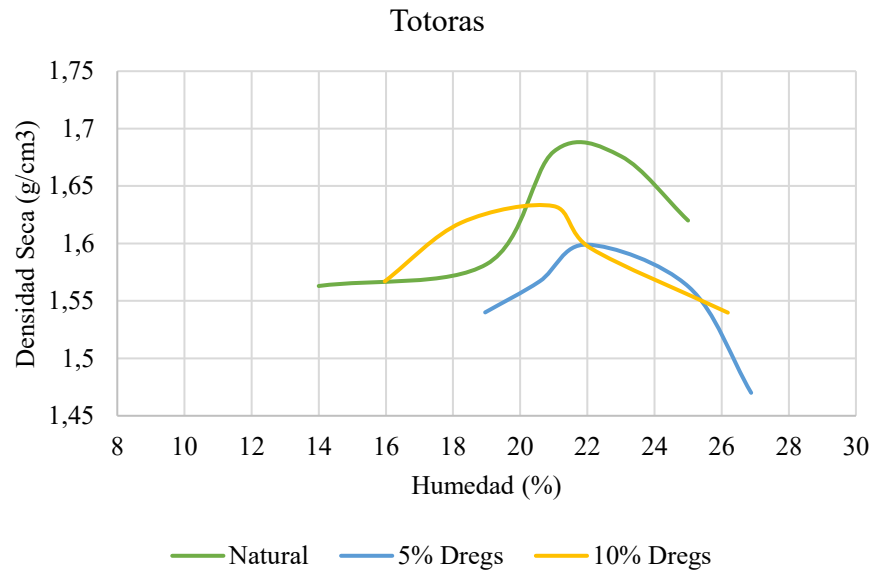


Figura 4.16 Curva de Proctor Modificado suelo Totoras + %Dregs

De la Figura 4.16 se puede ver que la curva del suelo natural presenta una campana de compactación prominente y de pendiente pronunciada, logrando un valor de DMCS de $1,68 \text{ g/cm}^3$ y humedad óptima del 21 %. Con la incorporación del 5 % de *Dregs*, la curva sufre un descenso en el eje de las ordenadas, haciendo que la DMCS sea de $1,60 \text{ g/cm}^3$ y elevando la HO discretamente a 22 %. La adición del 10 % logra recuperar parcialmente la forma de campana y eleva la curva por sobre la del 5 %, pero sin lograr acercarse a la eficiencia de empaquetamiento del suelo en estado natural, obteniendo un valor de DMCS de $1,63 \text{ g/cm}^3$ y volviendo la humedad óptima al 21 %.

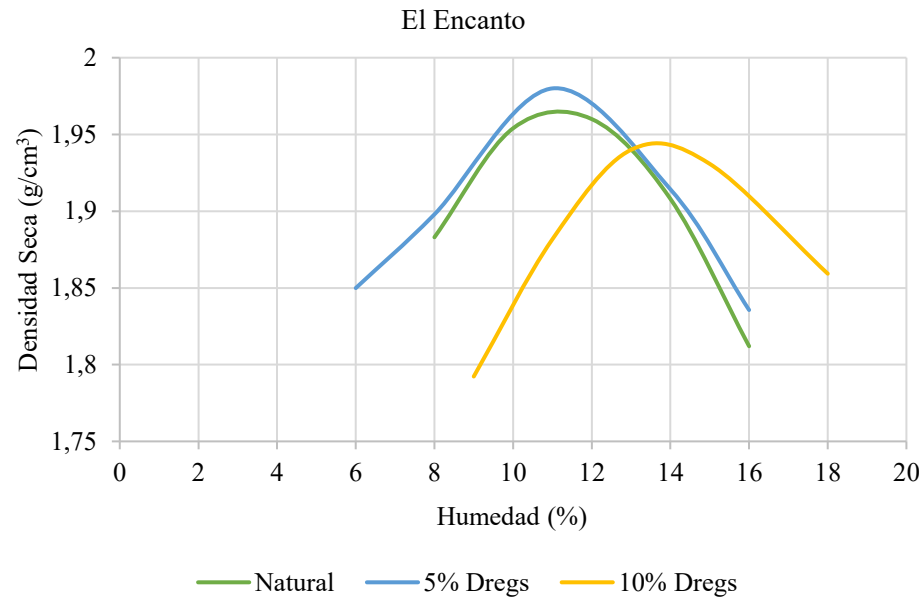


Figura 4.17 Curva de Proctor Modificado suelo El Encanto + %Dregs

La evolución del suelo El Encanto (Figura 4.17) describe una curva de respuesta con un umbral de optimización intermedio. Partiendo de una DMCS alta de $1,96 \text{ g/cm}^3$ para una HO de 12 %, la adición del 5 % de *Dregs* logra un leve incremento en la densificación, alcanzando el valor máximo de todas las mezclas suelo-*Dregs* analizadas, con $1,98 \text{ g/cm}^3$ y reduciendo la demanda de agua al 11 %. En este punto el subproducto actúa como relleno ideal para los escasos vacíos intersticiales del suelo. Sin embargo, con la adición del 10 %, la densidad cae a un $1,94 \text{ g/cm}^3$ y la humedad óptima se eleva al 13 %. Este quiebre evidencia un cambio mecánico hacia un efecto de desacomodo de las partículas. Al llenarse los vacíos disponibles, una dosis alta de *Dregs* ocupa el volumen que antes correspondía a los granos de suelo, aligerando el peso total de la mezcla. Simultáneamente, este exceso de subproducto impide el roce natural de las partículas de suelo, dificultando que se compacten adecuadamente frente a la energía aplicada.

4.5. Razón de Soporte de California (CBR) Suelo-*Dregs*

Luego de evaluar la plasticidad y la compactación de las mezclas suelo-*Dregs*, los resultados del CBR para estas mezclas permitió simular las condiciones más desfavorables en terreno para verificar la capacidad de soporte real de estas. En la Tabla 4.14 se presentan los resultados obtenidos para cada suelo con la incorporación de *Dregs* correspondiente.

Tabla 4.14 Resumen de resultados CBR para mezclas suelo-*Dregs*

Suelo	% Dregs	HO (%)	DMCS (g/cm ³)	95% DMCS (g/cm ³)	CBR al 100% de DMCS (%)	CBR al 95% de DMCS (%)
Los Barros	0	14%	1,860	1,767	28%	15%
	5	13%	1,850	1,758	15%	11%
	10	13%	1,820	1,729	10%	6%
Nihuinco	0	47%	1,000	0,950	24%	18%
	5	42%	1,030	0,979	22%	15%
	10	46%	1,060	1,007	22%	17%
Totoras S3	0	21%	1,680	1,596	12%	5%
	5	22%	1,600	1,520	8%	4%
	10	21%	1,630	1,549	5%	2%
Encanto 2	0	12%	1,960	1,862	11%	6%
	5	11%	1,980	1,881	5%	4%
	10	13%	1,940	1,843	3%	1%

Al observar la evolución de la capacidad de soporte a medida que se añade *Dregs*, se puede ver que en la mayoría de los casos produce una pérdida de resistencia. Para ilustrar de manera integral la evolución del CBR de cada suelo, las Figuras 4.18, 4.19, 4.20 y 4.21 presentan gráficamente la variación del CBR en función del porcentaje de *Dregs*.

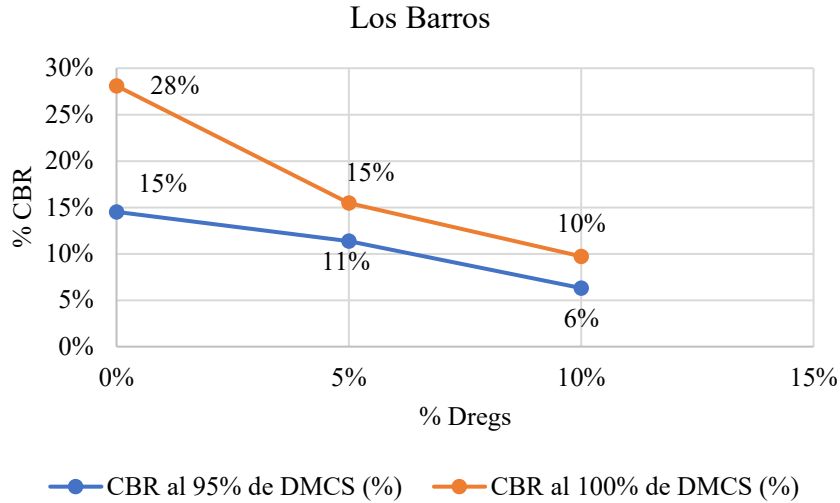


Figura 4.18 Porcentaje de CBR al 95 % y 100 % Los Barros

La Figura 4.18 expone un impacto netamente perjudicial del subproducto sobre la resistencia mecánica del suelo Los Barros. En su estado natural, el material exhibe una capacidad de soporte, alcanzando un CBR de 28 % al 100 % de la DMCS y un 15 % al 95 % de densificación. Sin embargo, la incorporación del residuo genera una degradación lineal y drástica de estos parámetros. Con un 5 % de *Dregs*, la resistencia máxima cae casi a la mitad (15 %), y al alcanzar la dosis del 10 % de *Dregs*, el CBR se desploma hasta un 10 %, y apenas un 6 % al 95 % de la DMCS.

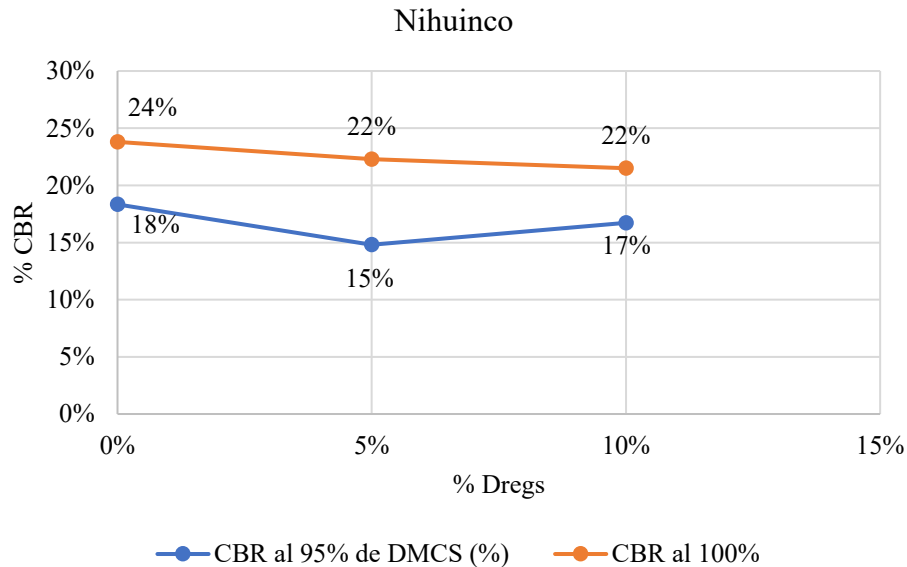


Figura 4.19 Porcentaje de CBR al 95 % y 100 % Nihuinco

Por otro lado, la Figura 4.19 presenta la variación de la razón de soporte del suelo Nihuinco, en donde se exhibe un comportamiento mecánico estable frente a la incorporación del subproducto. El suelo

natural registra valores iniciales competentes, con un CBR de 24 % al 100 % de la DMCS. Al dosificar la mezcla con un 5 % de *Dregs*, se produce un descenso mínimo que estabiliza la capacidad de soporte en un 22 %. Al incrementar la dosis de *Dregs* al 10 %, la capacidad de soporte se mantiene constante en 22 %, mientras que la resistencia al 95 % de la densidad máxima seca experimenta un ligero aumento, subiendo de 15 % a 17 %.

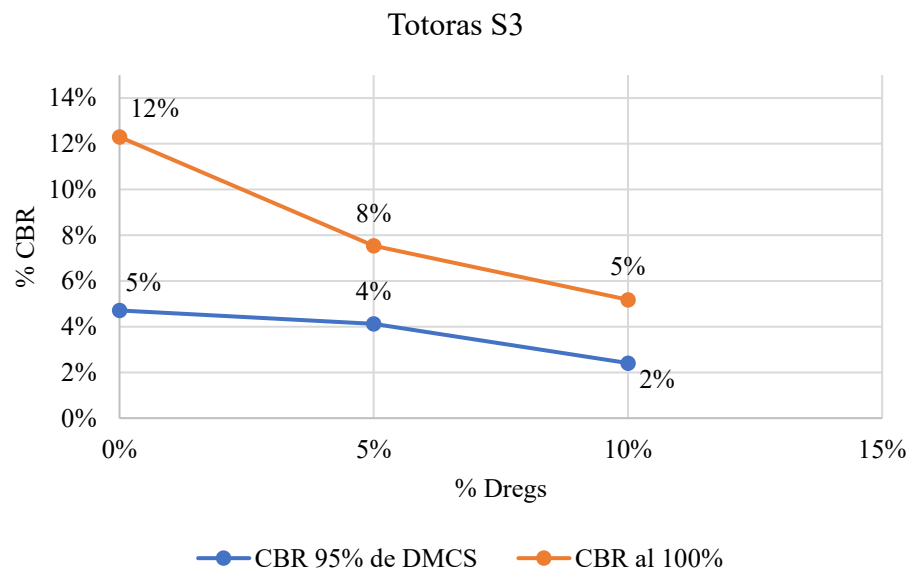


Figura 4.20 Porcentaje de CBR al 95 % y 100 % Totoras S3

El suelo Totoras (Figura 4.20) posee una capacidad de soporte natural baja, la cual se ve aun más comprometida por la presencia del subproducto. El suelo natural alcanza un valor máximo de CBR de 12 % al 100 % de la DMCS, valor que desciende a un 8 % tras la adición del 5 % de *Dregs*. Al analizar la mezcla con un 10 % de aditivo, el CBR cae hasta un 5 %, y al 95 % de densidad baja a un 2 % siendo un valor crítico en el diseño. La caída drástica del CBR con el 10 % de *Dregs* puede ser consecuencia a la posible a la sobre compactación que sufrió la probeta de 56 golpes, provocando que las partículas de suelo se hayan fracturado o pulverizado, lo que hizo que la curva carga-penetración de la probeta haya quedado incluso debajo de la curva de 10 golpes de compactación.

En los Anexos se presentan las gráficas de los valores de CBR para cada energía de compactación (10, 25 y 56 golpes) versus su densidad, además de las curvas de compactación.

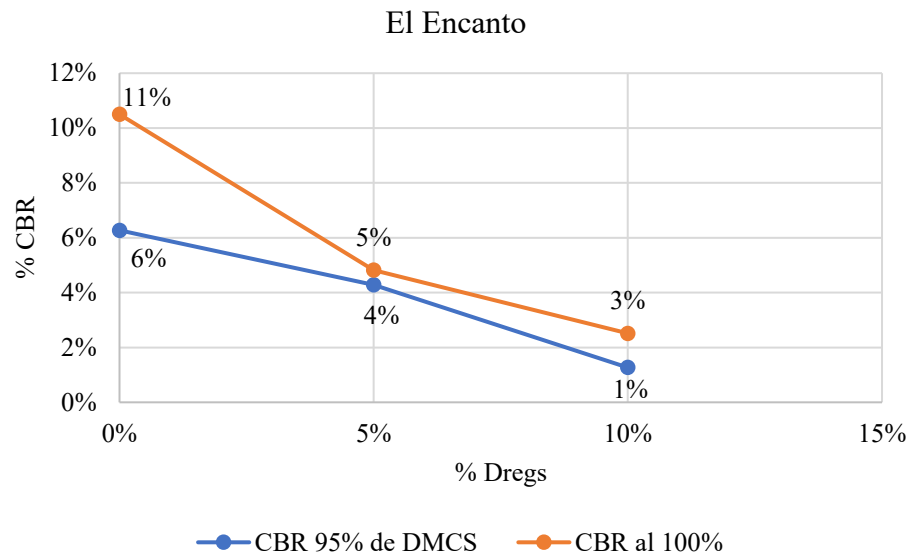


Figura 4.21 Porcentaje de CBR al 95 % y 100 % El Encanto

El análisis del suelo El Encanto (Figura 4.21) muestra la pérdida de soporte más drástica de la investigación. Partiendo con un CBR del suelo en estado natural de 11 % al 100 % de la densidad máxima compactada seca, la incorporación de un 5 % de *Dregs* reduce la resistencia más del 50 %, dando un valor de 5 %. Al aumentar la dosificación al 10 %, la razón de soporte del suelo queda prácticamente nula, registrando un 3 % y un CBR de diseño (al 95 % de la DMCS) del 1 %.

4.6. Conclusiones

La evaluación experimental realizada en este capítulo permitió establecer el impacto de la incorporación del subproducto industrial *Dregs* sobre las propiedades física-mecánicas de los suelos estudiados.

De los ensayos de plasticidad, se observó que la incorporación de *Dregs* en los suelos estudiados altera la plasticidad de los suelos naturales, evidenciando un comportamiento fluctuante según cada tipo. En el predio Totoras S3, la adición de *Dregs* en dosis del 5 % y 10 %, incrementó el Índice de Plasticidad desde un 16 % en su estado natural hasta un 23 %, impulsado principalmente por una reducción en su Límite Plástico de 24 % a 17 % y 18 %. El suelo Nihuinco experimentó un comportamiento similar, aumentando su Índice de Plasticidad, pasando de un 7 % inicial a un 13 % con la dosis máxima del 10 % de aditivo. Por otro lado, suelos como El Encanto exhibieron un comportamiento variable, donde el Índice de Plasticidad del 23 % se redujo a 14 % con 5 % y 10 % de *Dregs*, impulsado por una fuerte caída en su Límite Líquido (de 37 % a 23 % en la dosis máxima). Estos resultados demuestran que la

incorporación de *Dregs* modifica la demanda hídrica de las mezclas y altera de manera directa su comportamiento plástico.

Con respecto al Proctor Modificado, el impacto del aditivo demostró estar asociado con la naturaleza de cada suelo, identificando dos comportamientos opuestos. En los suelos Los Barros, Totoras S3 y El Encanto, la adición de *Dregs* produjo una disminución progresiva de la densidad máxima compactada seca (DMCS). A modo de ejemplo, con la dosis máxima del 10 %, el suelo Los Barros descendió de 1,86 a 1,82 g/cm³, y Totoras S3 disminuyó de 1,68 a 1,63 g/cm³. Por la otra vereda, el suelo Nihuinco experimentó un aumento sutil de su densidad máxima, alcanzando los 1,06 g/cm³ al 10 % de adición. En simultaneo, su humedad óptima se mantuvo relativamente estable, variando precariamente de un 47 % a un 46 % con la máxima dosis ensayada.

En la evaluación de la Razón de Soporte de California (CBR), las mezclas exhibieron respuestas dispares frente a las exigencias mecánicas. Para la mayoría de los predios, la incorporación de *Dregs* se tradujo en caídas abruptas de la resistencia en condiciones saturadas. Evaluadas al 100 % de la DMCS, la resistencia del suelo Los Barros cayó del 28 % en su estado natural al 10 % con un 10 % de adición de *Dregs*, Totoras S3 descendió del 12 % al 5 %, mientras que El Encanto bajó drásticamente del 11 % al 3 %. Por el contrario, de forma coherente con su mejora en densificación, el suelo Nihuinco fue el único capaz de amortiguar el impacto del aditivo. En este caso, se registró un CBR del 22 % (al 100 % de DMCS) con un 10 % de *Dregs*, conservando valores superiores al 17 % bajo el estándar de diseño del 95 % de la DMCS.

En conclusión, los ensayos realizados permitieron establecer que la incorporación de *Dregs*, en dosis hasta el 10 %, no constituye una técnica de mejora estructural viable para los suelos analizados, debido a la disminución comprobada en su capacidad de soporte y las alteraciones perjudiciales en su comportamiento plástico.

CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES

La presente investigación evaluó experimentalmente la influencia del subproducto industrial *Dregs* (en dosificaciones del 0 %, 5 % y 10 %) en las propiedades físicas y mecánicas de cuatro suelos de la región del Biobío, Los Barros, clasificado como Arena Limosa (SM) según el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos, Nihuinco (Limo de Alta Plasticidad, MH), Totoras S3 (Arcilla de Baja Plasticidad, CL) y El Encanto (Arena Arcillosa, SC). El trabajo se sustentó en la necesidad de generar alternativas para la disposición final de los residuos generados en el proceso de producción Kraft. A partir de los ensayos desarrollados y del análisis comparativo entre los resultados obtenidos, se exponen las principales conclusiones, comentarios y proyecciones de la investigación.

Desde el punto de vista del comportamiento físico, el estudio demostró que la incorporación de *Dregs* altera significativamente la interacción del suelo con el agua. La evaluación de los límites de consistencia evidenció una tendencia generalizada hacia el aumento del Índice de Plasticidad, con excepción parcial de El Encanto, que mostró una estabilidad temprana en 14 % con el 5 % y 10 % de *Dregs*. Este aumento en la brecha de la plasticidad indica que el subproducto vuelve las matrices de suelo más reactivas y susceptibles frente a los cambios de humedad. En relación a los cambios en la densidad que sufrieron los suelos, el ensayo Proctor Modificado reveló que el subproducto genera una caída progresiva de la densidad máxima compactada seca en la mayoría de los suelos, actuando como un elemento que sustituye las partículas del suelo ocupando más volumen gracias a su baja densidad, esto genera que el peso total de la mezcla se reduzca y dificulta que las partículas naturales del terreno se acomoden y encajen correctamente entre si bajo la energía de compactación. El suelo Nihuinco, fue la única excepción, ya que se observó un aumento en su densidad, logrando que las partículas de *Dregs* hayan rellenado los vacíos mejorando su empaquetamiento.

Sin embargo, el factor determinante de la investigación para saber si el subproducto industrial *Dregs* constituye una alternativa viable en la estabilización de suelos fue la evaluación del desempeño mecánico mediante el ensayo CBR en condición saturada. Los resultados concluyeron que la adición de *Dregs* generó un impacto netamente perjudicial en la capacidad de soporte de las mezclas suelo-*Dregs*. Excepcionalmente, el predio Nihuinco logró mitigar el efecto negativo del aditivo, por otro lado, Los Barros, Totoras S3 y El Encanto sufrieron descensos importantes en su capacidad estructural, llegando en algunos casos a la casi nula capacidad de soporte en condición saturada.

Adicionalmente, el análisis de las curvas de carga-penetración permitió identificar que la mezcla dosificada con un 10 % del suelo Totoras S3 experimenta una falla por sobre compactación al ser sometida a la máxima energía de compactación (2800 kJ/m^3). Esto pudo haber provocado la reducción extrema de los espacios intersticiales impidiendo el drenaje del agua frente a la carga aplicada, teniendo como resultado un exceso de presión de poros que impidió el contacto entre partículas del suelo y colapsó la capacidad de soporte de la probeta de 56 golpes.

En respuesta a la evaluación de las dosificaciones más favorables para cada tipo de suelo, el análisis de las propiedades físico-mecánicas establece dosis óptimas de *Dregs* diferenciadas según la naturaleza de cada suelo. El escenario de mayor viabilidad técnica se presenta en el suelo Nihuinco, donde la magnitud más favorable corresponde a la adición del 10 % de *Dregs*, esta dosis logra retener el CBR en un 22 % y amortigua los efectos de la saturación.

Por otro lado, El Encanto exige una magnitud que conlleva compromiso técnico, situando su dosificación óptima en 5 %. Esta proporción conlleva el máximo beneficio físico, disminuyendo considerablemente el Índice de Plasticidad sin comprometer totalmente la capacidad de soporte. Finalmente, para las matrices de Los Barros y Totoras S3, la evaluación experimental determina que ninguna de las dosis de *Dregs* (5 % y 10 %) constituye alguna mejora en las propiedades de estos suelos, por lo que la dosis recomendada es nula.

En conjunto, los resultados obtenidos tras la evaluación experimental llevada a cabo permiten concluir que la incorporación de *Dregs*, en dosificaciones de hasta un 10 %, no constituye una alternativa viable para la mejora de los suelos evaluados, especialmente en términos de capacidad de soporte. Lejos de aportar un beneficio estructural, la adición de este subproducto industrial debilita las matrices de los suelos naturales y reduce su capacidad para soportar cargas, descartando su aplicabilidad como material estabilizador de suelos destinados a la construcción de caminos forestales.

REFERENCIAS

- ASTM International. (2017). *ASTM D2216-17: Standard test methods for laboratory determination of water (moisture) content of soil and rock by mass*. <https://www.astm.org/d2216-17.html>
- ASTM International. (2017). *ASTM D2487-17: Standard practice for classification of soils for engineering purposes (Unified Soil Classification System)*. <https://www.astm.org/d248717.html>
- ASTM International. (2017). *ASTM D422-63(2007)e2: Standard test method for particle size analysis of soils*. <https://www.astm.org/d0422-63r07e02.html>
- Ayala, S. (2024). Mejoramiento de la capacidad de soporte del terreno de fundación vial conformado por suelos finos, incorporando fibras resultantes del triturado de mascarillas quirúrgicas recicladas – Región Ucayali. Universidad San Ignacio de Loyola. <https://hdl.handle.net/20.500.14005/14897>
- Contreras, P. (2024). Evaluación de la aplicación de residuos de celulosa *Dregs*- Grits en mezclas de hormigones. Memoria de título, Universidad de Concepción, Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Civil.
- De Oliveira, A. I., Subhani, M., Aramburu, A. B., Rossetto, H. L., Trindade, G. H., dos Santos, W. J., y de Avila Delucis, R. (2023). Use of *Dregs* as a Replacement for Hydrated Lime in Cement Coating Mortar. *Journal of Composites Science*. <https://doi.org/10.3390/jcs7050181>
- Instituto Nacional de Normalización. (1979). NCh1515:1979 *Mecánica de suelos – Determinación de la humedad*. Santiago, Chile: INN.
- Instituto Nacional de Normalización (1979). NCh1517/1:1979 *Mecánica de suelos – Límites de consistencia – Parte I: Determinación del límite líquido*. Santiago, Chile: INN.

- Instituto Nacional de Normalización (1979). NCh1517/2:1979 *Mecánica de suelos – Límites de consistencia – Parte 2: Determinación del límite plástico*. Santiago, Chile: INN.
- Instituto Nacional de Normalización. (1980). NCh1532:1980 *Mecánica de suelos – Determinación de la densidad de partículas sólidas*. Santiago, Chile: INN.
- Instituto Nacional de Normalización (2008). NCh1534/2:2008 *Mecánica de suelos – Relaciones humedad/densidad – Parte 2: Métodos de compactación con pisón de 4,5 kg y 457 mm de caída*. Santiago, Chile: INN.
- Instituto Nacional de Normalización (2010). NCh 1852:2010 *Mecánica de suelos – Determinación de la razón de soporte de suelos compactados en laboratorio*. Santiago, Chile: INN.
- Mamanchura, E. (2022). Influencia del uso de cenizas volantes en la estabilización de suelos para la pavimentación en la Av. Alfonso Ugarte, distrito de San Antonio – Moquegua, 2021 Universidad Continental. <https://hdl.handle.net/20.500.12394/12954>
- Meisenbichler, N. (2020). Reducción del uso de agua en una planta de celulosa: análisis técnico y propuesta de mejora. <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/175802>
- Oñat, Á., Rodríguez M., Tapia H. (2023). Gestión de residuos sólidos de la industria de celulosa Kraft. *El futuro del papel en Chile y el mundo*, 38(Nº2), 24.
- Park, J., and Santamarina, J. C. (2017). *Revised soil classification system RSCS*. Proceedings of the 19th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Seoul 2017. p.1081-1084.
- Parra, M. (2018). Estabilización de un suelo con cal y ceniza volante. Trabajo de Grado. Universidad Católica de Colombia. Facultad de Ingeniería. Programa de Ingeniería Civil. Bogotá, Colombia. <https://hdl.handle.net/10983/22856>

- Poblete Hernández, P., Gysling Caselli, J., Alvarez González, V. (2023). Anuario forestal 2023. INFOR. <https://doi.org/10.52904/20.500.12220/32652>
- Poblete Hernández, P., Kahler González, C., Bañados M., J. (2024). Anuario forestal 2024. INFOR. <https://doi.org/10.52904/20.500.12220/32753>
- Ruiz S. (2023). Evaluación de la influencia del reemplazo parcial de cemento por residuo *Dregs-Grits* en la resistencia a la compresión y flexión de morteros. Memoria de título, Universidad de Concepción, Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Civil. <https://repositorio.udec.cl/server/api/core/bitstreams/1e0c59c6-e169-47bb-b13f-40aab5cb0002/content>
- Sepúlveda, P. (2024). Evaluación del uso del subproducto de celulosa *Dregs-Grits* como filler en mezclas de hormigón. Memoria de título, Universidad de Concepción, Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Civil.
- Torres, C. M. M. E., Pedroti, L. G., Silva, C. M., Fernandes, W. E. H., Viana, N. G., Martins, R. O. G., Lima, G. E. S., Sathler, L. M., Andrade, I. K. R., y Caetano, M. A. (2017). Use of Alkaline Solid Wastes from Kraft Pulp and Paper Mills, *Dregs* and Grits in Cement Production. Minerals, Metals and Materials Series.
- Villar M. (2017). Evaluación de la aplicación de residuos de celulosa grits en mezclas de hormigones. Memoria de título, Universidad de Concepción, Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Civil.

ANEXO 1.1 Contribución a los objetivos de desarrollo sostenible

Los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) constituyen un llamamiento universal a la acción para poner fin a la pobreza, proteger el planeta y mejorar las vidas y las perspectivas de las personas en todo el mundo. Seleccione a cuál o cuáles de los 17 ODS contribuye su trabajo de Memoria de Título:

- ☐ ODS-1 : Fin de la pobreza.
- ☐ ODS-2 : Hambre cero.
- ☐ ODS-3 : Salud y bienestar.
- ☐ ODS-4 : Educación de calidad.
- ☐ ODS-5 : Igualdad de género.
- ☐ ODS-6 : Agua limpia y saneamiento.
- ☐ ODS-7 : Energía asequible y no contaminante.
- ☐ ODS-8 : Trabajo decente y crecimiento económico.
- ☒ ODS-9 : Industria, innovación e infraestructura.
- ☐ ODS-10 : Reducción de las desigualdades.
- ☐ ODS-11 : Ciudades y comunidades sostenibles.
- ☒ ODS-12 : Producción y consumo responsables.
- ☐ ODS-13 : Acción por el clima.
- ☐ ODS-14 : Vida Submarina.
- ☐ ODS-15 : Vida de ecosistemas terrestres.
- ☐ ODS-16 : Paz, justicia e instituciones sólidas.
- ☐ ODS-17 : Alianzas para lograr los objetivos.

Vinculación

El tema desarrollado se vincula directamente con los ODS 9 y 12: Industria, Innovación e Infraestructura, y Producción y consumo responsables, al abordar una problemática relevante para la industria forestal desde una perspectiva de innovación y eficiencia en el uso de recursos. La investigación propone la evaluación experimental del comportamiento físico-mecánico de suelos frente a la adición de *Dregs*, un subproducto industrial resultante del proceso Kraft, aportando sustento científico para fomentar la innovación en el diseño y construcción de caminos forestales. Respecto al ODS 9, esta aproximación constituye una innovación tecnológica que busca disminuir la dependencia de materiales tradicionales en la estabilización de suelos, como el ripio, favoreciendo procesos más amigables ambientalmente. Respecto al ODS 12, El uso del *Dregs* introduce prácticas de economía circular, integrando residuos industriales en nuevas aplicaciones constructivas y generando un valor agregado dentro del sector productivo. Además, el estudio aporta conocimiento experimental que fortalece la capacidad científica y tecnológica relacionada con materiales sustentables, promoviendo alternativas que podrían incorporarse en futuras soluciones de infraestructura de bajo impacto ambiental.

ANEXO 3.1 DENSIDAD DE PARTÍCULAS SÓLIDAS

En el presente anexo se presenta el procedimiento para determinar la densidad de partículas sólidas de los suelos.

3.1.1 Objetivo del ensayo

El objetivo de este procedimiento fue determinar la densidad de las partículas sólidas de las muestras de suelo en estudio, definida como el cociente entre la masa de las partículas sólidas y el volumen que estas ocupan, excluyendo los vacíos entre ellas.

3.1.2 Equipos y materiales utilizados

- Picnómetros
- Balanza con precisión de 0,01 g
- Reductor de presión (bomba de vacío)
- Termómetro graduado
- Recipientes, brochas, poruñas, embudo
- Estufa u horno de secado

3.1.3 Procedimiento experimental

La ejecución del ensayo se desarrolló siguiendo las directrices de la norma chilena NCh1532:1980, mediante los siguientes pasos:

- Calibración del picnómetro: Se limpió, secó, pesó y registró la masa de cada picnómetro vacío (M_f), luego se vació agua a temperatura ambiente hasta que la parte inferior del menisco coincidiera con la marca de calibración. Se secó el interior del cuello del picnómetro y también el exterior. Se registró la masa del picnómetro más el agua (M_a). Se determinó una tabla de valores de M_a para una serie de temperaturas aproximada a 1 °C.
- Preparación de la muestra: Se obtuvo una muestra representativa de cada suelo, la cual fue secada en horno a temperatura de 110 ± 5 °C hasta alcanzar masa constante. Posteriormente, se dejó enfriar hasta alcanzar la temperatura ambiente.
- Pesaje inicial: Se determinó la masa de la muestra de suelo seco a ensayar (m_s) y se introdujo cuidadosamente en el picnómetro, el cual se encontraba previamente limpio y calibrado.

- Hidratación y remoción de aire: Se añadió agua en el picnómetro hasta alcanzar aproximadamente 3/4 de la capacidad. Para eliminar el aire atrapado entre las partículas sólidas y en el agua, se realizó mediante agitación y aplicación de vacío parcial.
- Enrase y estabilización térmica: Una vez extraído el aire, se dejó enfriar el picnómetro a temperatura ambiente, luego se agregó agua hasta llenar el picnómetro y se registró la masa del picnómetro con el suelo y el agua (M_m). Inmediatamente después, se introdujo el termómetro en el picnómetro para registrar la temperatura de ensayo (T_x) y controlándola con precisión de ± 1 °C.

3.1.4 Expresión de resultados

La densidad de partículas sólidas (ρ_s) se calculó aplicando la siguiente expresión:

$$\rho_s = \frac{m_s}{(m_s + M_a - M_m)} \times \rho_{wtx}$$

donde:

- m_s : masa del suelo seco (g),
- M_a : masa del picnómetro con agua (g),
- M_m : masa del picnómetro con suelo y agua (g),
- ρ_{wtx} : densidad del agua a la temperatura de ensayo (g/cm³).

Para expresar la gravedad específica respecto al agua a 20 °C, se aplicó la corrección térmica según la siguiente expresión:

$$G_s = \frac{m_s}{(m_s + M_a - M_m)} \times K$$

donde K corresponde al factor de corrección de densidad del agua en función de la temperatura.

Este procedimiento permitió determinar la gravedad específica (G_s) de los suelos en estado natural.

ANEXO 3.2 ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO

En el presente anexo se presenta el procedimiento para determinar el análisis granulométrico de los suelos.

3.2.1 Objetivo del ensayo

El objetivo de este procedimiento fue determinar la distribución del tamaño de partículas de los suelos en estudio para fracciones mayores a 0,075 mm (tamiz N°200).

3.2.2 Equipos y materiales utilizados

- Juego de tamices estándar según especificaciones de la norma, en este trabajo experimental se utilizaron los tamices N°4, N°10, N°20, N°40, N°60 y N°200, incluyendo tapa y fondo.
- Tamizador mecánico.
- Balanza de precisión con sensibilidad de 0,1 g.
- Horno de secado con circulación de aire y temperatura regulable.
- Mortero para disgregar las partículas aglomeradas, sin reducir el tamaño de los granos individuales.
- Espátulas, brochas, recipientes.

3.2.3 Procedimiento experimental

La ejecución del ensayo se desarrolló siguiendo lo estipulado en la norma internacional ASTM D6913, contemplando la separación de la fracción fina mediante lavado. Los pasos fueron los siguientes:

- Preparación de la muestra: Se obtuvo muestra representativa de cada suelo, la cual fue secada en horno a $110 \pm 5^{\circ}\text{C}$ hasta alcanzar masa constante. Tras enfriarse se registró su masa seca total inicial.
- Lavado sobre el tamiz N°200: Para asegurar la correcta separación de los finos adheridos a los granos, las muestras se sometieron a un proceso de lavado. El material se colocó sobre el tamiz N°200 y se vertió agua corriente mientras se agitaba manualmente. El lavado concluyó cuando el agua que atravesaba el tamiz N°200 se observó completamente cristalina.
- Secado del material retenido: Todo el material retenido en el tamiz N°200 fue recuperado cuidadosamente, depositado en un recipiente y secado nuevamente en horno. Una vez seco y frío se registró su masa para determinar la cantidad de finos mediante la diferencia entre la masa inicial y la masa después del lavado.

- Tamizado en seco: La fracción seca y lavada se vertió en la parte superior del juego de tamices, se instaló en el tamizador mecánico durante un periodo de tiempo necesario para asegurar la separación completa de las partículas de suelo según su tamaño.
- Pesaje: Una vez finalizada la agitación, se desmontó el juego de tamices. Usando una brocha se extrajo y se pesó cuidadosamente la fracción de suelo retenida en cada uno de los tamices (M_{ret}).

3.2.4 Expresión de resultados

Los resultados del ensayo se expresaron en términos de porcentaje. Para cada tamiz, se calculó el porcentaje retenido y el porcentaje retenido acumulado. Finalmente, el porcentaje de material que pasa para, se determinó mediante la siguiente ecuación.

$$\% Pasa = 100 - \sum \% Retenido Acumulado$$

Donde el porcentaje retenido en cada tamiz se calculó respecto a la masa seca total inicial (M_t):

$$\% Retenido = \left(\frac{M_{ret}}{M_t} \right) \times 100$$

ANEXO 3.3 LÍMITES DE CONSISTENCIA

En el presente anexo se presenta el procedimiento para determinar los límites de consistencia.

3.3.1 Objetivo del ensayo

El objetivo de este procedimiento fue determinar los límites de consistencia tanto de los suelos como de las mezclas suelo-*Dregs*, estableciendo el contenido de humedad que define los límites entre los estados líquido, plástico y semisólido de los materiales. A partir de la obtención del límite líquido (LL) y el límite plástico (LP), se calculó el índice de plasticidad (IP).

3.3.2 Equipos y materiales utilizados

- Aparato de Casagrande
- Acanalador
- Placa de vidrio esmerilado
- Balanza con resolución de 0,01 g
- Plato de evaporación
- Espátula
- Cápsulas para secado
- Probeta graduada
- Horno de secado con circulación de aire y temperatura regulable

3.3.3 Procedimiento experimental

La ejecución del ensayo se realizó siguiendo lo establecido en la norma chilena NCh1517/1 y NCh1517/2 mediante los siguientes pasos:

- Preparación del material: Para ambos casos se tomó una porción de material seco y tamizado a través del tamiz N°40, obteniendo una cantidad superior a 100 g para luego colocarlo sobre el plato de evaporación. Luego, se añadió agua y se mezcló utilizando la espátula hasta conseguir una humedad homogénea, finalmente se dejó saturar durante el tiempo necesario para que las partículas hayan sido hidratadas de manera uniforme.
- Determinación del límite líquido:
 - Se tomó una porción de la pasta acondicionada y se colocó en la copa de bronce del aparato de Casagrande, aplanando la superficie hasta alcanzar un espesor máximo de aproximadamente 10 mm en el centro.

- Utilizando el acanalador, se trazó una ranura recta en el centro de la masa de suelo, dividiéndola en dos mitades lo más simétricas posible.
- Se giró la manivela de la máquina de Casagrande a una velocidad constante de 2 caídas por segundo, registrando el número de golpes necesarios para que la ranura se cerrara en una longitud de 10 mm.
- Se extrajo una muestra de la zona donde se juntó el material y se depositó en una cápsula previamente pesada para determinar su contenido de humedad.
- Se repitió el ensayo ajustando el contenido de agua de la pasta, hasta obtener al menos tres puntos de ensayo con número de golpes idealmente entre 15 y 35.
- Determinación del límite plástico:
 - Se tomó una porción de la muestra de ensaye acondicionada de aproximadamente 1 cm³ y se amasó formando una esfera.
 - La muestra se amasó entre las manos para luego hacerla rodar sobre la superficie de amasado, ejerciendo una presión leve con la palma de la mano hasta conformar un cilindro.
 - El amasado continuó hasta que el cilindro se disgregó al llegar a un diámetro de aproximadamente 3 mm, en trozos del orden de 0,5 a 1 cm de largo y no pudo ser reamasado ni reconstituido.
 - Inmediatamente, se recolectaron los fragmentos desmoronados en una capsula tarada para determinar su contenido de humedad en el horno.

3.3.4 Expresión de resultados

Una vez secadas las cápsulas en el horno hasta obtener masa constante, los resultados se expresaron de la siguiente forma:

- Límite líquido: Se calculó la humedad de cada muestra y se construyó un gráfico semilogarítmico, con la humedad como ordenada en escala aritmética y el número de golpes como abscisa en escala logarítmica. Se marcaron los puntos correspondientes a los resultados de cada una de las pruebas efectuadas y se construyó una recta que se aproxime a dichos puntos. Finalmente, el límite líquido se expresó como la humedad correspondiente a la intersección de la recta de flujo con la abscisa de 25 golpes.
- Límite plástico: Se determinó como el promedio de las tres determinaciones de humedad efectuadas a las muestras de ensayo.

- Índice de plasticidad: El IP corresponde a la diferencia entre el límite líquido (LL) y el límite plástico (LP)

ANEXO 3.4 SISTEMA UNIFICADO DE CLASIFICACIÓN DE SUELOS

En el presente anexo se muestra el procedimiento para la clasificación de los suelos mediante el método del Sistema Unificado de Clasificación de Suelo (USCS).

3.4.1 Objetivo

Este procedimiento tiene como objetivo categorizar las muestras de suelos ensayados asignándoles una nomenclatura estandarizada. Esta clasificación, está basada en la distribución granulométrica y en los límites de consistencia.

3.4.2 Parámetros de entrada

La clasificación requiere la recopilación y análisis de los resultados de los ensayos antes mencionados:

- Porcentaje de material que pasa el tamiz N°200.
- Porcentaje de la fracción gruesa que pasa el tamiz N°4.
- Límite líquido e índice de plasticidad.

3.4.3 Criterios y procedimiento de clasificación

En la clasificación de suelos gruesos, el porcentaje de finos es un criterio decisivo que se evalúa en tres niveles:

- **Menos de 5 % de finos:** se considera un suelo limpio. Las propiedades de los finos son despreciables. La clasificación depende solo de la granulometría de la fracción gruesa.
- **Entre 5 % y 12 % de finos:** se considera un suelo “de borde” o con influencia dual. Los finos son suficientes para afectar el comportamiento del suelo, por lo que se requiere una doble simbología que incluya tanto la granulometría de la fracción gruesa como la plasticidad de los finos.
- **Más de 12 % de finos:** se considera un suelo “con finos”. En este caso, los finos dominan completamente el comportamiento del suelo. La matriz de finos llena los vacíos entre las partículas gruesas, controlando propiedades como la permeabilidad y resistencia.

En nuestro caso, dado que los suelos presentan un contenido de finos muy superior al umbral del 12 %, la clasificación y el comportamiento de estos depende críticamente de la plasticidad de esa fracción fina, por lo que es obligatorio realizar los ensayos de límites de consistencia para determinar si estos finos son de carácter limoso (M) o arcilloso (C) y así obtener la clasificación final correcta. Cuando más de la mitad de la fracción gruesa pasa por la malla N°4, los suelos se clasifican como arena (S).

Con los datos de granulometría y límites de consistencia se procedió a la clasificación final del suelo utilizando los diagramas y la Carta de Plasticidad (Figura A.3.1) especificados en la norma ASTM D2487. La carta grafica el índice de plasticidad en las ordenadas contra el límite líquido en el eje de las abscisas.

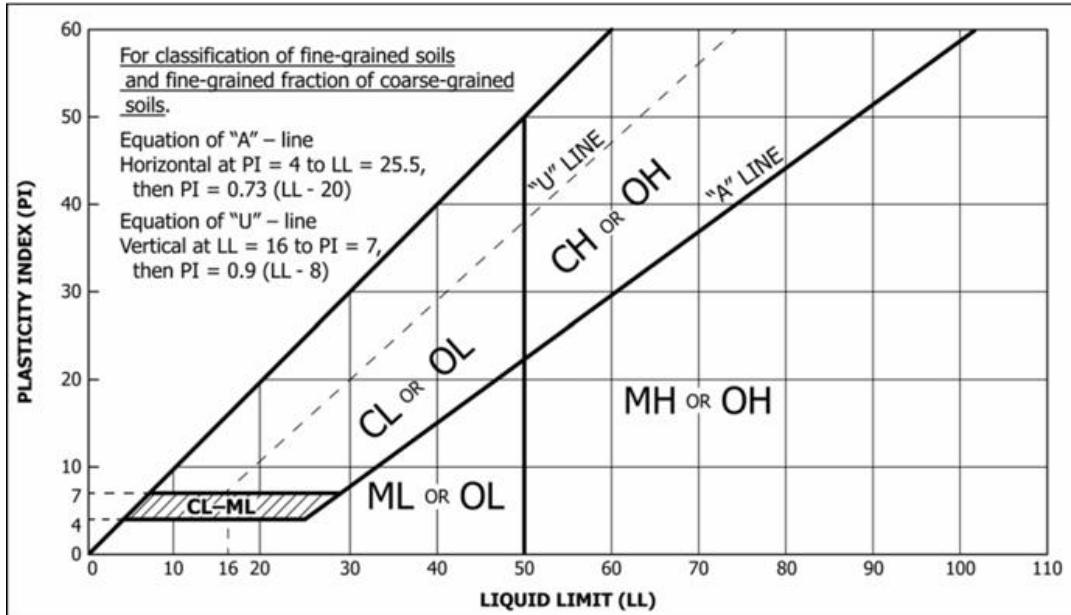


Figura A.3.1 Carta de Plasticidad de Casagrande

Fuente: ASTM D2487

- Línea vertical en $LL=50$: Divide los suelos finos en dos categorías de plasticidad:
 - o Baja plasticidad (L): si LL es menor a 50
 - o Alta plasticidad (H): si el LL es mayor a 50
- Línea "A": Es una línea diagonal que separa las arcillas (C) de los limos (M). Su ecuación es:

$$IP = 0,73 \times (LL - 20)$$

- o Si el punto (LL,IP) del suelo se grafica por encima de la Línea "A", se clasifica como Arcilla (C).
- o Si el punto se grafica por debajo de la Línea "A", se clasifica como Limo (M).
- o Existe una zona sombreada para suelos con IP entre 4 y 7 que reciben una clasificación dual CL-ML.

Además de la Línea "A", la Carta de Plasticidad incluye una línea superior conocida como Línea "U". El propósito de esta es servir como una herramienta de verificación de la calidad de los datos. Representa un límite superior empírico para todos los suelos naturales conocidos.

ANEXO 3.5 SISTEMA REVISADO DE CLASIFICACIÓN DE SUELOS

A continuación, se presenta el procedimiento de clasificación de suelos mediante el método del Sistema Revisado de Clasificación de Suelos (RSCS).

3.5.1 Objetivo

El objetivo de este ensayo es evaluar con precisión la sensibilidad de los suelos finos a la química del agua intersticial. A diferencia de otros sistemas, el RSCS define los suelos en base a cuál componente controla la resistencia y cuál controla el flujo, entregando una doble denominación que refleja de mejor forma el comportamiento real del material.

3.5.2 Procedimiento de la clasificación

- Análisis granulométrico: Se realiza este ensayo mediante tamizado para determinar el porcentaje de material que pasa por mallas estandarizadas, con ello se obtiene el porcentaje de grava, arena o finos.
- Límite líquido avanzado: Se realiza ensayo de límite líquido utilizando diferentes fluidos para evaluar la respuesta del suelo a su entorno químico. Utilizando el Método de penetrómetro de cono se obtiene el Límite Líquido con Agua Desionizada (LL_{dw}), Límite Líquido con Salmuera (LL_{brine}), Límite Líquido con Queroseno (LL_{ker}). Estos datos permiten determinar el factor de sensibilidad a la química del fluido intersticial (S_E).
- Análisis de la Carta de Clasificación Triangular (Soil-Specific Triangular Chart): Utilizando los porcentajes de grava, arena y finos obtenidos en el análisis granulométrico, se ubica la muestra de suelo en el gráfico triangular. Este gráfico permite una primera clasificación para determinar cuál es la fracción del suelo que domina el comportamiento mecánico e hidráulico. El RSCS utiliza una nomenclatura como G(F), S(F), o F(F), donde el primer término indica el control mecánico, es decir, que parte del suelo (grava, arena o los finos) soporta las carga y determina la resistencia, rigidez y compresibilidad del material; y el término entre paréntesis indica el control hidráulico, el cual hace referencia a que parte del suelo determina la permeabilidad y la forma en que el agua fluye a través del material. Las letras utilizadas son:
 - G = Grava (Gravel)
 - S = Arena (Sand)
 - F = Finos (Fines: limo y arcilla)

- Análisis del Gráfico de Clasificación de Finos (Fines Classification Chart): En este gráfico se utilizan los valores de los Límites Líquidos Avanzados para evaluar la plasticidad y la sensibilidad del suelo. Con este gráfico se determinará si el suelo tiene alta o baja plasticidad y alta o baja sensibilidad a la química del agua. Esto se codifica con letras como:
 - H = Alta plasticidad
 - L = Baja plasticidad
 - S = Alta sensibilidad
 - L = Baja sensibilidad
- Evaluación de la Sensibilidad a la Química del Fluido Intersticial: Se utilizan valores de los Límites Líquidos Avanzados para calcular los cocientes de sensibilidad y ubicar el suelo en el Gráfico de Sensibilidad a la Química del Fluido Intersticial. Se calculan las relaciones LL_{ker}/LL_{brine} y LL_{dw}/LL_{brine} . Estos puntos se grafican para determinar si el suelo se encuentra en la zona de baja sensibilidad ($S_E \approx 0,4$) o alta sensibilidad ($S_E \approx 1,2$). Este es el paso clave que determina si el suelo fino tiene alta sensibilidad (S) o baja sensibilidad (L). Esta información será parte de la nomenclatura final.

3.5.3 Resultados

La Tabla A.3.5.3.1 detalla de manera gráfica los resultados RSCS para los suelos.

Tabla A.3.5.3.1 Resultados RSCS para los suelos

Tipo de suelo	Soil-Specific Triangular Chart	Fines Clasification Chart	Sensitive to Pore Fluid Chemistry
Los Barros (29190)			

Nihuinco (29286)	<u>Soil-Specific Triangular Chart</u>	<u>Fines Classification Chart</u>	<u>Sensitivity to Pore Fluid Chemistry</u>
Totoras S3 (29285)	<u>Soil-Specific Triangular Chart</u>	<u>Fines Classification Chart</u>	<u>Sensitivity to Pore Fluid Chemistry</u>
Encanto 2 (29274)	<u>Soil-Specific Triangular Chart</u>	<u>Fines Classification Chart</u>	<u>Sensitivity to Pore Fluid Chemistry</u>

ANEXO 3.6 PROCTOR MODIFICADO

En este anexo se presenta el procedimiento para llevar a cabo el ensayo Proctor Modificado.

3.6.1 Objetivo del ensayo

El objetivo de este procedimiento experimental fue determinar la relación entre el contenido de humedad y la densidad seca de los materiales, mediante un procedimiento normado que consiste en compactar el suelo en un molde con un pisón de 4,5 kg y una caída de 460 mm, realizando esta compactación en 5 capas de 25 golpes cada una. A partir de este procedimiento, se estableció la Humedad Óptima (HO) y la Densidad Máxima Compactada Seca (DMCS) de cada suelo y mezcla suelo-*Dregs*.

Este ensayo se realizó según lo dispuesto en la norma NCh1534/2:2008, Relaciones humedad/densidad – Parte 2: Métodos de compactación con pisón de 4,5 kg y 460 mm de caída.

3.6.2 Equipos y materiales utilizados

- Moldes metálicos con collarín separable de aproximadamente 60 mm de altura.
- Pisón metálico con cara circular de $50 \pm 0,2$ mm de diámetro y una masa de 4500 ± 10 g. Debe estar equipado con una guía tubular para controlar la altura de caída de 460 ± 2 mm.
- Probetas graduadas.
- Balanza
- Horno de secado con temperatura regulable y circulación de aire.
- Regla de acero.
- Tamices
- Herramientas y pailas para mezclado, cuchara, llana, espátula, etc., o un dispositivo mecánico para mezclado.

3.6.3 Procedimiento experimental

El procedimiento constó con las siguientes etapas:

- Preparación y curado de las muestras: Para la evaluación de las mezclas, se homogeneizó el suelo natural con el subproducto *Dregs* (previamente secados en horno a 60 °C), en los porcentajes estipulados. Posteriormente, se incorporó agua de manera gradual y controlada mediante rociado, mezclando continuamente hasta alcanzar el contenido de humedad objetivo para cada punto de la curva.

- Proceso de compactación: En el molde Proctor correctamente ensamblado se introdujo el material en cinco capas del mismo espesor aproximadamente, cada una de las capas fue compactada mediante la aplicación de 25 golpes uniformemente distribuidos sobre la superficie de la capa utilizando el pisón metálico de 4,5 kg cayendo libremente desde 460 mm de altura. Durante la compactación de cada capa sucesiva, se “rayó” levemente la superficie de la capa anterior para lograr buena coherencia y evitar planos de falla.
- Enrase y pesaje: Una vez compactada la quinta capa, se retiró cuidadosamente el collarín del molde. Utilizando la regla metálica, se enrasó el suelo que estaba sobre el nivel del borde superior del molde proctor. Luego, se limpió el exterior del molde, se registró la masa del molde + suelo húmedo compactado y se le restó la masa del molde para determinar el peso del suelo compactado (m).
- Determinación de humedad: Se extrajo la probeta compactada del molde y se tomaron muestras de la parte central del cilindro de suelo para determinar la humedad del suelo compactado (w).
- Curva de compactación: Se repitió este procedimiento cinco veces con nuevas porciones de mezclas acondicionadas a diferentes contenidos de humedad, variando en incrementos del 2 % aproximadamente.

3.6.4 Expresión de resultados

Con los datos obtenidos, se determinó la densidad húmeda del suelo compactado (ρ_h) dividiendo la masa de suelo compactado que llena el molde por la capacidad volumétrica del molde:

$$\rho_h = \frac{m}{V}$$

Luego, con el contenido de humedad del suelo compactado, se calculó la densidad seca del suelo compactado (ρ_d) para cada determinación, de acuerdo con la fórmula siguiente:

$$\rho_d = \frac{100\rho_h}{w + 100}$$

Los valores de densidad seca resultantes en g/cm^3 se graficaron en las ordenadas frente a sus respectivos contenidos de humedad en % en las abscisas, construyendo una curva conectando cada uno de los puntos. El punto máximo de esta curva de compactación determinó gráficamente la Densidad Máxima Compactada Seca y su correspondiente Humedad Óptima.

ANEXO 3.7 RAZÓN DE SOPORTE DE CALIFORNIA

En el presente anexo se presenta el procedimiento necesario para determinar la capacidad de soporte tanto de los suelos en su estado natural como de las mezclas suelo-*Dregs*.

3.7.1 Objetivo del ensayo

El objetivo de este procedimiento experimental fue determinar la capacidad de soporte de un suelo compactado en laboratorio mediante la comparación de la carga de penetración del suelo en estudio y otro suelo patrón normalizado. Este ensayo conocido mundialmente como CBR, mide la resistencia al corte de un suelo bajo condiciones de humedad y densidad controladas, generalmente las óptimas y se realizará mediante las indicaciones de la NCh1852:2010, determinación de la razón de soporte de suelos compactados en laboratorio.

3.7.2 Equipos y materiales utilizados

- Moldes cilíndricos de compactación CBR con diámetro interno de $152,4 \pm 0,7$ mm y una altura de $177,8 \pm 0,5$ mm. Deben tener un collar de extensión metálico de 50,8 mm de altura y una placa base metálica de 9,5 mm de espesor con perforaciones de un diámetro menor o igual que 1,6 mm.
- Disco espaciador metálico, con un diámetro de $150,8 \pm 0,8$ mm y una altura de $61,4 \pm 0,2$ mm.
- Pisón metálico con cara circular de $50 \pm 0,2$ mm de diámetro y una masa de 4500 ± 10 g. Debe estar equipado con una guía tubular para controlar la altura de caída de 460 ± 2 mm (el mismo empleado en el Proctor Modificado).
- Masas de sobrecarga de $2,27 \pm 0,05$ kg cada una.
- Aparato medidor de expansión para determinar hinchamiento (trípode metálico con dial de lectura).
- Pistón de penetración metálico de $49,6 \pm 0,4$ mm de diámetro y una longitud no inferior a 101,6 mm.
- Depósito para inmersión de los moldes, horno, tamices, balanza, pailas, recipientes, probetas, poruñas, reglas, brochas, discos de papel filtro, cronómetro, etc.

3.7.3 Procedimiento experimental

La ejecución del ensayo se realizó de acuerdo con la norma ya mencionada, considerando la evaluación en condición saturada.

- Preparación y curado de las muestras: Se combinó suelo natural con el subproducto *Dregs* (ambos en estado seco) según las dosificaciones en estudio. Se incorporó agua mediante rociado continuo hasta alcanzar la Humedad Óptima (HO) previamente determinada en el

ensayo Proctor Modificado. La mezcla húmeda se almacenó herméticamente y se dejó en reposo hasta el día siguiente para asegurar una correcta hidratación de las partículas.

- Compactación de las probetas: Para cada molde se colocó el disco espaciador sobre la placa base, fijando el molde con su collarín de extensión sobre dicha placa y se puso un disco de papel filtro sobre el espaciador. El material acondicionado se compactó en cinco capas de espesor similar. Para evaluar la sensibilidad a la energía mecánica y obtener las curvas de diseño, se confeccionaron probetas compactadas a 10, 25 y 56 golpes por capa. Tras compactar la quinta capa, se retiró el collarín, se enrasó la superficie, se extrajo el disco espaciador, se pesó el molde y se invirtió la probeta sobre la placa base.
- Inmersión de las probetas: Sobre la superficie libre del suelo se dispusieron las masas de sobrecarga, empleando 4,54 kg para simular el peso de las capas superiores del camino. Se instaló el trípode con el dial, registrando la lectura inicial. Se sumergieron los tres moldes en el recipiente lleno de agua por un periodo de 96 horas. Finalizado el tiempo, se registró la lectura final del dial para calcular el porcentaje de hinchamiento.
- Ensayo de penetración: Tras dejar drenar el agua de los moldes, se falló cada molde mediante la penetración del pistón a una velocidad de 1,27 mm/min, registrando las lecturas de las cargas a intervalos regulares de penetración, comparando la carga necesitada para penetrar la muestra en 2,54 mm y 5,08 mm con respecto a cargas patrones. Esta relación muestra la capacidad de soporte medida como porcentaje de CBR (%CBR).

3.7.4 Expresión de resultados

- Curva Tensión – Deformación: Calcular las tensiones de penetración en MPa dividiendo las cargas aplicadas (kgf) por el área de la sección transversal del pistón (cm²), luego dividir el resultado obtenido por el factor de conversión 10,2.

Con los puntos anteriores graficar la curva de tensión-deformación para cada molde. En los casos que esta curva tome forma cóncava hacia arriba en su inicio, deberá ser corregida trazando una recta tangente a la mayor pendiente de la curva y trasladando el origen al punto en que esta tangente corta la abscisa.

- Razón de Soporte: Empleando los valores de tensión corregidos de la curva tensión-deformación para 5,08 mm de penetración, se calcula las razones de soporte de cada molde, dividiendo las tensiones corregidas por una tensión normal de 10,3 MPa y multiplicando por 100 para que el resultado sea entregado como porcentaje de CBR.

- Razón de Soporte – Densidad Seca: Usando los datos obtenidos para las distintas probetas, dibujar una curva CBR-Densidad Seca, permitiendo determinar así la Razón de Soporte correspondiente a una densidad seca preestablecida.

ANEXO 4.1 RESULTADOS ENSAYO RAZÓN DE SOPORTE DE CALIFORNIA

Tabla A.4.1.1 Resultados ensayo Razón de Soporte de California

Suelo	% Dregs	HO (%)	DMCS (g/cm ³)	95% DMCS (g/cm ³)	Humedad 10 Golpes (%)	Densidad CBR 10 Golpes (g/cm ³)	CBR 10 Golpes (%)	Humedad 25 Golpes (%)	Densidad CBR 25 Golpes (g/cm ³)	CBR 25 Golpes (%)	Humedad 56 Golpes (%)	Densidad CBR 56 Golpes (g/cm ³)	CBR 56 Golpes (%)	CBR al 100% de DMCS (%)	CBR al 95% de DMCS (%)
Los Barros	0%	14%	1,860	1,767	15	1,500	6%	15	1,850	17%	14	1,860	28%	28%	15%
	5%	13%	1,850	1,758	13	1,590	6%	13	1,840	14%	13	1,910	24%	15%	11%
	10%	13%	1,820	1,729	13	1,710	6%	13	1,870	12%	13	1,990	25%	10%	6%
Nítrico	0%	47%	1,000	0,950	45	0,840	6%	46	0,900	12%	46	0,990	24%	24%	18%
	5%	42%	1,030	0,979	41	0,890	3%	40	0,950	11%	39	1,040	24%	22%	15%
	10%	46%	1,060	1,007	50	0,840	6%	49	0,960	13%	48	1,060	22%	22%	17%
Torreón S3	0%	21%	1,680	1,596	16	1,280	1%	15	1,640	5%	17	1,680	12%	12%	5%
	5%	22%	1,600	1,520	22	1,550	4%	22	1,590	7%	21	1,620	8%	8%	4%
	10%	21%	1,630	1,549	21	1,560	3%	21	1,660	6%	21	1,670	3%	5%	2%
Encanto 2	0%	12%	1,960	1,862	10	1,720	3%	12	1,900	7%	10	1,980	12%	11%	6%
	5%	11%	1,980	1,881	13	1,630	0%	11	1,900	5%	10	2,010	5%	5%	4%
	10%	13%	1,940	1,843	13	1,830	1%	12	2,040	4%	12	2,100	8%	3%	1%

A continuación, se adjuntan las curvas de carga-penetración del ensayo CBR para cada una de las combinaciones suelo-subproducto-porcentaje. Además, se presentan las curvas de capacidad de soporte obtenidas, en donde se muestra la interpolación de CBR a 95 % de la DMCS, así como la capacidad de soporte a las 3 energías de compactación (10, 25 y 56 golpes).

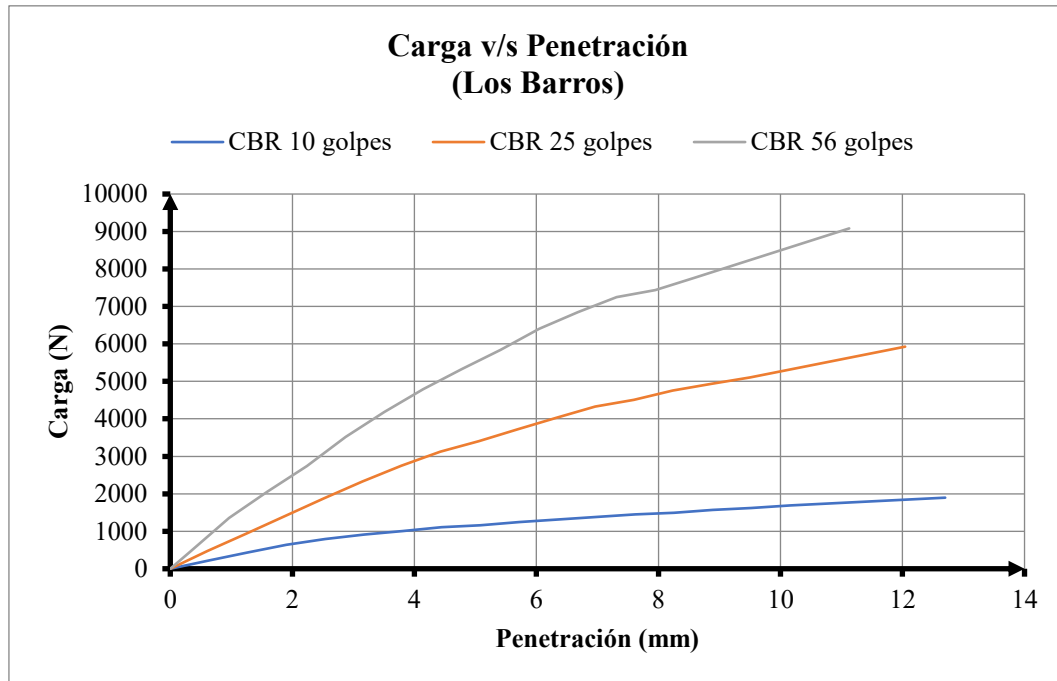


Figura A.4.1.1 Curva carga-penetración suelo Los Barros

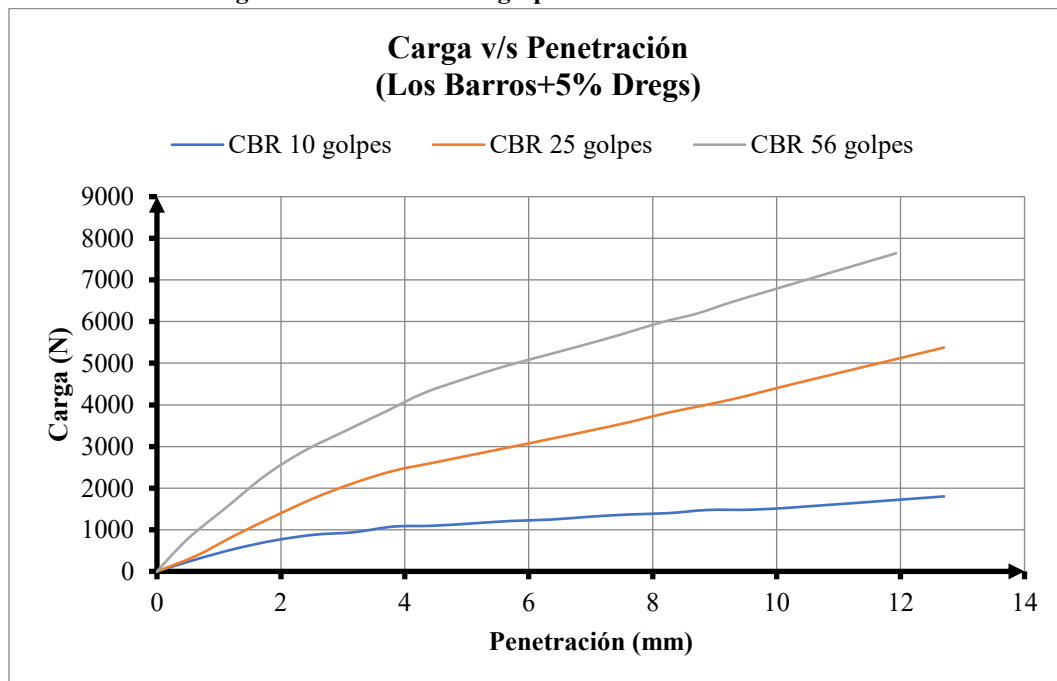


Figura A.4.1.2 Curva carga-penetración suelo Los Barros + 5% Dregs

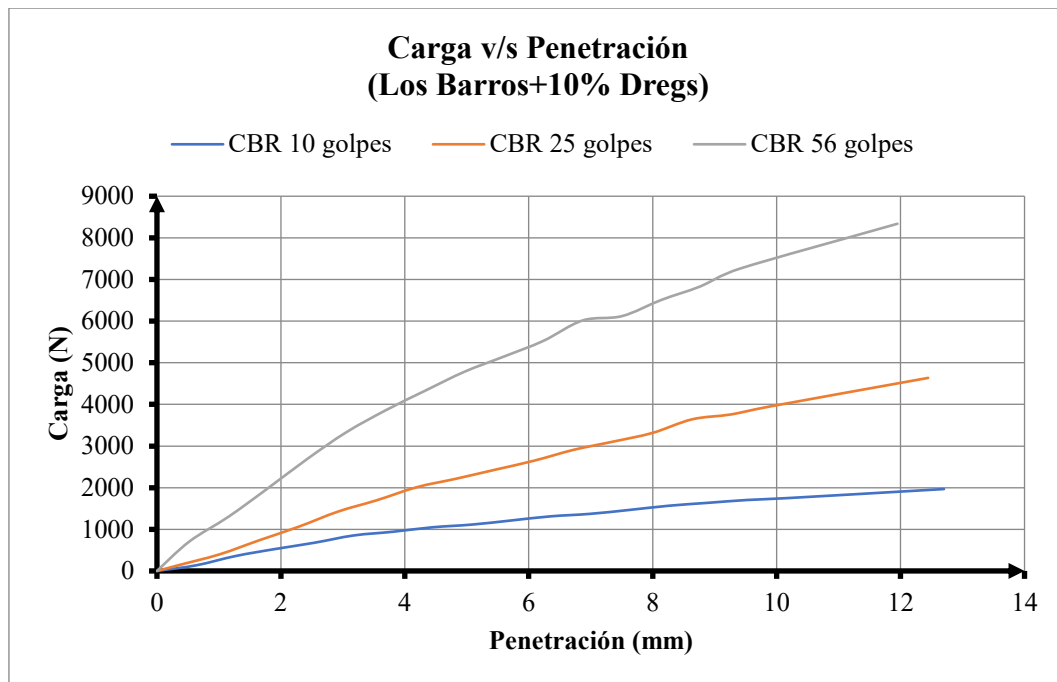


Figura A.4.1.3 Curva carga-penetración suelo Los Barros + 10% Dregs

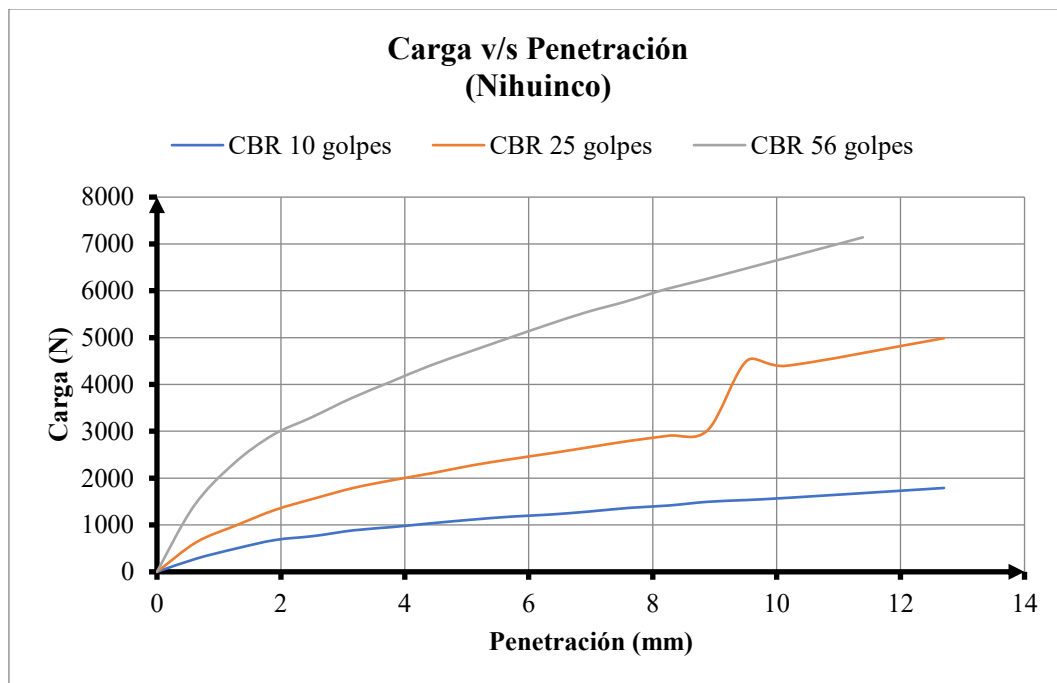


Figura A.4.1.4 Curva carga-penetración suelo Nihuinco

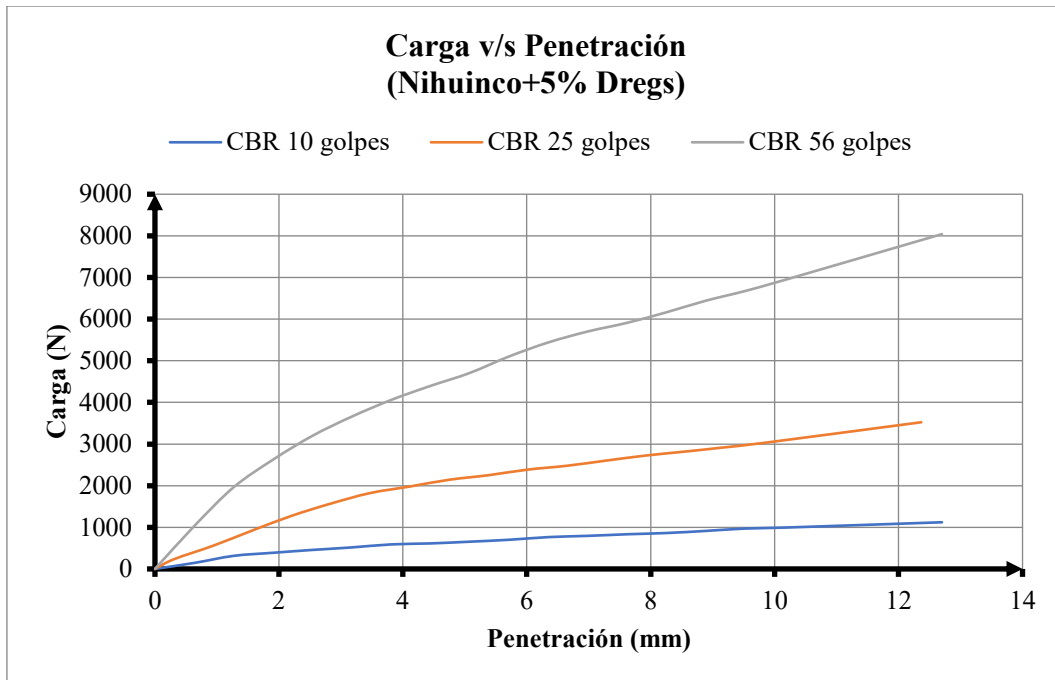


Figura A.4.1.5 Curva carga-penetración suelo Nihuinco + 5% Dregs

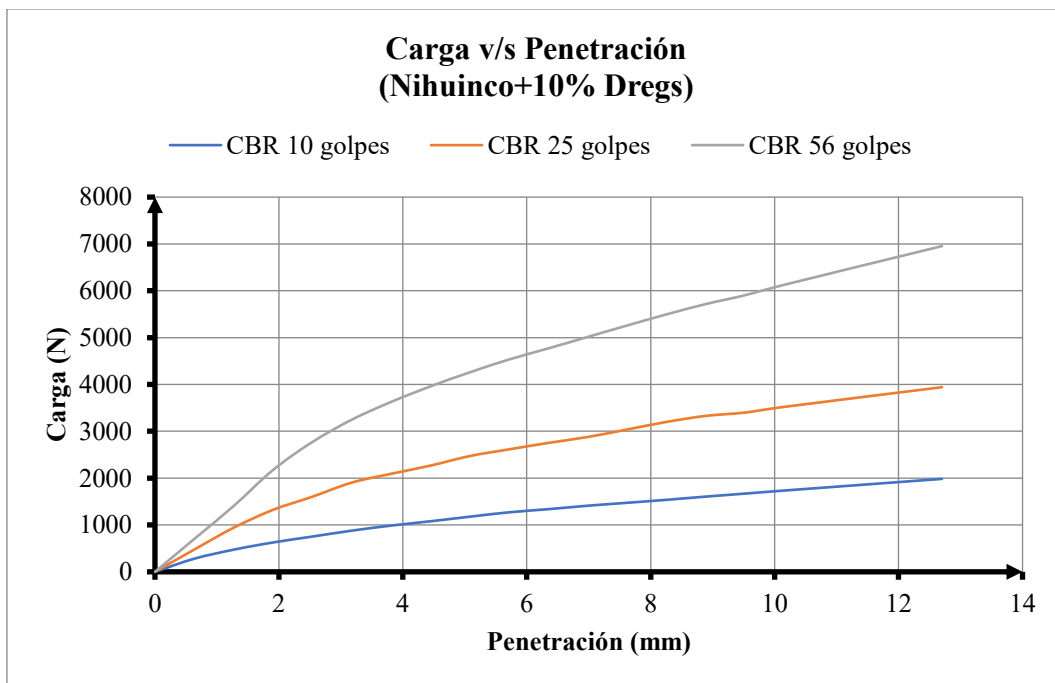


Figura A.4.1.6 Curva carga-penetración suelo Nihuinco + 10% Dregs

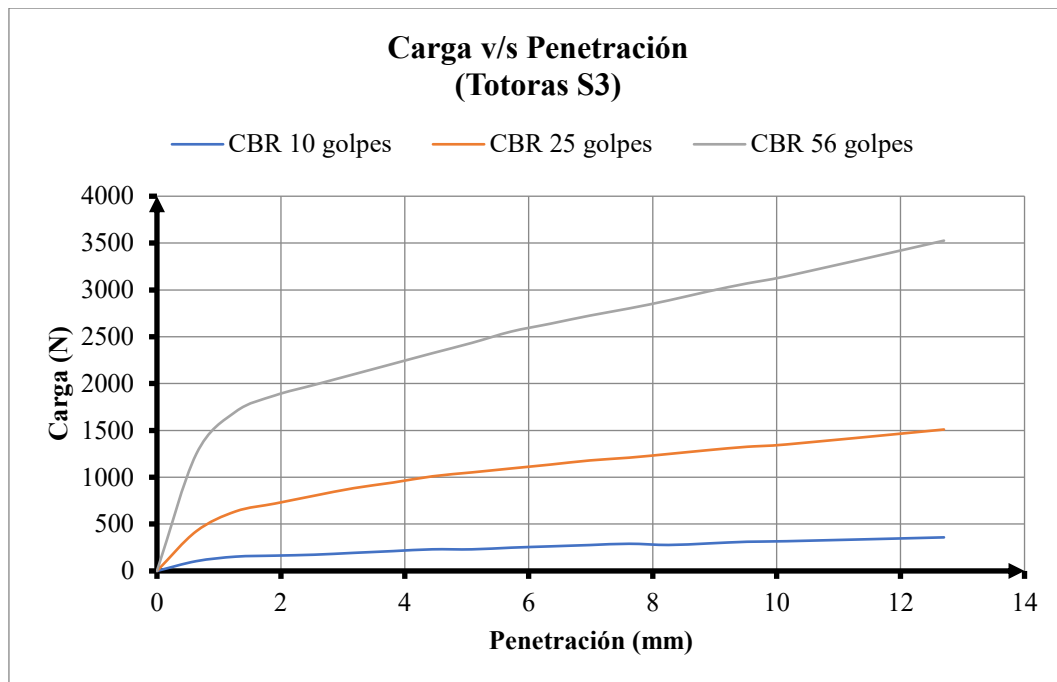


Figura A.4.1.7 Curva carga-penetración suelo Totoras S3

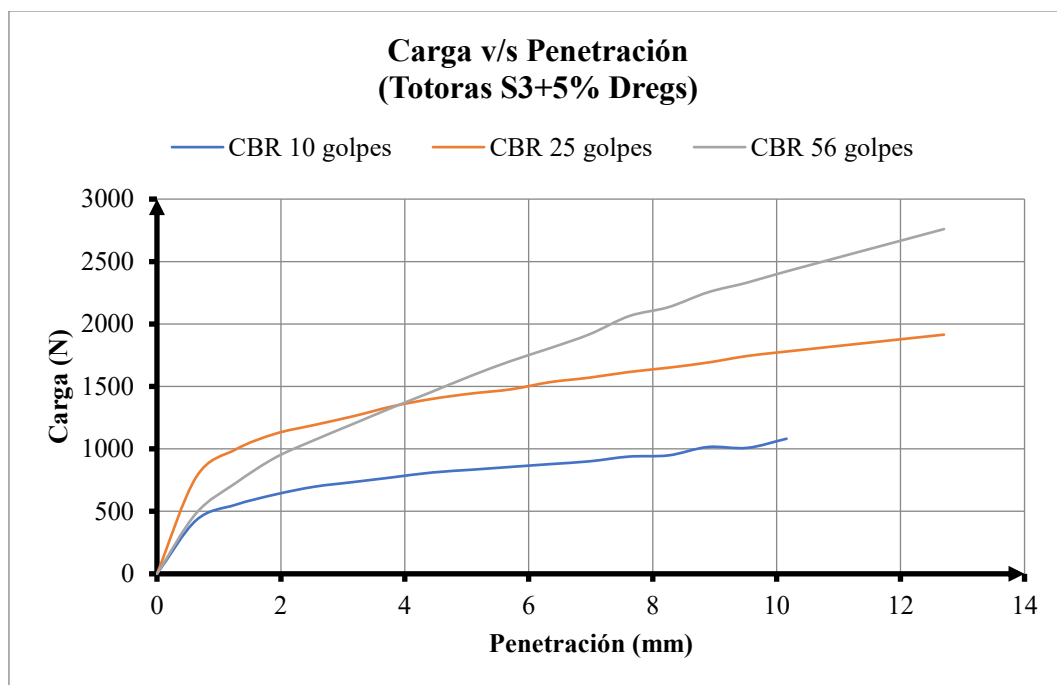


Figura A.4.1.8 Curva carga-penetración suelo Totoras S3 + 5% Dregs

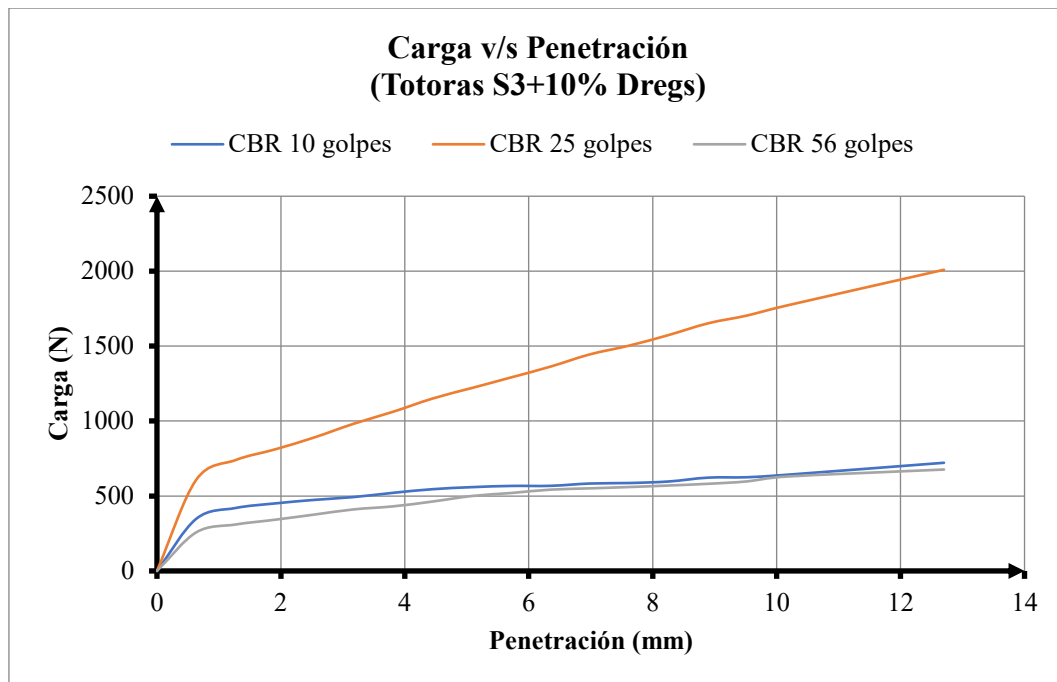


Figura A.4.1.9 Curva carga-penetración suelo Totoras S3 + 10% Dregs

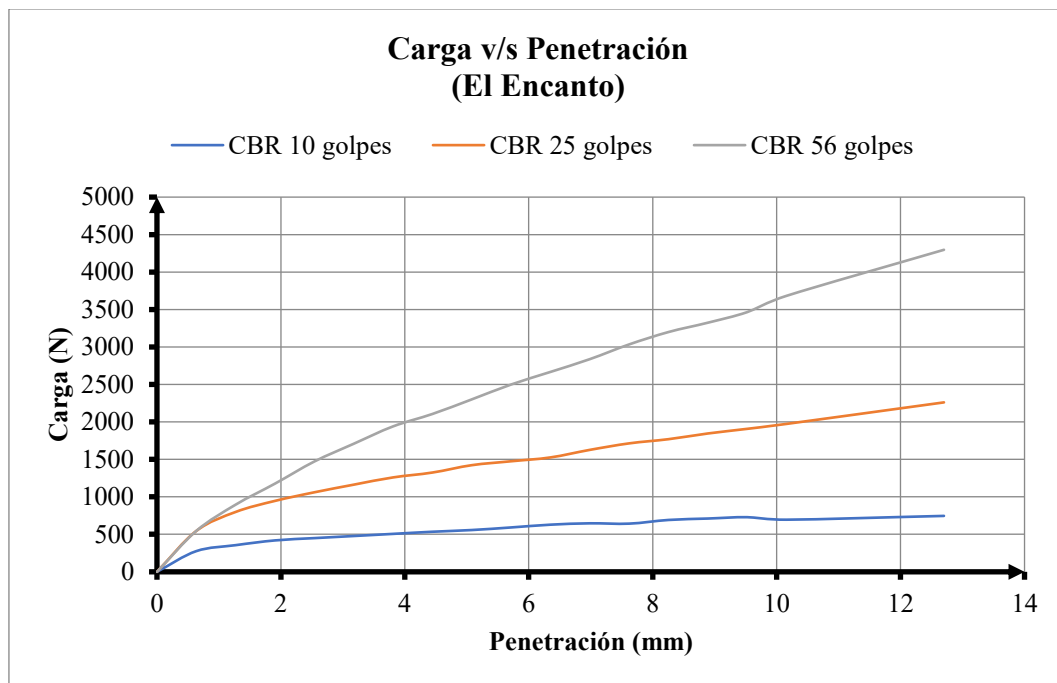


Figura A.4.1.10 Curva carga-penetración suelo El Encanto

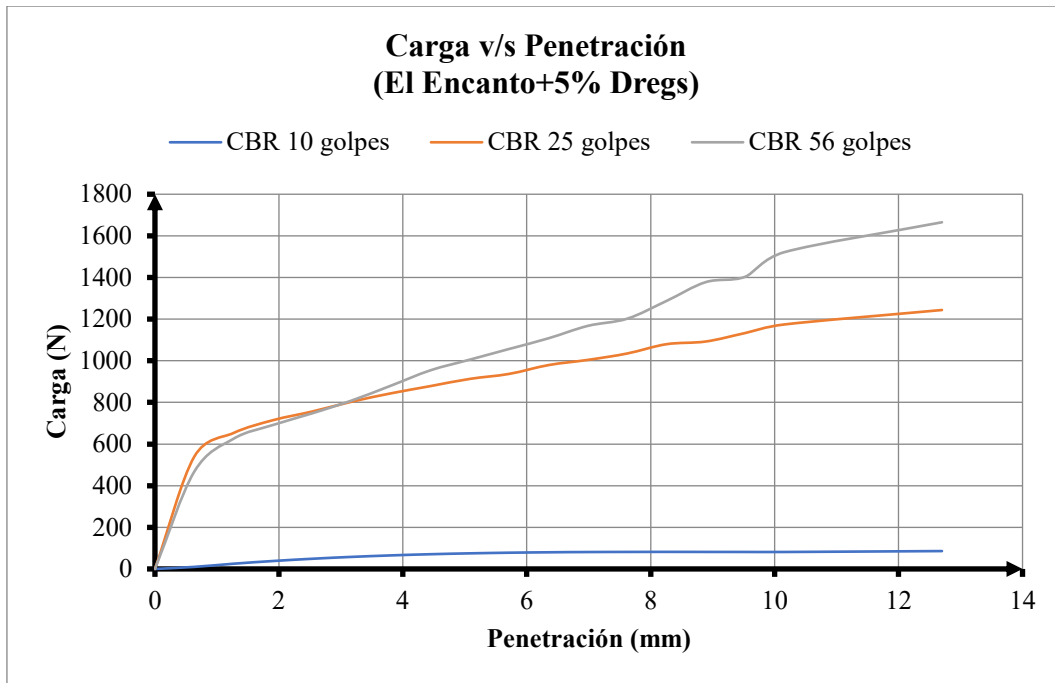


Figura A.4.1.11 Curva carga-penetración suelo El Encanto + 5% Dregs

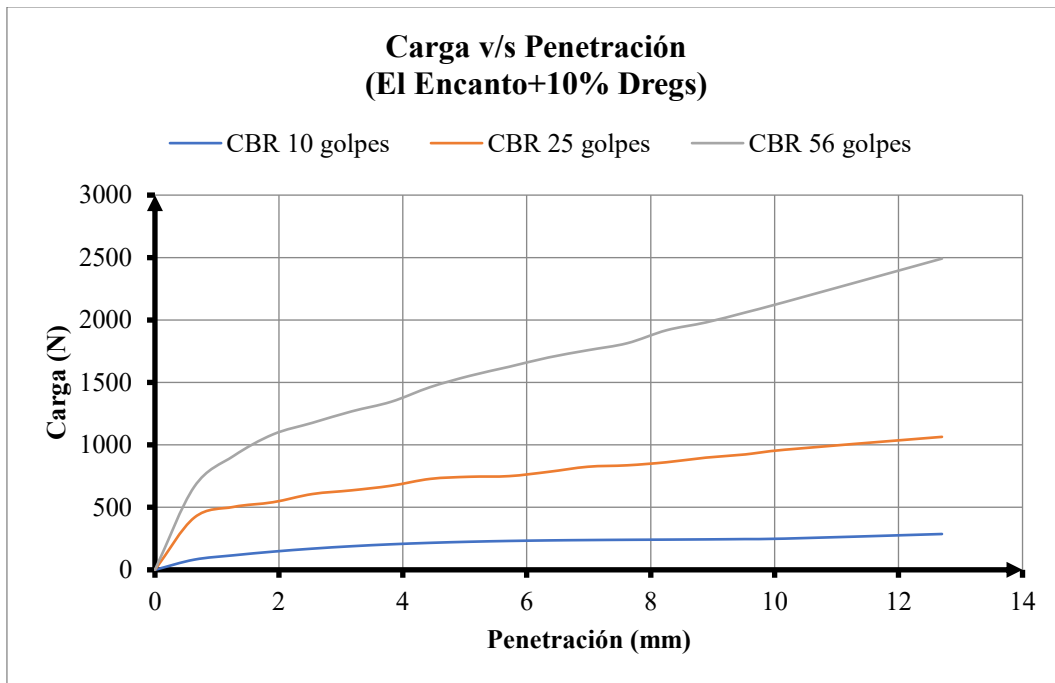


Figura A.4.1.12 Curva carga-penetración suelo El Encanto + 10% Dregs

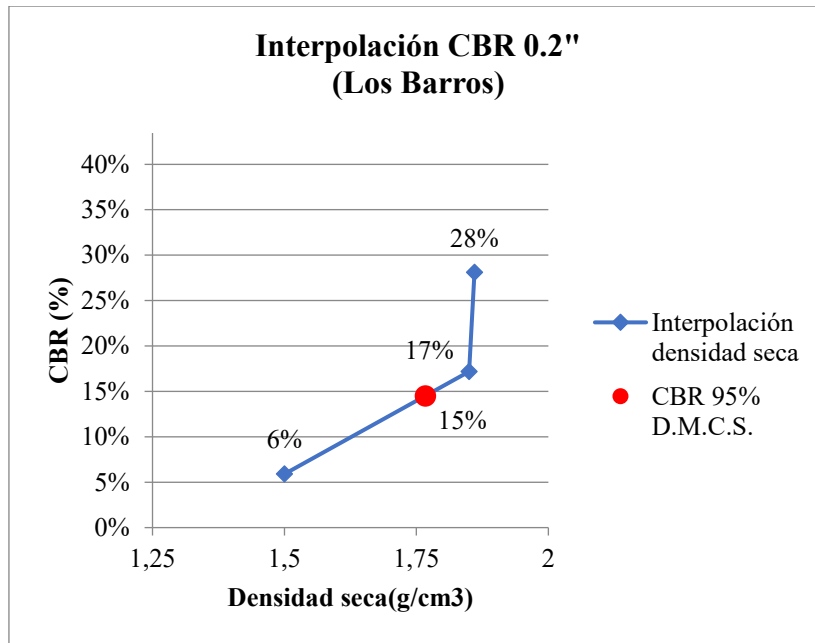


Figura A.4.1.13 Interpolación CBR 0.2" suelo Los Barros

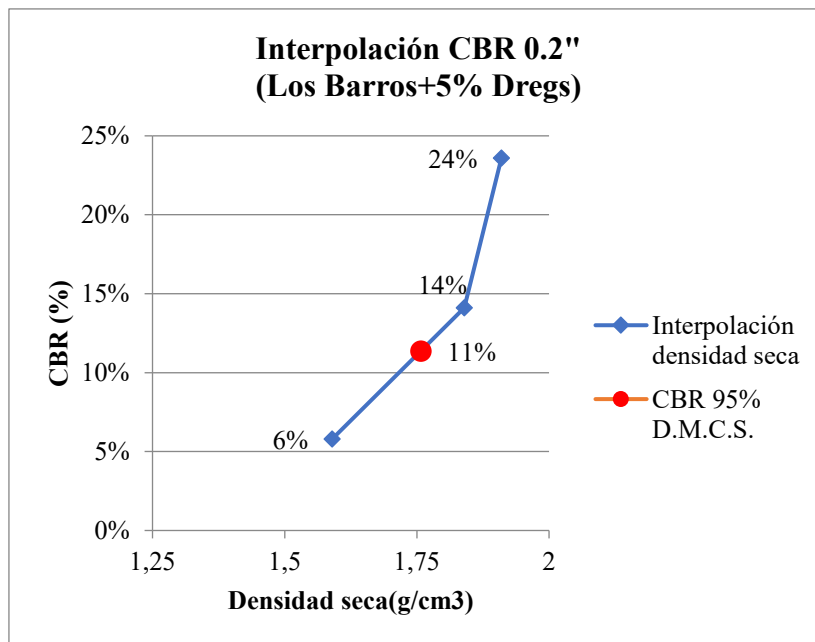


Figura A.4.1.14 Interpolación CBR 0.2" suelo Los Barros + 5% Dregs

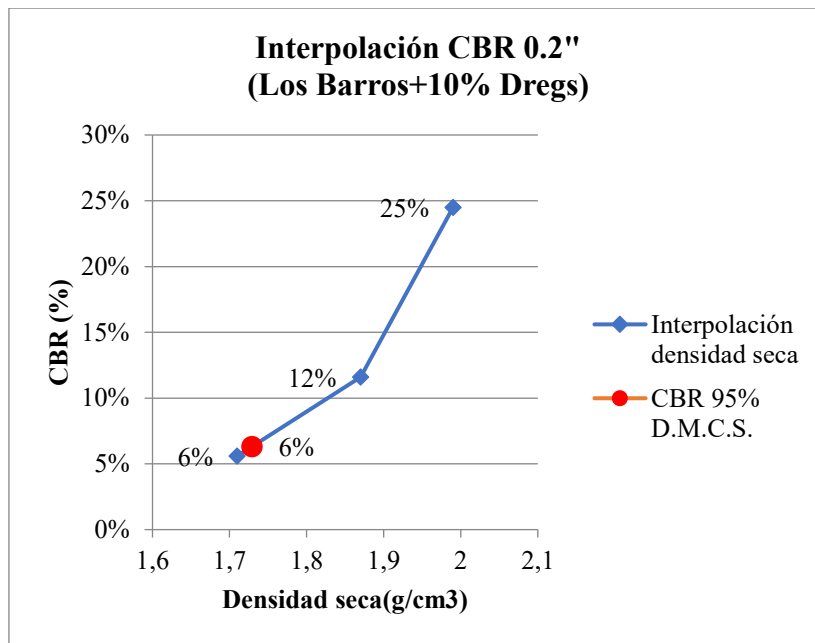


Figura A.4.1.15 Interpolación CBR 0.2" suelo Los Barros + 10% Dregs

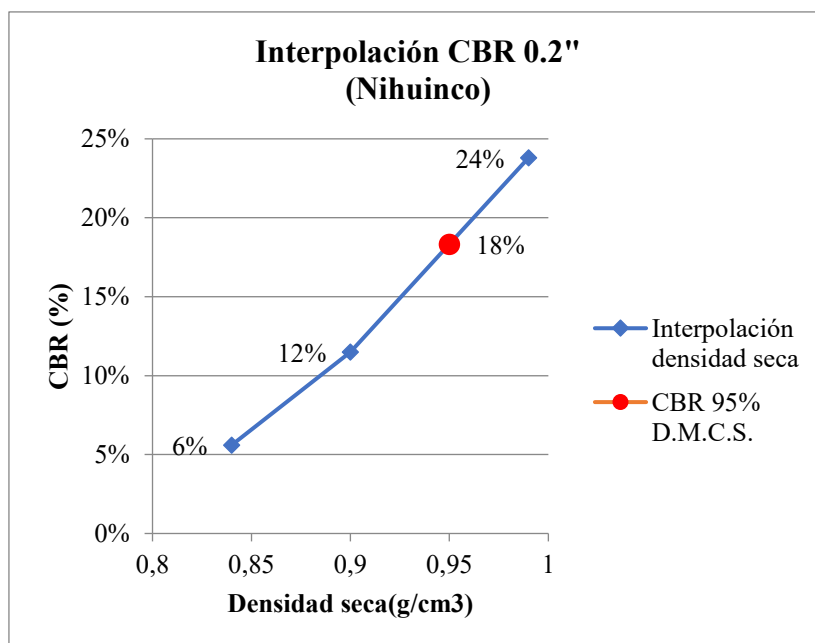


Figura A.4.1.16 Interpolación CBR 0.2" suelo Nihuinco

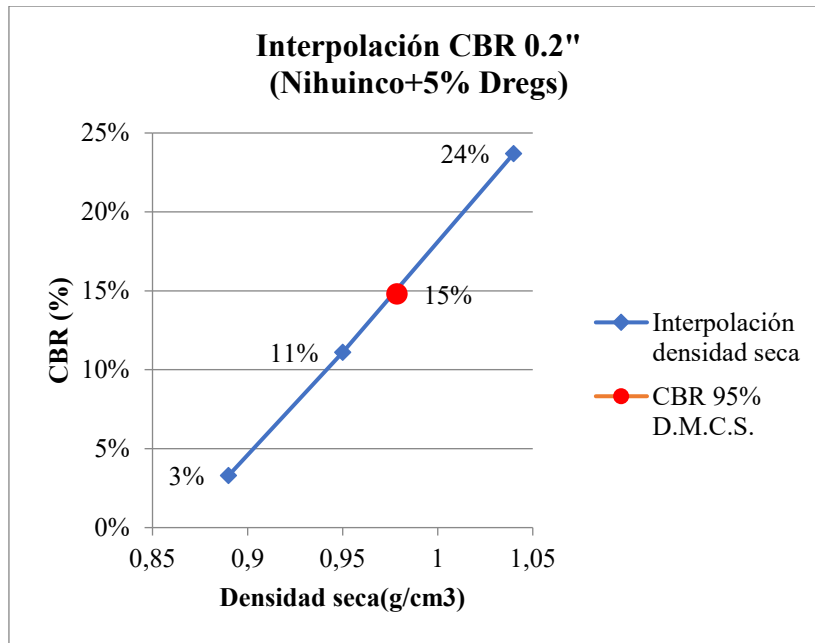


Figura A.4.1.17 Interpolación CBR 0.2" suelo Nihuinco + 5% Dregs

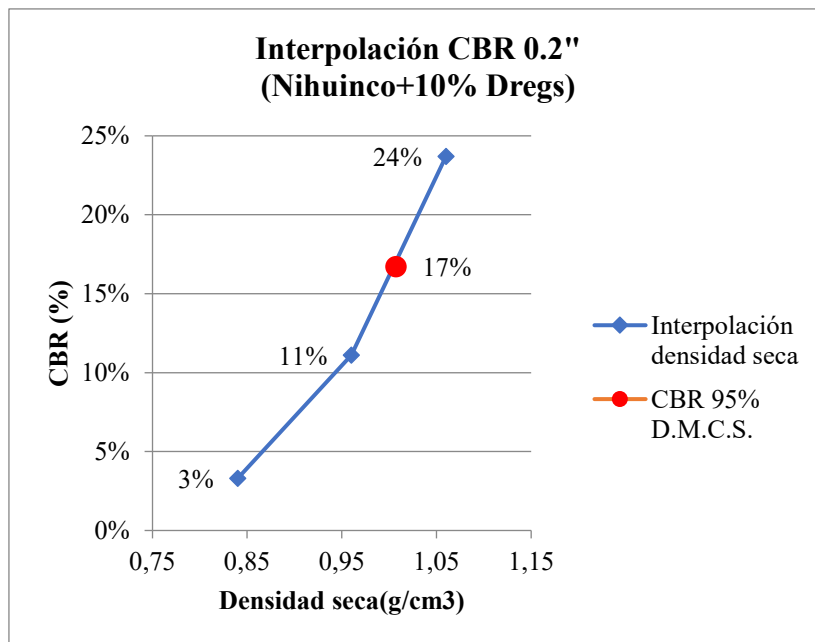


Figura A.4.1.18 Interpolación CBR 0.2" suelo Nihuinco + 10% Dregs

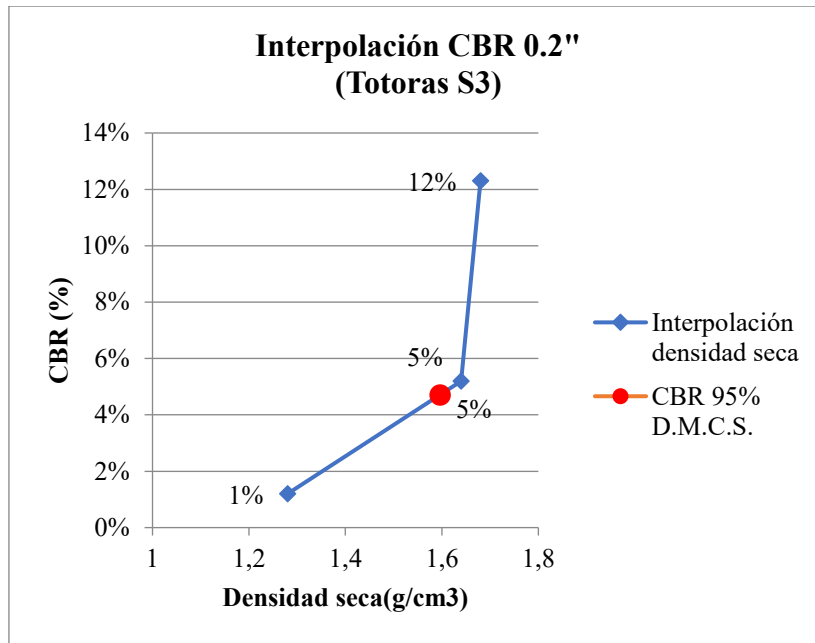


Figura A.4.1.19 Interpolación CBR 0.2" suelo Totoras S3

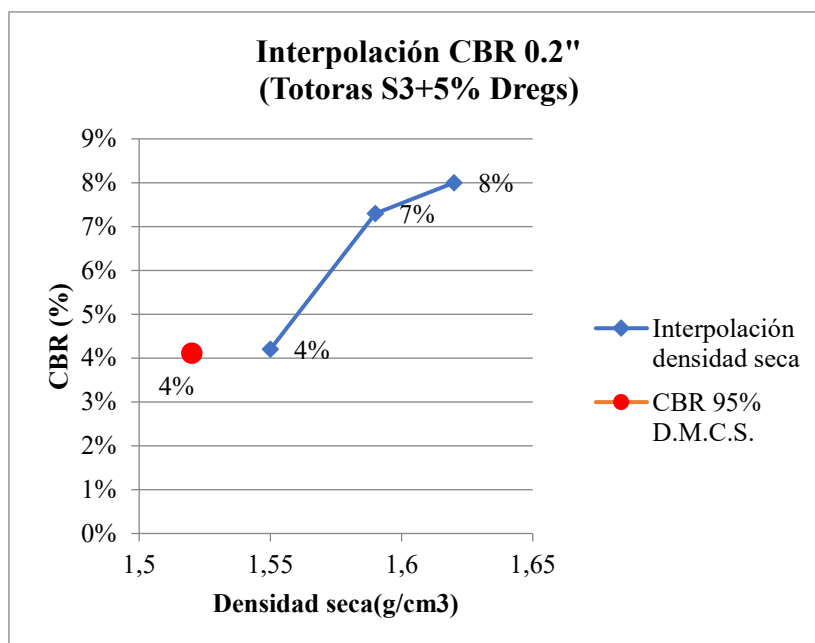


Figura A.4.1.20 Interpolación CBR 0.2" suelo Totoras S3 + 5% Dregs

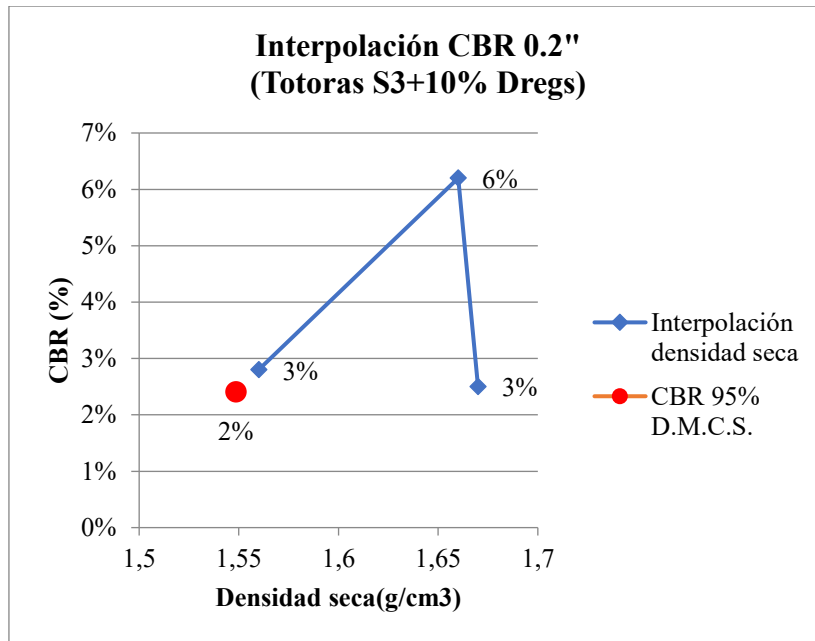


Figura A.4.1.21 Interpolación CBR 0.2" suelo Totoras S3 + 10% Dregs

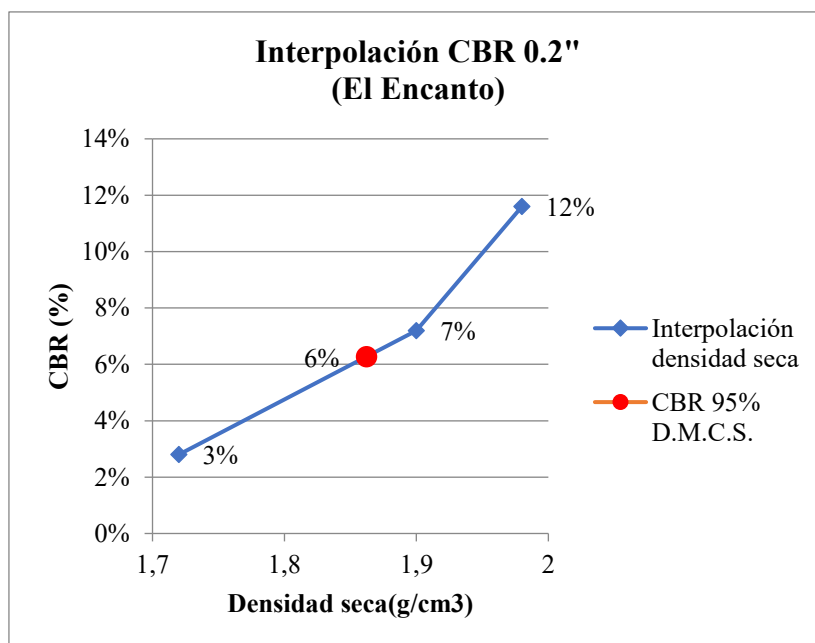


Figura A.4.1.22 Interpolación CBR 0.2" suelo El Encanto

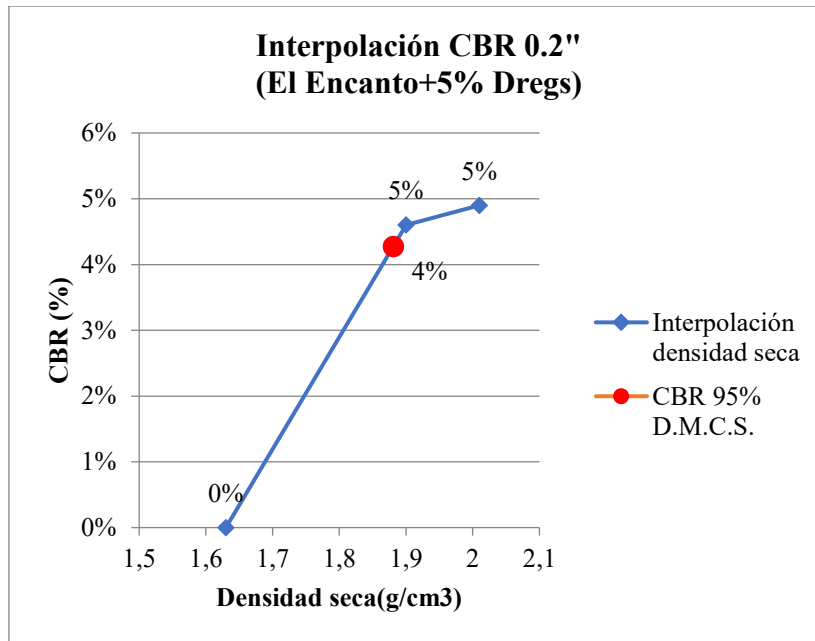


Figura A.4.1.23 Interpolación CBR 0.2" suelo El Encanto + 5% Dregs

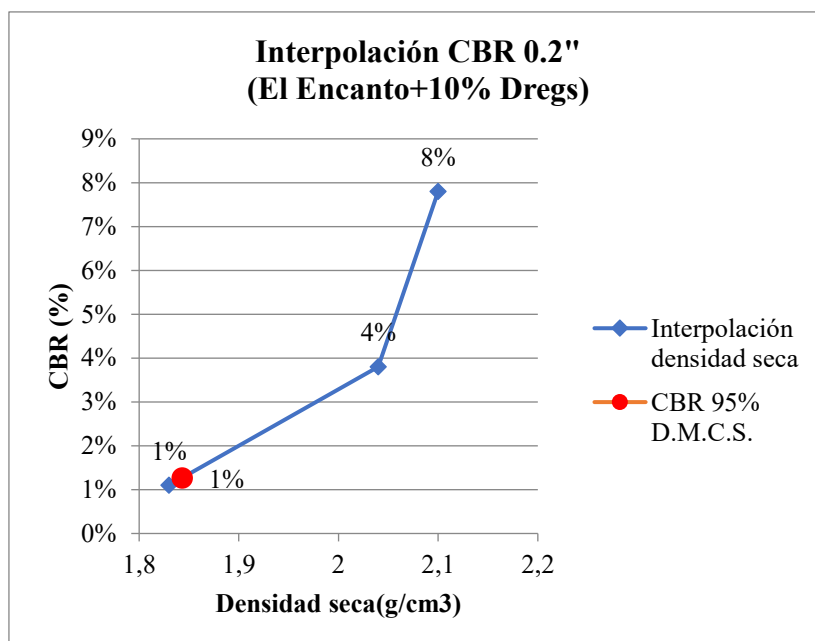


Figura A.4.1.24 Interpolación CBR 0.2" suelo El Encanto + 10% Dregs

UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN – FACULTAD DE INGENIERÍA

RESUMEN DE MEMORIA DE TÍTULO

Departamento	: Departamento de Ingeniería Civil
Carrera	: Ingeniería Civil
Nombre del memorista	: Pedro Ignacio Andía Vargas
Título de la memoria	: Evaluación experimental de la influencia del subproducto industrial <i>Dregs</i> en las propiedades geotécnicas de subbases de caminos forestales en la Región del Biobío
Fecha de la presentación oral	: 16 de abril de 2026
Profesor(es) Guía	: Luis Merino
Profesor(es) Revisor(es)	: Daniella Escribano
Concepto	:
Calificación	:

Resumen

El estudio evaluó el comportamiento de cuatro suelos con adiciones de *Dregs* en proporciones del 5 % y 10 % respecto al peso seco.

Físicamente, el subproducto alteró de manera desfavorable la plasticidad de los suelos. El Índice de Plasticidad (IP) aumentó en Totoras (de 16 % a 23 %) y Nihuinco (de 7 % a 13 %), mientras que El Encanto disminuyó del 23 % al 14 %. En términos de compactación, la adición del 10 % redujo la Densidad Máxima Compactada Seca (DMCS) en Los Barros (de 1,86 a 1,82 g/cm³), Totoras (1,68 a 1,63 g/cm³) y El Encanto (1,96 a 1,94 g/cm³). En Nihuinco, aumentó de 1,00 a 1,06 g/cm³.

Mecánicamente, los ensayos CBR evidenciaron una caída abrupta en la capacidad de soporte bajo saturación para Los Barros (de 28 % a 10 %), Totoras (12 % a 5 %) y El Encanto (11 % a 3 %). Nihuinco mantuvo un CBR estable de 24 % a 22 %.

En conclusión, la incorporación de *Dregs* no constituye alternativa técnica viable para la mejora estructural de los suelos estudiados, debido a la comprobada disminución en su capacidad de soporte y a las alteraciones desfavorables en su comportamiento plástico.