

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA “JUAN MISAEL SARACHO”

FACULTAD DE CIENCIAS Y TECNOLOGÍA

CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL



**“COMPARACIÓN TÉCNICA-ECONÓMICA DEL MEJORAMIENTO DE
SUELOS ARCILLOSOS APLICANDO SUELO-CAL VS. SUELO-CAL-SAL”**

Por:

JOSE FERNANDO CASSAL ZURUGUAY

Proyecto presentado a consideración de la “**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA JUAN MISAEL SARACHO**”, como requisito para optar el grado académico de Licenciatura en Ingeniería Civil.

Semestre I – 2025

TARIJA - BOLIVIA

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA “JUAN MISAEL SARACHO”

FACULTAD DE CIENCIAS Y TECNOLOGÍA

CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

**“COMPARACIÓN TÉCNICA-ECONÓMICA DEL MEJORAMIENTO DE
SUELOS ARCILLOSOS APLICANDO SUELO-CAL VS. SUELO-CAL-SAL”**

Por:

JOSE FERNANDO CASSAL ZURUGUAY

Proyecto presentado a consideración de la **“UNIVERSIDAD AUTÓNOMA JUAN MISAEL SARACHO”**, como requisito para optar el grado académico de Licenciatura en Ingeniería Civil.

Semestre I – 2025

TARIJA – BOLIVIA

DEDICATORIA:

Dedico este trabajo, en primer lugar, a Dios, por concedernos el don de la vida y por acompañarme con su guía y fortaleza en cada paso de este camino.

A mi madre Dora Zuruguay Valverde, por su dedicación, esfuerzo y amor incondicional, pilares fundamentales en mi formación personal y académica.

A la memoria de mi padre Jose Emilio Cassal Salinas, quien, aunque ya no está físicamente, sigue guiando mis pasos desde el cielo. Su recuerdo y enseñanzas han sido una fuente constante de inspiración en mi vida.

A toda mi familia y a mis amigos verdaderos, que creyeron en mí incluso cuando yo dudaba, por su apoyo constante y sus palabras que me impulsaron a seguir.

A cada uno de ustedes, este logro les pertenece tanto como a mí.

INDICE GENERAL

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

Página.

1.1. Antecedentes	1
1.2. Situación problemática	3
1.2.1. Problema	4
1.3. Justificación	4
1.4. Objetivos de investigación.....	5
1.4.1. Objetivo general	5
1.4.2. Objetivos específicos	5
1.5. Hipótesis	6
1.6. Operacionalización de variables	6
1.6.1. Variable independiente	6
1.6.2. Variable dependiente.....	6
1.6.1.1. Variable independiente.....	6
1.6.2.1. Variable dependiente	7
1.7. Alcance	8

CAPÍTULO II

GENERALIDADES Y DEFINICIONES

2.1. Suelo	9
2.2. Suelos arcillosos	10
2.2.1. Características de los Suelos Arcillosos.....	10
2.2.2. Ventajas de los Suelos Arcillosos	11
2.2.3. Desventajas de los suelos arcillosos.....	12

2.2.4. Uso de las arcillas en Ingeniería.....	12
2.3. Cloruro de sodio	12
2.3.1. Estabilización con sal	12
2.3.2. Propiedades del suelo que mejoran con la adición de sal	13
2.3.3. Ventajas y desventajas de la estabilización con sal	14
2.4. Cal hidratada	14
2.4.1. Estabilización con cal.....	15
2.4.2. Propiedades del suelo que mejoran con la adición de cal	15
2.4.3. Ventajas y desventajas de la estabilización con cal	16
2.5. Subrasante	16
2.5.1. Características que deben cumplir los suelos para formar una subrasante según SUCS	17
2.5.2. El índice CBR en la evaluación de la calidad de una subrasante.....	18
2.5.3. Recomendaciones de la altura de la subrasante según el CBR	19
2.6. Teoría de los ensayos que determina las propiedades de los suelos.....	19
2.6.1. Humedad de los suelos.....	19
2.6.2. Granulometría de los suelos	20
2.6.3. Límites de Atterberg	24
2.6.4. Estados de consistencia	25
2.6.5. Clasificación del suelo según SUCS	27
2.6.6. Compactación.....	29
2.6.7. Capacidad de soporte de los suelos	32
2.7. Estabilización de suelos	35
2.7.1. Beneficios de la estabilización de suelos	35
2.7.1.1. Controlar cambios volumétricos	35

2.7.1.2. Aumentar la resistencia	36
2.7.1.3. Durabilidad	36
2.7.1.4. Reducir la permeabilidad.....	37
2.7.1.5. Reducir la compresibilidad.....	37
2.7.1.6. Disminuir la plasticidad.....	38
2.7.2. Tipos de estabilización.....	38
2.7.2.1. Estabilización mecánica	38
2.7.2.2. Estabilización física.....	39
2.7.2.3. Estabilización química	39
2.7.2.3.1. Ventajas de la estabilización.....	41
2.8. Evaluación de métodos de estabilización de suelos.....	41
2.8.1. Características del Suelo	41
2.8.2. Costo	42
2.8.3. Eficiencia a Largo Plazo	42
2.8.4. Impacto Ambiental.....	42
2.8.5. Condiciones Climáticas y del Terreno	42
2.8.6. Tiempo de Implementación	43

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

3.1. Tipo y nivel de investigación.....	44
3.1.1. Tipo de investigación	44
3.1.2. Nivel de investigación.....	44
3.2. Diseño de la investigación	44
3.3. Población de estudio, muestra y unidad de análisis.....	45

3.3.1. Población.....	45
3.3.2. Muestra.....	45
3.3.3. Unidad de Análisis	47
3.4. Técnicas e instrumentos de recolección de datos	47
3.4.1. Técnicas.....	47
3.4.2. Instrumentos	48
3.5. Ubicación del proyecto	49
3.6. Justificación de la zona de estudio.....	51
3.7. Extracción de la muestra de suelo	51
3.8. Caracterización de los materiales estabilizantes	53
3.8.1. Características y propiedades de la Cal.....	53
3.8.2. Propiedades y características de la sal	54
3.9. Recolección de datos	55
3.9.1. Análisis mecánico de los suelos	56
3.9.2. Contenido de humedad.....	56
3.9.3. Análisis granulométrico	57
3.9.4. Límites de Atterberg	59
3.9.5. Clasificación del suelo	63
3.9.6. Compactación Proctor modificado (T 180)	63
3.9.7. Ensayo de valor relativo de soporte (CBR).....	66

CAPÍTULO IV

ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.1. Presentación de los resultados técnicos de los tres suelos	71
4.2. Análisis del límite de Atterberg	74

4.3. Compactación Proctor (T 180)	78
4.4. Capacidad de soporte (CBR)	80
4.5. Análisis de costos unitarios	81
4.6. Evaluación técnica y económica.....	84
4.7. Comparación de los tres suelos en condiciones óptimas de estabilización	86

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones.....	88
5.2. Recomendaciones técnicas	90

BIBLIOGRAFÍA

ANEXOS

ANEXO 1. REPORTE FOTOGRÁFICO

ANEXO 2. ENSAYOS DE HUMEDAD NATURAL

ANEXO 3. ENSAYOS DE GRANULOMETRÍA

ANEXO 4. ENSAYOS DE LÍMITES DE ATTERBERG

ANEXO 5. CLASIFICACIÓN SUCS

ANEXO 6. ENSAYOS DE COMPACTACIÓN PROCTOR MODIFICADO T 180

ANEXO 7. ENSAYOS CAPACIDAD DE SOPORTE

ÍNDICE DE FIGURAS

	Página.
Figura 2.1: Suelo arcilloso	10
Figura 2.2: Equipo para determinar la humedad del suelo.....	20
Figura 2.3: Conjunto de mallas para el análisis mecánico del suelo.....	21
Figura 2.4: Distribución granulométrica	22
Figura 2.5: Curvas granulométricas	23
Figura 2.6: Equipo para límites de Atterberg.....	24
Figura 2.7: Variación de la plasticidad según el contenido de humedad	25
Figura 2.8: Límite de Atterberg (Carta de plasticidad)	27
Figura 2.9: Equipo para la compactación Proctor modificado.....	29
Figura 2.10: Principio de la compactación.....	30
Figura 2.11: Equipo de laboratorio para ensayo CBR	32
Figura 2.12: Compactación del suelo.....	39
Figura 2.13: Estabilización física por mezcla de suelos	39
Figura 2.14: Compactación química del suelo	40
Figura 3.15: Ubicación muestra suelo 1.....	49
Figura 3.16: Ubicación muestra suelo 2.....	50
Figura 3.17: Ubicación muestra suelo 3.....	50
Figura 3.18: Extracción muestra suelo 1	52
Figura 3.19: Extracción muestra suelo 2.....	53
Figura 3.20: Extracción muestra suelo 3.....	53
Figura 3.21: Humedad del suelo	56
Figura 3.22: Lavado de material	58

Figura 3.23: Límite líquido	60
Figura 3.24: Límite plástico	61
Figura 3.25: Ensayo de compactación Proctor (T 180).....	65
Figura 3.26: Ensayo de capacidad de soporte	68
Figura 4.27: Análisis del límite líquido	74
Figura 4.28: Análisis del límite plástico	75
Figura 4.29: Análisis del índice de plasticidad	76
Figura 4.30: Análisis de la densidad máxima	78
Figura 4.31: Análisis de la humedad óptima.....	79
Figura 4.32: Análisis del CBR al 95%.....	80

ÍNDICE DE TABLAS

	Página.
Tabla 1.1: Operacionalización de la variable independiente	6
Tabla 1.2: Operacionalización de la variable dependiente.....	7
Tabla 2.3: Relación entre CBR y la altura de la subrasante.....	19
Tabla 2.4: Clasificación de un suelo según el tamaño de sus partículas.....	21
Tabla 2.5: Clasificación de un suelo según su índice de plasticidad	26
Tabla 2.6: Caracterización de la plasticidad de un suelo	27
Tabla 2.7: Clasificación de suelos.....	28
Tabla 2.8: Requerimiento inicial para la estabilización suelo-cal.....	29
Tabla 2.9: Clasificación de suelos según el valor de CBR	35
Tabla 3.10: Peso total - muestra suelo 1	46
Tabla 3.11: Peso total - muestra suelo 2	46
Tabla 3.12: Peso total - muestra suelo 3	46
Tabla 3.13: Puntos de extracción de muestras de suelo.....	49
Tabla 3.14: Características de la cal.....	54
Tabla 3.15: Propiedades físicas y químicas de la cal	54
Tabla 3.16: Características de la sal.....	55
Tabla 3.17: Propiedades físicas y químicas de la sal	55
Tabla 3.18: Contenido de humedad natural del suelo	57
Tabla 3.19: Tamices para fracción fina.....	57
Tabla 3.20: Resultados del análisis granulométrico.....	59
Tabla 3.21: Resultados de los límites de Atterberg.....	62
Tabla 3.22: Resultados de los límites de Atterberg.....	62

Tabla 3.23: Resultados de los límites de Atterberg.....	62
Tabla 3.24: Resultados de clasificación del suelo según SUCS	63
Tabla 3.25: Resultados de compactación Proctor modificado (T 180).....	65
Tabla 3.26: Resultados de compactación Proctor modificado (T 180).....	66
Tabla 3.27: Resultados de compactación Proctor modificado (T 180).....	66
Tabla 3.28: Resultados de la capacidad de soporte CBR.....	69
Tabla 3.29: Resultados de la capacidad de soporte CBR.....	69
Tabla 3.30: Resultados de la capacidad de soporte CBR.....	69
Tabla 4.31: Distribución granulométrica y clasificación SUCS de los suelos.....	71
Tabla 4.32: Análisis comparativo de suelos estabilizados con cal y sal	72
Tabla 4.33: Costo en Bs/m ² de suelo estabilizado con cal al 7%.....	82
Tabla 4.34: Costo en Bs/m ² de suelo estabilizado con cal al 4% y sal al 3%	83
Tabla 4.35: Relación costo - beneficio suelo 1	84
Tabla 4.36: Relación costo - beneficio suelo 2	85
Tabla 4.37: Relación costo - beneficio suelo 3	86
Tabla 4.38: Resultados óptimos de estabilización para cada suelo.....	87