

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA “JUAN MISAEL SARACHO”**  
**FACULTAD DE CIENCIAS Y TECNOLOGÍA**  
**CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL**  
**DEPARTAMENTO DE TOPOGRAFÍA Y VÍAS DE**  
**COMUNICACIÓN**



**“VALORACIÓN DE LA CORRELACIÓN**  
**ENTRE CBR IN SITU Y EL CBR EN LABORATORIO”**

**Por:**

**ERIK NOEL MONTOYA COLQUE**

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

**SEMESTRE II - 2023**

**TARIJA – BOLIVIA**

## **DEDICATORIA**

A mis padres Rene y Marcelina por haberme forjado como la persona que soy.

A mi pareja Dora, a mis hijos Sahory y Moises, y a toda mi familia que me regalan día a día su paciencia, apoyo y comprensión.

A los ingenieros que me facilitaron información y me guiaron en el proceso de la investigación y la realización del proyecto, a mis amistades que de una u otra forma me apoyaron y motivaron a seguir adelante.

**ÍNDICE GENERAL**  
**CAPÍTULO I**  
**INTRODUCCIÓN**

	Pág.
1.1. Antecedentes.....	1
1.2. Justificación .....	1
1.3. Planteamiento del problema.....	3
1.3.1. Problema.....	3
1.3.2. Delimitación temporal y espacial del problema.....	3
1.4. Hipótesis.....	4
1.5. Objetivos.....	4
1.5.1. Objetivo general.....	4
1.5.2. Objetivos específicos.....	4
1.6. Identificación del tipo de investigación.....	5
1.7. Alcance de la investigación.....	5

**CAPÍTULO II**  
**MARCO TEÓRICO**

	Pág.
2.1. Introducción.....	7
2.2. Conceptos de suelo.....	7
2.2.1. Origen, formación y tipos de suelos.....	8
2.2.1.1. Origen.....	8
2.2.1.2. Procesos de formación.....	9
2.2.1.3. Tipos de suelos.....	10
2.3. Características de los suelos.....	13
2.3.1. Constitución mineralógica.....	13
2.3.1.1. Minerales constitutivos de los suelos gruesos.....	13
2.3.1.2. Minerales constitutivos de las arcillas.....	14

2.3.2.	Distribución granulométrica.....	15
2.3.2.1.	Tamaño de las partículas del suelo.....	16
2.3.2.2.	Análisis mecánico del suelo.....	17
2.3.2.2.1.	Análisis por cribado.....	17
2.3.2.2.2.	Análisis hidrométrico.....	18
2.3.2.3.	Curva de distribución granulométrica.....	21
2.3.2.3.1.	Tamaño efectivo, coeficiente de uniformidad y coeficiente de curvatura.....	22
2.3.3.	Forma de sus partículas.....	22
2.3.4.	Peso específico relativo.....	23
2.3.5.	Contenido de humedad.....	24
2.3.6.	Estructura de la masa de un suelo.....	24
2.4.	Propiedades básicas de los suelos.....	25
2.4.1.	Relaciones de fase.....	25
2.4.1.1.	Porosidad.....	26
2.4.1.2.	Relación de vacíos.....	26
2.4.1.3.	Contenido de humedad.....	26
2.4.1.4.	Grado de saturación .....	27
2.4.1.5.	Peso específico del suelo.....	27
2.4.2.	Plasticidad de los suelos.....	28
2.4.2.1.	Estados de consistencia.....	28
2.4.2.2.	Limite líquido.....	29
2.4.2.3.	Limite plástico.....	30
2.4.2.4.	Carta de plasticidad.....	31
2.5.	Clasificación de suelos.....	32
2.5.1.	Sistema de clasificación aastho.....	32
2.5.1.1.	Suelos granulares.....	34
2.5.1.2.	Suelos finos.....	35
2.5.1.3.	Índice de grupo (ig).....	36
2.5.2.	Sistema unificado de clasificación de suelos s.u.c.s.....	39
2.5.2.1.	Clasificación de gravas.....	41

2.5.2.2. Clasificación de arenas.....	41
2.5.2.3. Clasificación de los suelos finos.....	42
2.6. Compactación de los suelos.....	45
2.6.1. Curva de compactación.....	46
2.6.2. Método de compactación próctor .....	48
2.6.2.1. Próctor estándar.....	49
2.6.2.2. Próctor modificado.....	50
2.7. Densidad in situ.....	50
2.8. CBR (california bearing ratio).....	53
2.8.1. Antecedentes.....	53
2.8.2. Generalidades.....	53
2.8.3. Tipos de cbr.....	55
2.8.3.1. Cbr en laboratorio.....	55
2.8.3.1.1. Cbr para suelos perturbados y remoldados.....	55
2.8.3.1.2. Cbr para suelos inalterados.....	56
2.8.3.2. Cbr en el sitio.....	56
2.9. Ensayo CBR en laboratorio.....	58
2.9.1. Materiales.....	59
2.9.2. Preparación de la muestra de acuerdo a la norma.....	61
2.9.3. Procedimiento de ensayo.....	61
2.9.4. Elaboración de los moldes.....	61
2.9.5. Remojo.....	62
2.9.6. Penetración.....	63
2.9.7. Cálculos.....	63
2.10. ENSAYO CBR IN SITU.....	65
2.10.1. Metodología de ensayo CBR In Situ.....	66
2.10.2. Objetivo.....	66
2.10.3. Finalidad y Alcance.....	66
2.10.4. Referencias normativas.....	66
2.10.5. Equipos y materiales.....	67
2.10.6. Muestra.....	69

2.10.7. Procedimiento del ensayo in situ.....	69
2.10.8. Cálculos.....	71
2.10.9. Cálculo curva Esfuerzo – Penetración.....	71
2.10.10. Cálculo relación de soporte (CBR In Situ).....	72
2.11. ANÁLISIS ESTADÍSTICO.....	73
2.11.1. Estadística descriptiva y estadística inferencial.....	73
2.11.1.1. Población y muestra.....	74
2.11.1.2. Las variables.....	74
2.11.1.3. Escalas de medición de los datos.....	75
2.11.2. Construcción de tablas de frecuencia .....	77
2.11.2.1. Variable discreta.....	77
2.11.2.2. Variable continua.....	78
2.11.3. Análisis de tendencia central.....	80
2.11.3.1. La Media aritmética ( $\bar{X}$ ).....	80
2.11.3.2. La Mediana (Me).....	81
2.11.3.3. La Moda (Mo).....	82
2.11.4. Medidas de dispersión.....	83
2.11.4.1. El Rango ( R ).....	83
2.11.4.2. La desviación media (DM).....	84
2.11.4.3. Varianza poblacional ( $S^2$ ).....	85
2.11.4.4. Varianza muestral( $\sigma^2$ ).....	85
2.11.4.5. La desviación estándar (s).....	85
2.11.4.6. El coeficiente de variación (CV).....	86
2.12. Definición y tipos de modelos matemáticos.....	87
2.12.1. Modelo lineal.....	87
2.12.2. Modelo polinómico.....	88
2.12.3. Modelo potencial.....	90
2.12.4. Modelo trigonométrico.....	91
2.12.5. Modelo exponencial.....	92
2.12.6. Modelo logarítmico.....	92
2.13. Correlación.....	93

2.13.1. Coeficiente de correlación de Pearson.....	94
2.14. Cómo valorar la magnitud de los coeficientes de correlación.....	95
2.15. REGRESION MULTIPLE.....	96
2.15.1. Coeficiente de correlacion multiple.....	96

**CAPÍTULO III**  
**CARACTERIZACION DE LOS SUELOS**

	Pág.
3.1. Introducción.....	97
3.2. Laboratorios empleados.....	97
3.3. Unidades de estudio y decisión muestral .....	97
3.3.1. Muestra.....	98
3.3.2. Selección de las técnicas de muestreo.....	98
3.3.3. Parámetros de muestreo.....	99
3.4. Ubicación de las muestras de aplicación.....	100
3.5. Trabajo en campo.....	103
3.5.1. Toma de muestras.....	103
3.5.2. CBR In Situ.....	104
3.5.3. Densidad In Situ.....	105
3.6. Trabajo en laboratorio.....	107
3.6.1. Clasificación de los suelos subrasantes.....	107
3.6.2. Compactación Próctor modificado (T-180).....	110
3.6.3. CBR (laboratorio).....	111

**CAPÍTULO IV**  
**ANÁLISIS Y DEBATE DE RESULTADOS**  
**CON LA PRUEBA DE HIPOTESIS**

	Pág.
4.1. Análisis estadístico.....	113
4.1.1. Frecuencia.....	113
4.1.2. Medidas de tendencia central.....	116
4.1.2.1. Media aritmética.....	116
4.1.2.2. Mediana.....	117
4.1.2.3. Moda.....	117
4.1.2.4. Rango.....	117
4.1.3. Medidas de dispersión.....	118
4.1.3.1. Desviación media.....	118
4.1.3.2. Varianza poblacional.....	119
4.1.3.3. Varianza muestral.....	119
4.1.3.4. Desviación estándar.....	119
4.1.3.5. Coeficiente de variación.....	120
4.2. Dispersión de puntos.....	121
4.3. Elección del modelo matemático.....	122
4.4. Elección del modelo estadístico.....	126
4.5. Correlación del CBR In Situ con el CBR de laboratorio.....	128
4.5.1. Aplicación del modelo estadístico.....	128
4.5.2. Análisis correlacional – descriptivo.....	130
4.6. Análisis de los parámetros de correlación.....	130
4.6.1. Coeficiente de correlación.....	130
4.6.2. Coeficiente de determinación.....	131
4.7. Aplicación de la correlación de CBR convencional con CBR In Situ.....	132
4.8. Aplicación de la regresión múltiple.....	132
4.8.1. Regresión Múltiple - CBR al 95%.....	132
4.8.2. Regresión Múltiple - CBR al 100%.....	134



4.9. Aplicación de la correlación múltiple de CBR Laboratorio con CBR In Situ y la Densidad In Situ.....	135
----------------------------------------------------------------------------------------------------------	-----

**CAPÍTULO V**  
**CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

	Pág.
5.1. Conclusiones.....	138
5.2. Recomendaciones.....	139

**BIBLIOGRAFÍA**

**ANEXOS**

Anexo I	Clasificación de las muestras
Anexo II	Ensayos de compactación
Anexo III	Ensayos de CBR en laboratorio
Anexo IV	Ensayos de densidad in situ
Anexo V	Ensayos de CBR in situ

## ÍNDICE DE TABLAS

	Pag.
Tabla 2.1. Intemperización del granito.....	11
Tabla 2.2 Limites de tamaños para suelos.....	16
Tabla 2.3 Tamaños de mallas de acuerdo a la norma A.S.T.M.....	17
Tabla 2.4. Sistema de clasificación AASHTO.....	38
Tabla 2.5. Prefijos y sufijos del suelo.....	39
Tabla 2.6. Combinaciones en función de los prefijos y sufijos del suelo.....	40
Tabla 2.7. Sistema de clasificación de suelos unificado S.U.C.S.....	44
Tabla 2.8. Número de CBR para suelos clasificados según SUCS y AASHTO.....	54
Tabla 2.9. Clasificación del suelo de acuerdo al CBR.....	55
Tabla 2.10. Tipos de variables según su criterio y ejemplo.....	75
Tabla 2.11. La media aritmética y resumen.....	81
Tabla 2.12. Resumen de la mediana.....	82
Tabla 2.13. Resumen de la moda.....	83
Tabla 2.14. Relación empírica entre mediana, media y moda.....	83
Tabla 3.1. Numero de muestras.....	99
Tabla 3.2. Parámetros de muestreo.....	100
Tabla 3.3. Ubicación de la toma de muestras.....	101
Tabla 3.4. Resultados de CBR In Situ.....	105
Tabla 3.5. Densidad y humedad In Situ.....	106
Tabla 3.6. Clasificación de las muestras de las subrasantes: Avenida Salinas – Avenida La Paz y Av. La Paz – Avenida Colon .....	108
Tabla 3.7. Clasificación de las muestras de las subrasantes: Av. Colon – Av. Froilán Tejerina y Av. Froilan Tejerina – Av. Jorge Majluf.....	108
Tabla 3.8. Análisis de suelos en la investigación.....	109
Tabla 3.9. Resultados de densidad (Próctor modificado T-180).....	110
Tabla 3.10. CBR al 100% (Convencional).....	112
Tabla 3.11. CBR al 95% (Convencional).....	112

Tabla 4.1. Medidas de tendencia central – CBR convencional al 100%.....	113
Tabla 4.2. Medidas de tendencia central – CBR convencional al 95%.....	114
Tabla 4.3. Medidas de tendencia central – CBR In Situ.....	115
Tabla 4.4. Resultados de la media aritmética.....	116
Tabla 4.5. Resultados de la mediana.....	117
Tabla 4.6 Resultados de la moda.....	117
Tabla 4.7. Resultados del rango.....	118
Tabla 4.8. Resultados de la desviación media.....	118
Tabla 4.9. Resultados de la varianza poblacional.....	119
Tabla 4.10. Resultados de la varianza muestral.....	119
Tabla 4.11. Resultados de la desviación estándar.....	120
Tabla 4.12 Resultados de la desviación estándar.....	120
Tabla 4.13. Coeficientes de correlación por Statgraphics y Excel.....	128
Tabla 4.14. Constantes de las ecuaciones correlacionadas.....	129
Tabla 4.15. Ecuaciones correlacionadas.....	129
Tabla 4.16. Coeficientes de correlación obtenidos.....	131
Tabla 4.17. Coeficientes de determinación obtenidos.....	131

## ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 2.1. Tamices y vibrador para el análisis por cribado.....	18
Figura 2.2. Hidrómetro y cilindro de sedimentación.....	20
Figura 2.3. Curva de distribución granulométrica.....	21
Figura 2.4. Relaciones de fase de los suelos.....	26
Figura 2.5. Estados de consistencia de los suelos finos.....	29
Figura 2.6. Equipo de casasgrande.....	29
Figura 2.7. Comportamiento de los suelos en prueba.....	30
Figura 2.8. Prueba para limite plástico.....	31
Figura 2.9. Carta de plasticidad de Casagrande .....	32
Figura 2.10. Carta de plasticidad AASHTO.....	36
Figura 2.11. Carta de plasticidad Casagrande.....	42
Figura 2.12. Características de los suelos.....	43
Figura 2.13. Técnica de compactación en obra.....	45
Figura 2.14. Curva de compactación y curva de saturación.....	47
Figura 2.15. Curva de compactación según energía de compactado.....	47
Figura 2.16. Curvas típicas de compactación.....	48
Figura 2.17. Equipo de compactación próctor estándar y modificado.....	50
Figura 2.18. Equipo cono de arena.....	51
Figura 2.19. Molde y accesorios para ensayo CBR en laboratorio.....	55
Figura 2.20. Molde para muestra de suelo inalterada .....	56
Figura 2.21. Ensayo de CBR In Situ .....	57
Figura 2.22. Partes del molde CBR y sus accesorios .....	60
Figura 2.23. Dispositivo de carga para CBR de laboratorio.....	63
Figura 2.24. Relación de la curva de CBR con la curva de compactación.....	64
Figura 2.25. Montaje del equipo CBR in situ.....	68
Figura 2.26. Materiales y accesorios del equipo CBR in situ.....	69
Figura 2.27. Instalación típica del ensayo en el terreno.....	71
Figura 2.28. Corrección de curvas esfuerzo – penetración.....	72
Figura 2.29. Diferencia entre estadística descriptiva y inferencial.....	74

Figura 3.1. Esquema de muestreo.....	98
Figura 3.2. Ubicación de las subrasantes.....	100
Figura 3.3. Ubicación tramo Avenida Salinas – Avenida La Paz.....	101
Figura 3.4. Ubicación tramo Avenida La Paz – Avenida Colon.....	102
Figura 3.5. Ubicación tramo Av. Colon – Av. Froilan Tejerina.....	102
Figura 3.6. Ubicación tramo Av. Froilan Tejerina – Av. Jorge Majluf.....	102
Figura 3.7. Extracción muestra.....	103
Figura 3.8. Realización del ensayo CBR In Situ.....	104
Figura 3.9. Ensayo densidad in situ.....	105
Figura 3.10. Muestras suelo para el contenido de humedad en el horno.....	106
Figura 3.11. Ensayo clasificación de suelos.....	107
Figura 3.12. Tamices para la clasificación de suelos.....	107
Figura 3.13. Realizando el ensayo de compactación.....	110
Figura 3.14. Prensa hidráulica y moldes CBR listos para romper.....	111
Figura 3.15. Lectura de expansión de CBR convencional.....	111

## ÍNDICE DE GRÁFICOS

	Pág.
Gráfico 2.1 Modelo lineal.....	88
Gráfico 2.2. Modelo polinómico de segundo grado.....	89
Gráfico 2.3. Modelo potencial de tercer grado.....	89
Gráfico 2.4. Modelo potencial, raíz cuadrada.....	90
Gráfico 2.5. Modelo potencial, raíz cúbica.....	90
Gráfico 2.6. Modelo trigonométrico, función seno.....	91
Gráfico 2.7. Modelo trigonométrico, función coseno.....	91
Gráfico 2.8. Modelo exponencial.....	92
Gráfico 2.9. Modelo logarítmico.....	93
Gráfica 4.1. Dispersión de puntos – CBR al 100%.....	121
Gráfica 4.2. Dispersión de puntos – CBR al 95%.....	122
Gráfico 4.3. Modelo Polinómico.....	123
Gráfico 4.4. Ajuste al modelo lineal de CBR al 100% con el CBR In Situ.....	123
Gráfico 4.5. Ajuste al modelo polinómico de CBR al 100% con el CBR In Situ.....	124
Gráfico 4.6. Ajuste al modelo exponencial de CBR al 100% con el CBR In Situ.	124
Gráfico 4.7. Ajuste al modelo potencial de CBR al 100% con el CBR In Situ.....	125
Gráfico 4.8. Ajuste al modelo logarítmico de CBR al 100% con el CBR In Situ...	125
Gráfica 4.9. Correlación CBR In Situ y CBR laboratorio al 100% con programa STATGRAPHICS.....	127
Gráfica 4.10. Correlación CBR In Situ y CBR laboratorio al 100% con programa .Excel.....	127
Gráfico 4.11. Modelo de regresión ajustado – CBR al 100% (CBR1).....	128
Gráfico 4.12. Modelo de regresión ajustado – CBR al 95% (CBR2).....	129