

UNIVERSIDAD PERUANA UNIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
Escuela Profesional de Ingeniería Civil



Correlación entre los valores de CBR y las propiedades de índice de los suelos: un estudio de caso en la ciudad de Lima

Tesis para obtener el Título Profesional de Ingeniero civil

Autor:

Luis Eduardo Suarez Muedas
Gloria Stefany Santillán Trauco
Ronald Arturo Calle Chimbo

Asesor:

Mg Leonel Chahuares Paucar

Lima, noviembre de 2023

DECLARACIÓN JURADA DE ORIGINALIDAD DE TESIS

Mg. Leonel Chahuares Paucar, docente de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Escuela Profesional de Ingeniería Civil, de la Universidad Peruana Unión.

DECLARO:

Que la presente investigación titulada: **“CORRELACIÓN ENTRE LOS VALORES DE CBR Y LAS PROPIEDADES DE ÍNDICE DE LOS SUELOS: UN ESTUDIO DE CASO EN LA CIUDAD DE LIMA”** de los autores Luis Eduardo Suarez Muedas, Ronald Arturo Calle Chimbo y Gloria Stefany Santillan Trauco, tiene un índice de similitud de 17 % verificable en el informe del programa Turnitin, y fue realizada en la Universidad Peruana Unión bajo mi dirección.

En tal sentido asumo la responsabilidad que corresponde ante cualquier falsedad u omisión de los documentos como de la información aportada, firmo la presente declaración en la ciudad de Lima, a los 22 días del mes de noviembre del año 2023.



Mg. Leonel Chahuares Paucar

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS

En Lima, Ñaña, Villa Unión, a los **16** día(s) del mes de **noviembre** del año 2023 siendo las **9:00 horas**, se reunieron en modalidad virtual u online sincrónica, bajo la dirección del Señor Presidente del jurado: **Ing. Ferrer Canaza Rojas**, el secretario **Mg. Reymundo Jaulis Palomino** y los demás miembros: **Ing. David Díaz Garamendi** y el asesor **Mg. Leonel Chahuares Paucar** con el propósito de administrar el acto académico de sustentación de la tesis titulada: "Correlación entre los valores de CBR y las propiedades de índice de los suelos: un estudio de caso en la ciudad de Lima"

.....de el(los)/la(las) bachiller/es: a) **LUIS EDUARDO SUAREZ MUEDAS**.....
b)**RONALD ARTURO CALLE CHIMBO**.....
c)**GLORIA STEFANY SANTILLAN TRAUCO**.....
conducente a la obtención del título profesional de:.....**INGENIERO CIVIL**.....

El Presidente inició el acto académico de sustentación invitando al (los)/a(la)(las) candidato(a)s hacer uso del tiempo determinado para su exposición. Concluida la exposición, el Presidente invitó a los demás miembros del jurado a efectuar las preguntas, y aclaraciones pertinentes, las cuales fueron absueltas por el(los)/la(las) candidato(a)s. Luego, se produjo un receso para las deliberaciones y la emisión del dictamen del jurado.

Posteriormente, el jurado procedió a dejar constancia escrita sobre la evaluación en la presente acta, con el dictamen siguiente:

Candidato (a): **LUIS EDUARDO SUAREZ MUEDAS**

CALIFICACIÓN	ESCALAS			Mérito
	Vigesimal	Literal	Cualitativa	
Aprobado	18	B+	Muy bueno	Sobresaliente

Candidato (b): **RONALD ARTURO CALLE CHIMBO**

CALIFICACIÓN	ESCALAS			Mérito
	Vigesimal	Literal	Cualitativa	
Aprobado	16	B	Bueno	Muy bueno

Candidato (C): **GLORIA STEFANY SANTILLAN TRAUCO**

CALIFICACIÓN	ESCALAS			Mérito
	Vigesimal	Literal	Cualitativa	
Aprobado	16	B	Bueno	Muy bueno

Finalmente, el Presidente del jurado invitó al(los)/a(la)(las) candidato(a)s a ponerse de pie, para recibir la evaluación final y concluir el acto académico de sustentación procediéndose a registrar las firmas respectivas.

 Presidente
 Ing. Ferrer
 Canaza Rojas



 Secretario
 Mg. Reymundo
 Jaulis Palomino

 Asesor
 Mg. Leonel
 Chahuares Paucar

 Miembro
 Ing. David Díaz
 Garamendi

 Miembro

 Candidato/a (a)
 Luis Eduardo
 Suarez Muedas

 Candidato/a (b)
 Ronald Arturo Calle
 Chimbo

 Candidato/a (c)
 Gloria Stefany
 Santillan Trauco

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a Labgeo Group por permitirnos realizar los ensayos en sus instalaciones y por fomentar la investigación.

DEDICATORIA

Dedicamos la presente investigación a nuestros padres, que con todo su esfuerzo nos apoyaron durante transcurso de nuestra vida universitaria.

ÍNDICE

AGRADECIMIENTOS	3
DEDICATORIA.....	3
RESUMEN	5
ABSTRACT	6
INTRODUCCIÓN	6
1. MATERIALES Y MÉTODOS.....	7
1.1 CANTIDAD, LOCALIZACIÓN Y TIPO DE MUESTRA	7
1.2 ENSAYOS DE LABORATORIO.....	8
1.3 DETERMINACIÓN DE CORRELACIONES.....	8
1.3.1 Análisis de regresión lineal simple	8
1.3.2 Análisis de regresión lineal múltiple	8
2. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	9
2.1 REGRESIÓN LINEAL SIMPLE.....	10
2.2 REGRESIÓN LINEAL MÚLTIPLE	11
3. CONCLUSIONES	15
4. REFERENCIAS	16

CORRELACIÓN ENTRE LOS VALORES DE CBR Y LAS PROPIEDADES DE ÍNDICE DE LOS SUELOS: UN ESTUDIO DE CASO EN LA CIUDAD DE LIMA

CORRELATION BETWEEN CBR VALUES AND INDEX PROPERTIES OF SOILS: A CASE STUDY IN THE CITY OF LIMA"

Luis Eduardo Suarez Muedas
Universidad Peruana Unión
Lima, Perú,
luissuarez@upeu.edu.pe
0000-0003-0840-888X

Gloria Stefany Santillan Trauco
Universidad Peruana Unión
Lima, Perú,
gloriasantillan@upeu.edu.pe
0000-0003-1756-3806

Ronald Arturo Calle Chimbo
Universidad Peruana Unión
Lima, Perú,
ronaldcalle@upeu.edu.pe
0000-0002-9567-9516

RESUMEN

El ensayo California Bearing Ratio (CBR) tarda aproximadamente una semana en su realización, por lo que el ensayo es lento y laborioso. Ante ello, es imprescindible predecir su valor, por lo que el objetivo de esta investigación es determinar ecuaciones para calcular el valor CBR mediante correlación con las propiedades de índice del suelo y evaluar el nivel de ajuste mediante el coeficiente de determinación (R^2). Se analizaron treinta muestras de suelo correspondientes a los distritos de Surco, Comas, Miraflores y Lurigancho-Chosica; cuyos parámetros fueron el porcentaje de gravas, arenas y finos, límite líquido, límite plástico, máxima densidad seca, óptimo contenido de humedad y CBR; mediante el análisis de regresión lineal simple y múltiple. En el análisis de correlación lineal simple se encontró que el porcentaje de finos, la máxima densidad seca y óptimo contenido de humedad tiene un aceptable nivel de ajuste con el CBR, con un R^2 máximo de 0.5174, y para la correlación lineal múltiple, la ecuación de regresión con mejor ajuste tiene un R^2 de 0.9707 y R^2 ajustado de 0.9291. El análisis de regresión lineal múltiple predice de mejor manera el CBR que el análisis de regresión lineal simple.

Palabras clave: CBR; predicción; correlación; propiedades de índice

ABSTRACT

The California Bearing Ratio (CBR) test takes approximately one week to perform, making the test slow and laborious. In view of this, it is essential to predict its value, so the objective of this research is to determine equations to calculate the CBR value by correlation with the index properties of the soil and to evaluate the level of adjustment by means of the coefficient of determination (R^2). Thirty soil samples corresponding to the districts of Surco, Comas, Miraflores and Lurigancho-Chosica were analyzed; whose parameters were the percentage of gravels, sands and fines, liquid limit, plastic limit, maximum dry density, optimum moisture content and CBR; by means of simple and multiple linear regression analysis. In the simple linear correlation analysis, it was found that the percentage of fines, maximum dry density and optimum moisture content have an acceptable level of fit with the CBR, with a maximum R^2 of 0.5174, and for the multiple linear correlation, the regression equation with the best fit has an R^2 of 0.9707 and adjusted R^2 of 0.9291. The multiple linear regression analysis predicts CBR better than the simple linear regression analysis.

Keywords: CBR; prediction; correlation; index properties

INTRODUCCIÓN

El ensayo California Bearing Ratio (CBR) se utiliza para evaluar la resistencia potencial de los materiales base, subbase y subrasante; cuyos valores son componentes cruciales en el diseño de pavimentos [1]. Para realizar el ensayo CBR, se requiere extraer muestras de suelo representativas de ubicaciones previamente seleccionadas, del que se prepara un espécimen que representa un valor de óptimo contenido de humedad y máxima densidad seca, seguido se sumerge por 96 ± 2 horas para evaluar el potencial de hinchamiento, y finalmente se halla el valor del CBR que representa la resistencia real del suelo. Su determinación tarda aproximadamente una semana en realizarse, lo que hace que el ensayo sea lento y laborioso [2]. Además, sumado a la variabilidad geográfica de las condiciones del suelo de un lugar a otro hace difícil predecir el comportamiento del suelo; por lo que la capacidad de carga cambia de vez en cuando y puede variar de un lugar a otro dentro de una zona determinada [3]. Esto hace que el número de muestras siempre sea limitado y el valor del CBR puede ser poco significativo [4].

Para superar estas dificultades, es imprescindible predecir el valor CBR del suelo con parámetros fácilmente determinables. Dado que la prueba requiere mucho tiempo, una buena indicación de los valores CBR a partir de los ensayos de índice es beneficioso [2]. El valor CBR del suelo está influenciado por diferentes propiedades del suelo como límite líquido (LL), límite plástico (LP), índice de plasticidad (IP), Óptimo Contenido de Humedad (OCH) y Máxima Densidad Seca (MDS); y también estas pruebas son fáciles de realizar [3].

[2] Realizaron ensayos de laboratorio para determinar el LL, LP, IP, MDS, OCH y CBR en 22 muestras de suelo extraídas de Ibiono, Oron y Onna en el Estado de Akwa Ibom. Usaron análisis de regresión lineal, no lineal y múltiple con los programas Minitab 13 y Microsoft Excel 2013 para desarrollar una correlación

entre CBR y las propiedades de índice del suelo. Para las muestras de Ibiono y Onna se alcanzó un coeficiente de regresión lineal múltiple alto. La comparación entre los valores de CBR de laboratorio y los predichos obtenidos a partir de los modelos MLR indican que, el IP y OCH para Ibiono, OCH y MDS para Onna, LL, LP y OCH para Oron pueden ser útiles para predecir los valores de CBR empapados. Se obtuvieron valores R^2 de 0.942, 0.731 y 0.653 de la variación del CBR real de laboratorio con el CBR predicho.

[5] Tomaron en consideración análisis de regresión sencillos y complejos entre las propiedades de índice del suelo (límite líquido, límite plástico e índice de plasticidad), características de compactación (máxima densidad seca y óptimo contenido de humedad), porcentaje de tamaños de partículas (grava, arena y finos) y CBR. El estudio se realizó en consonancia con un proyecto de construcción de carreteras en el complejo Ntem en El Congo, en el que se recogieron 33 muestras de suelo que se trasladaron al laboratorio para su análisis. Se llevaron a cabo las pruebas geotécnicas y, se realizaron análisis de correlación y regresión con los datos obtenidos para evaluar la relación entre estas propiedades de compactación y el CBR experimental obtenido. Los resultados de este análisis mostraron unos coeficientes de determinación relativamente buenos de $R^2= 0.772$ entre el CBR y la MDS utilizando un análisis de regresión lineal simple y $R^2 = 0.841$ entre el CBR y todos los parámetros mediante el análisis de regresión lineal múltiple.

[6] Correlacionó las propiedades del suelo como la máxima densidad seca, óptimo contenido de humedad, límite líquido, límite plástico, índice de plasticidad, con el fin de estimar el valor CBR, en un total de 16 muestras, las cuales fueron extraídas del distrito de Nogaon de Assam, India. Se observó que el valor de CBR disminuye con el aumento del valor del índice de plasticidad y el contenido óptimo de humedad del suelo, contrario a lo que ocurre con el aumento del valor de la densidad seca máxima, puesto que con su incremento el valor del CBR también aumenta. Seguidamente desarrolló un modelo de regresión lineal múltiple utilizando el programa Microsoft Excel con el objetivo de establecer una relación del valor CBR del suelo con el límite líquido, límite plástico, índice de plasticidad, Máxima Densidad seca y Óptimo Contenido de Humedad, de ello finalmente concluye que la diferencia máxima entre el valor del CBR calculado y de laboratorio es del 3,67 %, pero en la mayoría de los casos las diferencias son menores a 3 %, por lo que el modelo es satisfactorio.

El objetivo de esta investigación es determinar ecuaciones para calcular el valor del CBR mediante correlación con las propiedades de índice de los suelos y evaluar el nivel de ajuste de las correlaciones mediante el coeficiente de determinación (R^2).

1. MATERIALES Y MÉTODOS

1.1 CANTIDAD, LOCALIZACIÓN Y TIPO DE MUESTRA

Se requirieron muestras de suelos en las que se puedan determinar el porcentaje de gravas, arenas y finos, límite líquido, límite plástico, máxima densidad seca y óptimo contenido de humedad. Para tener una muestra que no sea considerada

pequeña, se requiere al menos 30 casos o datos, que es el mínimo recomendado [7]. Por ello se trabajó con 30 muestras de suelo.

Con el fin de estudiar suelos con diferentes características, las muestras fueron extraídas de cuatro distritos de la ciudad de Lima: Surco, Comas, Miraflores y Lurigancho-Chosica.

1.2 ENSAYOS DE LABORATORIO

Se realizaron los ensayos de laboratorio siguiendo las metodologías descritas en las normas ASTM. Para determinar el porcentaje de gravas, arenas y finos por tamizado según ASTM D6913M-17, para el límite líquido y límite plástico según ASTM D4318-17e1, para determinar la máxima densidad seca y el óptimo contenido de humedad según ASTM D1557-12e1 y para el CBR según ASTM D1883-16, respectivamente [8-10,1].

Cabe resaltar que para el ensayo de CBR, cada espécimen de ensayo fue sumergido en agua durante 96 ± 2 horas con el fin de simular las condiciones más críticas que se puedan presentar al verse inundadas por agua.

1.3 DETERMINACIÓN DE CORRELACIONES

1.3.1 Análisis de regresión lineal simple

Desarrolla una correlación entre una variable dependiente y una variable independiente, a través de una línea de tendencia. Para este estudio las variables independientes utilizadas son el porcentaje de grava, arenas y finos, límite líquido, límite plástico, índice de plasticidad, máxima densidad seca y óptimo contenido de humedad; y la variable dependiente es el valor de CBR.

1.3.2 Análisis de regresión lineal múltiple

Proporciona un intento de desarrollar una correlación entre más de dos variables. En esta investigación se combinaron las variables independientes ya mencionadas, para correlacionarlas con la variable dependiente, que es el CBR. Para la presente investigación se usó el software Minitab.

El parámetro utilizado para evaluar el nivel de ajuste conseguido es mediante el coeficiente de determinación (R^2), el cual indica que mientras más cercano sea el valor a 1, mejor es el modelo planteado para predecir el valor de la variable dependiente [4]. Este criterio de ajuste se muestra en la tabla 1.

El valor de p se utiliza para analizar la importancia de cada variable en el análisis de regresión lineal múltiple. El valor p es la probabilidad de medir la evidencia contra la hipótesis nula. Un valor p más pequeño proporciona una evidencia más fuerte en contra de la hipótesis nula [11].

Tabla 1. Criterio de nivel de ajuste

Criterio	R^2
Excelente	≥ 0.90
Bueno	0.70 - 0.89
Aceptable	0.40 - 0.69
Pobre	0.20 - 0.39
Muy pobre	≤ 0.19

Fuente: Araujo, 2014.

2. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se presentan los resultados de los ensayos de laboratorio en la Tabla 2. Los resultados de CBR corresponden al 100% de la máxima densidad seca a 0.1 pulgadas.

Tabla 2. Ubicación de muestras y resultados de ensayos de laboratorio

No.	Lugar	Gravas (%)	Arenas (%)	Finos (%)	LL	LP	MDS (g/cm ³)	OCH (%)	CBR a 0.1" (%)
1	Surco	7	44	49	26	19	1.806	15.4	11.6
2	Surco	29	34	37	26	19	2.100	9.2	36.0
3	Surco	9	41	50	24	17	2.064	11.3	19.9
4	Surco	4	36	60	31	19	1.759	15.3	8.7
5	Surco	7	38	55	26	19	1.829	14.4	9.3
6	Surco	0	40	60	28	19	1.797	15.1	8.8
7	Surco	3	43	54	23	17	1.869	12.7	10.5
8	Comas	2	43	55	27	15	1.963	10.9	8.7
9	Comas	11	39	50	25	15	2.074	9.8	18.0
10	Comas	24	46	30	21	14	2.199	6.8	34.1
11	Comas	5	32	63	28	18	1.910	11.7	7.1
12	Comas	16	41	43	23	15	2.138	8.2	24.0
13	Miraflores	8	40	52	24	16	2.073	8.0	15.2
14	Miraflores	7	43	50	24	15	2.035	10.0	18.8
15	Miraflores	13	31	56	24	16	2.030	9.6	26.8
16	Miraflores	11	43	46	22	15	2.098	8.4	29.0
17	Miraflores	6	38	56	24	15	1.952	11.4	9.6
18	Miraflores	5	50	45	22	15	1.954	11.7	15.1
19	Miraflores	2	58	40	21	16	1.989	10.6	17.6
20	Miraflores	18	48	34	22	14	2.013	9.9	10.2
21	Miraflores	14	35	51	23	14	1.969	12.1	8.9
22	Miraflores	13	33	54	29	19	1.838	12.8	7.7
23	Chosica	1	20	79	30	16	1.944	12.5	6.5
24	Chosica	3	24	73	28	14	2.020	11.0	6.9
25	Chosica	0	17	83	30	17	1.943	12.3	5.7
26	Chosica	3	22	75	29	16	2.028	11.6	10.6
27	Chosica	8	40	52	26	16	1.981	11.2	13.4
28	Chosica	6	48	46	25	14	1.972	11.8	8.6
29	Chosica	0	69	31	27	17	2.017	11.4	15.6
30	Chosica	2	71	27	25	16	2.070	9.5	30.1

Fuente: Elaboración propia.

2.1 REGRESIÓN LINEAL SIMPLE

La correlación entre el porcentaje de gravas y el CBR se muestran en la Figura 1, se observa que la línea de tendencia es creciente, por lo que ambas variables son directamente proporcionales, de igual manera que lo calcularon [5]. El valor de R^2 es de 0.3772 lo que indica que existe un pobre nivel de ajuste. En la Figura 2, se muestra la correlación entre el porcentaje de arenas y el CBR, que de manera similar muestra una relación directamente proporcional entre ambas variables, pero el valor de R^2 es 0.1383, lo que indica que el nivel de ajuste es muy pobre; resultados que en comparación a lo investigado por [12], es similar; pues demostró una relación directamente proporcional con un R^2 de 0.2058. Para el caso del porcentaje de finos, de acuerdo con la Figura 3, presenta una relación inversamente proporcional, y el valor de R^2 es de 0.3922, lo que indica que el nivel de ajuste está entre pobre y aceptable; estos resultados se asemejan a lo hallado por [5], pero con un R^2 menor de 0.4144.

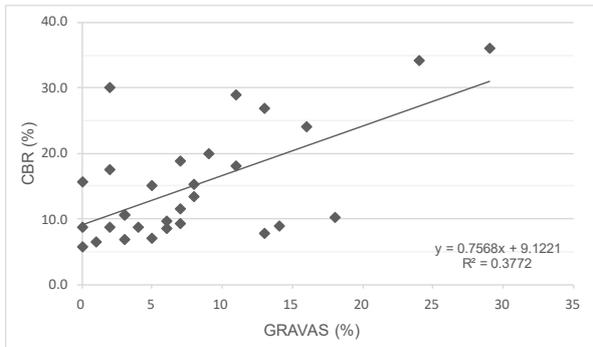


Figura 1. CBR vs Gravas (%)

Fuente: Elaboración propia

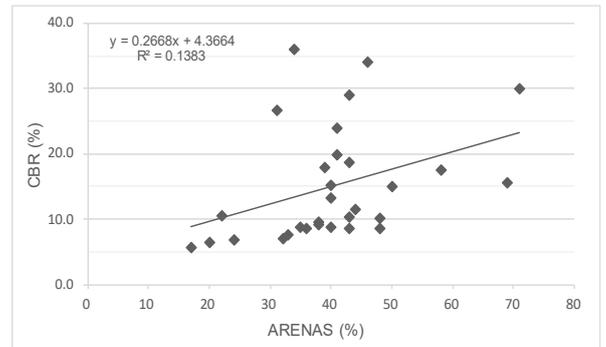


Figura 2. CBR vs Arenas (%)

Fuente: Elaboración propia

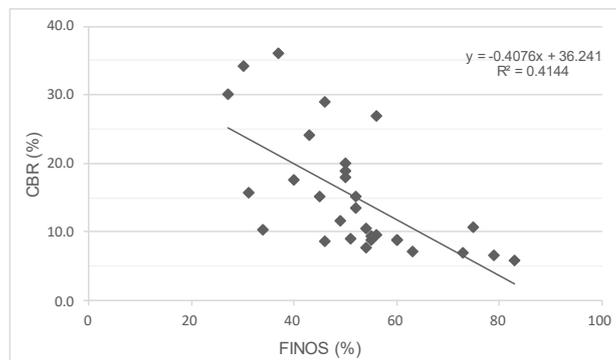


Figura 3. CBR vs Finos (%)

Fuente: Elaboración propia

Según la Figura 4, El límite líquido y el CBR presentan una relación inversamente proporcional y el valor de R^2 es 0.2755, por lo que el nivel de ajuste es pobre. Con el límite plástico también se presenta una relación inversamente proporcional según la Figuras 5, con valor de R^2 de 0.0154 para el límite líquido, lo cual indica que es muy pobre. Estos resultados son contrarios a lo determinado por [13], quien encontró una relación directamente proporcional tanto para el límite líquido, límite plástico e índice de plasticidad, pero tienen la misma tendencia a lo estudiado por [6].

Respecto a los resultados de compactación, en la Figura 6 se ve que hay un aceptable nivel de ajuste, directamente proporcional, entre la máxima densidad seca y el CBR, con un R^2 de 0.5174; y finalmente vemos, en la Figura 7, que existe una relación inversamente proporcional entre el CBR y el óptimo contenido de humedad, con un R^2 de 0.4981, lo que indica un aceptable nivel de ajuste. La relación es similar a lo propuesto por [3], que también obtuvo una relación directamente proporcional con la máxima densidad seca ($R^2=0.592$) e inversamente proporcional con el óptimo contenido de humedad ($R^2=0.555$).

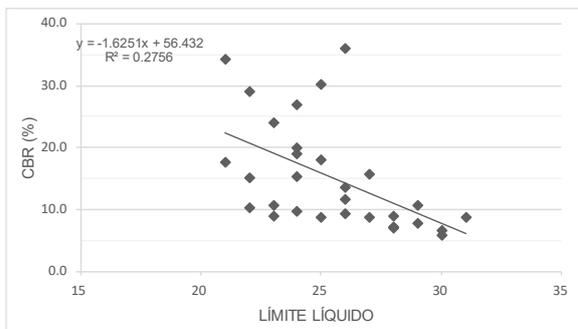


Figura 4. CBR vs límite líquido
Fuente: Elaboración propia

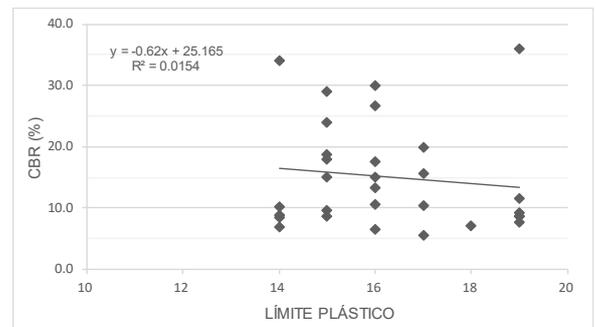


Figura 5. CBR vs límite plástico
Fuente: Elaboración propia

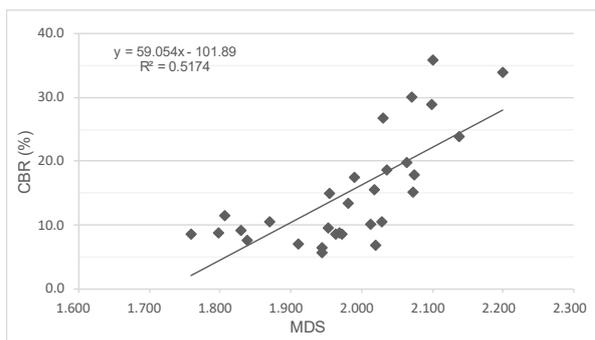


Figura 6. CBR vs máxima densidad seca (g/cm³)
Fuente: Elaboración propia

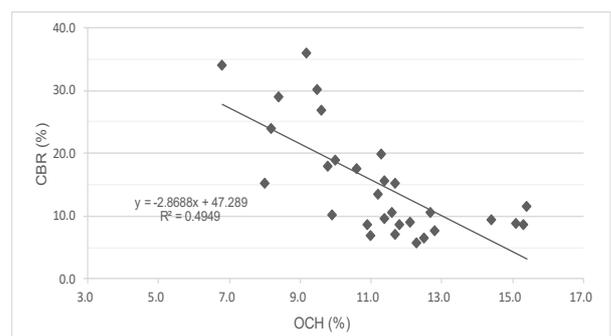


Figura 7. CBR vs OCH (%)
Fuente: Elaboración propia

2.2 REGRESIÓN LINEAL MÚLTIPLE

Se desarrolló el modelo de regresión lineal múltiple utilizando todas las variables descritas anteriormente. La ecuación resultante demuestra como variables significativas al límite plástico (LP) y la máxima densidad seca (MDS) como se

muestra en la Tabla 3, considerando que sus valores de p son los más cercanos a 0. La ecuación de regresión obtuvo un R^2 de 0.8214 y R^2 ajustado de 0.7749, considerándolo como un nivel de ajuste bueno para determinar el valor del CBR. La ecuación resultante es la siguiente:

$$\%CBR = -149.4 + 0.236 G + 0.1409 S - 0.600LL + 2.716LP + 65.5MDS - 0.13 OCH(\%) \quad (1),$$

Donde G representa el contenido de grava (%), S representa el contenido de arena (%), LL el límite líquido, LP es el límite plástico, MDS es la máxima densidad seca (g/cm^3) y OCH representa el óptimo contenido de humedad (%).

Tabla 3. Resultados de regresión lineal múltiple

Término	Coef	Valor T	Valor p	
Constante	-149.4	-2.61	0.016	$R^2=0.8214$ R^2 ajustado $=0.7749$
Grava (%)	0.236	1.51	0.144	
Arena (%)	0.1409	1.68	0.106	
LL	-0.6	-1.28	0.214	
LP	2.716	3.96	0.001	
MDS	65.5	2.9	0.008	
OCH (%)	-0.13	-0.12	0.907	

Fuente: Elaboración propia

El criterio de bondad de ajuste no llega a ser excelente por lo que agregaron interacciones entre variables hasta el orden 2 y también se incluyeron efectos cuadráticos. Como consecuencia de esto, se obtuvo mayor nivel de ajuste obteniendo como resultados $R^2=0.9827$ y R^2 ajustado=0.7497. El valor de R^2 es mayor al obtenido según la tabla 3, sin embargo, el valor de R^2 ajustado es menor. Esto porque el R^2 ajustado considera el impacto de las variables adicionales que tienden a sesgar los resultados de las mediciones de R^2 . La participación de cada variable predictora se muestra en la Tabla 4 y la ecuación es:

$$\begin{aligned} \%CBR = & -12272 - 58.7 G + 38.9 S + 84 LL + 203 LP + 9145 MDS - \\ & 14 OCH - 0.086 G * G + 0.0749 S * S + 0.90 LL * LL - 1.16 LP * LP - \\ & 1474 MDS * MDS + 1.92 OCH * OCH + 0.116 G * S + 0.472 G * LL + \\ & 0.581 G * LP + 18.8 G * MDS - 0.21 G * OCH + 0.579 S * LL - 0.130 S * LP - \\ & 23.5 S * MDS - 1.054 S * OCH - 0.32 LL * LP - 65.1 LL * MDS - 2.23 LL * \\ & OCH - 76.8 LP * MDS - 0.14 LP * OCH + 38 MDS * OCH \end{aligned} \quad (2),$$

Tabla 4. Resultados de regresión lineal múltiple con la adición de interacciones y efectos cuadráticos

Término	Coefficiente	Valor T	Valor p
Constante	-12272	-0.88	0.473
Grava (%)	-58.7	-0.87	0.477
Arena (%)	38.9	1.49	0.275
LL	84	0.75	0.529
LP	203	0.8	0.507
MDS	9145	0.91	0.459
OCH (%)	-14	-0.03	0.979
Grava (%)*Grava (%)	-0.086	-0.64	0.586
Arena (%)*Arena (%)	0.0749	1.48	0.277
LL*LL	0.9	0.44	0.704
LP*LP	-1.16	-0.6	0.61
MDS *MDS	-1474	-0.84	0.489
OCH (%)*OCH (%)	1.92	0.43	0.711
Grava (%)*Arena (%)	0.116	0.8	0.508
Grava (%)*LL	0.472	0.49	0.676
Grava (%)*LP	0.581	0.97	0.432
Grava (%)*MDS	18.8	0.74	0.538
Grava (%)*OCH (%)	-0.21	-0.17	0.88
Arena (%)*LL	0.579	1.04	0.409
Arena (%)*LP	-0.13	-0.53	0.648
Arena (%)*MDS	-23.5	-1.5	0.274
Arena (%)*OCH (%)	-1.054	-1.38	0.301
LL*LP	-0.32	-0.22	0.848
LL*MDS	-65.1	-1.02	0.416
LL*OCH (%)	-2.23	-0.56	0.634
LP*MDS	-76.8	-0.85	0.486
LP*OCH (%)	-0.14	-0.03	0.976
MDS *OCH (%)	38	0.23	0.841

R²=0.9827
R²ajustado
=0.7497

Fuente: Elaboración propia

De acuerdo con los resultados de la Tabla 4, el valor de p indica la presencia de variables con muy poca significancia, siendo menores los que presentan valores más cercanos a 1, por lo que se requirió la eliminación de variables no significativas. Para ello se realizó el método de selección de variables de Eliminación hacia atrás, considerando 0.1 como α a retirar. Como resultado la ecuación resultante obtuvo $R^2=0.9707$ y R^2 ajustado=0.9291 obteniendo el

criterio de ajuste excelente. La significancia de cada variable seleccionada se muestra en la Tabla 5 y la ecuación resultante es:

$$\%CBR = -5977 - 30.67 G + 19.65 S + 30.43 LL + 104.9 LP + 4377 MDS + 21.52 OCH - 0.0739 G * G + 0.03302 S * S - 0.970 LP * LP - 731 MDS * MDS + 0.5235 G * LP + 12.14 G * MDS + 0.1730 S * LL - 10.57 S * MDS - 0.514 S * OCH - 19.92 LL * MDS - 38.1 LP * MDS \quad (3),$$

Tabla 5. Resultados de regresión lineal múltiple aplicando la Eliminación hacia atrás.

Término	Coefficiente	Valor T	Valor p	
Constante	-5977	-3.95	0.002	
Grava (%)	-30.67	-4.51	0.001	
Arena (%)	19.65	3.07	0.01	
LL	30.43	3.68	0.003	
LP	104.9	2.9	0.013	
MDS	4377	3.73	0.003	
OCH (%)	21.52	4.05	0.002	
Grava (%) * Grava (%)	-0.0739	-2.06	0.062	R ² =0.9707 R ² ajustado =0.9291
Arena (%) * Arena (%)	0.03302	4.66	0.001	
LP*LP	-0.97	-1.99	0.07	
MDS *MDS	-731	-3.3	0.006	
Grava (%) *LP	0.5235	6.07	0.001	
Grava (%) *MDS	12.14	3.63	0.003	
Arena (%) *LL	0.173	4.59	0.001	
Arena (%) *MDS	-10.57	-3.56	0.004	
Arena (%) *OCH (%)	-0.514	-3.87	0.002	
LL *MDS	-19.92	-4.2	0.001	
LP *MDS	-38.1	-3.04	0.01	

Fuente: Elaboración propia

El nivel de ajuste determinado en las ecuaciones 1 y 2, calificados como buenos, se asemejan a lo determinado por [14] que mediante el análisis de regresión múltiple obtuvo R²=0.80, a [15] con R²=0.785 y a [16] con R²=0.88.

El nivel de ajuste determinado en la ecuación 3, calificado como excelente, se asemeja a lo determinado por [17] que mediante el análisis de regresión múltiple obtuvo R²=0.94, a [18] con R²=0.9731, a [19] con R²=0.96 y a [20] con R²=0.957.

En la Figura 8 se muestra gráficamente, las diferencias entre los resultados de CBR determinados en laboratorio y los CBR hallados matemáticamente mediante la ecuación descrita en la ecuación 3, que fue la que mejor nivel de ajuste obtuvo.

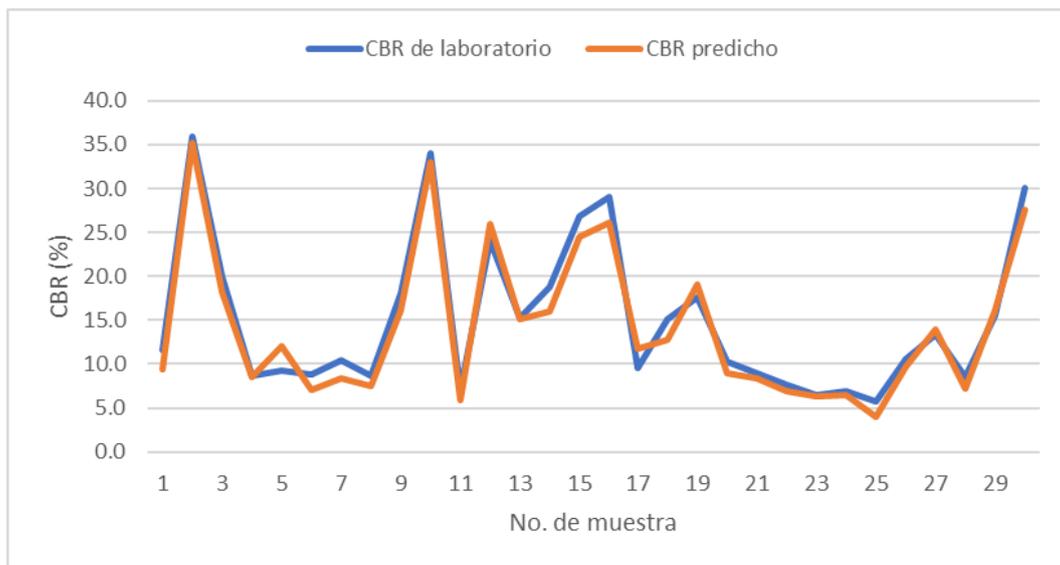


Figura 8. Comparación entre CBR de laboratorio y CBR predicho por la ecuación de correlación con el mejor nivel de ajuste.
Fuente: Elaboración propia

3. CONCLUSIONES

Según lo analizado mediante el análisis de regresión lineal simple:

- El porcentaje de gravas, porcentaje de arenas y la máxima densidad seca tienen una relación directamente proporcional con el valor CBR.
- El porcentaje de finos, límite líquido, límite plástico, y óptimo contenido de humedad tienen una relación inversamente proporcional con el valor CBR.
- Las variables que tienen un nivel de ajuste aceptable son la máxima densidad seca con $R^2=0.5301$ y el óptimo contenido de humedad con $R^2=0.4981$.

Según lo analizado mediante el análisis de regresión lineal múltiple:

- La ecuación 1 tuvo un $R^2=0.8214$ y R^2 ajustado=0.7749, lo cual indica que el nivel de ajuste es bueno.
- La ecuación 2 mejoró el valor de $R^2=0.9827$, pero disminuyó el valor de R^2 ajustado=0.7497.
- La ecuación 3 obtuvo resultados de $R^2=0.9707$ y R^2 ajustado=0.9291, obteniendo los resultados más precisos calificado con un nivel de ajuste excelente y es el que mejor predice el valor del CBR.

El análisis de regresión lineal múltiple brinda mejores resultados de correlación que la del análisis lineal simple.

El obtener resultados de R^2 que se califican como excelente permite predecir, con gran precisión, el valor del CBR.

4. REFERENCIAS

- [1] ASTM D1883 - 16. Standard Test Method for California Bearing Ratio (CBR) of Laboratory-Compacted Soils. ASTM International, 2016.
- [2] O. B. Basse, I. C. Attah, E. E. Ambrose, R. K. Etim, "Correlation between CBR Values and Index Properties of Soils: A Case Study of Ibiono, Oron and Onna in Akwa Ibom State", *Resources and Environment*, vol. 7, n°4, pp. 94-102, septiembre, 2017. <http://article.sapub.org/10.5923.j.re.20170704.02.html>
- [3] M. Korde, R. K. Yadav, "Predicting the CBR Value of Different Soils with the Help of Index Properties", *International Journal of Engineering Research and Science & Technology*, vol. 4, n°3, pp. 142-145, agosto, 2015. <https://www.ijerst.com/Currentissue.php#>
- [4] W. Araujo, "Ecuaciones de correlación del CBR con propiedades índice de suelos para la ciudad de Piura, Universidad de Piura," Tesis de pregrado, Universidad de Piura, Piura, Perú, 2014.
- [5] V. Y. Katte, S. M. Mfoyet, B. Manefouet, A. S. L. Wouatong, L. A. Bezeng, "Correlation of California Bearing Ratio (CBR) Value with Soil Properties of Road Subgrade Soil", *Geotechnical and Geological Engineering*, vol. 37, n°1, pp. 217-234, enero, 2019. <https://doi.org/10.1007/s10706-018-0604-x>
- [6] D. Kumar, "A Study of Correlation Between California Bearing Ratio (CBR) Value With Other Properties of Soil", *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, vol. 4, n°1, pp. 559-562, enero, 2014. <https://ijetae.com/>
- [7] P. L. López, "Población Muestra y Muestreo", *Punto Cero*, vol. 9, n°8, pp. 69-74, 2004. http://www.scielo.org.bo/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1815-02762004000100012
- [8] ASTM D6913M - 17. Standard Test Methods for Particle-Size Distribution (Gradation) of Soils Using Sieve Analysis. ASTM International, 2017.
- [9] ASTM D4318 - 17e1. Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils. ASTM International, 2017.
- [10] ASTM D1557 - 12. Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Modified Effort (56,000 ft-lbf/ft³ (2,700 kN-m/m³)). ASTM International, 2021.
- [11] Minitab, LLC. (2021). Minitab. En: <https://www.minitab.com>
- [12] D. A. Al-Hamdani, "Correlation of CBR Value with Particles Size and Compaction Characteristics of Cohesionless Soil", *Kufa Journal of Engineering*, vol. 9, n°1, pp. 158-174, enero, 2018. <https://doi.org/10.30572/2018/KJE/090111>
- [13] F. Iqbal, A. Kumar, A. Murtaza, "Co-Relationship between California Bearing Ratio and Index Properties of Jamshoro Soil", *Mehran University Research Journal of Engineering & Technology*, vol. 37, n°1, pp. 177-190, enero, 2018. <https://doi.org/10.22581/muet1982.1801.16>
- [14] D. P. Khatri, I. P. Acharya, B. B. Dhakal, "Correlation of California Bearing Ratio with Index Properties of Sub-Grade Soil: A Case Study on Thankot Chitlang Road Section", *Proceedings of IOE Graduate Conference, 2019-Winter*, vol. 7, pp. 85-89, diciembre, 2019. <http://conference.ioe.edu.np/>

- [15] S. A. Taha, S. M. El-Badawy, A. M. Ali, "Determination of California Bearing Ratio Through Material Index Properties", *ResearchGate*, pp. 1-6, marzo, 2014.
https://www.researchgate.net/publication/328433675_Determination_of_California_Bearing_Ratio_Through_Material_Index_Properties
- [16] A. Ul-Rehman, K. Farooq, H. Mujtaba, O. Altaf, "Estimation of California Bearing Ratio (CBR) From Index Properties and Compaction Characteristics of Coarse Grained Soil", *Science International (Lahore)*, vol. 27, n°6, pp. 6207-6210, enero, 2015. <http://www.sci-int.com/>
- [17] P. Ambrose, S. Rimoy, "Prediction of four-days Soaked California Bearing Ratio (CBR) Values from Soil Index Properties", *Tanzania Journal of Engineering and Technology*, vol. 40, n°1, pp. 28-38, junio, 2021.
<https://www.ajol.info/index.php/tjet>
- [18] J. Khatti, G. K. Singh, "Relationship Between Index Properties and CBR of Soil and Prediction of CBR", *Transportation and Environmental Geotechnics*, Lecture Notes in Civil Engineering, vol 298. pp. 171–185, diciembre, 2022. https://doi.org/10.1007/978-981-19-6774-0_16
- [19] J. O. Irokwe, I. L. Nwaogazie, S. Sule, "Development of Empirical Models for the Estimation of CBR Value of Soil from Their Index Properties: A Case Study of the Ogbia-Nembe Road in Niger Delta Region of Nigeria", *Open Journal of Civil Engineering*, vol. 12, n°4, pp. 648-664, diciembre, 2022.
<https://doi.org/10.4236/ojce.2022.124036>
- [20] Y. Hassan, B. Alshameri, F. Iqbal, "Prediction of California Bearing Ratio (CBR) Using Index Soil Properties and Compaction Parameters of Low Plastic Fine-Grained Soil", *Transportation Infrastructure Geotechnology*, vol. 9, n°6, pp. 764-776, diciembre, 2022. <https://doi.org/10.1007/s40515-021-00197-0>

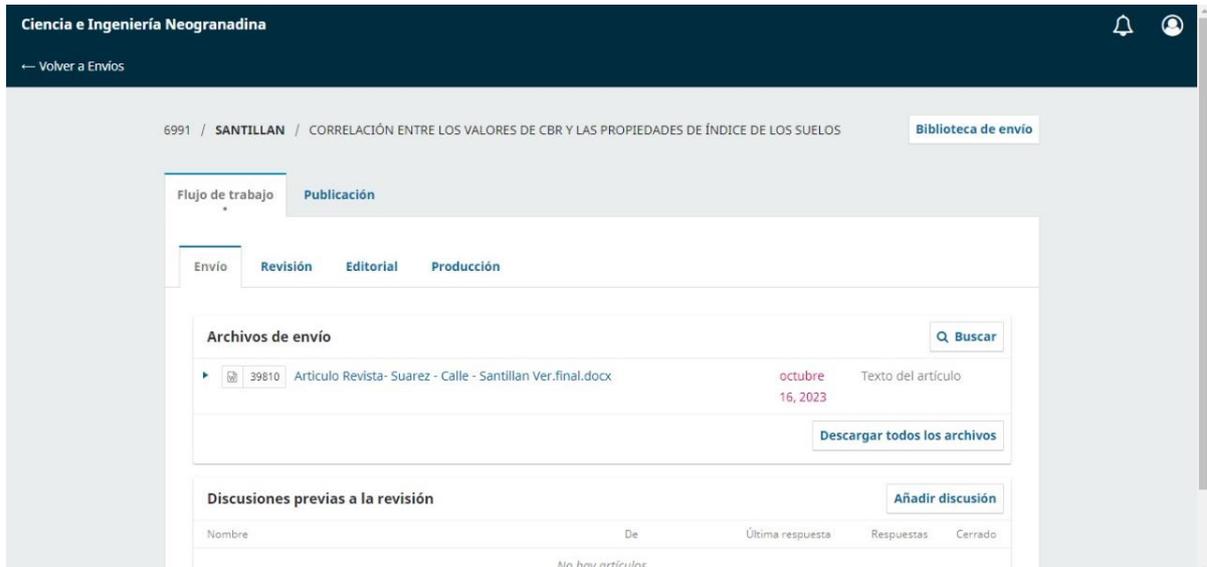
ANEXOS

EVIDENCIA DE SUMISIÓN A REVISTA INDEXADA

Revista: Ciencia e Ingeniería Neogranadina

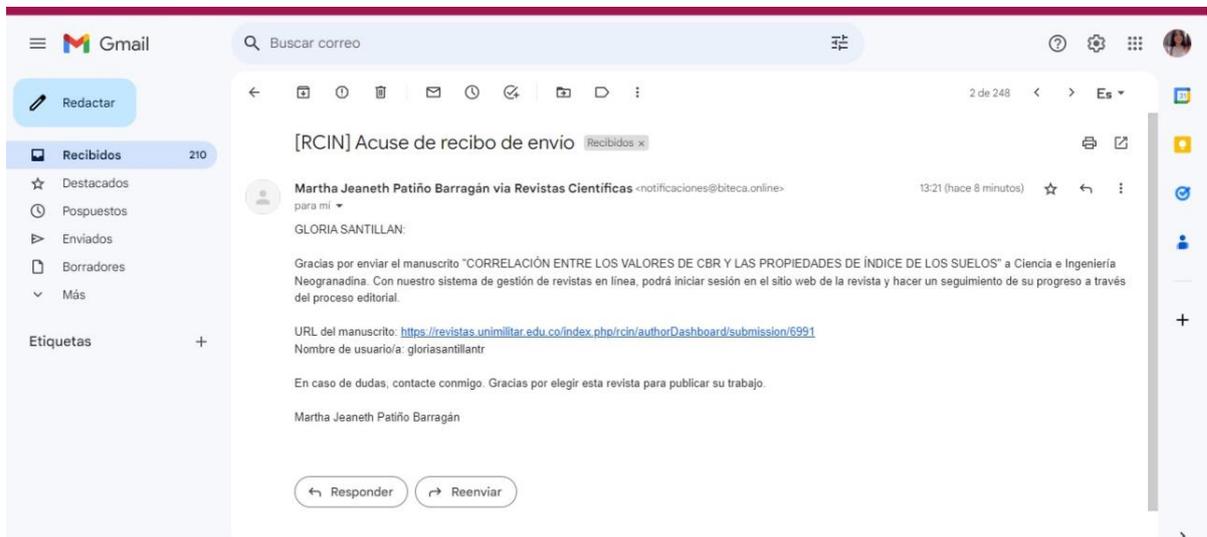
Link: <https://revistas.unimilitar.edu.co/index.php/rcin>

Envío:



The screenshot shows the submission interface for 'Ciencia e Ingeniería Neogranadina'. The page title is '6991 / SANTILLAN / CORRELACIÓN ENTRE LOS VALORES DE CBR Y LAS PROPIEDADES DE ÍNDICE DE LOS SUELOS'. The 'Biblioteca de envío' section is active, displaying a workflow for 'Publicación' with tabs for 'Envío', 'Revisión', 'Editorial', and 'Producción'. Under 'Archivos de envío', a document titled 'Artículo Revista- Suarez - Calle - Santillan Ver.final.docx' is listed with a submission date of 'octubre 16, 2023'. A 'Discusiones previas a la revisión' section is also visible, currently empty with the message 'No hay artículos'.

Recepción:



The screenshot shows a Gmail email received from Martha Jeaneth Patiño Barragán via 'Revistas Cientificas'. The subject is '[RCIN] Acuse de recibo de envío'. The email content includes a thank you message for submitting the manuscript 'CORRELACIÓN ENTRE LOS VALORES DE CBR Y LAS PROPIEDADES DE ÍNDICE DE LOS SUELOS' to 'Ciencia e Ingeniería Neogranadina'. It provides the submission URL: <https://revistas.unimilitar.edu.co/index.php/rcin/authorDashboard/submission/6991> and the user name 'gloriasantillantr'. The email concludes with contact information for Martha Jeaneth Patiño Barragán.



“AÑO DE LA UNIDAD, LA PAZ Y EL DESARROLLO”

RESOLUCIÓN N° 0045-2023/UPeU-FIA-CF-T

Lima, Ñaña 28 de febrero de 2023

VISTO:

El expediente de **Suarez Muedas, Luis Eduardo**, identificado(a) con Código Universitario N° 201510030, **Calle Chimbo, Ronald Arturo**, identificado(a) con Código Universitario N° 201810088 y **Santillán Trauco, Gloria Stefany**, identificado(a) con Código Universitario N° 201711634, de la Escuela Profesional de Ingeniería Civil de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura de la Universidad Peruana Unión;

CONSIDERANDO

Que la Universidad Peruana Unión tiene autonomía académica, administrativa y normativa, dentro del ámbito establecido por la Ley Universitaria N° 30220 y el Estatuto de la Universidad;

Que la Facultad de Ingeniería y Arquitectura de la Universidad Peruana Unión, mediante sus reglamentos académicos y administrativos, ha establecido las formas y procedimientos para la aprobación e inscripción del perfil de proyecto de tesis en formato artículo y la designación o nombramiento del asesor para la obtención del título profesional;

Que **Suarez Muedas, Luis Eduardo, Calle Chimbo, Ronald Arturo y Santillán Trauco, Gloria Stefany**, han solicitado: la inscripción del perfil de proyecto de tesis titulado "Correlación entre los valores de CBR y las propiedades de índice de los suelos: un estudio de caso en la ciudad de Lima" y la designación del Asesor, encargado de orientar y asesorar la ejecución del perfil de proyecto de tesis en formato artículo;

Estando a lo acordado en la sesión del Consejo de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura de la Universidad Peruana Unión, celebrada el 28 de febrero de 2023, y en aplicación del Estatuto y el Reglamento General de Investigación de la Universidad;

SE RESUELVE:

Aprobar el perfil de proyecto de tesis en formato artículo titulado "**Correlación entre los valores de CBR y las propiedades de índice de los suelos: un estudio de caso en la ciudad de Lima**" y disponer su inscripción en el registro correspondiente, designar al (a la) **Mg. Leonel Chahuarez Paucar** como ASESOR para que oriente y asesore la ejecución del perfil de proyecto de tesis en formato artículo el cual fue dictaminado por: **Mg. Reymundo Jaulis Palomino** y **Ing. David Diaz Garamendi**, otorgándoles un plazo máximo de doce (12) meses para la ejecución.

Regístrese, comuníquese y archívese.




Dra. Erika Inés Acuña Salinas
DECANA




Dr. Santiago Ramírez López
SECRETARIO ACADÉMICO

cc:
-Interesado
Asesor
Dirección General de Investigación
Archivo

FIGURAS ADICIONALES



Figura 9. Presencia de Campo
Fuente: Elaboración propia



Figura 10. Elaboración de Calicatas
Fuente: Elaboración propia



Figura 11. Termino de recojo de muestras
Fuente: Elaboración propia



Figura 12. Muestras en Laboratorio
Fuente: Elaboración propia



Figura 13. Presencia en Laboratorio
Fuente: Elaboración propia



Figura 14. Ensayo de Límite Líquido
Fuente: Elaboración propia



Figura 15. Ensayo de CBR
Fuente: Elaboración propia



Figura 16. Ensayo de Límite Plástico
Fuente: Elaboración propia

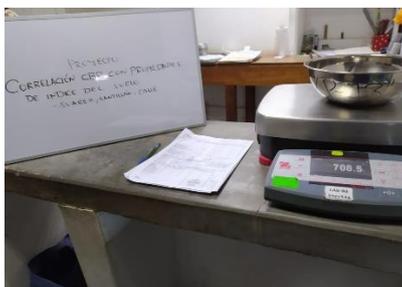


Figura 17. Ensayo de Granulometría
Fuente: Elaboración propia



Figura 18. Muestras en horno
Fuente: Elaboración propia