

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



**Relación de módulo resiliente entre el método Geogauge y
California Bearing Ratio de los suelos de la Universidad
Peruana Unión**

Tesis para obtener el Título Profesional de Ingeniería Civil

Autor:

Rossy Yhanet Flores Caza
Ronaldo Leon Chambi

Asesor:

Mg. Edwin Parillo Escarsena

Juliaca, diciembre de 2024


DECLARACIÓN JURADA DE ORIGINALIDAD DE TESIS

Yo Mg. Edwin Parillo Escarsena, docente de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Escuela Profesional de Ingeniería Civil, de la Universidad Peruana Unión.

DECLARO:

Que la presente investigación titulada: **“Relación de módulo resiliente entre el método Geogauge y California Bearing Ratio de los suelos de la Universidad Peruana Unión”** de los autores Rossy Yhanet Flores Caza y Ronaldo Leon Chambi tiene un índice de similitud de 19 % 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 Juliaca, a los 5 días del mes de diciembre del año 2024.



Mg. Edwin Parillo Escarsena

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS



En Puno, Juliaca, Villa Chullunquiari, a 03 día(s) del mes de diciembre del año 2024, siendo las 16:00 horas, se reunieron los miembros del jurado en la Universidad Peruana Unión Campus Juliaca, bajo la dirección del (de la) presidente(a):

Mtro Leonel Chahueros Paucar el (la) secretario(a): Ing Heron Dubarley
Pari Gusi y los demás miembros: Mg Gerardo Williams
Pari Juiope y el (la) asesor(a) Mg Edwin

Pavillo Escorona con el propósito de administrar el acto académico de sustentación de la tesis titulado:
Relación de módulo resiliente entre el metal Guggen y California
Bearing Ratio de los suelos de la Universidad Peruana Unión
 del(los) bachiller(es): a) Rosy Janet Flores Goya
 b) Ronald Leon Chombi
 c) _____

conducente a la obtención del título profesional de:
Ingeniero Civil
(Denominación del Título Profesional)

El Presidente inició el acto académico de sustentación invitando al (a la) / a (los) (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 al (a la) / a (los) (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:

Bachiller (a): Rosy Janet Flores Goya

CALIFICACIÓN	ESCALAS			Mérito
	Vigesimal	Literal	Cualitativa	
<u>Aprobado</u>	<u>16</u>	<u>B</u>	<u>Bueno</u>	<u>Muy Bueno</u>

Bachiller (b): Ronald Leon Chombi

CALIFICACIÓN	ESCALAS			Mérito
	Vigesimal	Literal	Cualitativa	
<u>Aprobado</u>	<u>16</u>	<u>B</u>	<u>Bueno</u>	<u>Muy Bueno</u>

Bachiller (c): _____

CALIFICACIÓN	ESCALAS			Mérito
	Vigesimal	Literal	Cualitativa	

(*) Ver parte posterior

Finalmente, el Presidente del jurado invitó al (a la) / a (los) (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.

[Firma]
Presidente/a
[Firma]
Asesor(a)
[Firma]
Bachiller (a)

[Firma]
Miembro
[Firma]
Bachiller (b)

[Firma]
Secretario/a
[Firma]
Miembro
[Firma]
Bachiller (c)

AGRADECIMIENTO

“Queremos expresar nuestro más sincero agradecimiento a todas las personas que hicieron posible el desarrollo de esta investigación. A nuestros profesores y asesores, por su invaluable guía, dedicación y conocimientos compartidos; a nuestras familias, por su constante apoyo, paciencia y palabras de aliento en cada etapa de este proceso; y a nuestros compañeros, por su colaboración y motivación, especialmente en los momentos más desafiantes. También extendemos nuestro agradecimiento al laboratorio de mecánica de suelos de la Universidad Peruana Unión, por brindarnos los recursos y la confianza necesarios para llevar a cabo esta investigación.”

DEDICATORIA

“Dedicamos este trabajo de investigación a nuestros padres, quienes han sido nuestro pilar fundamental con su apoyo incondicional. También lo dedicamos a nuestros amigos y mentores, que nos inspiraron a seguir adelante, y a todas aquellas personas que de alguna manera creyeron en nuestra capacidad para superar cada desafío. Este proyecto, fruto de muchas horas de esfuerzo y dedicación compartida, es un reflejo de nuestra perseverancia. Lo ofrecemos con gratitud a quienes nos acompañaron en este camino.”

ÍNDICE

AGRADECIMIENTO	iv
DEDICATORIA	v
RESUMEN	vii
ABSTRACT.....	viii
INTRODUCCIÓN.....	9
1. MATERIALES Y MÉTODOS	12
1.1 METODOLOGÍA	12
1.2 CANTIDAD DE MUESTRAS Y LOCALIZACIÓN.....	13
1.3 ENSAYOS REALIZADOS	14
1.4 PARÁMETROS FÍSICOS DEL SUELO	15
1.5 ANÁLISIS DEL MÓDULO RESILIENTE CON EL CALIFORNIA BEARING RATIO (CBR).....	16
1.6 ANÁLISIS DEL MÓDULO RESILIENTE CON EL MÉTODO DE GEOGAUGE..	17
2. RESULTADO Y ANÁLISIS.....	18
2.1 Método estadístico.....	19
2.2 Análisis de la Prueba T en muestras relacionadas.....	22
2.2.1 Hipótesis planteada para la prueba T:	22
2.3 Análisis de correlación de Pearson	23
2.3.1 Hipótesis planteada para la correlación de Pearson.....	24
2.4 Análisis de regresión lineal simple	25
3. DISCUSIÓN.....	28
3.1 Limitaciones	29
4. CONCLUSIONES	30
5. REFERENCIAS	32

Relación de módulo resiliente entre el método Geogauge y California Bearing Ratio de los suelos de la Universidad Peruana Unión

RESUMEN

La evaluación precisa de la capacidad de soporte del suelo es esencial para el diseño y construcción de pavimentos. Los métodos tradicionales, como el California Bearing Ratio (CBR), son ampliamente utilizados, pero requieren tiempo y recursos. Este estudio evalúa la relación entre el módulo resiliente medido a partir del método Geogauge y CBR en suelos de subrasante. Ambos métodos se utilizaron para medir las propiedades de rigidez y capacidad de soporte del suelo. Se adoptó un enfoque cuantitativo y aplicativo, con un nivel evaluativo relacional, en el cual se evaluaron 5 muestras con un nivel de confianza del 90%, distribuidas aleatoriamente en un tramo de 750m. Los resultados mostraron una relación significativa entre los valores de Mr obtenidos con el Geogauge y el CBR, con un coeficiente de correlación de Pearson de 0.994. Además, el análisis de regresión lineal indicó una relación excelente y significativa entre ambos métodos, con un R^2 de 0.989, sin diferencias significativas ($p = 0.937$) y una variación del 2.867% en el módulo resiliente entre ambos métodos. A pesar de la consistencia entre los métodos, el Geogauge ofrece ventajas prácticas en campo debido a su rapidez, aunque su precisión puede verse influenciada por factores como la humedad y el estado del suelo. Por otro lado, el CBR sigue siendo una referencia estándar confiable en laboratorio. Según lo investigado, la relación entre ambos métodos es complementaria y contribuye a optimizar la evaluación de suelos para pavimentos.

Palabras clave: Módulo Resiliente, Geogauge, California Bearing Ratio, subrasante, pavimentos.

Resilient modulus relationship between the Geogauge method and California Bearing Ratio of the soils of the Universidad Peruana Unión

ABSTRACT

Accurate assessment of soil bearing capacity is crucial for pavement design and construction. Traditional methods, such as the California Bearing Ratio (CBR), are widely used but require significant time and resources. This study evaluates the relationship between the resilient modulus measured using the Geogauge method and CBR in subgrade soils. Both methods were used to assess soil stiffness and bearing capacity. A quantitative and applicative approach was adopted, with a relational evaluative level, where five samples were tested with a 90% confidence level, randomly distributed along a 750-meter section. Results showed a significant relationship between the resilient modulus (M_r) values obtained with the Geogauge and the CBR, with a Pearson correlation coefficient of 0.994. Furthermore, linear regression analysis indicated an excellent and significant relationship between the two methods, with an R^2 of 0.989, no significant differences ($p = 0.937$), and a 2.867% variation in the resilient modulus between the methods. Despite the consistency between the methods, the Geogauge offers practical advantages in the field due to its speed, though its accuracy can be affected by factors such as moisture and soil conditions. On the other hand, the CBR remains a reliable standard reference in laboratory settings. According to the findings, the relationship between the two methods is complementary and contributes to optimizing soil evaluation for pavements.

Keywords: Resilient Modulus, Geogauge, California Bearing Ratio, Subgrade, Pavements.

INTRODUCCIÓN

En la ingeniería de pavimentos, la evaluación de las propiedades del suelo es esencial para asegurar la construcción de pavimentos duraderos y seguros. Tradicionalmente, se ha empleado el ensayo de Índice de Capacidad Portante de California (California Bearing Ratio, CBR) como método para estimar el módulo resiliente (M_r) del suelo. Sin embargo, el método Geogauge ha emergido como una técnica alternativa prometedora, debido a su capacidad para medir la rigidez y el módulo aparente del suelo de forma rápida y precisa in situ. En esta investigación, se examina la relación entre estos dos métodos en los suelos de la subrasante del campus de la Universidad Peruana Unión.

A pesar de los avances en el diseño mecanicista de pavimentos, muchos países en desarrollo siguen utilizando enfoques empíricos debido a la complejidad, el costo y la necesidad de equipo especializado para implementar métodos analíticos y mecanicistas. La determinación del módulo resiliente (M_r) en laboratorio es particularmente demandante, ya que requiere equipos avanzados y personal capacitado, lo cual limita su aplicación en la práctica diaria, (Torres, 2020) .

La capacidad de soporte y el comportamiento del suelo bajo cargas repetidas son factores críticos en el diseño de pavimentos. El ensayo CBR, comúnmente utilizado para evaluar la capacidad de soporte de suelos de subrasante y capas granulares, permite determinar la resistencia del suelo ante cargas de diseño (ICG & MTC, 2000). No obstante, obtener el valor de CBR empapado de una muestra de suelo puede tomar aproximadamente una semana, lo que hace que esta prueba sea costosa, lenta y laboriosa, aumentando los costos y retrasos en los proyectos, (Bassey et al., 2017).

La capacidad de predecir el valor de CBR y el módulo resiliente de forma eficiente es crucial para disponer de herramientas que permitan evaluar la resistencia potencial de los materiales cumpliendo con las normativas vigentes. En una estructura de pavimento, cada capa, de distinto espesor y calidad, descansa sobre la subrasante, que actúa como base de soporte; por ello, la caracterización precisa de esta capa es fundamental para asegurar la estabilidad y durabilidad del pavimento, (Sandoval & Rivera, 2019).

El módulo resiliente es una medida de la elasticidad del suelo bajo carga, esencial para garantizar que el pavimento distribuya y absorba adecuadamente las cargas repetidas

del tráfico vehicular. Una evaluación precisa de este parámetro mediante herramientas como el Deflectómetro Liviano de Impacto (LWD) o el Geogauge permite verificar la rigidez y compactación de las capas durante la construcción, previniendo fallas prematuras o deformaciones en el pavimento, lo que aumenta su durabilidad, (Arteaga et al., 2023).

El módulo resiliente mide la capacidad de recuperación de un material, mientras que el CBR evalúa la resistencia al esfuerzo cortante, ambos siendo parámetros clave en este contexto. El módulo de resiliencia es uno de los parámetros más importantes utilizados en el análisis y modelado del comportamiento de la subrasante; está directamente relacionado con la seguridad, la economía y la vida útil de las estructuras viales, (Kuttah, 2021).

El ensayo de módulo resiliente (M_r), que mide la relación entre la amplitud de un esfuerzo desviador cíclico y la deformación recuperable, es una prueba de laboratorio incorporada por algunos métodos de diseño para considerar la rigidez elástica de los materiales. No obstante, el ensayo M_r requiere usar equipos especializados y personal capacitado para realizar dicho ensayo, y hay aún un gran debate sobre la variabilidad de los resultados para muestras probadas bajo condiciones similares, (Sandoval & Rivera, 2019).

Diversas investigaciones han promovido el uso de tecnologías alternativas, como el Geogauge, para el análisis de la correlación entre el módulo de elasticidad del suelo y su grado de compactación (Narvaez, 2017). El Geogauge es un dispositivo portátil que permite medir de forma rápida y precisa la rigidez y el módulo aparente del suelo in situ, ofrece medios alternativos para estimar la reacción de la subrasante, CBR y densidad del suelo. Diseñado para cubrir una necesidad existente desde que la calidad pasó a ser un importantísimo factor a considerar en la construcción de obras sobre tierra (Humbolt, n. d.). Este instrumento tiene el respaldo por la Norma ASTM-D6758, "Método de prueba estándar para medir la rigidez y el módulo aparente del suelo y el agregado del suelo in situ mediante un método electromecánico". En un estudio realizado en Ecuador, se evaluaron las propiedades fisicoquímicas de los agregados de la mina Copeto, estableciéndose una correlación entre M_r y CBR. Los ensayos mostraron que es posible derivar una ecuación analítica que permite estimar el módulo resiliente a partir del valor CBR, proporcionando una caracterización precisa del

comportamiento del material. Para bases y subbases, los valores de CBR fueron superiores al 80% y 70%, respectivamente, mientras que el módulo resiliente promedio alcanzó hasta 200 MPa en algunas clases de base, (Parra et al., 2020).

Estudios de control de compactación mediante densidades de campo aseguran los grados de compactación requeridos, aunque la resistencia del suelo varía con la humedad. Investigaciones usando el Geogauge demuestran que este equipo puede garantizar resistencias óptimas y un buen grado de compactación. En suelos con 5-6% de humedad y 56 golpes en ensayos de CBR, se observó una compactación adecuada y un módulo de elasticidad satisfactorio, sugiriendo que el control por resistencia es más efectivo que el control por densidad en pavimentos, (Narvaez, 2017).

La relación entre el ensayo CBR y el módulo resiliente en suelos de subrasante ha sido ampliamente estudiada desde los trabajos pioneros de Heukelom & Klomp (1962), Green and Hall (1975) y Lister (1987). En Colombia, el ensayo de CBR sigue siendo el método más empleado para determinar la capacidad de soporte de la subrasante. Tanto en Colombia como en otras regiones, es común estimar el módulo resiliente de diseño a partir de los valores de CBR, (Rodríguez, 2020). El 90% de los profesionales en el campo indica que los métodos de CBR y módulo resiliente son los más utilizados para la caracterización de suelos de subrasante, (Chang et al., 2013). En la infraestructura vial, la subrasante debe tener propiedades mecánicas adecuadas para soportar la estructura del pavimento y las cargas vehiculares; el CBR es el parámetro principal a evaluar y generalmente debe ser superior al 6%, (Gonzales et al., n.d.). El valor de CBR del suelo se ve influenciado por propiedades como el límite líquido (LL), límite plástico (LP), índice de plasticidad (IP), óptimo contenido de humedad (OCH) y máxima densidad seca (MDS); estas pruebas, además, son relativamente sencillas de realizar, (Korde & Yadav, 2015).

El Geogauge resulta particularmente útil en proyectos de construcción de carreteras y edificaciones que requieren una evaluación precisa de la rigidez y calidad de compactación del suelo. Gracias a su capacidad para proporcionar datos en tiempo real, este equipo facilita un control de calidad efectivo y es especialmente valioso en zonas geográficamente complejas, como áreas montañosas, donde los métodos tradicionales suelen ser menos efectivos, (Yu et al., 2022).

Se plantea la hipótesis de que existe una relación significativa entre el módulo resiliente obtenido con el Geogauge y el índice CBR en suelos de subrasante. En este análisis, el módulo resiliente actúa como la variable dependiente, mientras que el CBR y otras propiedades del suelo son las variables independientes. Se considera que tanto el método Geogauge como el CBR proporcionan información valiosa sobre la capacidad portante del suelo.

El objetivo principal de esta investigación es establecer la relación entre el módulo resiliente obtenido mediante el método Geogauge y el índice CBR en los suelos de la Universidad Peruana Unión. El estudio se basa en la determinación de los parámetros físicos del suelo de la subrasante y el análisis del módulo resiliente a través del CBR en ambos métodos, comparando sus resultados para contribuir al diseño eficiente de pavimentos.

1. MATERIALES Y MÉTODOS

1.1 METODOLOGÍA

Según Hernández Sampieri (2014), la presente investigación es de tipo aplicativo, enfocada en la resolución de problemas prácticos mediante la aplicación de conocimientos científicos. Se adoptó un diseño relacional, ya que el objetivo es establecer la relación entre dos variables. El enfoque es cuantitativo, con un nivel evaluativo relacional, y se empleó un muestreo no probabilístico por conveniencia, basado en el criterio del investigador para seleccionar los puntos de muestreo. Para obtener el módulo resiliente de la subrasante, se utilizaron dos métodos: el Geogauge y el Índice de Capacidad Portante de California (CBR). El Geogauge mide la rigidez y el módulo aparente del suelo, mientras que el CBR evalúa su capacidad de soporte. Se recolectaron datos en campo y laboratorio, midiendo parámetros físicos del suelo. Además, se calculó el CBR a partir de la densidad seca obtenida in situ, con el fin de comparar este valor con el obtenido mediante el Geogauge. Los equipos se calibraron previamente y se siguieron procedimientos estandarizados para asegurar resultados confiables. Así mismo, los datos obtenidos como es el módulo resiliente se analizarán estadísticamente para relacionar y comparar ambos métodos.

1.2 CANTIDAD DE MUESTRAS Y LOCALIZACIÓN

Para caracterizar las propiedades físico-mecánicas de los materiales de la subrasante, se realizaron investigaciones mediante calicatas con una profundidad promedio de 0.90 m, limitada por un nivel freático elevado. De acuerdo con el Manual de Carreteras de Suelos y Pavimentos del Ministerio de Transportes y Comunicaciones (MTC), para carreteras de Segunda Clase con un IMDA entre 2000 y 401 vehículos por día y una calzada de dos carriles, se recomienda un mínimo de tres calicatas por kilómetro, ubicadas longitudinalmente y de forma alternada dentro de la franja de la calzada (EG, 2013).

En este estudio, el tramo de vía tiene una longitud de 750 metros, por lo que, adaptando el criterio normativo, se distribuyeron cinco muestras a intervalos de 150 metros. Este número de muestras se consideró suficiente para representar adecuadamente las condiciones del suelo en el área de estudio.

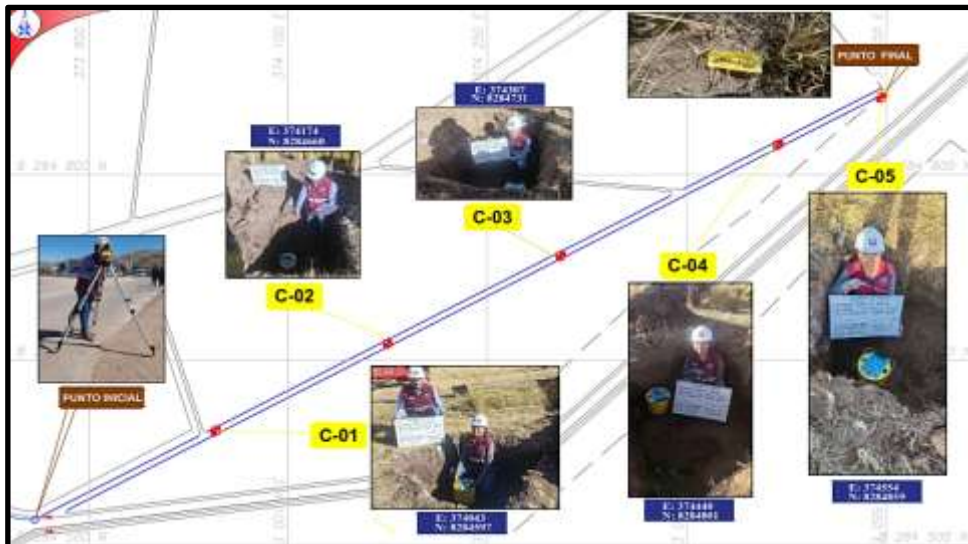
Para reforzar la representatividad estadística de la muestra, se determinó el tamaño de muestra teórico utilizando un nivel de confianza del 90%, una probabilidad de éxito (p) de 98% y un margen de error de 10%. Estos valores fueron aplicados en la ecuación 1 de cálculo de tamaño de muestra:

$$n = \frac{Z^2 * p * (1-p)}{e^2} \quad (1)$$

Donde n representa el tamaño de la muestra necesario, Z es el nivel de confianza, p es la probabilidad de éxito y e es el margen de error. El resultado determinó que 5 muestras eran suficientes para garantizar la precisión estadística deseada en la caracterización de los materiales de la subrasante, considerando además las limitaciones logísticas del tramo de estudio.

Figura 1

Ubicación de las calicatas



Nota. Alineación y ubicación de las calicatas a cada 150 m.

1.3 ENSAYOS REALIZADOS

Los ensayos se realizaron siguiendo las normas técnicas ASTM internacionales. En las 5 calicatas evaluadas, se ejecutaron ensayos de granulometría, ensayos de consistencia, ensayo de Proctor modificado, densidad de campo, ensayos de CBR, según las normas ASTM D422, D424, D - 1557, D - 1883, D-1556; respectivamente. En el ensayo de CBR, las muestras extraídas se sumergieron en agua durante 96 horas para simular las condiciones de trabajo más desfavorables y para determinar su posible expansión.

Figura 2.

Ensayo de CBR en maquina automática



Nota. Ensayo de CBR en laboratorio.

El ensayo de Geogauge está considerado en la normativa vial del manual de carreteras “Especificaciones técnicas generales para construcción EG-2013”. Menciona en la sección 202.18, que alternativamente a los controles de compactación y deflectometría se deberá aplicar otros ensayos de calidad a nivel de subrasante como Ensayo de Placa, Penetración Dinámica de Cono (PDC), Geogauge, (EG, 2013). En donde el Geogauge se rige por la norma ASTM D6758-18e1.

Figura 3

Ensayo de Geogauge



Nota. Se realizó el ensayo de Geogauge en las 5 calicatas.

El Geogauge es un equipo portátil en forma de cilindro que se coloca directamente sobre el suelo, requiriendo mínima preparación de la superficie. Basta con aplicar una ligera presión y rotación para asegurar al menos un 60% de área de contacto entre su base y el suelo. Este dispositivo mide deflexiones muy bajas producidas por cargas pequeñas mediante un vibrador interno que genera fuerzas dinámicas en 25 frecuencias, dentro del rango de 100 a 196 Hz. Estas fuerzas se transmiten a un anillo en la base del Geogauge, y los desplazamientos generados se registran con dos sensores de velocidad, en un intervalo de medición de 75 segundos, (Paredes & Peñafiel, 2023).

1.4 PARÁMETROS FÍSICOS DEL SUELO

En el estudio de los suelos de la subrasante de la vía analizada en la Universidad Peruana Unión, se realizaron diversas pruebas de laboratorio y campo, ya mencionadas anteriormente; para determinar los parámetros físicos que influyen en la capacidad de carga y comportamiento resiliente del suelo. Estos parámetros son fundamentales para el diseño y construcción de pavimentos, ya que afectan directamente la durabilidad y calidad del mismo.

Tabla 1*Estudio de clasificación del suelo*

CALI-CATA S	PROFUN- DIDAD (m)	CONSISTENCIA (%)			GRANULOMETRÍA (% QUE PASA)				CLASIFICACIÓN	
		Límite líquido	Límite plástico	Índice de plasticidad	N° 4	N° 10	N° 40	N° 200	SUCS	AASHTO
C - 01	0.80	NP	NP	NP	98.09	82.39	33.24	2.02	SP	A-1-b
C - 02	0.95	NP	NP	NP	95.65	74.68	23.46	0.02	SP	A-1-b
C - 03	0.85	NP	NP	NP	100.00	99.96	98.83	4.05	SP	A-3
C - 04	0.95	NP	NP	NP	100.00	100.0	95.65	0.91	SP	A-3
C - 05	0.95	27.68	22.59	5.09	100.00	99.50	94.07	10.35	SP-SM	A-2-4

Nota. La tabla 1 presenta un resumen de los parámetros físicos correspondientes a la muestra de suelo natural que está siendo estudiada.

Tabla 2*Estudio de las propiedades mecánicas del suelo*

CALI-CATAS	PROFUN- DIDAD (m)	GEOGAUGE				EN LABORATORIO				CONO DE ARENA	
		MÓDULO ELÁSTICO (Mpa)	COEF. DE POISSO N (μ)	Rigidez del suelo (Mn/m)	CBR (%)	MAX. DENS. SECA (gr/cm ³)	CONT. HUMED AD ÓPTIMA (%)	CBR		D.S in situ (gr/c m ³)	CBR (%)
C - 01	0.8	39.205	0.370	4.518	9.25	1.872	10.4	9.1	12.9	1.79	9.5
C - 02	0.95	69.703	0.373	7.008	19	1.95	11.56	18.3	22	1.87	17.8
C - 03	0.85	34.865	0.373	4.020	8.25	1.56	17.9	8.9	9.2	1.51	8.41
C - 04	0.95	52.200	0.388	6.103	13.5	1.87	15.4	12.8	13.7	1.78	12.95
C - 05	0.95	37.480	0.370	4.318	8.75	1.9	18.98	8.4	9.5	1.83	8.05

Nota. Con el fin de evaluar el comportamiento mecánico del suelo, se realizaron ensayos in situ con el Geogauge y en laboratorio, cuyos resultados se resumen en la tabla 2.

1.5 ANÁLISIS DEL MÓDULO RESILIENTE CON EL CALIFORNIA BEARING RATIO (CBR)

Diversos estudios y metodologías han demostrado que las correlaciones permiten estimar el módulo resiliente (M_r) a partir de los valores del CBR bajo diferentes condiciones de compactación. A continuación, se analizan las correlaciones empleadas para determinar el M_r en función del CBR a 0.1" con un nivel de compactación del 95% de la M.D.S. del laboratorio, utilizando fórmulas propuestas por varios autores.

Tabla 3*Aplicación de correlaciones para determinar el Mr en relación al CBR de laboratorio*

Correlaciones para el módulo resiliente del CBR de laboratorio			CBR A 0.1" - 95% de la M.D.S.				
			9.1	18.3	8.9	12.8	8.4
			C-01	C-02	C-03	C-04	C-05
			Mr	Mr	Mr	Mr	Mr
UZAN ET AL. 1977	$Mr=2030.53 \cdot CBR$	(Psi)	18477.823	-	18071.717	-	17056.452
HEUKELOM Y KLOMP (1962)	$Mr=1500 \cdot CBR$	(Psi)	13650.000	-	13350.000	-	12600.000
POULSEN Y S. (1980)	$Mr=1450.38 \cdot CBR^{0.73}$	(Psi)	7270.797	12107.963	7153.795	9327.067	6858.129
GREEN Y HALL (1975)	$Mr=5409 \cdot CBR^{0.711}$	(Psi)	26001.321	42728.703	25593.712	33139.295	24562.895
AYRES (1997)	$Mr=3045, 79 \cdot CBR^{0.65}$	(Psi)	12796.077	20150.840	12612.566	15972.998	12147.349
TRRL (1987)	$Mr=2555 \cdot CBR^{0.64}$	(Psi)	10499.712	16419.488	10351.434	13061.868	9975.385
CSIR	$Mr=3000 \cdot cbr^{0.65}$	(Psi)	12603.703	19847.895	12422.951	15732.862	11964.727
HEUKELOM F. (1980)	$Mr=1565 \cdot CBR$	(Psi)	14241.500	28639.500	13928.500	20032.000	13146.000
POWELL et. al(1984)	$Mr=2554 \cdot CBR^{0.64}$	(Psi)	10495.603	-	10347.382	-	9971.480

Nota. Resultados del módulo resiliente obtenido a 0.1" al 95% de la M.D.S., con los diversos autores empleados.

1.6 ANÁLISIS DEL MÓDULO RESILIENTE CON EL MÉTODO DE GEOGAUGE

Tabla 4

Aplicación de correlaciones para determinar el Mr en relación al CBR dado por el Geogauge

Correlaciones para el módulo resiliente del Geogauge			CBR A 0.1"				
			9.25	19	8.25	13.5	8.75
			C-01	C-02	C-03	C-04	C-05
			Mr	Mr	Mr	Mr	Mr
UZAN ET AL. 1977	$Mr=2030.53 \cdot CBR$	(Psi)	18782.403	-	16751.873	-	17767.138
HEUKELOM Y KLOMP (1962)	$Mr=1500 \cdot CBR$	(Psi)	13875.000	-	12375.000	-	13125.000
POULSEN Y S. (1980)	$Mr=1450.38 \cdot CBR^{0.73}$	(Psi)	7358.093	12444.342	6768.512	9696.733	7065.578
GREEN Y HALL (1975)	$Mr=5409 \cdot CBR^{0.711}$	(Psi)	26305.330	43884.463	24250.223	34417.894	25286.266
AYRES (1997)	$Mr=3045, 79 \cdot CBR^{0.65}$	(Psi)	12932.786	20648.561	12005.908	16535.484	12473.984
TRRL(1987)	$Mr=2555 \cdot CBR^{0.64}$	(Psi)	10610.152	16818.730	9861.011	13514.641	10239.437
CSIR	$Mr=3000 \cdot cbr^{0.65}$	(Psi)	12738.356	20338.134	11825.413	16286.892	12286.452
HEUKELOM F. (1980)	$Mr=1565 \cdot CBR$	(Psi)	14476.250	29735.000	12911.250	21127.500	13693.750

POWELL et. al(1984)	$Mr=2554 * CBR^{0.64}$	(Psi)	10605.999	-	9857.151	-	10235.429
------------------------	------------------------	-------	-----------	---	----------	---	-----------

Nota. Resultados del módulo resiliente a 0.1”, con diversos autores empleados.

Las correlaciones presentadas en las Tablas 3 y 4 por los autores analizados son consistentes en ambos métodos de obtención del CBR (laboratorio y Geogauge), mostrando solo diferencias mínimas en los valores del módulo resiliente (Mr). Sin embargo, se observan ciertas restricciones en el CBR en algunas de las correlaciones. A pesar de esta consistencia general, la variabilidad en los valores de Mr entre los diferentes autores revela diferencias notables. Por ejemplo, las variaciones mínimas alcanzan 6858.129 Psi en el CBR de laboratorio y 6768.521 Psi con Geogauge, mientras que las máximas llegan a 42728.703 Psi en el CBR de laboratorio y 43884.463 Psi con Geogauge.

Dado que ambos métodos proporcionan resultados consistentes dentro de una misma correlación, para obtener un enfoque más claro y confiable en la estimación del módulo resiliente (Mr), es recomendable basarse en una sola correlación tanto para el CBR de laboratorio como para el CBR estimado con Geogauge. De esta forma, se garantizará mayor consistencia y precisión en los resultados.

2. RESULTADO Y ANÁLISIS

En la Tabla 5 se presenta el análisis del módulo resiliente (Mr) en la subrasante, calculado a partir del CBR. Para este cálculo, se ha empleado la ecuación (2), la cual establece una correlación con el Mr, conforme a lo indicado en la sección de suelos y pavimentos del Manual de Carreteras: Suelos, Geología, Geotecnia y Pavimentos del Ministerio de Transportes y Comunicaciones de Perú, (2013).

$$Mr(Psi) = 2555 * CBR^{0.64} \quad (2)$$

Tabla 5.*Correlación del módulo resiliente*

Calicatas	CBR a 0.1"	Mr de Geogauge (Psi)	CBR a 0.1"	Mr de Laboratorio (Psi)	CBR a 0.1"	Mr de Laboratorio con Densidad seca de campo (Psi)
C-01	9.25	10610.152	9.1	10499.712	9.5	10792.797
C-02	19	16818.73	18.3	16419.488	17.8	16130.941
C-03	8.25	9861.011	8.9	10351.434	8.41	9982.983
C-04	13.5	13514.641	12.8	13061.868	12.95	13159.626
C-05	8.75	10239.437	8.4	9975.385	8.05	9707.341

Nota. Los valores del CBR fueron obtenidos mediante pruebas in situ y laboratorio, luego aplicados con la ecuación 2 para obtener el Mr.

2.1 Método estadístico

Es la ciencia que se usa para tomar decisiones en circunstancias de inseguridad (duda) se encarga de diseñar (planear y desarrollar la investigación), recoger los datos, describir los datos (resumir y explorar), analizar la información, inferir la información (predecir y tomar decisiones sobre las características de la población respecto de la información de la muestra), (Nel, 2019).

En esta investigación, se utilizó el software SPSS vs. 25 (Statistical Package for the Social Sciences) para realizar el análisis estadístico de los datos cuantitativos obtenidos durante la investigación. Con el objetivo de evaluar la relación y comparabilidad entre el módulo resiliente medido por el método Geogauge y el obtenido a través del método CBR en laboratorio. El análisis permitió una comparación rigurosa y una interpretación precisa del comportamiento de ambos métodos. Principalmente, se realizó un análisis descriptivo y de normalidad de las variables clave para comprender la naturaleza y características de los datos cuantitativos recopilados, identificando patrones, tendencias y distribuciones. Este análisis inicial es crucial para obtener una visión general de los datos y establecer una base sólida para explorar las relaciones entre los métodos evaluados.

Tabla 6*Estadísticos Descriptivos (Psi)*

	N	Mínimo	Máximo	Media	Desv. Estándar
Mr- Geogauge	5	9861.011	16818.730	12208.794	2953.932
Mr- Laboratorio	5	9975.385	16419.488	12061.577	2725.260
Mr- Lab. con D.S. de campo	5	9707.341	16130.941	11954.738	2700.979
Total	15	9707.341	16818.730	12075.036	2590.572

Nota. Principales características de los valores del Mr.

Tabla 7*Prueba de normalidad*

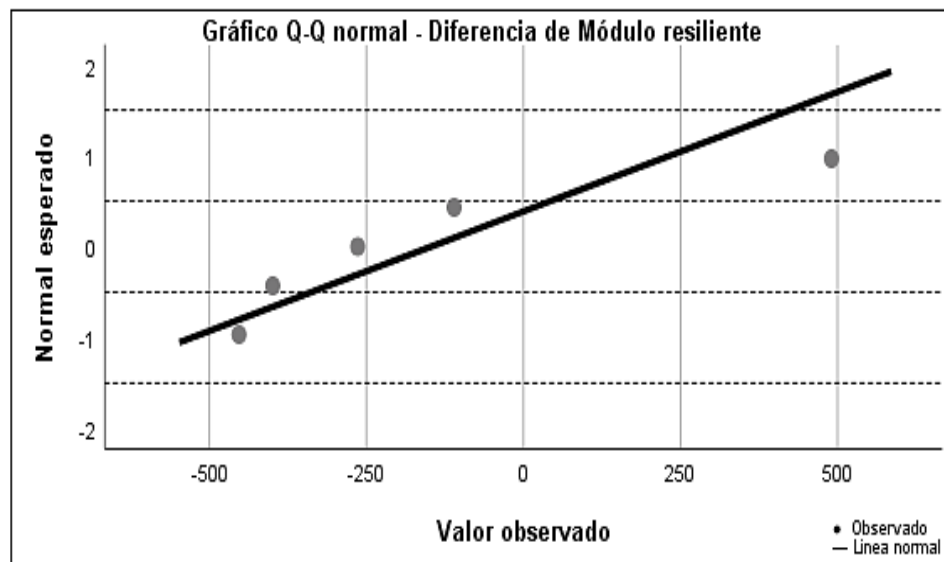
Módulo resiliente	Shapiro-Wilk			
	Estadístico	gl	Sig.	Condición
Mr - Geogauge	0.840	5	0.165	Distribución Normal
Mr - Laboratorio	0.821	5	0.118	Distribución Normal
Mr - Laboratorio con densidad seca de campo	0.869	5	0.263	Distribución Normal

Nota. Análisis de la distribución normal.

El análisis estadístico descriptivo presentado en la Tabla 6 muestra los valores de los módulos resilientes obtenidos mediante los métodos Geogauge y CBR de laboratorio, a su vez considerando el CBR de laboratorio calculado con densidad seca de campo. Las medias de los módulos resilientes para cada caso son 12,208.794, 12,061.577 y 11,954.738, respectivamente. Las desviaciones estándar, que oscilan entre 2,700.979 y 2,953.392, reflejan una ligera variabilidad en las mediciones. La Tabla 7 presenta las pruebas de normalidad de Shapiro-Wilk, las cuales confirman que los datos de los tres casos siguen una distribución normal ($p > 0.05$), permitiendo así realizar análisis comparativos paramétricos. Asimismo, los gráficos Q-Q en las Figuras 4 y 5 respaldan la normalidad de las diferencias de Mr, sin mostrar desviaciones significativas respecto a la distribución esperada.

Figura 4

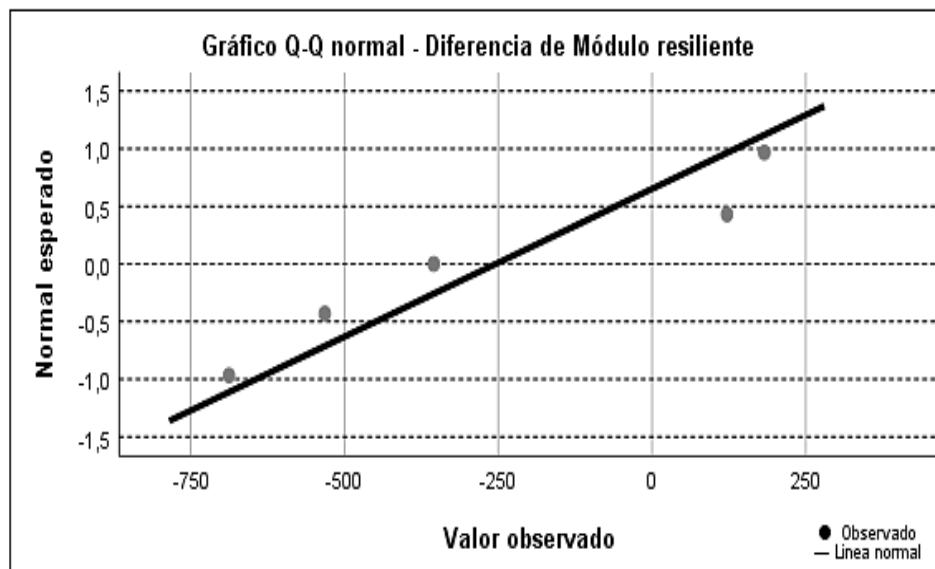
Ensayo de Geogauge y laboratorio



Nota. Distribución normal obtenida entre el Geogauge y CBR de laboratorio.

Figura 5

Ensayo de Geogauge y laboratorio con densidad seca de campo.



Nota. Distribución normal obtenida entre el Geogauge y laboratorio con densidad seca de campo.

Tabla 8*Análisis de Varianza (ANOVA)*

Módulo resiliente		Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Geogauge - Laboratorio	Entre grupos	54181.966	1	54181.966	0.007	0.937
	Dentro de grupos	64611033.352	8	8076379.169		
	Total	64665215.318	9			
Geogauge - Laboratorio con D.S. de campo	Entre grupos	161361.890	1	161361.890	0.020	0.891
	Dentro de grupos	64083999.097	8	8010499.887		
	Total	64245360.987	9			

Nota. Se evalúa si las diferencias observadas entre las medias de estos métodos son estadísticamente significativas.

El análisis de varianza (ANOVA) presentado en la Tabla 8 muestra que no existen diferencias estadísticamente significativas entre los valores del módulo resiliente obtenidos con los métodos Geogauge y CBR de laboratorio, a su vez con el CBR de laboratorio utilizando densidad seca de campo, con valores de p superiores a 0.10 en ambos casos. Esto sugiere que los tres métodos producen resultados comparables, y cualquier variabilidad observada es probablemente atribuible a variaciones aleatorias.

2.2 Análisis de la Prueba T en muestras relacionadas

La prueba t para muestras pareadas se utiliza para comparar las medias de dos conjuntos de datos relacionados, en este caso, los módulos resilientes medidos por los métodos Geogauge y de laboratorio. Este análisis es fundamental para determinar si existe una diferencia significativa entre ambos métodos de medición.

2.2.1 Hipótesis planteada para la prueba T:

Hipótesis Nula (H_0): No existe una diferencia significativa entre los módulos resilientes medidos por los métodos Geogauge y de CBR en laboratorio o de CBR en laboratorio con densidad seca en campo.

Hipótesis Alternativa (H_a): Existe una diferencia significativa entre los módulos resilientes medidos por los métodos Geogauge y de CBR en laboratorio o de CBR en laboratorio con densidad seca en campo. La hipótesis es:

- Si $\text{Mr Geogauge} = \text{Mr Laboratorio}$ o de Mr Laboratorio con densidad seca de campo, se acepta (H_0) y se rechaza (H_a).
- Si $\text{Mr Geogauge} \neq \text{Mr Laboratorio}$ o de Mr Laboratorio con densidad seca de campo, se rechaza (H_0) y se acepta (H_a).

Tabla 9

Prueba T para muestras relacionadas

Mr	Media	Desv. Estandar	Desv. Error promedio	90% de intervalo de confianza de la diferencia		t	gl	t (critico)
				Inferior	Superior			
				Geogauge - Laboratorio	147.217			
Geogauge – Lab. con D.S. de campo	254.057	389.785	174.317	-117.560	625.674	1.457	4	2.132

Nota. Se presenta el valor crítico de la prueba t, el cual se utilizó para determinar si existe una diferencia estadísticamente significativa.

Según el análisis presentado en la Tabla 9, la prueba t para muestras relacionadas no mostró diferencias estadísticamente significativas en los valores del módulo resiliente obtenidos mediante el método Geogauge en comparación con el CBR de laboratorio ($t = 0.866$, diferencia media = 147.217) ni con el CBR de laboratorio utilizando densidad seca de campo ($t = 1.457$, diferencia media = 254.057). En ambos casos, el valor de t calculado es menor que el valor crítico de 2.132, lo que indica que no se rechaza la hipótesis nula (H_0). Los intervalos de confianza del 90% para las diferencias medias incluyen el cero (-215.344 a 509.778 y -117.560 a 625.674, respectivamente), lo cual sugiere que los tres métodos de medición del módulo resiliente son comparables, sin evidencia de diferencias significativas entre ellos.

2.3 Análisis de correlación de Pearson

La correlación de Pearson se utiliza para medir la fuerza y la dirección de la relación lineal entre dos variables cuantitativas. En este caso, se aplica para evaluar si existe una relación significativa entre los módulos resilientes medidos por los métodos Geogauge y de laboratorio.

2.3.1 Hipótesis planteada para la correlación de Pearson.

Para determinar si existe una correlación positiva, negativa o ninguna correlación entre las variables, se compara el p-valor (sig) con el nivel de significancia (0.10). La hipótesis es:

Ho: No existe correlación entre los módulos resilientes medidos por los métodos Geogauge y de CBR en laboratorio o de CBR en laboratorio con densidad seca en campo.

Ha: Existe correlación entre los módulos resilientes medidos por los métodos Geogauge y de CBR en laboratorio o de CBR en laboratorio con densidad seca en campo.

- Si $0.10 > p$, se rechaza (Ho), y se acepta (Ha).
- Si $0.10 < p$, se acepta (Ho), y se rechaza (Ha).

Tabla 10

Correlación de Pearson

Geogauge - Laboratorio				Geogauge - Laboratorio con D.S. de campo			
		Mr Geogauge	Mr Laboratorio			Mr Geogauge	Mr Laboratorio con D.S. de campo
Mr Geogauge	Correlación de Pearson	1	,994	Mr Geogauge	Correlación de Pearson	1	,994
	Sig. (bilateral)		0.001		Sig. (bilateral)		0.000
	N	5	5		N	5	5
Mr Laboratorio	Correlación de Pearson	,994	1	Mr Laboratorio con D.S. de campo	Correlación de Pearson	,994	1
	Sig. (bilateral)	0.001			Sig. (bilateral)	0.000	
	N	5	5		N	5	5

Nota. Se mide la fuerza y dirección de la relación línea entre las dos variables cuantitativas.

El análisis de correlación de Pearson presentado en la Tabla 10 muestra una correlación positiva muy fuerte y significativa entre los módulos resilientes obtenidos mediante los métodos Geogauge y CBR de laboratorio (coeficiente de correlación = 0.994, sig = 0.001), así como entre Geogauge y CBR de laboratorio con densidad seca de campo (coeficiente de correlación = 0.994, sig = 0.000). Dado que los valores de significancia son menores al nivel de 0.10, se rechaza la hipótesis nula, confirmando una correlación

significativa entre los métodos. Estos resultados indican una alta consistencia en las mediciones del módulo resiliente entre los tres métodos evaluados.

2.4 Análisis de regresión lineal simple

La regresión lineal simple es un método estadístico que modela la relación entre una variable independiente y una variable dependiente mediante una línea recta. En este análisis, se utilizó el método Geogauge como la variable independiente para predecir los valores del CBR en laboratorio, que se consideró como la variable dependiente. Esto permitirá evaluar cómo las mediciones obtenidas con el Geogauge pueden predecir las mediciones realizadas en laboratorio.

El coeficiente de determinación (R^2) refleja la calidad del ajuste obtenido con el modelo de regresión; un valor más alto de R^2 sugiere que el modelo es más eficaz para prever los valores de la variable dependiente. Según un criterio comúnmente aceptado, un R^2 de 0.90 o superior se considera excelente, entre 0.70 y 0.89 se clasifica como bueno, entre 0.40 y 0.69 es aceptable, entre 0.20 y 0.39 es pobre, y un R^2 de 0.19 o inferior se considera muy pobre. Un R^2 más cercano a 1 indica que el modelo proporciona una mejor predicción de la variable dependiente, (Araujo, 2014).

Tabla 11

Coefficientes - Regresión Lineal

Modelo		Coeficientes no estandarizados		Coeficientes estandarizados	t	Sig.	90 % intervalo de confianza para B	
		B	Std. Error	Beta			Límite inferior	Límite superior
Mr. Geogauge - Laboratorio	(Constante)	862.488	711.531		1.212	0.312	-812.004	2536.979
	Mr Geogauge	0.917	0.057	0.994	16.104	0.001	0.783	1.051
Mr. Geogauge - Laboratorio con D.S. de campo	(Constante)	852.942	691.387		1.234	0.305	-774.143	2480.027
	Mr Geogauge	0.909	0.055	0.994	16.429	0.000	0.779	1.040

Nota. Se evalúa la relación entre una variable independiente (Mr-Geogauge) y una variable dependiente (Mr-Laboratorio).

Tabla 12*Resumen del modelo - Regresión Lineal*

Modelo	R	R cuadrado	R cuadrado ajustado	Error estándar de la estimación
Mr. Geogauge - Laboratorio	,994 ^a	0.989	0.985	336.522
Mr. Geogauge - Laboratorio con D.S. de campo	,994 ^a	0.989	0.985	326.994

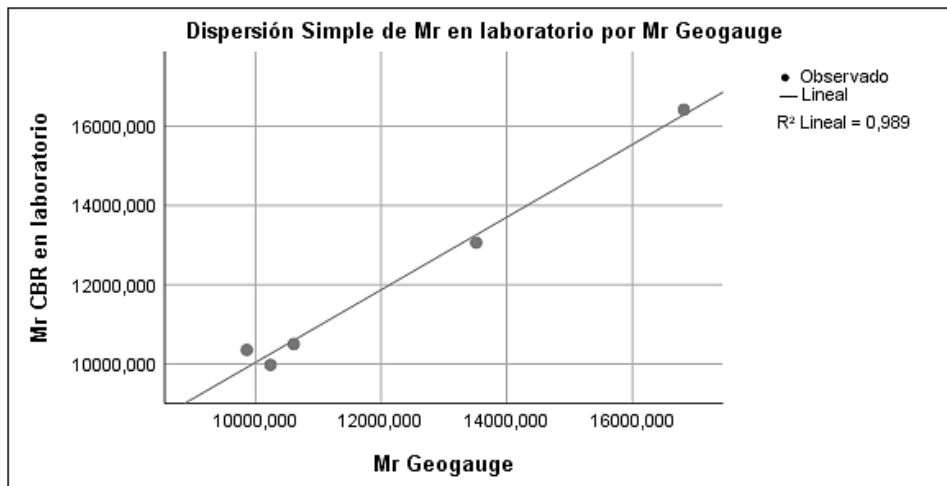
Nota. El alto R^2 y la significancia del modelo respaldan esta utilidad.

En ambos modelos (Geogauge vs. CBR de laboratorio y Geogauge vs. CBR de laboratorio con densidad seca de campo), el análisis de regresión lineal presentado en las Tablas 11 y 12 muestra una relación lineal excelente y significativa entre el método Geogauge y el método CBR en laboratorio, tanto con la consideración de densidad seca de campo como sin ella, a un nivel de confianza del 90%. El alto valor de R^2 (0.989) en ambos casos indica que los métodos son altamente consistentes y que las mediciones del módulo resiliente obtenidas mediante el Geogauge pueden predecirse con gran precisión a partir de los resultados del método CBR en laboratorio.

Las Figuras 6 y 7 presentan gráficos de dispersión que ilustran la relación entre el módulo resiliente medido mediante el método Geogauge y el CBR en laboratorio, tanto sin considerar como considerando la densidad seca de campo. En ambos gráficos, se observa una fuerte relación lineal entre las mediciones, con un coeficiente de determinación (R^2) de 0.989, lo que indica que aproximadamente el 98.9% de la variabilidad en los valores del módulo resiliente medido en laboratorio puede explicarse mediante los valores obtenidos con el Geogauge. La alineación cercana de los puntos de datos a la línea de regresión confirma la alta consistencia entre los métodos de medición, sugiriendo que el Geogauge y el CBR en laboratorio son comparables para evaluar el módulo resiliente.

Figura 6

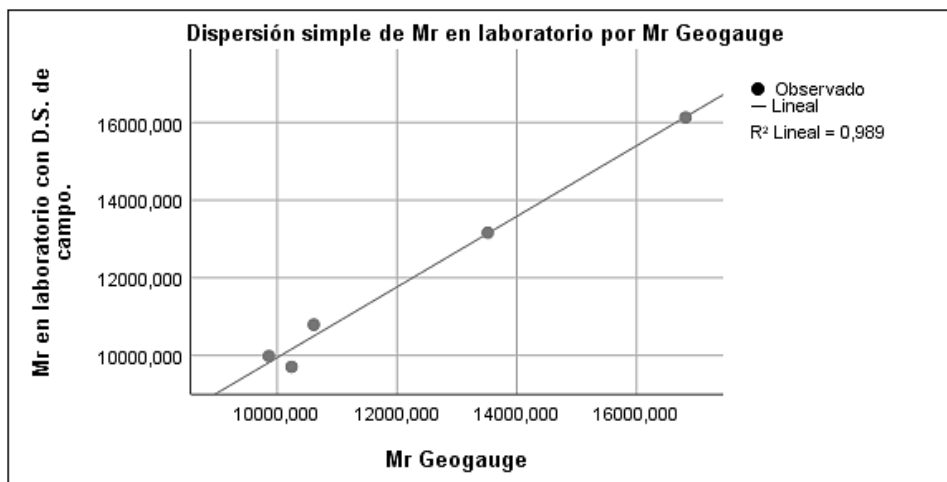
Gráfico de dispersión simple



Nota. Se muestra la dispersión simple con un R² igual a 0.989.

Figura 7.

Gráfico de dispersión simple



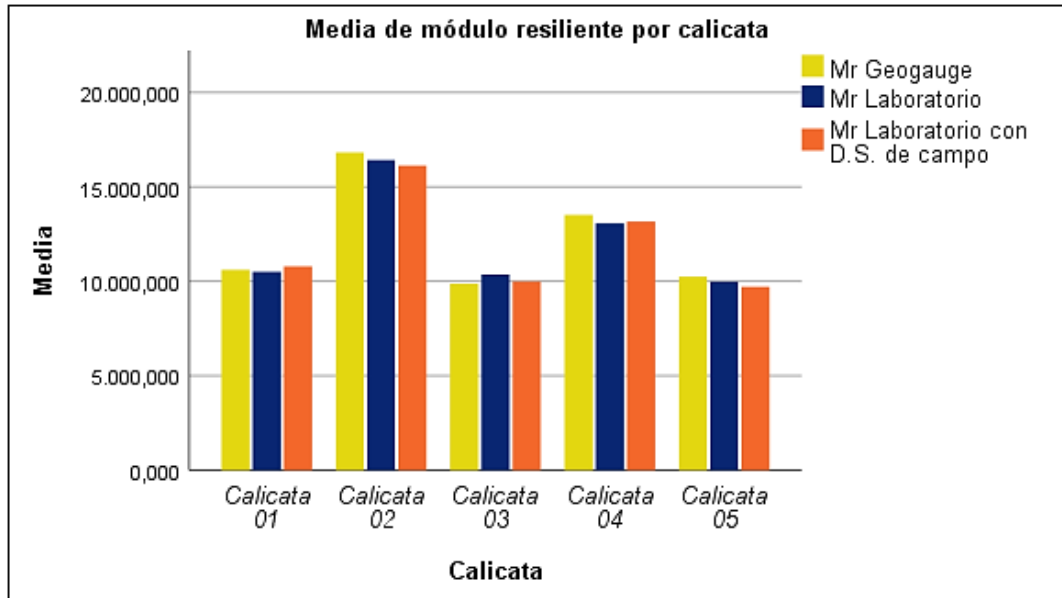
Nota. Se muestra la dispersión simple con un R² igual a 0.989.

La Figura 8 presenta una comparación de las medias del módulo resiliente obtenidas mediante los métodos Geogauge, CBR de laboratorio y, a su vez, CBR de laboratorio con densidad seca de campo en cinco calicatas. Aunque se observan diferencias entre los métodos en cada calicata, los valores se mantienen relativamente consistentes, lo que indica una alta comparabilidad entre los métodos para la medición del módulo resiliente. La mayor variabilidad se observa en la calicata 02, donde el método Geogauge registra un valor más alto, posiblemente debido a características locales del suelo. En promedio, la diferencia relativa entre Geogauge - CBR de laboratorio es de 2.867%, y entre Geogauge - CBR de laboratorio con densidad seca de campo es de

3.071%, lo que sugiere que, a pesar de ligeras variaciones, estos métodos son comparables para la evaluación del módulo resiliente.

Figura 8

Barras simples de Medias del Mr Geogauge y CBR en laboratorio por Calicata.



Nota. Se muestra las medias de diferentes grupos de Mr mediante barras.

3. DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos en este estudio muestran una correlación de Pearson positiva ($r = 0.994$) y una regresión en la que el 98.9% de la variabilidad en las mediciones del módulo resiliente puede explicarse por la relación entre el método Geogauge y el de laboratorio ($R^2 = 0.989$), lo que indica una relación excelente y confiable entre ambos métodos. Esto es consistente con el estudio de Lima (2016), quien también desarrolló un modelo de predicción basado en pruebas de campo realizadas con el equipo Geogauge y mediciones obtenidas en laboratorio mediante el ensayo TCR, logrando una correlación significativa de $R^2 = 0.85$ en el módulo resiliente.

Según en Zhang et al., (2023), las mediciones de rigidez con el Geogauge muestran una sólida relación exponencial con la compactación en mezclas de suelo y roca, evidenciada por un alto coeficiente de correlación de 0.968. Este ajuste indica que los resultados obtenidos con el Geogauge presentan una alta estabilidad y una baja dispersión, similar a la observada en nuestro estudio, donde el Geogauge y el CBR

demonstraron una excelente correspondencia en la evaluación del módulo resiliente (Mr). Esto respalda la factibilidad del Geogauge como herramienta práctica para la detección de la calidad de compactación en subrasantes, proporcionando un método rápido y confiable para el control de calidad en proyectos de ingeniería.

Asimismo, Lima (2016) identificó que los módulos obtenidos con el Geogauge tienden a diferir de los valores de laboratorio debido a varios factores, como la diferencia en el tipo de carga aplicada, el estado de compactación y la humedad del suelo. Esto también se refleja en mi investigación, donde las mediciones con el Geogauge son ligeramente más altas que las del CBR de laboratorio, establecido al 95% del a M.D.S.. Para minimizar la influencia de estos factores, se recomienda realizar múltiples mediciones en el mismo punto y mantener condiciones de prueba uniformes en cada sitio de medición. Esto incluye evitar la influencia de factores externos, como maquinaria cercana, que pueda afectar las lecturas del dispositivo, (Humbolt, n.d.).

La propuesta de utilizar el equipo para medir rigidez (Geogauge), planteada por Perez & Garnica, (2010), sugiere que el control de calidad de materiales compactados se realice mediante variables de rigidez y módulo, ya que estos parámetros son fundamentales en el diseño de pavimentos. Esto asegura coherencia entre el diseño y las pruebas de campo, permitiendo evaluar la calidad con la misma propiedad utilizada en el diseño. De este modo, se optimiza el proceso constructivo y se garantiza que los materiales respondan adecuadamente a las exigencias estructurales del pavimento.

3.1 Limitaciones

Una de las principales limitaciones de este estudio es la dependencia de las condiciones del terreno y del estado del suelo, lo cual puede afectar significativamente los resultados obtenidos con el Geogauge. Factores como la humedad, el grado de compactación y el tipo de suelo (granular o cohesivo) pueden influir en las mediciones del módulo resiliente, lo que podría explicar las discrepancias observadas en comparación con los resultados del ensayo CBR en laboratorio.

A pesar de su precisión en laboratorio, el CBR tiene la desventaja de ser un ensayo en que lleva mucho más tiempo para obtener resultados comparado con el Geogauge que es realizado in situ. Esto limita su aplicabilidad en campo durante la construcción, donde se requiere una respuesta rápida para decisiones en tiempo real. Sin embargo, el CBR

en laboratorio proporciona una visión más integral de la composición del suelo, especialmente en suelos cohesivos, estos parámetros son cruciales para el diseño de pavimentos, ya que el contenido de humedad y la cohesión del suelo influyen directamente en la capacidad de carga del suelo.

Por otro lado, la cantidad de muestras tomadas es relativamente limitada, lo que podría reducir la representatividad de los resultados para diferentes tipos de suelo y condiciones de campo. Otra restricción es la variabilidad en la ejecución del Geogauge, que puede ser sensible a errores operativos, afectando la repetibilidad y reproducibilidad de las mediciones.

Estas limitaciones sugieren la necesidad de futuras investigaciones con un mayor número de muestras, bajo diversas condiciones y con diferentes tipos de suelo, para fortalecer las correlaciones obtenidas y mejorar la confiabilidad del Geogauge como herramienta para estimar el módulo resiliente.

4. CONCLUSIONES

Se llevó a cabo un estudio en laboratorio y en campo, evaluando el módulo resiliente (M_r) de los suelos de subrasante en cinco calicatas a lo largo de un tramo de 750 metros, utilizando los métodos Geogauge y California Bearing Ratio (CBR). Los resultados evidenciaron una relación fuerte entre ambos métodos, con un coeficiente de correlación de $r=0.994$. La regresión lineal mostró que el 98.9% de la variabilidad en las mediciones del CBR puede explicarse mediante los valores del Geogauge ($R^2=0.989$), lo cual indica una correspondencia excelente entre los métodos con una variación promedio del M_r de 2.867%, lo que señala una alta concordancia. Asimismo, el análisis de varianza indicó que no existen diferencias significativas entre los métodos, ya que el valor de p obtenido ($p = 0.937$) supera el umbral crítico de 0.10. La prueba t de Student corroboró esta concordancia, ya que el valor de $t=0.866$ calculado fue menor que el valor crítico de 2.132, confirmando que ambos métodos son complementarios y eficaces para la medición del módulo resiliente. Estos hallazgos sugieren que la implementación conjunta de ambos métodos optimiza la evaluación de suelos en proyectos de pavimentación.

Se realizaron estudios detallados de los suelos de subrasante en la Universidad Peruana Unión, enfocados en la determinación de sus parámetros físicos, siguiendo los lineamientos normativos. Los ensayos de laboratorio revelaron que los suelos están compuestos principalmente por gravas y arenas. Los valores de densidad seca máxima oscilaron entre 1.872 g/cm³ y 1.900 g/cm³, mientras que el contenido óptimo de humedad (OCH) varió entre 10.40% y 18.98%. Estos parámetros son fundamentales para evaluar la capacidad de soporte del suelo y su comportamiento bajo cargas repetidas, aspectos clave en el diseño de pavimentos duraderos y eficientes

El análisis del CBR realizado en laboratorio y con el Geogauge arrojó valores promedio de 11.50% y 11.75%, respectivamente, ambos correspondientes a una subrasante clasificada como S3 (buena), según el Manual de Carreteras: Suelos y Pavimentos. Con base en estos valores de CBR, se calculó el módulo resiliente (Mr) utilizando la ecuación (2), obteniéndose rangos de 9975.39 psi a 16419.49 psi en laboratorio y de 9861.01 psi a 16818.73 psi con el Geogauge. Las medias de Mr fueron de 12061.58 psi y 12208.79 psi, con desviaciones estándar de 2725.26 psi y 2953.93 psi, respectivamente. Estos resultados comparables validan la eficacia del método Geogauge para medir el módulo resiliente, y el análisis estadístico confirmó la consistencia y fiabilidad de ambos métodos.

La comparación entre el Geogauge y el método CBR en la construcción de pavimentos demuestra que ambos ofrecen resultados consistentes y confiables para evaluar el módulo resiliente de los suelos de subrasante, con una fuerte correlación ($r = 0.994$) que respalda su validez en proyectos de pavimentación. Mientras el CBR es ideal para evaluaciones detalladas en laboratorio, el Geogauge permite mediciones rápidas y precisas en campo, lo cual facilita seleccionar el método más adecuado según los requisitos específicos del proyecto y optimiza la flexibilidad en diseño estructural y control de calidad. Aunque el Geogauge proporciona resultados inmediatos, se recomienda complementarlo con el CBR para mayor precisión, ya que factores como la humedad y la homogeneidad del suelo pueden influir en su exactitud.

El Geogauge ofrece una solución innovadora y precisa para proyectos de infraestructura que requieren control de calidad del suelo, siendo especialmente beneficioso en entornos complejos como la construcción de carreteras en zonas montañosas o terrenos irregulares. A diferencia de los métodos convencionales, que pueden ser invasivos y

demandar un tiempo considerable, el Geogauge permite obtener mediciones rápidas y fiables de la rigidez y compactación del suelo en tiempo real y en el propio lugar de trabajo. Esta capacidad no solo asegura que la compactación cumpla con estándares específicos desde el inicio, sino que también facilita un seguimiento continuo durante el proyecto, reduciendo así riesgos y optimizando la durabilidad de las infraestructuras. Además, su portabilidad y facilidad de uso representan una alternativa sostenible, disminuyendo costos operativos y tiempos sin sacrificar precisión. En conjunto, el Geogauge no solo fortalece la integridad y seguridad de las construcciones, sino que también apoya la evolución de normativas más exigentes en la industria.

5. REFERENCIAS

- Araujo Navarro, W. (2014). *ECUACIONES DE CORRELACIÓN DEL CBR CON PROPIEDADES ÍNDICE DE SUELOS PARA LA CIUDAD DE PIURA*.
- Arteaga Vargas, C. A., Valencia Gutierrez, O. J., & Botello Segarrundo, G. L. (2023). *ANÁLISIS COMPARATIVO PARA LA DETERMINACIÓN DEL GRADO DE COMPACTACIÓN EMPLEANDO LOS MÉTODOS DEL CONO DE ARENA, DEFLECTÓMETRO LIVIANO DE IMPACTO Y GEOGAUGE EN LA CAPA SUBBASE DE LA CONSTRUCCIÓN DOBLE VÍA EL ALTO - VIACHA*.
- Bassegy Bassegy, O., Attah, I. C., Ambrose, E., & Etim, R. K. (2017). *Correlation between CBR Values and Index Properties of Soils: A Case Study of Ibiono, Oron and Onna in Akwa Ibom State*. 7(4), 94–102. <https://doi.org/10.5923/j.re.20170704.02>
- Chang Albitres, C. M., Vidal Valencia, J., Loria Salazar, L. G., Bustos, M., & Degadillo, R. (2013). Aplicabilidad del método de mecanístico- empírico de diseño de pavimentos (MEDPG) ASSTHO 2008 en latinoamérica. *XVII Congreso Ibero-Latinoamericano Del Asfalto – CILA 2013*.
- “Especificaciones Técnicas Generales para Construcción,” & (EG – 2013) Revisada y Corregida a Junio 2013. (2013). *Manual de Carreteras EG - 2013*.
- Gonzales, C., Alessandra, M., Pereyra, N., David Citation, J., Gonzales, M. A. C., & Navarro, J. D. (n.d.). *Análisis de mejora de suelos arcillosos de alta plasticidad a nivel de subrasante mediante adición de cemento Portland para disminuir el cambio volumétrico* Item Type info:eu-repo/semantics/bachelorThesis. <http://hdl.handle.net/10757/626119>
- Hernández Sampieri, R. (2014). *Metodología de la Investigación -sampieri- 6ta EDICION. 6to*.
- ICG - Instituto de la Construcción y Gerencia. (2013). *Manual de Carreteras - Sección Suelos y Pavimentos*. www.construccion.org
- ICG, & MTC E 101. (2000). *MANUAL DE ENSAYO DE MATERIALES (EM 2000)*.
- Korde, M., & Yadav, R. (2015). *PREDICTING THE CBR VALUE OF DIFFERENT SOILS WITH THE HELP OF INDEX PROPERTIES*.
- Kuttah, D. (2021). Determining the resilient modulus of sandy subgrade using cyclic light weight deflectometer test. *Transportation Geotechnics*, 27. <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2020.100482>
- Maia, C. L. (2016). *Análise comparativa de módulos de resiliência obtidos com o Geogauge para o controle de qualidade de camadas granulares dos pavimentos*. <http://www.repositorio.ufc.br/handle/riufc/22640>

- Mfg Co, H. (n.d.). *Geogauge TM GUIA DEL USUARIO Modelo H-4140*.
- Mfg, H. (n.d.). *Geogauge GUIA DEL USUARIO Modelo H-4140 Medidor de rigidez y módulo del suelo Cumple con la nueva norma ASTM D6758*.
- Narvaez Espinoza, M. E. (2017). *ESTUDIOS COMPARATIVOS DEL GRADO DE COMPACTACIÓN Y MÓDULO DE YOUNG PARA EVALUAR LA RESPUESTA MECÁNICA EN RELLENOS ESTRUCTURALES*.
- Nel Quezada Lucio. (2019). *ESTADÍSTICA PARA INGENIEROS: Vol. Primera Edición*. www.editorialmacro.com
- Paredes Leon, L. C., & Peñafiel Mesache, P. J. (2023). *EVALUACIÓN DEL GRADO DE COMPACTACIÓN EN LA RED DE CAMINOS VECINALES DE RIOBAMBA COMPARANDO MÉTODOS CONVENCIONALES Y ALTERNATIVOS IN SITU*.
- Parra P., F., Espinoza-Montero, P., Fernández, L., Zambrano, H., & Cando T., W. (2020). CORRELACIÓN ANALÍTICA-TÉCNICA ENTRE ENSAYOS DE LABORATORIO DE MÓDULO RESILIENTE Y CALIFORNIA BEARING RATIO DE LA MINA COPETO. *InfoANALÍTICA*, 8(1), 139–152. <https://doi.org/10.26807/ia.v8i1.123>
- Perez García, N., & Garnica Anguas, P. (2010). *Algunas consideraciones sobre el control de calidad de materiales compactados en carreteras*.
- Rodríguez Torres, I. A. (2020). *Maestría en Ingeniería Civil Correlaciones entre el CBR de la Subrasante y Deflexiones Medidas con FWD en Colombia*.
- Sandoval Vallejo, E. A., & Rivera Mena, W. A. (2019). Correlación del CBR con la resistencia a la compresión inconfnada. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, 29(1), 135–152. <https://doi.org/10.18359/rcin.3478>
- Torres Bojacá, C. D. (2020). *Módulo resiliente de suelos blandos de subrasante de la zona lacustre de Bogotá a partir del ensayo CBR cíclico*.
- Yu, J., Zhao, Y., Liu, W., Liu, Z., & Yang, G. (2022). Research on Geogauge instrument for testing the quality of subgrade filling process. *Advances in Civil Engineering: Structural Seismic Resistance, Monitoring and Detection*, 361–365. <https://doi.org/10.1201/9781003310884-47>
- Zhang, X., Yang, G., Wang, X., & Cao, H. (2023). Compaction Quality Inspection and Uniformity Analysis of Soil-Rock Mixed Subgrade. *Sustainability (Switzerland)*, 15(7). <https://doi.org/10.3390/su15075809>

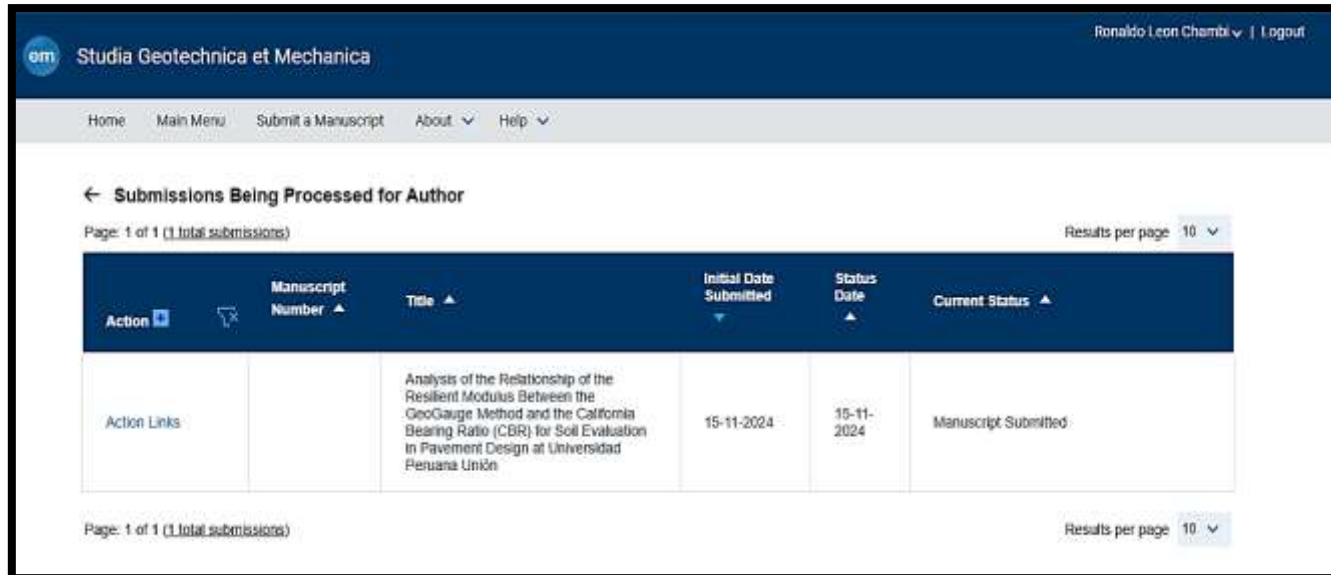
ANEXOS

EVIDENCIA DE SUMISIÓN A REVISTA INDEXADA

Revista: Studia Geotechnica et Mechanica

Link: <https://www.editorialmanager.com/sgem/default.aspx>

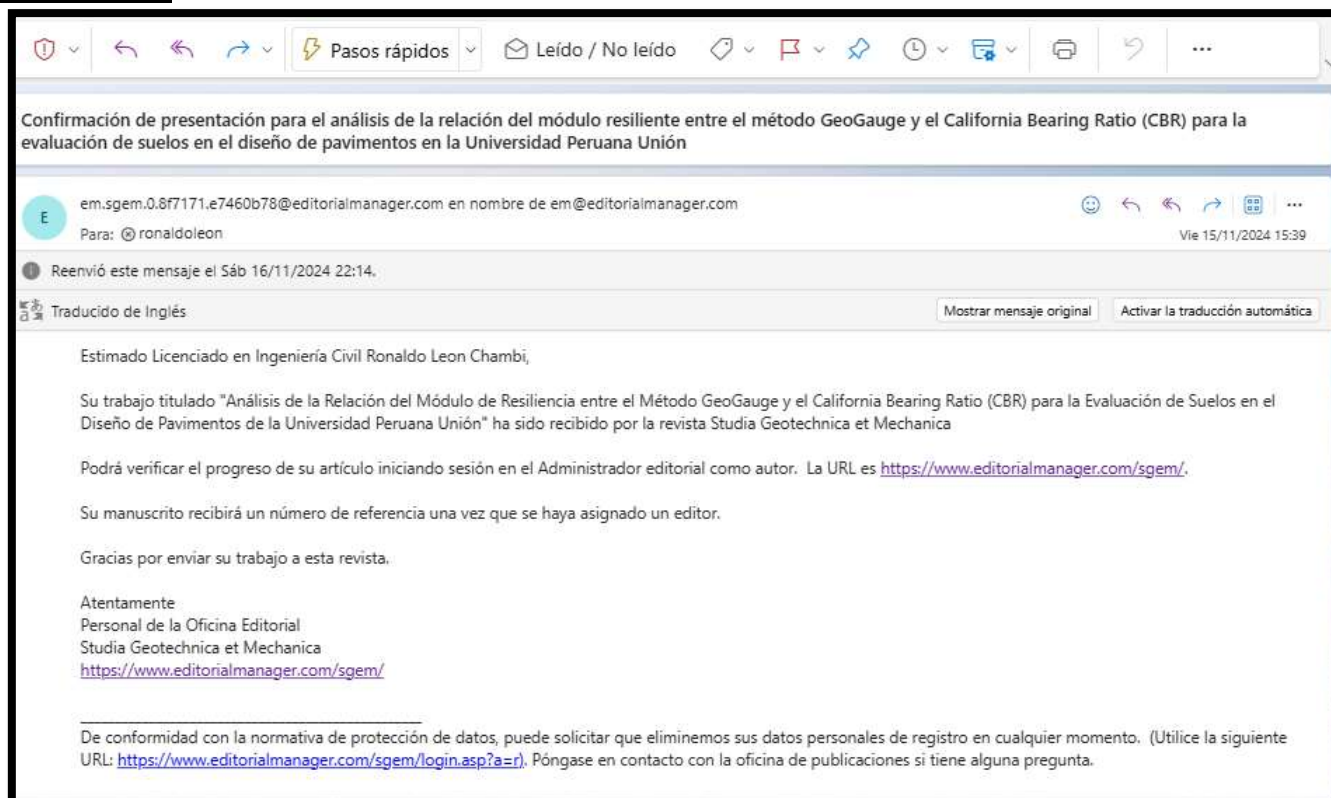
Envió:



The screenshot shows the 'Submissions Being Processed for Author' page in the Editorial Manager system. The page header includes the journal name 'Studia Geotechnica et Mechanica' and the user name 'Ronaldo Leon Chambi'. The main content area displays a table with one submission entry.

Action	Manuscript Number	Title	Initial Date Submitted	Status Date	Current Status
Action Links		Analysis of the Relationship of the Resilient Modulus Between the GeoGauge Method and the California Bearing Ratio (CBR) for Soil Evaluation in Pavement Design at Universidad Peruana Unión	15-11-2024	15-11-2024	Manuscript Submitted

Recepción:



The screenshot shows an email confirmation from the journal editor. The subject line is 'Confirmación de presentación para el análisis de la relación del módulo resiliente entre el método GeoGauge y el California Bearing Ratio (CBR) para la evaluación de suelos en el diseño de pavimentos en la Universidad Peruana Unión'. The email is addressed to 'ronaldoleon' and was received on Saturday, 16/11/2024 at 22:14. The body of the email contains the following text:

Estimado Licenciado en Ingeniería Civil Ronaldo Leon Chambi,

Su trabajo titulado "Análisis de la Relación del Módulo de Resiliencia entre el Método GeoGauge y el California Bearing Ratio (CBR) para la Evaluación de Suelos en el Diseño de Pavimentos de la Universidad Peruana Unión" ha sido recibido por la revista Studia Geotechnica et Mechanica

Podrá verificar el progreso de su artículo iniciando sesión en el Administrador editorial como autor. La URL es <https://www.editorialmanager.com/sgem/>.

Su manuscrito recibirá un número de referencia una vez que se haya asignado un editor.

Gracias por enviar su trabajo a esta revista.

Atentamente
Personal de la Oficina Editorial
Studia Geotechnica et Mechanica
<https://www.editorialmanager.com/sgem/>

De conformidad con la normativa de protección de datos, puede solicitar que eliminemos sus datos personales de registro en cualquier momento. (Utilice la siguiente URL: <https://www.editorialmanager.com/sgem/login.asp?a=r>). Póngase en contacto con la oficina de publicaciones si tiene alguna pregunta.



"AÑO DE LA UNIDAD, LA PAZ Y EL DESARROLLO"

RESOLUCIÓN N° 1022-2023/UPeU-FIA-CF-T

Lima, Naña 26 de diciembre de 2023

VISTO:

El expediente de **Rosy Yhanet Flores Caza**, identificado(a) con Código Universitario N° 202013616 y **Ronaldo Leon Chambi**, identificado(a) con Código Universitario N° 202014073, 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 **Rosy Yhanet Flores Caza** y **Ronaldo Leon Chambi**, han solicitado: la inscripción del perfil de proyecto de tesis titulado "Relación de módulo resiliente entre el método geogauge y California Bearing Ratio de los suelos de la Universidad Peruana Unión" 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 26 de diciembre 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 "**Relación de módulo resiliente entre el método geogauge y California Bearing Ratio de los suelos de la Universidad Peruana Unión**" y disponer su inscripción en el registro correspondiente, designar a **Mg. Edwin Parillo Escarsena** como ASESOR para que oriente y asesore la ejecución del perfil de proyecto de tesis en formato artículo el cual fue dictaminado por: **Mg. Henry Antonio Aguilar Chuquimia** y **Mg. Gerardo William Pari Quispe**, otorgándoles un plazo máximo de doce (12) meses para la ejecución.

Regístrese, comuníquese y archívese.




Dra. Erika Inés Acuña Salinas
DECANA




Mg. Ketty Magaly Arellano Lino
SECRETARIA ACADÉMICA

cc:
-Interesado
-Asesor
-Dirección General de Investigación
-Archivo

FIGURAS ADICIONALES

Figura 9

Ubicación de las calicatas



Nota. Alineamiento de las calicatas

Figura 10

Trazo y replanteo de las calicatas



Nota. Se realizó para las 5 calicatas

Figura 11

Ensayo Geogauge



Nota. Se realizó el ensayo de geogauge, 4 puntos por cada calicata

Figura 12

Ensayo de Geogauge



Nota. Se realizó para las 5 calicatas

Figura 13

Método de lavado



Nota. Se realizó el lavado con la malla N° 200

Figura 14

Ensayo de granulometría



Nota. Se usaron los tamices desde N° 3/8 hasta la malla N°200

Figura 15

Proctor modificado



Nota. Se realizó el ensayo de Proctor modificado para poder

Figura 16

Ensayo de CBR



Nota. Se sumergieron durante 96

hallar el contenido de humedad
óptimo

Figura 17
*Determinación de contenido
de humedad*



Nota. Toma de datos de las muestras
sometidas al horno.

Figura 19
*Determinación de contenido de
humedad*

horas bajo el agua, para determinar
su posible expansión

Figura 18
Ensayo de CBR



Nota. Escurrimiento de agua para
proceder a la máquina de ensayo

Figura 20
Ensayo de densidad de campo



Nota. Toma de datos de las muestras sometidas al horno.



Nota. Se realizó los ensayos de densidad de campo con el cono de arena