

**UNIVERSIDAD PERUANA UNIÓN**

FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA

Escuela Profesional de Ingeniería Civil



**Estimación de la densidad seca de un relleno granular utilizando el  
penetrometro dinámico de cono**

Tesis para obtener el título profesional de Ingeniero Civil

**Autor:**

Bach. Iván José Guevara Lopez

**Asesor:**

Ing. Ferrer Canaza Rojas

Lima, julio del 2023

## ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS

En Lima, Ñaña, Villa Unión, a los 10 día(s) del mes de julio del año 2023 siendo las 11:00 horas, se reunieron en modalidad virtual u online sincrónica, bajo la dirección del Señor Presidente del jurado: **Mg. Reymundo Jaulis Palomino**, el secretario: **Mg. Leonel Chahuares Paucar** y los demás miembros: **Ing. David Díaz Garamendi** y el asesor **Ing. Ferrer Canaza Rojas** con el propósito de administrar el acto académico de sustentación de la tesis titulada:

.....de el(los)/la(las) bachiller/es: a) ... **IVÁN JOSÉ GUEVARA LOPEZ** .....

.....b) .....

.....conducente a la obtención del título profesional de:.....

.....**INGENIERO CIVIL**.....

con mención en.....

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)/a(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): ..... **IVÁN JOSÉ GUEVARA LOPEZ** .....

CALIFICACIÓN	ESCALAS			Mérito
	Vigesimal	Literal	Cualitativa	
<b>APROBADO</b>	<b>18</b>	<b>A-</b>	<b>MUY BUENO</b>	<b>SOBRESALIENTE</b>

Candidato (b): .....

CALIFICACIÓN	ESCALAS			Mérito
	Vigesimal	Literal	Cualitativa	

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  
Mg. Reymundo  
Jaulis Palomino

  
\_\_\_\_\_  
Secretario  
Mg. Leonel  
Chahuares  
Paucar

\_\_\_\_\_  
Asesor  
Ing Ferrer Canaza  
Rojas

\_\_\_\_\_  
Miembro  
Ing. David Díaz  
Garamendi

\_\_\_\_\_  
Miembro

\_\_\_\_\_  
Candidato/a (a)  
Iván José Guevara  
Lopez

\_\_\_\_\_  
Candidato/s (b)

## DECLARACIÓN JURADA DE AUTENTICIDAD DE TESIS

Yo Ing. Ferrer Canaza Rojas, docente de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Escuela Profesional de Ingeniería Civil, de la Universidad Peruana Unión.

DECLARO:

Que la presente investigación titulada: "**Estimación de la densidad seca de un relleno granular utilizando el penetrometro dinámico de cono**" del autor Iván José Guevara Lopez tiene un índice de similitud de 2 % verificable en el informe del programa Turnitin, y fue realizada en la Universidad Peruana Unión bajo mi dirección.

Y estando de acuerdo, firmo la presente declaración en la ciudad de Lima, a los 15 días del mes de julio del año 2023.



Ing. Ferrer Canaza Rojas

## ÍNDICE

RESUMEN.....	2
ABSTRACT.....	3
1. INTRODUCCIÓN.....	6
2. DESARROLLO.....	7
2.1. Antecedentes.....	7
3. METODOLOGÍA.....	9
3.1. Material usado en este estudio.....	9
3.2. DCP.....	11
3.3. Experimentación.....	12
4. RESULTADOS.....	14
4.1. Prueba de la correlación.....	17
5. CONCLUSIONES.....	18
6. FINANCIAMIENTO.....	19
7. CONFLICTO DE INTERESES.....	19
8. CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES.....	19
9. REFERENCIAS.....	19

# ESTIMACIÓN DE LA DENSIDAD SECA DE UN RELLENO GRANULAR UTILIZANDO EL PENETROMETRO DINÁMICO DE CONO

## ESTIMATION OF DRY DENSITY A GRANULAR FILL USING THE DYNAMIC CONE PENETROMETER

Guevara Lopez, Iván José. \*, Canaza Rojas, Ferrer\*\*

### RESUMEN

El control de calidad de un relleno generalmente se realiza con métodos estandarizados, como el cono de arena y el densímetro nuclear, pero se viene planteando un método alternativo, el penetrometro dinámico de cono (DCP), que usualmente se utiliza para calcular el CBR in situ. En esta investigación se utilizó el DCP para realizar el control de calidad de un suelo de grava limosa arcillosa con arena (GC-GM), con porcentaje de 53.13, 31.36 y 15.51 de grava, arena y finos respectivamente. Primeramente se caracterizó el material, es decir se realizaron los ensayos básicos y específicos, como el Proctor Modificado (ASTM D1557), por otro parte se realizó un relleno de prueba de 12.00 metros de longitud la cual fue dividida en siete zonas, las cuales fueron compactados con diferentes energías, además, en cada zona se realizó pruebas de cono de arena (ASTM D1556) y DCP (ASTM D6951), con los datos obtenidos se determinó una ecuación de correlación, donde, el IDCP fue la variable independiente y la densidad seca la variable dependiente. Con la ecuación de correlación se procedió a calcular de densidad seca de una plataforma compactada con una sola energía de prueba de 2.40x2.40m, se estimó una buena correlación entre la densidad seca compactada y IDCP, mostrando así la posibilidad de uso del DCP en el control de calidad de un relleno granular. Además, en la comparación de la densidad seca calculada a partir de la ecuación de correlación y la densidad hallada con el cono de arena varia alrededor de un 6%.

*Palabras clave:* relleno granular; control de calidad; penetrometro dinámico de cono; densidad seca

---

\* Guevara Lopez, Iván José. Estudiante de Ingeniería Civil. Universidad Peruana Unión. Lima, Perú. Correo: [ivanguuevara@upeu.edu.pe](mailto:ivanguuevara@upeu.edu.pe). ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0161-7718>

\*\* Canaza Rojas, Ferrer. Director de Investigación Escuela Profesional de Ingeniería Civil. Universidad Peruana Unión. Lima, Perú. Correo: [fcanaza@upeu.edu.pe](mailto:fcanaza@upeu.edu.pe). ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3952-0962>

## ABSTRACT

The quality control of a backfill is generally performed with standardized methods, such as the sand cone and the nuclear densimeter, but an alternative method, the dynamic cone penetrometer (DCP), which is usually used to calculate the CBR in situ. In this research, the DCP was used to perform the quality control of a silty clayey gravel soil with sand (GC-GM), with a percentage of 53.13, 31.36 and 15.51 of gravel, sand and fines, respectively. First, the material was characterized, that is to say, the basic and specific tests were performed, such as the Modified Proctor (ASTM D1557), on the other hand, a 12.00 meter long test fill was performed, which was divided into seven zones, which were compacted with different energies, in addition, in each zone sand cone (ASTM D1556) and DCP (ASTM D6951) tests were performed, with the data obtained a correlation equation was determined, where the IDCP was the independent variable and the dry density was the dependent variable. With the correlation equation we proceeded to calculate the dry density of a compacted platform with a single test energy of 2.40x2.40m, a good correlation was estimated between the compacted dry density and IDCP, thus showing the possibility of using the DCP in the quality control of a granular fill. In addition, the comparison of the dry density calculated from the correlation equation and the density found with the sand cone varies by about 6%.

**Keyword:** *granular fill; quality control; dynamic cone penetrometer; dry density*

### 1. INTRODUCCIÓN

Los ingenieros dedicados al movimiento de tierras se enfrentan al desafío de evaluar la calidad de los suelos compactados, esta se define como la densificación del suelo a través de la eliminación de aire que se encuentran en su estructura mediante la aplicación de esfuerzos mecánicos, normalmente en suelos granulares se utiliza rodillos vibrantes de rueda lisa [1]–[3]. Según [2] un factor clave en el control de calidad de la compactación de suelos es adherirse a un plan de procedimientos de control de calidad durante la ejecución de los trabajos.

En la actualidad los métodos estandarizados para medir la densidad in situ y contenido de humedad de un relleno compactado de forma directa son, el cono de arena y carburo de calcio o densímetro nuclear [1], [4], estos resultados se comparan con las pruebas de compactación obtenidas en laboratorio, normalmente con el Proctor estándar o modificado, en dicha prueba se obtiene la máxima densidad seca y el óptimo contenido de humedad, con los cuales se calcula el grado de compactación del relleno compactado.

Los métodos mencionados en el párrafo anterior presentan algunas desventajas, así en el método nuclear se observó que no era demasiado confiable en el cálculo de la humedad de la muestra, asimismo su manipulación es peligrosa para los operadores y el medio ambiente, mientras que el cono de arena presenta problemas en condiciones de alta humedad, debido a la dificultad de la calibración de la arena y su manejo, además consta de muchos pasos generando demora en su ejecución y necesita de un técnico para su operación [5][6].

Por otro lado el penetrometro dinámico de cono (DCP) se viene utilizando para el control de calidad de rellenos de tierra debido a su bajo costo, su sencillez en la operación y rapidez en su ejecución, asimismo para el uso correcto del equipo se requiere una calibración entre la resistencia del cono y la densidad seca del relleno, estas se pueden realizar en el laboratorio o in situ. De acuerdo a la revisión bibliográfica disponible en el Perú existen escasos estudios del control de calidad con el DCP en rellenos de suelos granulares. En el presente trabajo se usó el DCP como instrumento de control de calidad en un relleno granular que usualmente se usa en las estructuras de una carretera (base y sub-base) o en pavimentación rígida en el radio urbano. Para ello se empleó el ensayo de cono de arena para comparar los resultados del DCP, es decir como ensayo patrón. El aporte principal de este estudio es generar antecedentes en el control de calidad de suelos granulares compactados a través del ensayo de DCP, esto debido a que esta metodología se viene empleando hace ya bastante tiempo en Europa y Estados Unidos.

## **2. DESARROLLO**

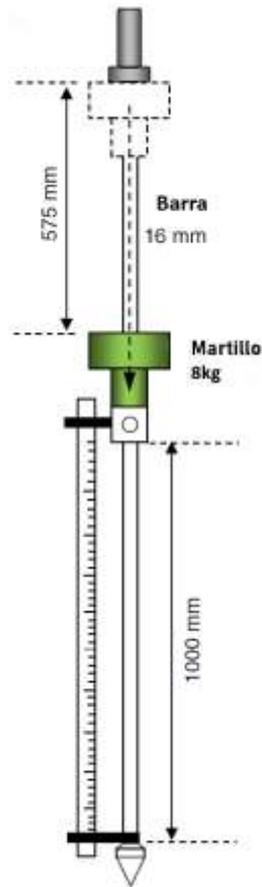
### **2.1. Antecedentes**

El DCP se utiliza para evaluar la resistencia y rigidez in situ de un suelo en su estado natural o de un relleno compactado [2], [7], [8], su configuración es como se muestra en la Figura 1, el equipo consta de dos partes unidos por una varilla de 16 mm de diámetro, la parte inferior posee un acoplador o mango en el extremo superior y una punta de cono extraíble en su extremo inferior, mientras que en la parte superior tiene un martillo deslizante de 8kg que se deja caer desde una altura fija de 575mm. Asimismo, la punta cónica tiene un ángulo de 60° grados y un diámetro en la base de 20mm, además la mayoría de los fabricantes incluyen un medidor de penetración. El equipo normalmente se fabrica de acero inoxidable con excepción de la punta extraíble o reemplazable.

Los estudios con el dispositivo DCP se han desarrollado ampliamente en la correlación del índice de penetración dinámica y el CBR (valor de relación de soporte), el módulo resiliente de una subrasante, modulo elástico [1], [2], asimismo [1] muestra una lista de correlaciones disponibles entre el índice de penetración dinámica y otros parámetros de un suelo obtenidos en campo y laboratorio.

Recientemente [2] correlacionaron el índice de penetración dinámica con parámetros como la humedad, coeficiente de uniformidad y límite de plasticidad en suelos de grano grueso, suelos de transición y suelos de grano fino esto en una subrasante compactada, donde reportaron correlaciones confiables con el número de golpes, el grado de humedad y coeficiente de

uniformidad en los suelos de grano grueso, mientras que en suelos de grano fino lograron correlacionar satisfactoriamente el número de golpes y el índice de plasticidad. En la misma línea [8] realizaron ensayos de laboratorio y campo para correlacionar el grado de compactación de un suelo arcilloso de alto límite líquido (CH) con buena gradación con los parámetros del IDCP (índice de penetración dinámico de cono) y el contenido de humedad. Donde consiguieron correlaciones confiables.



**Figura 1.** Esquema de equipo penetrómetro dinámico de cono ASTM D6951. Fuente: [9]

Por otra lado en estudios en el que realizaron correlaciones de la densidad seca y el IDCP in situ en suelos de préstamos compactados, como [1] en suelos clasificados como arena arcillosa con grava, arena arcillosa y arena limosa, observaron efectos de la humedad y la altura de caída del martillo. Asimismo [10] trabajo con suelos de naturaleza uniforme arena pobremente graduada con limo (SP-SM), compactado con un rodillo vibrante de rueda lisa, donde observaron variaciones de densidad considerable asumiendo que tal hecho de deba al cambio de la humedad del suelo y la condición de succión del material, mas no por la heterogeneidad del suelo, obteniendo correlaciones pobres. Por otro lado [11] desarrollaron un método alternativo que funciona con los mismos principios del DCP en versión más pequeña, utilizaron

el suelo arena de sílice y arena amarilla de Tamala ambas clasificadas como (SP), el modelo fue desarrollado en un laboratorio, obteniendo correlaciones de la orden de 0.83 y 0.66 respectivamente para las dos muestras. De la misma forma [6] utilizaron muestras de suelo (SP), donde observaron una correlación alta, además reportaron que IDCP aumentaba considerablemente en profundidad, los ensayos fueron hechos en laboratorio y campo. En todos los estudios mencionados para realizar las correlaciones utilizaron como ensayo patrón el cono de arena y/o el densímetro nuclear, además se aprecia que las muestras utilizadas fueron arenas en su mayoría, las cuales muestran correlaciones óptimas, se ve la ausencia de materiales granulares en este tipo de investigaciones.

Por otro lado, también reportaron estudios realizados a través de modelos computacionales, donde usaron características de suelos granulares gruesos, [12] realizaron modelos DEM (Método de Elementos Discretos) con el fin de apreciar la relación del tamaño de las partículas y su distribución ante la penetración dinámica de cono, observaron que el tamaño y distribución de partículas influyen en la resistencia a la penetración. Asimismo [13] evaluaron mediante modelos FEM (Modelos de Elementos Finitos) la relevancia de la resistencia a la penetración en materiales granulares gruesos y cómo estas afectan la medición con el penetrometro dinámico de cono, observando que a pesar de que el material sea grueso las fuerzas medidas en la punta del cono reflejan el estado mecánico del material en el sitio ensayado. Estos resultados invitan a realizar ensayos reales en suelos gruesos.

La mayoría de los estudios citados coinciden en señalar que la humedad es una variable que hace que la resistencia del suelo varíe, por ende, variaran los resultados que se pueda obtener con el DCP [1], [2], [8], [10], [11], [14].

### **3. METODOLOGÍA**

#### **3.1. Material usado en este estudio**

En este estudio se utilizó un suelo de préstamo que se obtuvo de una cantera en el distrito de Espinar - Cusco en Perú. En la Figura 1 se muestra la metodología seguida para el desarrollo de la investigación, en consecuencia, se realizaron los ensayos para identificar las características mecánicas y físicas de acuerdo a la normativa nacional que a la vez están respaldadas por las normativas ASTM (American Society for Testing and Materials), en la Tabla 1 se muestra los resultados de los ensayos básicos y específicos.

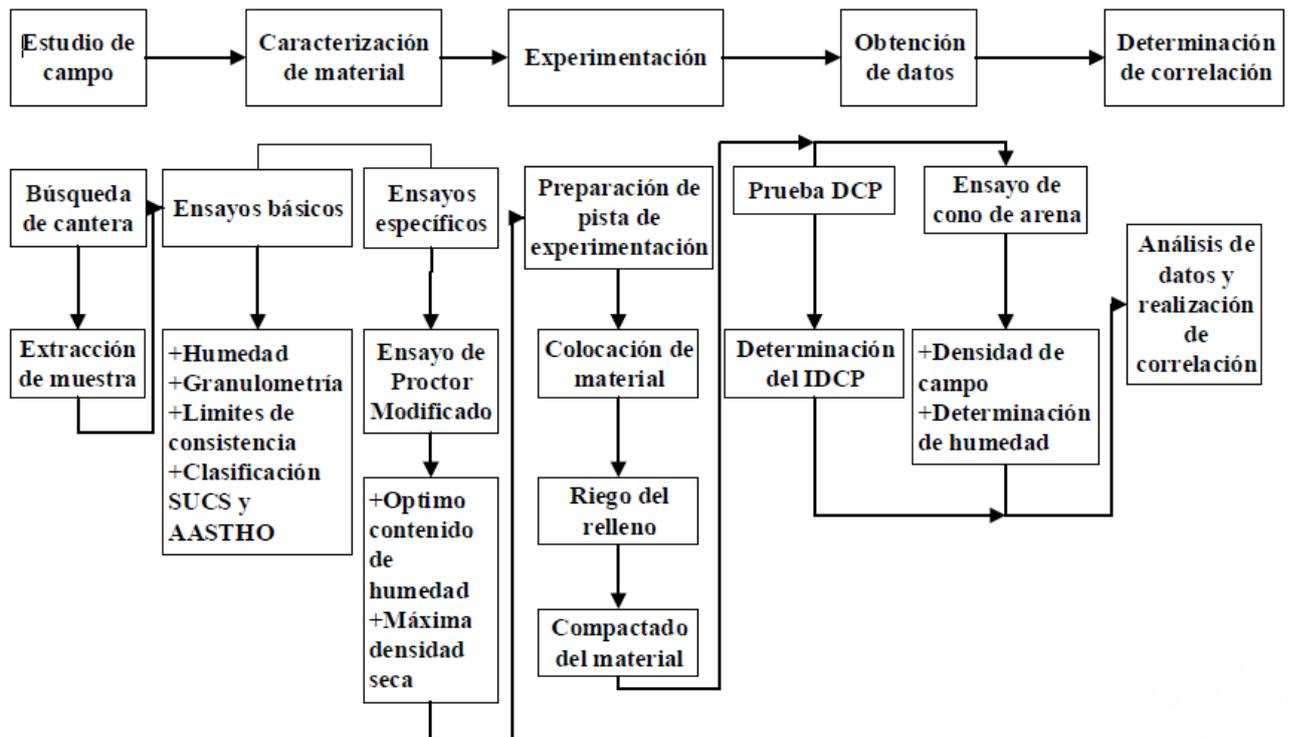


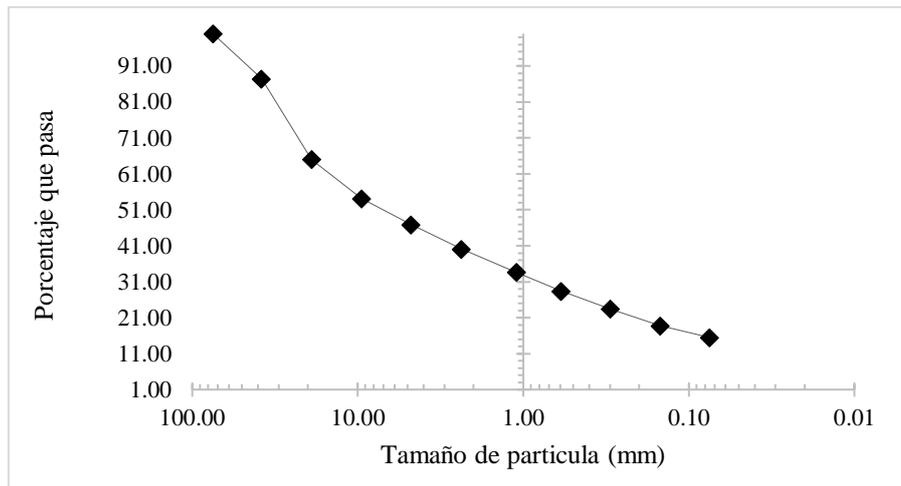
Figura 2. Metodología para la estimación de la correlación del IDCP vs  $\rho_d$ . Fuente: el autor

Tabla 1. Propiedades físicas del suelo

Parámetros	Medición
D30 (mm)	0.733
D60 (mm)	11.616
Límite plástico (%)	19.23
Límite líquido (%)	25.45
Índice de plasticidad (%)	6.21
Clasificación del suelo	
SUCS	GC-GM
AASHTO	A-2-4 (0)
Óptimo contenido de humedad (%)	10.07
Máxima densidad seca g/cm <sup>3</sup>	2.248
Abrasión los ángeles (%)	25.5
CBR (%)	37.55

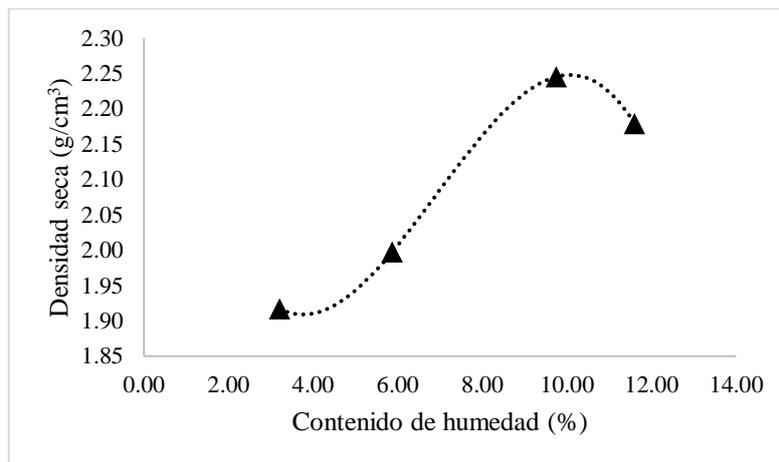
El suelo se clasifica como grava limosa arcillosa con arena (GC-GM), en el análisis granulométrico (ASTM D6913) se observó que no posee el parámetro  $D_{10}$ , esto debido a que los finos superan el 15%, en la, Figura 3 se muestra la curva granulométrica de suelo usado, por

otro lado, la distribución en porcentajes esta dado de la siguiente forma, 53.13%, 31.36% y 15.51% de grava, arena y finos respectivamente.



**Figura 3.** Curva granulométrica de la muestra. Fuente: el autor

Para hallar los parámetros del óptimo contenido de humedad y máxima densidad seca se utilizó la metodología del Proctor Modificado (ASTM D1557), siendo 2.248g/cm<sup>3</sup> y 10.07% la máxima densidad seca y el óptimo contenido de humedad respectivamente, la curva de compactación se aprecia en la Figura 4, además el material posee un CBR al 95% de 37.55% (ASTM D 1883). Asimismo, el material usado en este estudio se utiliza como base o subbase en la construcción de pavimentos rígidos en la ciudad de Espinar.



**Figura 4.** Curva de compactación (Proctor modificado). Fuente: el autor

### 3.2. DCP

En los antecedentes se describió el aspecto físico y de forma del dispositivo DCP, en este apartado se describirá brevemente como funciona. Después del correcto ensamblado se toma el equipo y se sujeta verticalmente en el punto elegido para prueba, inicialmente se dan unos

golpes parciales con el martillo para asegurar el hincado de la punta, esta se lectura como número de golpe cero, una vez asegurado el hincado inicial se deja caer el martillo de la altura de 575mm para luego tomar lectura hasta la profundidad dada, de la lectura hecha se extrae el resultado la cual se expresa en términos de índice de penetración dinámico de cono (IDCP), esta se define como la profundidad de penetración del cono por cada golpe (mm/golpe), se calcula utilizando la Ecuación 01, donde,  $P_i$  y  $P_{i+1}$  son valores de penetración del cono en mm y  $N_i$  y  $N_{i+1}$  son el número de golpes correspondientes a las profundidades de penetración.

$$IDCP = \frac{P_{i-1} - P_i}{N_{i-1} - N_i} \quad (1)$$

$$IDCP_{P\_pond} = \frac{1}{H} \sum_i^N [(IDCP)_i(Z)_i] \quad (2)$$

Mientras que para calcular el IDCP representativo del relleno se utilizó el promedio ponderado como sugiere [15], se muestra en la ecuación 2, donde, N=número total de IDCP, Z= distancia de penetración por golpe y H=altura total de penetración.

### 3.3. Experimentación

Con el material caracterizado se procedió a realizar una plataforma de 12.00 metro de largo y 2.50 metros de ancho, de la misma forma el ancho efectivo de compactación fue de 2.134 metros y el ancho útil de trabajo de 2.00 metros, como se muestra en la Figura 5, al conformar el relleno se colocó el material con una altura de 30 centímetros de altura, la cual disminuyo después de realizarse la compactación una altura promedio de 26 centímetros. Después de conformarse el relleno se dividió en 7 zonas ( $Z_i$ ) de 1.50 metros por zona, excepto la zona 7 que tuvo una mayor dimensión, debido a que esa área se encontraba al final de la pista experimental y fue donde se compacto con mayor energía, la energía de compactación se tomó de la referencia [1] y la practica local.

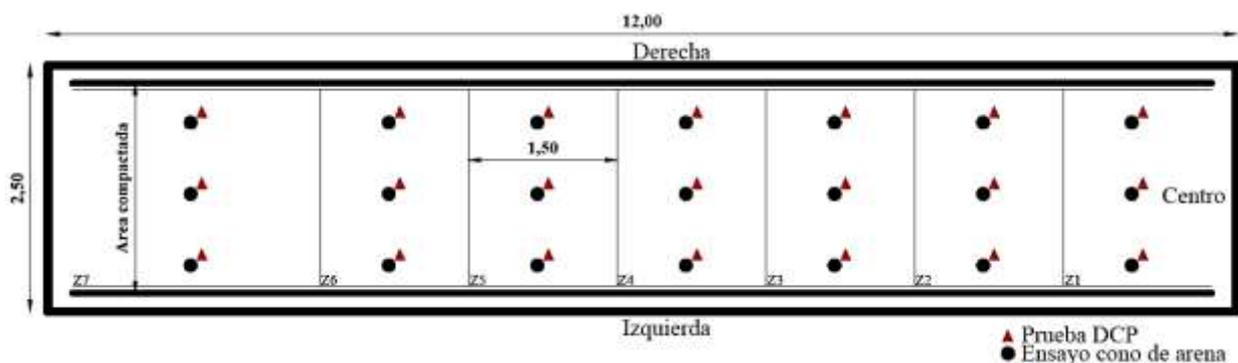
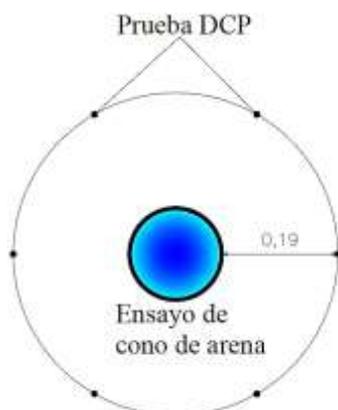


Figura 5. Esquema de relleno de pruebas. Fuente: el autor

En las diferentes zonas se aplicó diferentes energías de compactación, con el fin de tener distintas densidades por cada zona, la configuración de energía se muestra en la Tabla 2. Para la compactación del relleno se utilizó un rodillo compactador de tambor liso Cat CS 533E de 2.134 de ancho de rueda lisa a una velocidad constante por pasada, realizando un total de 6 pasadas en la zona 7. En la Figura 6 se muestra la distribución realizada de las pruebas, 3 por cada zona. En cada zona se realizó 01 ensayo de cono de arena y 06 pruebas de DCP alrededor del ensayo de cono de arena dejando un espacio libre de 19 centímetros.



**Figura 6.** Esquema de pruebas por punto de cono de arena. Fuente: el autor

**Tabla 2.** Configuración de energía de compactación

Zona de compactación	Energía de compactación
Z1	1 pasada de baja vibración (BV1)
Z2	2 (BV1)
Z3	1 (BV1) + 1 pasada de alta vibración (AV1)
Z4	1 (BV1) + 2 (AV1)
Z5	2 (BV1) + 2 (AV1)
Z6	2 (BV1) + 3 (AV1)
Z7	2 (BV1) + 4 (AV1)

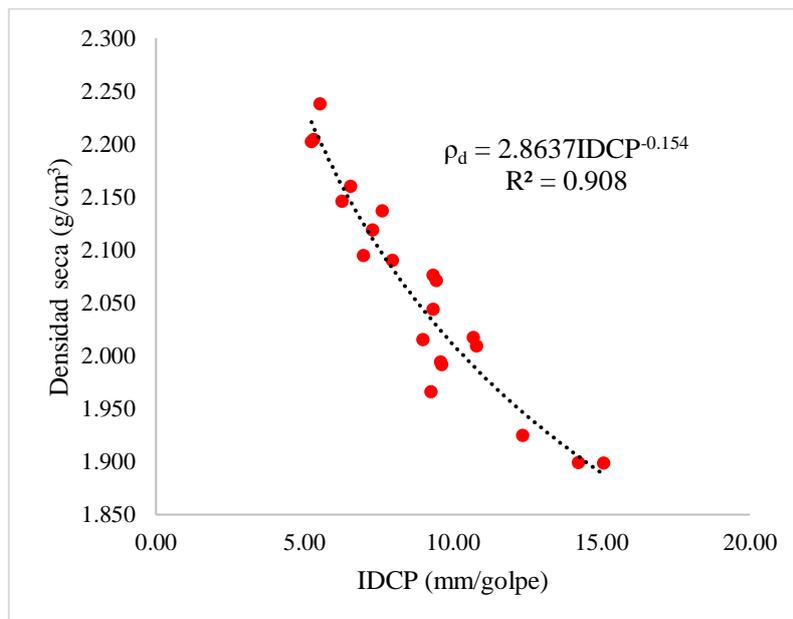
Después de realizar la compactación como muestra la Figura 7a se procedió a marcar la ubicación de lugar donde se realizaron los ensayos de cono de arena y los de DCP. Los puntos del ensayo DCP se realizaron aleatoriamente con el criterio de que cada punto debía tener una distancia mínima de separación tanto de lado como de ancho de 20 centímetros, en la Figura 7b se muestra la realización de los ensayos del DCP.



**Figura 7.** a) Compactación del relleno de pruebas con rodillo, b) prueba de DCP. Fuente: el autor

#### 4. RESULTADOS

En total se realizaron 126 pruebas de DCP y 21 pruebas de cono de arena en todo el relleno compactado, de todos los datos procesados de los ensayos de DCP se descartaron algunos datos, especialmente de DCP que se realizaron en el borde del relleno de prueba, esto por formar parte de datos atípicos. Por cada zona y punto de cono de arena se extrajo el promedio ponderado del ensayo DCP. Las pruebas de Cono de arena tuvieron una variación mínima en cada zona, por consiguiente, se tomaron esos datos y se graficó el resultado global, es decir el índice de penetración dinámico de cono (IDCP) versus la densidad seca ( $\rho_d$ ) como se muestra en la Figura 8.

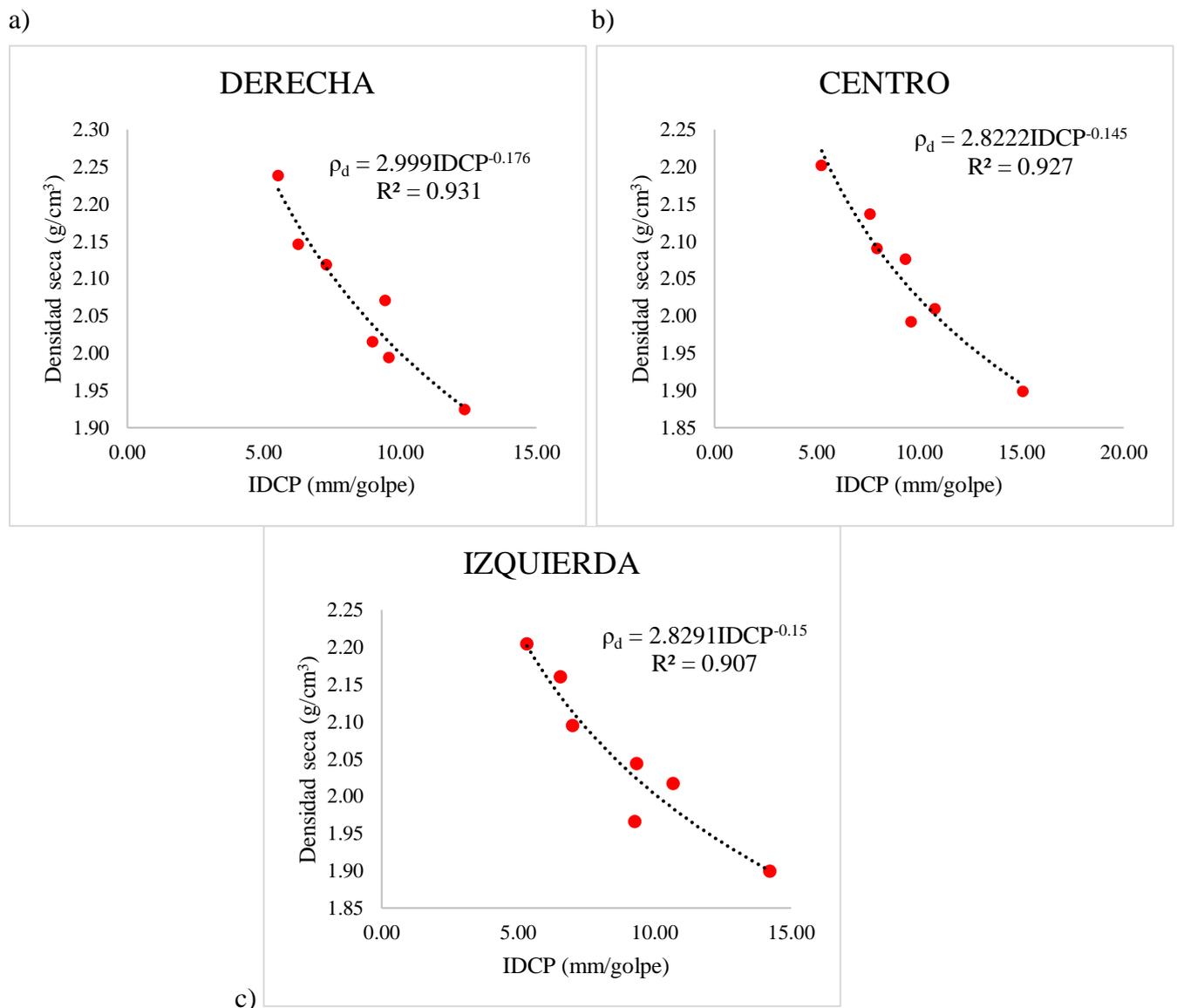


**Figura 8.** Variación del IDCP vs  $\rho_d$ . Fuente: el autor

Las humedades halladas de los ensayos de cono de arena presentaron mínimas variaciones, esto probablemente se debe a que se compacto a una sola humedad el relleno, además según [16]

los agregados gruesos tienen un rango de humedades a los que pueden alcanzar grados de compactación aceptables.

Se puede observar que existe una buena correlación según [11] de  $\rho_d$  vs IDCP de 0.908 del suelo clasificado como grava limosa arcillosa con arena (GC-GM). También se presentan los resultados de cada lado o franja de relleno compactado, es decir de la derecha, centro e izquierda en la Figuras 9. Donde se muestra correlaciones buenas según [11] de 0.931, 0.927 y 0.907 de los lados derecha, centro e izquierda respectivamente. En la Tabla 3 se muestra los resultados por cada zona y franja con esos datos se generó las correlaciones realizadas en este estudio.



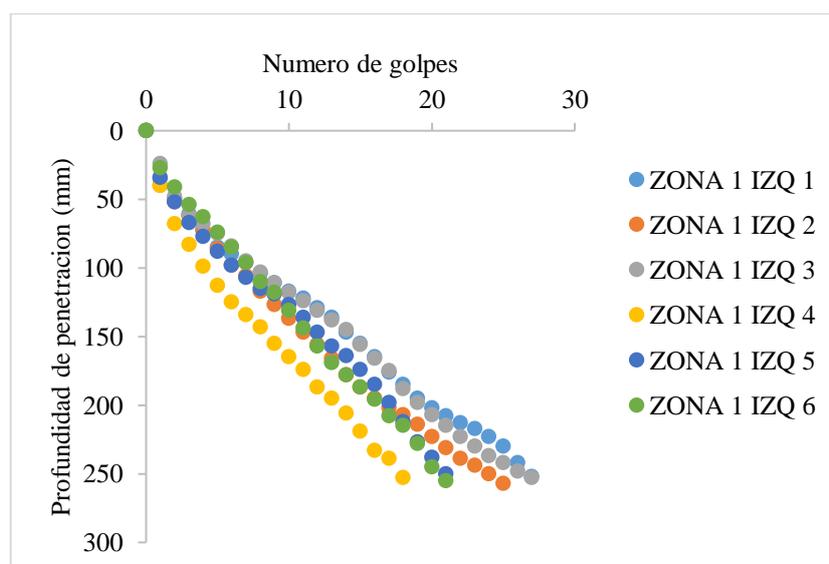
**Figura 9.** Variación del IDCP vs  $\rho_d$  en la franja derecha. Fuente: el autor

A pesar de compactar a un mismo esfuerzo en cada zona con el mismo suelo, la variación de los resultados de cada franja se atribuye al tamaño de partículas de suelo, conformado por

53.13% de grava, 31.36% de arena y 15.51% de finos, es decir contiene mayor porcentaje de tamaño de suelo que pasan los tamices 1 1/2", 3/4", 3/8" y tamiz N° 04. En la revisión bibliográfica no se encontró considerables estudios donde se correlacionen el  $\rho_d$  vs IDCP en suelos granulares como el que fue utilizado en este estudio, pero de acuerdo a los resultados se cree que es posible utilizar el DCP como dispositivo adecuado para el control de calidad de rellenos granulares.

**Tabla 3.** Resumen de resultados por zonas

Zona	Derecha		Centro		Izquierda	
	IDCP ( mm)	$\rho_d$ (g/cm <sup>3</sup> )	IDCP ( mm)	$\rho_d$ (g/cm <sup>3</sup> )	IDCP ( mm)	$\rho_d$ (g/cm <sup>3</sup> )
Z1	12.36	1.92	15.08	1.90	14.23	1.90
Z2	9.60	1.99	9.62	1.99	9.27	1.97
Z3	9.00	2.01	10.80	2.01	10.69	2.02
Z4	9.45	2.07	9.35	2.08	9.35	2.04
Z5	7.30	2.12	7.96	2.09	7.00	2.09
Z6	6.27	2.15	7.63	2.14	6.55	2.16
Z7	5.54	2.24	5.24	2.20	5.32	2.20



**Figura 10.** curva DCP vs golpes acumulados de la zona 1. Fuente: el autor

Además, se informa que las curvas de número de golpes versus profundidad de penetración muestran una pendiente uniforme como se muestra en la Figura 10, este comportamiento se

refleja en todas la zonas, por lo tanto se evidencia un solo estrato y de estructura relativamente uniforme [17].

En la Figura 11 se presenta una comparación con los resultados reportados de [1] y los resultados hallados en este estudio, se puede apreciar que ambas curvas tienen la misma tendencia para IDCP iguales, probablemente la variación existente se da por la cantidad de grava presente en ambas muestras, también varía el óptimo contenido de humedad y la máxima densidad seca, datos que explican que para cada tipo de suelo en particular el IDCP mostrara resultados diferentes, es por ello para utilizar este método de control de calidad se deberá calibrar la  $\rho_d$  vs el IDCP, y así evitar el uso incorrecto del método DCP.

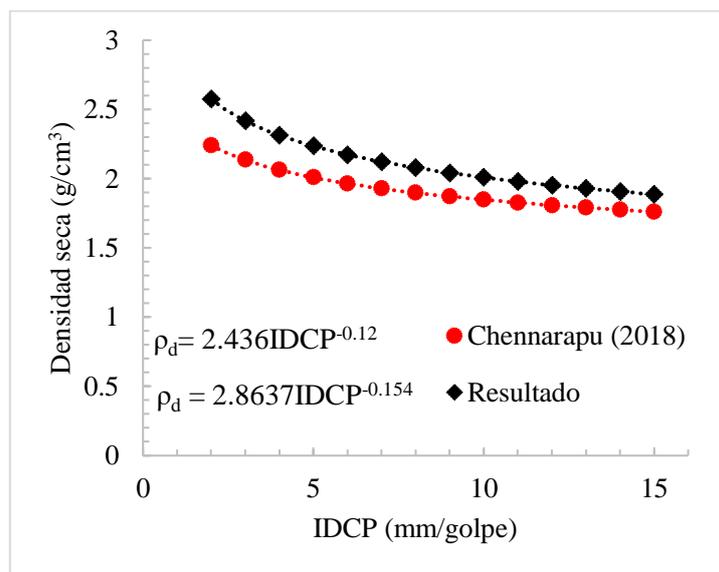
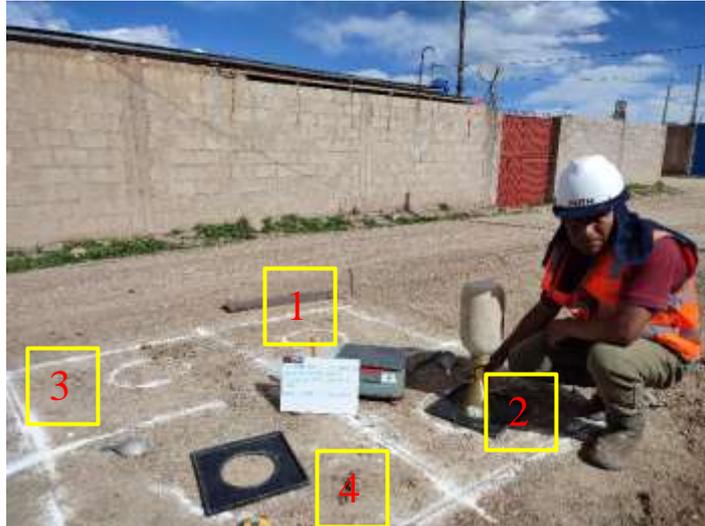


Figura 11. Comparación de IDCP vs  $\rho_d$  del presente estudio el de [1]. Fuente: el autor

#### 4.1. Prueba de la correlación

Después de realizar el cálculo de la ecuación de correlación en la pista de prueba por cada franja y de manera general mostrados en las Figuras 8 y 9 respectivamente, se procedió a realizar un relleno para determinar la densidad seca por medio del IDCP, para ello se compacto una plataforma de 2.40x2.40x0.25 metros con el mismo material. La plataforma se compacto con un vibro-compactador estándar en tres capas de altura aproximada de 15 centímetros, aplicándose a cada capa la misma cantidad de energía de compactación, al finalizar la compactación la plataforma termino con una altura promedio de 25 centímetros.



**Figura 12.** División de la plataforma en 4 sectores y realización del ensayo de cono de arena. Fuente: el autor

Terminado la compactación de la plataforma se dividió en 4 sectores como se muestra en la Figura 12, en cada sector se realizó 3 pruebas DCP y 1 cono de arena, las pruebas de cono de arena se extrajeron para comparar con los resultados de la ecuación de correlación general y los de franja [6][9][18].

Con la ecuación de correlación general se calculó la densidad seca en los sectores 1, 2, 3 y 4 los que se muestran en la Tabla 4, las variaciones respecto a la densidad seca de cono de arena (CA) en porcentaje de orden del 6% sobre estimando la densidad seca, pero aun así brindan resultados cercanos, estos resultados ofrecen evidencia positiva para el uso del DCP en el control de calidad en rellenos granulares (GC-GM) con un índice de plasticidad de 6.21 %.

**Tabla 4.** Resultados de la ecuación de correlación general

$\rho_d$ (IDCP) (g/cm <sup>3</sup> )	$\rho_d$ (CA) (g/cm <sup>3</sup> )	Variación	
2.167	2.107	0.060	2.8%
2.202	2.136	0.067	3.1%
2.189	2.063	0.126	6.1%
2.233	2.108	0.124	5.9%

## 5. CONCLUSIONES

En este estudio se investigó la aplicación del cono dinámico de penetración estándar para el control de calidad de rellenos de un suelo granular. Después de realizar los ensayos requeridos se ha desarrollado una correlación del índice de penetración dinámica de cono (IDCP) y la densidad seca.

$$\rho_d = 2.8637 (IDCP)^{-0.154} (R^2 = 0.908)(GC - GM, n = 126)$$

Dónde:  $\rho_d$  = densidad seca ( $\text{g/cm}^3$ ), IDCP = índice de penetración dinámico de cono (mm/golpe),  $n$  = número de pruebas de penetración dinámico de cono.

Para comprobar la ecuación de correlación calculada se elaboró una plataforma, la cual se compactó con un Vibro compactador en capas, donde se pudo apreciar resultados cercanos a los determinados con el cono de arena, variando en un orden del 6%, mostrando así ser una herramienta útil en el control de calidad en suelos con 53.13% de grava, 31.36% de arena y 15.51% de finos como se demostró en este estudio.

Las pruebas de DCP son económicas y relativamente fáciles de manipular, la cual podría ayudar en el control de calidad de un relleno en distancias cortas con mayor número de pruebas.

Para el uso de DCP como dispositivo de control de calidad primeramente se tiene que realizar trabajos previos de caracterización del material y calcular una ecuación de correlación con el tipo de suelo a trabajar, una vez establecido estos pasos se podrá utilizar el DCP para hacer seguimiento de la calidad del relleno, ya sea una capa de carretera o un terraplén compactado en capas. El procedimiento descrito se repite cuando el suelo a usar cambia. Existen otras metodologías en estudios previos especialmente para arenas sin embargo se pueden adecuar para suelos granulares.

Se recomienda usar este estudio como antecedente para estudios posteriores con suelos granulares con distintas gradaciones, por otra parte, se pueda incluir la humedad en la ecuación de correlación.

## **6. FINANCIAMIENTO**

Financiado con recursos propios de los autores

## **7. CONFLICTO DE INTERESES**

Los autores declaran no tener ningún conflicto de interés.

## **8. CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES**

Investigación, IG.; redacción, IG.; supervisión, FC.

## **9. REFERENCIAS**

- [1] H. Chennarapu, T. K. Garala, R. Chennareddy, U. Balunaini, y G. Venkata Narasimha Reddy, "Compaction Quality Control of Earth Fills Using Dynamic Cone Penetrometer," *J. Constr. Eng. Manag.*, vol. 144, no. 9, pp. 1–10, 2018.

- [2] E. Ganju, H. Kim, M. Prezzi, R. Salgado, y N. Z. Siddiki, “Quality assurance and quality control of subgrade compaction using the dynamic cone penetrometer,” *Int. J. Pavement Eng.*, vol. 19, no. 11, pp. 966–975, 2016.
- [3] L. D. Wesley, “Soil Compaction,” in *Fundamentals of Soil Mechanics for Sedimentary and Residual Soils*, Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc., 2009, pp. 391–404.
- [4] Y. Gansonré, P. Breul, C. Bacconnet, M. Benz, y R. Gourvès, “Prediction of in-situ dry unit weight considering chamber boundary effects on lateritic soils using Panda® penetrometer,” *Int. J. Geotech. Eng.*, vol. 16, no. 4, pp. 408–414, 2022.
- [5] R. B. Freeman, C. A. Gartrell, L. D. Wakeley, E. S. Berney, y J. R. Kelley, “Steel-shot method for measuring the density of soils,” *Can. Geotech. J.*, vol. 47, no. 11, pp. 1299–1304, 2010.
- [6] A. M. Hamid, O. S. B. Al-Amoudi, y S. A. Aiban, “Assessing the Effect of Density and Water Level on the Degree of Compaction of Sand Using Dynamic Cone Penetration Test,” *Arab. J. Sci. Eng.*, vol. 44, no. 5, pp. 4921–4930, 2018.
- [7] H. Kim, “Dynamic analysis of dynamic cone penetration test for subgrade compaction assessment,” Purdue University, 2014.
- [8] B. Yang, R. Zhang, X. Zha, C. Liu, y Q. Pan, “Improved testing method of dynamic cone penetrometer in laboratory for evaluating compaction properties of soil subgrade,” *Road Mater. Pavement Des.*, vol. 17, no. 2, pp. 487–498, 2015.
- [9] C. Lee, K. Kim, W. Woo, y W. Lee, “Soil Stiffness Gauge ( SSG ) and Dynamic Cone Penetrometer ( DCP ) tests for estimating engineering properties of weathered sandy soils in Korea,” *Eng. Geol.*, vol. 169, pp. 91–99, 2014.
- [10] F. S. Tehrani, C. L. Meehan, y F. Vahedifard, “Comparison of Density-Based and Modulus-Based In Situ Tests for Earthwork Quality Control,” pp. 2345–2354, 2014.
- [11] A. Mohajerani *et al.*, “A practical technique for the compaction control of sand in road construction: using a dynamic lightweight cone penetrometer,” *Road Mater. Pavement Des.*, vol. 22, no. 1, pp. 200–214, 2019.
- [12] Q. A. Tran, B. Chevalier, y P. Breul, “Spectral Analysis of the Response of Coarse Granular Material to Dynamic Penetration Test Modelled with DEM,” *Int. J. Geosynth. Gr. Eng.*, vol. 4, no. 3, pp. 1–10, 2018.
- [13] J. C. Quezada, P. Breul, G. Saussine, y F. Radjai, “Penetration test in coarse granular material using Contact Dynamics Method,” *Comput. Geotech.*, vol. 55, pp. 248–253, 2014.
- [14] A. S. I. Kofi y F. G. J. Yao, “The influence of water content on the Dynamic Cone Penetration Index of a lateritic soil stabilized with various percentages of a quarry by-product,” *Transp. Geotech.*, vol. 5, pp. 68–85, 2015.
- [15] T. B. Edil y C. H. Benson, “Investigation of DCP and SSG as alternative methods to determine subgrade stability,” University of Wisconsin-Madison, 2005.
- [16] P. W. Jayawickrama, A. L. Amarasiri, y P. E. Regino, “Use of dynamic cone penetrometer to control compaction of granular fill,” *Transp. Res. Rec.*, no. 1736, pp. 71–80, 2000.
- [17] M. A. Y. Montes, “Determinación de la ecuación de correlación entre el PDC Y CBR

con muestra inalterada, en suelos a nivel de subrasante en el tramo Gallito de las Rocas-Los Olivos, región Junín,” Universidad Peruana Unión, 2020.

- [18] J. S. Lee, S. Y. Kim, W. T. Hong, y Y. H. Byun, “Assessing subgrade strength using an instrumented dynamic cone penetrometer,” *Soils Found.*, vol. 59, no. 4, pp. 930–941, 2019.