



Determinación de los Límites de Atterberg con uso del penetrómetro cónico para la ciudad de Portoviejo

Determination of the Atterberg Limits using the cone penetrometer for the
city of Portoviejo

*Determinação dos Limites de Atterberg usando o penetrômetro cônico para a cidade de
Portoviejo*

ARTÍCULO ORIGINAL



Verónica Michelle Cedeño Vera ¹ 
vcedeno1258@utm.edu.ec

Jean Pierre Olivo Zambrano ¹ 
jolivo7721@utm.edu.ec

Eduardo Ortiz Hernández ¹ 
eduardo.ortiz@utm.edu.ec

¹ Universidad Técnica de Manabí. Portoviejo, Ecuador

Escanea en tu dispositivo móvil
o revisa este artículo en:

<https://doi.org/10.33996/revistaingenieria.v9i25.136>

Artículo recibido 19 de junio 2025 / Aceptado 10 de agosto 2025 / Publicado 02 de septiembre 2025

RESUMEN

Los límites de Atterberg son parámetros fundamentales en la caracterización geotécnica de suelos finos. El método tradicional de Copa de Casagrande presenta alta variabilidad debido a la dependencia del operador, motivando la búsqueda de alternativas más confiables. El objetivo de este estudio fue evaluar la viabilidad y exactitud del método del penetrómetro cónico para la determinación de los límites de Atterberg en suelos representativos de la ciudad de Portoviejo, Ecuador. El enfoque del estudio es cuantitativo experimental. El tipo de estudio es correlacional comparativa. Se analizaron 15 muestras mediante ambos métodos y se establecieron correlaciones estadísticas. Los resultados mostraron que el método de Casagrande arroja valores de límite líquido entre 10 y 15 puntos porcentuales superiores al penetrómetro cónico, manteniendo una correlación significativa ($R^2 = 0.71$). Las conclusiones señalan que, el penetrómetro cónico demostró ser una alternativa confiable con menor variabilidad y mayor reproducibilidad para la determinación de límites de consistencia en suelos arcillosos de la región costera ecuatoriana.

Palabras clave: Consistencia; Correlación; Geotecnia; Límites De Atterberg; Penetrómetro Cónico

ABSTRACT

Atterberg limits are fundamental parameters in the geotechnical characterization of fine-grained soils. The traditional Casagrande Cup method exhibits high variability due to operator dependence, prompting the search for more reliable alternatives. The objective of this study was to evaluate the feasibility and accuracy of the cone penetrometer method for determining Atterberg limits in representative soils from the city of Portoviejo, Ecuador. The study's approach is quantitative experimental. The type of study is comparative correlational. Fifteen samples were analyzed using both methods, and statistical correlations were established. The results showed that the Casagrande method yielded liquid limit values between 10 and 15 percentage points higher than the cone penetrometer, maintaining a significant correlation ($R^2 = 0.71$). The conclusions indicate that the cone penetrometer proved to be a reliable alternative with lower variability and greater reproducibility for determining consistency limits in clayey soils in the Ecuadorian coastal region.

Keywords: Consistency; Correlation; Geotechnics; Atterberg Limits; Cone Penetrometer

RESUMO

Os limites de Atterberg são parâmetros fundamentais na caracterização geotécnica de solos de granulação fina. O método tradicional de Casagrande Cup apresenta alta variabilidade devido à dependência do operador, o que leva à busca por alternativas mais confiáveis. O objetivo deste estudo foi avaliar a viabilidade e a precisão do método do penetrômetro cônico para a determinação dos limites de Atterberg em solos representativos da cidade de Portoviejo, Equador. A abordagem do estudo é quantitativa experimental. O tipo de estudo é correlacional comparativo. Quinze amostras foram analisadas por ambos os métodos, e correlações estatísticas foram estabelecidas. Os resultados mostraram que o método de Casagrande produziu valores de limite de liquidez entre 10 e 15 pontos percentuais superiores ao penetrômetro cônico, mantendo uma correlação significativa ($R^2 = 0,71$). As conclusões indicam que o penetrômetro cônico demonstrou ser uma alternativa confiável, com menor variabilidade e maior reprodutibilidade para a determinação dos limites de consistência em solos argilosos na região costeira equatoriana.

Palavras-chave: Consistência; Correlação; Geotecnia; Limites de Atterberg; Penetrômetro de cone

INTRODUCCIÓN

Los límites de Atterberg constituyen parámetros fundamentales de la mecánica de suelos, permitiendo clasificar y caracterizar el comportamiento de suelos finos según su contenido de humedad y estado de consistencia. Estos límites definen transiciones entre estados líquido, plástico y sólido, y permiten evaluar propiedades críticas como la compresibilidad, la permeabilidad y la resistencia al corte, aspectos fundamentales para el diseño de cimentaciones y obras de infraestructura civil (Font, 2005). En este sentido, su aplicación sigue vigente en estudios geotécnicos contemporáneos, dada su capacidad para reflejar el comportamiento mecánico de suelos cohesivos.

Ahora bien, a pesar de su amplia utilización, el método tradicional de la Copa de Casagrande ha sido objeto de cuestionamientos por su limitada repetibilidad y reproducibilidad. Diversos factores operativos como el ritmo de golpeo, la forma del surco, la rigidez de la base y la experiencia del operador, introducen variabilidad significativa en los resultados. En respuesta a estas limitaciones, O'Kelly et al. (2022) recomiendan el uso del método de cono de caída, el cual presenta ventajas en términos de precisión y consistencia, proponiendo redefinir el límite líquido como el contenido de agua en el que un cono estándar penetra una profundidad específica. Complementariamente, Ullah (2024) evidenció en Bangladesh desviaciones de -10% a +7% entre ambos métodos en 20 localidades, concluyendo que el cono estándar reduce significativamente la

variabilidad del operador.

En el contexto latinoamericano, la búsqueda de métodos alternativos ha cobrado relevancia por la necesidad de optimizar recursos en laboratorios. Por ejemplo, Malki et al. (2024) demostraron en suelos de Argelia con plasticidad media a alta, la aplicabilidad del método de cono de caída en contextos con características similares a regiones costeras sudamericanas. Asimismo, Jagodnik y Marušić (2023) validaron su uso en Croacia para mezclas de baja plasticidad con presencia de arena, mostrando una correlación sólida con los datos obtenidos mediante métodos tradicionales.

En Ecuador, país caracterizado con una notable diversidad geológica y una alta actividad sísmica, se requiere de métodos confiables para la caracterización geotécnica de sus suelos. En esta línea, Othman et al. (2023) desarrollaron una geodatabase para suelos de Quito, documentando que el índice de plasticidad derivado de los límites de Atterberg muestra distribución Weibull con media de 18.23 y coeficiente de variación del 76%, evidenciando diferencias estadísticamente significativas entre suelos del norte y sur de la capital ecuatoriana.

Particularmente, en la provincia de Manabí, específicamente en zonas costeras. Por ejemplo los estudios de Velásquez-Chávez y Véliz-Rivadeneira (2024) en la Avenida Miraflores de Portoviejo documentaron suelos arcillosos con elevada plasticidad e inestabilidad de volumen, donde el límite líquido disminuyó de 54.95% en suelo natural a 40.96% con adición de

estabilizantes, demostrando la importancia de la caracterización precisa para procesos de mejoramiento. De forma complementaria, Pin Ponce y Ortiz Hernández (2024) reportaron condiciones similares en el cantón El Carmen, Manabí, donde los suelos arcillosos presentan graves problemas geotécnicos asociados a su alta plasticidad y sensibilidad a la humedad.

En este marco, el penetrómetro cónico, regulado por la Norma BS 1377-2:1990 (actualizada en 2022), ha ganado aceptación internacional como alternativa al método de Casagrande. Karakan (2023) estableció correlaciones robustas $Plc = 0.7407 \times F_{lc} - 1.40$ con $R^2 = 0.96$ para 125 especímenes, validando el gráfico de plasticidad de Vardanega et al. (2022). Shimobe y Spagnoli (2020) analizaron más de 500 datos estableciendo relaciones empíricas útiles para estimación geotécnica preliminar.

En regiones costeras como Portoviejo, la obtención rápida de parámetros de consistencia resulta crítica para diseño de cimentaciones y análisis de vulnerabilidad sísmica. Zambrano-Rendón et al. (2021) caracterizaron suelos de Calceta, Manabí, identificando contenidos de finos entre 45% y 96%, clasificados como CL, ML y MH. La heterogeneidad geotécnica regional requiere métodos que minimicen variabilidad operatoria y faciliten caracterización de mayor densidad espacial.

Por tanto, este estudio se justifica en la necesidad de validar métodos alternativos en suelos costeros ecuatorianos, cuyas condiciones

climáticas, mineralógicas y de humedad difieren de aquellas regiones donde se desarrollaron las correlaciones internacionales. Las actualizaciones de las normas ASTM D4318-22 (2023) y BS 1377-2:2022 (2022) reconocen la validez del método de cono de caída, pero enfatizan la necesidad de calibración local para contextos geológicos específicos.

Ante este panorama, surge la siguiente interrogante de investigación: ¿Qué correlación existe entre el método tradicional de Copa de Casagrande y el método del penetrómetro cónico para la determinación de los límites de Atterberg en suelos representativos de la ciudad de Portoviejo, Ecuador, ¿y cuál es el grado de confiabilidad del método alternativo para su aplicación en la práctica geotécnica local?

En consecuencia, el objetivo de este estudio fue evaluar la viabilidad y exactitud del método del penetrómetro cónico para la determinación de los límites de Atterberg en suelos representativos de la ciudad de Portoviejo, mediante un diseño experimental que compare y calibre lecturas del penetrómetro frente a ensayos estándar de laboratorio, generando curvas de correlación locales que permitan estimar incertidumbres y proponer procedimientos normalizados de uso en la práctica geotécnica de la región costera ecuatoriana.

MATERIALES Y MÉTODO

La metodología de este estudio se desarrolló orientado en un enfoque cuantitativo experimental, orientado a la medición objetiva de propiedades físicas del suelo mediante procedimientos estandarizados de laboratorio. El tipo de estudio corresponde a una investigación correlacional comparativa, cuyo propósito fue establecer relaciones estadísticas entre dos métodos de determinación de límites de consistencia: el método tradicional de Copa de Casagrande y el método alternativo del penetrómetro cónico. El diseño experimental de laboratorio permitió controlar variables externas y garantizar condiciones reproducibles para la comparación sistemática de ambos métodos en muestras de suelo representativas de la zona de estudio.

En cuanto al área de intervención se localizó en la calle La Rotaria, ciudad de Portoviejo, provincia de Manabí, Ecuador, con coordenadas geográficas -1.030475, -80.476611. Este sitio fue seleccionado estratégicamente en base al conocimiento previo de la existencia de depósitos de suelo natural fino característicos de las formaciones aluviales de la región costera ecuatoriana.

La extracción de muestras se realizó mediante excavación de una calicata con dimensiones de 1.0 m × 1.0 m y profundidad de 0.50 m, siguiendo los lineamientos establecidos en la norma ASTM D1587 para muestreo de suelos con fines geotécnicos. Se recolectaron

muestras alteradas representativas del perfil de suelo, asegurando en todo momento que las porciones seleccionadas fueran representativas del terreno a caracterizar. Las muestras destinadas a la determinación de contenido de humedad, límites de consistencia y análisis granulométrico se almacenaron en bolsas de plástico herméticas selladas para preservar sus propiedades naturales y contenido de humedad in situ. Por otro lado, las muestras destinadas a ensayos de compactación y resistencia fueron sometidas a proceso de secado bajo exposición solar directa durante aproximadamente siete días para reducir su contenido de humedad antes del procesamiento posterior.

La determinación del límite líquido mediante el método de Copa de Casagrande se ejecutó siguiendo estrictamente los lineamientos establecidos en la norma ASTM D4318-22. Se utilizaron aproximadamente 100 gramos de material previamente tamizado por malla N° 40 (abertura 0.425 mm), el cual se mezcló uniformemente con agua destilada hasta obtener una pasta homogénea. La muestra preparada se colocó en la cazuela de bronce del dispositivo Casagrande, distribuyéndola uniformemente en una capa de espesor aproximado de 1 cm.

Posteriormente, se ejecutó una ranura en el centro de la muestra utilizando el ranurador estandarizado, dividiendo el material en dos mitades. La cazuela se sometió a golpeo mediante giros de la manivela a velocidad aproximada de dos revoluciones por segundo,

contabilizando el número de golpes necesarios para que ambas mitades de la muestra entraran en contacto en una longitud aproximada de 13 a 14 mm.

Una vez alcanzado este criterio, se extrajo una porción representativa de la zona de cierre y se transfirió a un recipiente tarado para determinación de contenido de humedad. La muestra se secó en horno a temperatura de $110 \pm 5^\circ\text{C}$ hasta alcanzar masa constante, registrándose posteriormente el contenido de humedad correspondiente al número de golpes aplicados. Este procedimiento se repitió al menos tres veces con diferentes contenidos de humedad, ajustando la consistencia de la muestra mediante adición controlada de agua destilada. Los pares de valores (número de golpes, contenido de humedad) se graficaron en escala semilogarítmica, representando en el eje X el logaritmo del número de golpes y en el eje Y los porcentajes de humedad. Se ajustó una línea recta a los puntos experimentales mediante análisis de regresión, determinando el límite líquido como el contenido de humedad correspondiente a 25 golpes en la curva de fluidez.

Para la determinación del límite líquido mediante penetrómetro cónico, fue necesario construir el equipo de acuerdo con las especificaciones establecidas en la norma BS 1377-2:1990, dado que el Laboratorio del Consejo Provincial de Manabí no disponía del dispositivo comercial. El penetrómetro

construido consistió en un cono metálico de acero inoxidable con ángulo de 30° , masa de 80 g y mecanismo de liberación controlado que permite la caída libre durante 5 segundos. Se prepararon aproximadamente 300 gramos de suelo tamizado por malla N° 40 y se colocaron en cápsulas de mezclado cilíndricas de 55 mm de diámetro interno y 40 mm de altura.

El material se mezcló uniformemente durante un período de 10 minutos utilizando espátula metálica, añadiendo agua destilada en cantidad tal que la primera lectura del ensayo estuviera próxima a los 4 mm de penetración. Una porción del suelo preparado se transfirió cuidadosamente a la cápsula de ensayo con ayuda de espátula, asegurando la eliminación de burbujas de aire mediante compactación ligera. La superficie se alisó meticulosamente hasta obtener una apariencia plana y homogénea.

Con la muestra posicionada bajo el penetrómetro, se ajustó la altura del dispositivo de manera que solamente la punta del cono entrara en contacto con la superficie del suelo, verificándose mediante ligeros movimientos laterales de la cápsula que generaron pequeñas marcas superficiales. Se ajustó el micrómetro a lectura cero, se liberó el mecanismo de caída permitiendo que el cono penetrara libremente durante exactamente 5 segundos bajo su propio peso, y se registró la lectura final del micrómetro, calculando la penetración como la diferencia entre valores inicial y final.

Este procedimiento se repitió al menos dos veces en ubicaciones diferentes de la misma muestra. Cuando la variación entre la primera y segunda lectura fue inferior a 0.5 mm, se consideró como valor de penetración el promedio de ambas mediciones. Si la diferencia se encontró entre 0.5 mm y 1.0 mm, se ejecutó una tercera prueba, adoptando el promedio de las tres lecturas siempre que la discrepancia máxima no superara 1.0 mm. En caso de diferencias superiores a 1.0 mm, se descartaron los resultados y se repitió el procedimiento completo con nueva porción de muestra.

Después de determinar la penetración del cono, se extrajo una muestra de aproximadamente 10 gramos del área penetrada para determinación de contenido de humedad mediante secado en horno. El proceso completo se repitió al menos tres veces utilizando la misma muestra de suelo, pero variando su contenido de humedad mediante adición controlada de agua destilada, procurando obtener valores de penetración distribuidos en el rango de 3 mm a 15 mm. Los pares de valores (penetración del cono, contenido de humedad) se graficaron en escala lineal, ajustando una línea recta mediante regresión lineal y determinando el límite líquido como el contenido de humedad correspondiente a una penetración de 20 mm, según lo establecido en la norma BS 1377-2:1990.

Complementariamente, se realizó el análisis granulométrico conforme a la norma ASTM D6913/D6913M-17 para caracterizar la distribución de partículas del suelo mediante

tamizado en húmedo. Los datos experimentales obtenidos de ambos métodos fueron procesados mediante análisis de regresión lineal, estableciendo relaciones funcionales entre los valores de límite líquido determinados por el método de Casagrande (variable dependiente) y los valores obtenidos mediante penetrómetro cónico (variable independiente). Se calculó el coeficiente de determinación (R^2) como medida de bondad de ajuste del modelo de regresión, permitiendo cuantificar la proporción de variabilidad en los resultados de Casagrande que puede explicarse a partir de las mediciones del penetrómetro cónico. Adicionalmente, se determinaron los parámetros de la ecuación de regresión lineal (pendiente e intercepto) con sus respectivos intervalos de confianza al 95%, evaluando la significancia estadística de la correlación mediante pruebas de hipótesis estándar.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En esta sección se presentan los resultados del estudio correspondiente a la evaluación de la viabilidad y exactitud del método del penetrómetro cónico para la determinación de los límites de Atterberg en suelos representativos de la ciudad de Portoviejo, Ecuador.

Contenido de humedad natural

Como punto de partida, el contenido de humedad natural en tres tramos de análisis designados como 0+000–1+000 m, 1+000–2+000

m y 2+000–3+000 m, mediante excavación de calicatas de 1.0 m × 1.0 m y 0.50 m de profundidad en cada ubicación. Los valores obtenidos fueron 13.00%, 12.51% y 12.97% respectivamente, sin diferencias significativas entre tramos, lo que evidencia homogeneidad en las condiciones de saturación del perfil superficial del suelo en la zona de estudio.

Complementariamente, el análisis granulométrico reveló un predominio de fracciones finas, con más del 80% de las partículas pasando el tamiz N° 200. Este resultado confirma la naturaleza arcillosa del suelo, coherente con los depósitos aluviales costeros característicos de la región.

Límites de consistencia

Se determinaron los límites de Atterberg en 15 puntos de muestreo distribuidos en tres tramos (A1-A5, B1-B5, C1-C5), obteniéndose los resultados presentados en la Tabla 1. Los valores de límite líquido (LL) oscilaron entre 43.27% y 54.07%, con media de 46.17% y desviación estándar de 2.89%. El límite plástico (LP) presentó rango de 15.65% a 30.16%, con media de 23.82% y desviación estándar de 3.51%. El índice de plasticidad (IP) calculado como la diferencia entre LL y LP varió entre 14.92 y 28.84, con valor medio de 22.35 y desviación estándar de 4.02.

Tabla 1. Resultados de límites de Atterberg mediante método de Casagrande

Muestra	LL (%)	LP (%)	IP (%)
A1	45.68	27.11	18.57
A2	44.97	26.98	17.99
A3	44.49	15.65	28.84
A4	46.01	23.72	22.28
A5	45.08	30.16	14.92
B1	46.27	26.13	20.13
B2	54.07	25.45	28.62
B3	43.27	22.79	20.48
B4	53.38	26.93	26.44
B5	44.77	18.27	26.50
C1	45.26	23.58	21.68
C2	46.31	24.81	21.51
C3	46.69	23.61	23.08
C4	45.38	21.63	23.74
C5	44.01	22.45	21.56

Estos resultados reflejan una variabilidad moderada en los valores de consistencia, atribuible a diferencias locales en mineralogía y contenido de finos. La presencia de IP superiores a 25 en varias muestras sugiere una plasticidad significativa, lo cual tiene implicaciones directas en la estabilidad volumétrica y comportamiento mecánico del suelo.

Clasificación geotécnica del suelo

A partir de los límites de Atterberg determinados y la distribución granulométrica, se procedió a clasificar las muestras según el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS) y el sistema de clasificación de la American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO), presentándose los resultados en la Tabla 2.

Tabla 2. Clasificación del suelo según SUCS y AASHTO

Muestra	Clasificación SUCS	Clasificación AASHTO	Índice de Grupo
A1	CL	A-7-6	14
A2	CL	A-7-6	13
A3	CL	A-7-6	18
A4	CL	A-7-6	17
A5	ML	A-7-6	12
B1	CL	A-7-6	15
B2	CH	A-7-6	29
B3	CL	A-7-6	10
B4	CH	A-7-6	29
B5	CL	A-7-6	12
C1	CL	A-7-6	14
C2	CL	A-7-6	16
C3	CL	A-7-6	16
C4	CL	A-7-6	15
C5	CL	A-7-6	12

La clasificación predominante según SUCS fue CL (arcilla de baja plasticidad), presente en 13 de las 15 muestras. Se identificó además una muestra como ML (limo de baja plasticidad) y otra como CH (arcilla de alta plasticidad). En cuanto al sistema AASHTO, todas las muestras fueron clasificadas como A-7-6, lo que indica suelos arcillosos de baja calidad para uso como subrasante sin tratamiento.

Los valores del índice de grupo calculados oscilaron entre 10 y 29, con media de 16.13, confirmando la calidad deficiente del material para uso como subrasante sin tratamiento previo.

La Figura 1 presenta la ubicación de las muestras en la Carta de Plasticidad de Casagrande, donde se observa que la mayoría de los puntos se posicionan por encima de la Línea A, en la zona correspondiente a arcillas, con dos muestras ubicadas en la zona de transición entre arcillas de baja y alta plasticidad.

Figura 1: Carta de Plasticidad de Casagrande mostrando la ubicación de las 15 muestras analizadas. La mayoría de los puntos se posicionan en la zona CL (arcillas de baja plasticidad), con dos muestras en la zona CH (arcillas de alta plasticidad).

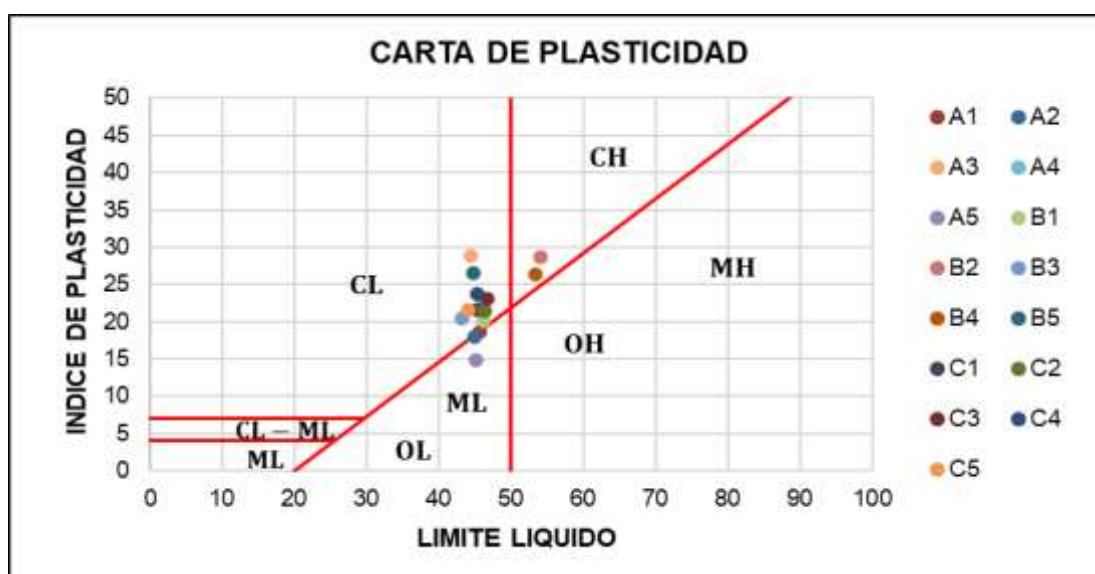


Figura 1. Carta de Plasticidad para las 15 muestras analizadas

Comparación entre método de Casagrande y Penetrómetro Cónico

Para evaluar la correlación entre ambos métodos de determinación del límite líquido, se realizó una comparación directa de los valores obtenidos en las 15 muestras analizadas. Los resultados se presentan en la Tabla 3, donde se detallan los valores de límite líquido obtenidos mediante el método de Casagrande, las penetraciones registradas con el penetrómetro cónico, los valores correspondientes de límite líquido estimados por este último método, y la diferencia porcentual entre ambos.

Tabla 3. Comparación de valores de límite líquido: Casagrande vs. Penetrómetro Cónico

Muestra	Número de Golpes	LL Casagrande (%)	Penetración (mm)	LL Penetrómetro (%)	Diferencia (%)
A1	19	45.68	20	32.50	13.18
A2	25	44.97	20	32.87	12.10
A3	31	44.49	20	32.39	12.10
A4	18	46.01	20	33.19	12.82
A5	26	45.08	20	32.62	12.46
A6	16	46.27	20	32.26	14.01
A7	23	54.07	20	34.91	19.16
A8	33	43.27	20	32.51	10.76
A9	19	53.38	20	34.61	18.77
A10	29	44.77	20	32.51	12.26
A11	25	45.26	20	32.68	12.58
A12	16	46.31	20	32.35	13.96
A13	21	46.69	20	31.61	15.08
A14	22	45.38	20	32.41	12.97
A15	25	44.01	20	32.70	11.31

Los valores obtenidos mediante el método de Casagrande oscilaron entre 43.27% y 54.07%, mientras que los valores derivados del penetrómetro cónico se ubicaron en un rango más estrecho, entre 31.61% y 34.91%. La diferencia absoluta entre métodos varió entre 10.36 y 19.16 puntos porcentuales, con una media de 13.53 y desviación estándar de 2.28.

Este comportamiento representa una subestimación promedio del 29.3% por parte del método del penetrómetro cónico respecto al método tradicional, lo que evidencia la necesidad de calibración local para su aplicación en contextos geotécnicos específicos.

A continuación, para visualizar la relación entre ambos métodos, se presenta en la Figura 2.

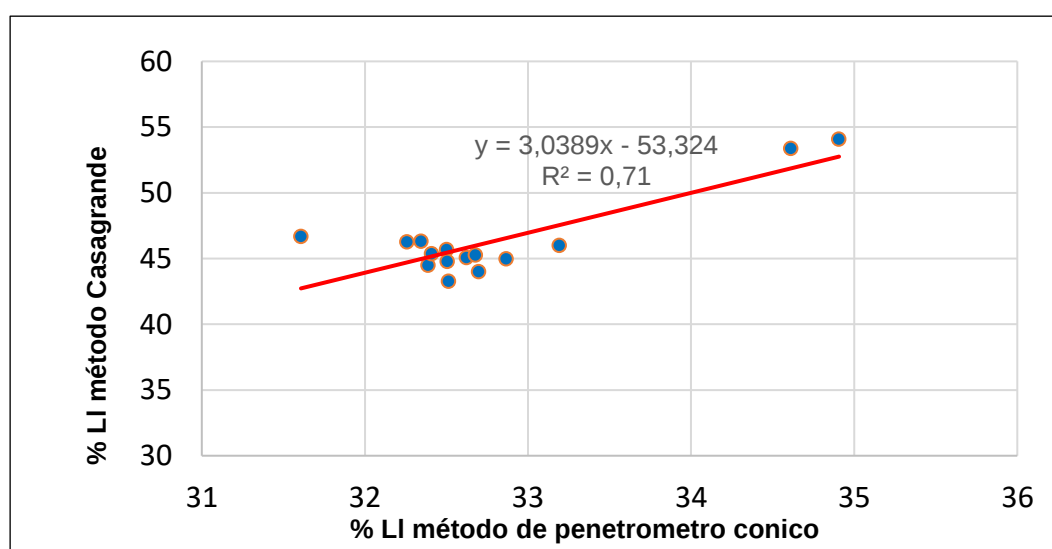


Figura 2. Gráfico de correlación entre límite líquido determinado por método de Casagrande (eje Y) y método de penetrómetro cónico (eje X)

La línea de regresión lineal muestra ecuación $LL_{Casa} = 3.0389 \times LL_{Cono} - 53.324$ con $R^2 = 0.7072$.

El análisis de regresión lineal entre ambos métodos, presentado en la Figura 2, reveló una relación positiva significativa descrita por la ecuación $LL_{Casagrande} = 3.0389 \times LL_{Penetrómetro} - 53.324$, con coeficiente de determinación $R^2 = 0.7072$. Este valor indica que aproximadamente el 71% de la variabilidad observada en los resultados del método de Casagrande puede explicarse mediante la relación lineal con los valores obtenidos por el penetrómetro cónico, evidenciando una

correlación moderada-alta entre ambos métodos.

DISCUSIÓN

Los resultados del estudio confirman diferencias sistemáticas entre ambos métodos, con Casagrande arrojando valores 10 a 15 puntos porcentuales superiores. Esta diferencia es congruente con literatura internacional: Ullah (2024) documentó desviaciones de -10% a +7% en Bangladesh, mientras Jagodnik y Marušić

(2023) reportaron tendencias similares en Croacia.

Esta diferencia se explica por fundamentos físicos distintos. Casagrande mide resistencia al corte dinámico con impactos repetidos, introduciendo variabilidad operadora. El penetrómetro mide penetración estática bajo peso constante, eliminando variabilidad humana. O'Kelly et al. (2022) argumentan que el cono presenta repetibilidad y reproducibilidad superiores.

El $R^2 = 0.71$ indica correlación moderada-alta, sugiriendo que el penetrómetro es alternativa confiable aplicando la ecuación de conversión local. Este valor es comparable con estudios internacionales como el de Karakan (2023) obtuvo $R^2 = 0.96$ para 125 especímenes, y Shimobe y Spagnoli (2020) analizaron más de 500 datos estableciendo relaciones empíricas útiles.

Por otro lado, la sobreestimación de Casagrande se atribuye a factores metodológicos: el mecanismo de falla por corte depende de energía transferida, que varía según mantenimiento del equipo y técnica del operador. Malki et al. (2024) documentaron que Casagrande produce valores más dispersos que el cono, particularmente con diferentes operadores.

En suelos ecuatorianos costeros, estos resultados son consistentes con literatura regional. Velásquez-Chávez y Véliz-Rivadeneira (2024) identificaron en Portoviejo límites líquidos de 54.95%, valor en el extremo superior del

rango de este estudio. Pin Ponce y Ortiz Hernández (2024) documentaron características similares en El Carmen, Manabí. Zambrano-Rendón et al. (2021) caracterizaron suelos de Calceta con clasificación predominante CL, coincidiendo con este estudio.

La aplicabilidad del penetrómetro requiere considerar factores mineralógicos específicos. Silva et al. (2021) establecieron que suelos tropicales presentan características distintivas que afectan la interpretación de límites de Atterberg. Kumar y Sharma (2021) documentaron que diferentes minerales arcillosos producen respuestas diferentes, sugiriendo considerar la mineralogía en la interpretación.

Las implicaciones prácticas son significativas. La ecuación $LL_{\text{Casagrande}} = 3.0389 \times LL_{\text{Penetrómetro}} - 53.324$ permite convertir lecturas del penetrómetro a valores equivalentes de Casagrande, manteniendo compatibilidad con especificaciones tradicionales. El penetrómetro reduce tiempo de ensayo, disminuye variabilidad entre operadores y facilita caracterización de mayor densidad espacial, crítico para proyectos que requieren evaluación de extensas áreas.

Deben reconocerse limitaciones del presente estudio. Las 15 muestras representan una caracterización inicial que requiere ampliación para capturar heterogeneidad espacial regional. La calibración se realizó en suelos CL, requiriendo validación para otros tipos como limos de alta plasticidad o arcillas orgánicas. Albuja-Sánchez (2021) documentó que los límites de Atterberg

muestran resultados erráticos en suelos orgánicos de Quito.

Las actualizaciones ASTM D4318-22 (2023) y BS 1377-2:2022 (2022) reconocen formalmente la validez del método de cono de caída. Vardanega et al. (2022) propusieron un nuevo gráfico de plasticidad validado por múltiples estudios. Zhou et al. (2023) desarrollaron sistemas automatizados con análisis de imagen digital que mejoran repetibilidad con mayor velocidad. La implementación en laboratorios ecuatorianos podría representar avances significativos en estandarización y reducción de incertidumbres.

CONCLUSIONES

Este estudio estableció una correlación cuantitativa entre el método tradicional de Copa de Casagrande y el método alternativo del penetrómetro cónico para la determinación de límites de Atterberg en suelos arcillosos representativos de la ciudad de Portoviejo, Ecuador. Los hallazgos demuestran que, si bien los métodos producen valores numéricos diferentes, mantienen una relación proporcional estadísticamente significativa que permite la conversión entre resultados mediante ecuación de regresión específica para el contexto geológico local.

La interrogante de investigación planteada ha sido respondida satisfactoriamente, estableciéndose que existe una correlación moderada-alta entre ambos métodos con

coeficiente de determinación de 0.71, lo cual indica que aproximadamente el setenta por ciento de la variabilidad observada en los resultados de Casagrande puede explicarse mediante la relación lineal con los valores del penetrómetro cónico. Esta correlación, si bien no perfecta, es suficientemente robusta para propósitos de caracterización geotécnica preliminar y clasificación de suelos.

Mediante el diseño experimental ejecutado, el objetivo de evaluar la viabilidad y exactitud del penetrómetro cónico como método alternativo se ha cumplido, ya que permitió comparar sistemáticamente ambos métodos en condiciones controladas de laboratorio. Los resultados confirman la viabilidad técnica del penetrómetro cónico para suelos arcillosos de la región costera ecuatoriana, con ventajas significativas en términos de reducción de variabilidad asociada al operador, disminución de tiempos de ensayo y facilitación de campañas de caracterización de mayor densidad espacial.

En cuanto a las implicaciones teóricas de este estudio contribuyen al entendimiento de las diferencias metodológicas entre técnicas dinámicas (Casagrande) y estáticas (penetrómetro cónico) para caracterización de consistencia de suelos finos. La diferencia sistemática de 10 a 15 puntos porcentuales observada responde a fundamentos físicos distintos y no a deficiencias inherentes de alguno de los métodos, requiriendo calibración específica para cada contexto geológico y mineralógico.

Desde una perspectiva práctica, los hallazgos de esta investigación proporcionan a los profesionales geotécnicos de la región una herramienta de conversión validada localmente que permite interpretar resultados de penetrómetro cónico en el contexto de especificaciones técnicas tradicionales basadas en el método de Casagrande. La ecuación de correlación determinada puede implementarse directamente en laboratorios para agilizar procesos de caracterización, particularmente en proyectos de infraestructura vial que requieren evaluación geotécnica de extensos corredores longitudinales.

Se recomienda a los laboratorios de mecánica de suelos de la región costera ecuatoriana considerar la incorporación del penetrómetro cónico como método complementario al tradicional de Casagrande, particularmente para fases preliminares de caracterización que requieren procesamiento de grandes volúmenes de muestras. La implementación debe acompañarse de programas de capacitación en la técnica apropiada de ensayo y calibración periódica del equipo conforme a especificaciones normativas internacionales.

Para proyectos de diseño final donde se requiere máxima precisión en la determinación de parámetros geotécnicos, se sugiere mantener el método de Casagrande como referencia primaria, utilizando el penetrómetro cónico para verificación y control de calidad. Esta aproximación híbrida permite aprovechar las

ventajas de rapidez y reproducibilidad del método de cono manteniendo trazabilidad con el método estandarizado tradicional.

Las líneas de investigación futuras identificadas incluyen la extensión de la calibración a otros tipos de suelos presentes en Ecuador, particularmente limos de alta plasticidad, arcillas orgánicas y suelos residuales de formaciones volcánicas características de la región andina. Adicionalmente, se requiere investigación sobre la influencia de variables mineralógicas específicas en las correlaciones entre métodos, así como la evaluación de tecnologías automatizadas con análisis de imagen digital para reducir aún más la variabilidad operadora y mejorar la eficiencia de los ensayos de caracterización geotécnica.

REFERENCIAS

- American Society for Testing and Materials. (2023). ASTM D4318-22: Standard test methods for liquid limit, plastic limit, and plasticity index of soils. ASTM International. <https://www.astm.org/d4318-22.html>
- American Society for Testing and Materials. (2017). ASTM D6913/D6913M-17: Standard test methods for particle-size distribution (gradation) of soils using sieve analysis. ASTM International. https://www.astm.org/d6913_d6913m-17.html
- Albujá-Sánchez, J. D. (2021). Determination of the undrained shear strength of organic soils using the cone penetration test and Marchetti's flat dilatometer test. En T. Huzák, A. Mahler, y E. Koch (Eds.), Proceedings of the 6th International Conference on Geotechnical and Geophysical Site Characterization (pp. 528-537). ISSMGE.

- <https://www.issmge.org/uploads/publications/25/111/ISC2020-528.pdf>
- British Standards Institution. (2022). BS 1377-2:2022: Methods of test for soils for civil engineering purposes. Classification tests. BSI Standards. <https://www.bsigroup.com/en-GB/>
- Font, R. G. (2005). Atterberg limits and indices. In R. G. Font (Ed.), *Encyclopedia of Earth Sciences Series* (pp. 25–27). Springer. https://link.springer.com/rwe/10.1007/0-387-30842-3_4
- Jagodnik, V., y Marušić, D. (2023). Determination of the Atterberg limits using a fall cone device on low plasticity silty sands. *Rudarsko-Geološko-Naftni Zbornik*, 38(3), 53-67. <https://hrcak.srce.hr/ojs/index.php/rgn/article/view/26526>
- Karakan, E. (2023). Flow index-liquid limit relationship by fall-cone tests in clay-sand mixtures. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 42, 101481. <https://doi.org/10.1016/j.jestch.2023.101481>
- Kumar, S., y Sharma, K. K. (2021). Influence of clay mineralogy on Atterberg limits and classification of fine-grained soils. *Clay Minerals*, 56(2), 112-125. <https://doi.org/10.1180/clm.2021.18>
- Malki, M., Benaissa, A., y Nechnech, A. (2024). Liquid limit determination of medium to high plasticity Algerian soils using fall-cone vs Casagrande percussion cup methods. *Acta Geotechnica et Geophysica*, 59(1), 1-17. https://www.irms.cas.cz/materialy/acta_content/2024_doi/Malki_AGG_2024_0001_0001.pdf
- O'Kelly, B. C., Vardanega, P. J., y Haigh, S. K. (2022). Discussion of "Mohajerani method: Tool for determining the liquid limit of soils using fall cone test results with strong correlation with the Casagrande test". *Engineering Geology*, 302, 106623. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2022.106623>
- Othman, M. M., Hen-Jones, R., Zapata, C., Jiménez, E., De Luca, F., Holcombe, E. A., y Vardanega, P. J. (2023). Geotechnical variability of the soils of Quito, Ecuador: A geodatabase study. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 82, 433-454. <https://doi.org/10.1007/s10064-023-03438-3>
- Pin Ponce, J., y Ortiz Hernández, E. (2024). Estabilización de suelos arcillosos con el empleo de cal. *Dominio de las Ciencias*, 10(1), 771-789. <https://doi.org/10.23857/dc.v10i1.3741>
- Shimobe, S., y Spagnoli, G. (2020). Fall cone tests considering water content, cone penetration index, and plasticity angle of fine-grained soils. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 12(5), 1078-1087. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2020.02.005>
- Silva, M. F., Guimarães, L. J. N., y Azevedo, R. F. (2021). Correlation between Atterberg limits and undrained shear strength of tropical soils. *Soils and Rocks*, 44(2), e2021060820. <https://doi.org/10.28927/SR.2021.060820>
- Ullah, A. (2024). Determination of liquid limit and plastic limit of clays using cone penetrometer [Tesis de maestría, Bangladesh University of Engineering and Technology]. BUET Institutional Repository. <http://lib.buet.ac.bd:8080/xmlui/handle/123456789/7175>
- Vardanega, P. J., Hickey, C. J., y Rezania, M. (2022). A modified geotechnical classification chart for fine-grained soils using fall-cone test results. *Géotechnique Letters*, 12(2), 124-131. <https://doi.org/10.1680/jgele.21.00150>
- Velásquez-Chávez, P. D., y Véliz-Rivadeneira, J. M. (2024). Estabilización de suelo arcilloso con el empleo de cal y cemento para el mejoramiento de la subrasante. *Revista InGeniar*, 8(15), 136-148. <https://doi.org/10.46296/ig.v8i15.0249>
- Zambrano-Rendón, V. A., Ortiz-Hernández, E. H., y Alcívar-Moreira, W. S. (2021). Caracterización geotécnica de los suelos de la ciudad de Calceta en la provincia de Manabí. *Polo del Conocimiento*, 6(8), 1018-1043. <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/8042612.pdf>
- Zhou, Y., Wang, H., y Zhang, L. (2023). Automated Atterberg limits testing using a modified fall cone apparatus with digital image analysis. *Geotechnical Testing Journal*, 46(4), 891-907. <https://doi.org/10.1520/GTJ20220145>