



UNIVERSIDAD CATÓLICA
de Colombia

**CORRELACIONES DE CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA EN SUELOS
BLANDOS CON ENSAYOS CPTU Y SPT: CASO DE SUELOS ARCILLOSOS
DEL OCCIDENTE DE BOGOTÁ**

PRESENTADO POR:
LAURA DANIELA FIGUEROA DIAZ

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL
BOGOTÁ D.C.
2021



UNIVERSIDAD CATÓLICA
de Colombia

**CORRELACIONES DE CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA EN SUELOS
BLANDOS CON ENSAYOS CPTU Y SPT: CASO DE SUELOS ARCILLOSOS
DEL OCCIDENTE DE BOGOTÁ**

PRESENTADO POR:

LAURA DANIELA FIGUEROA DIAZ

Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Civil
Modalidad: Trabajo de Investigación

DIRECTOR:

CAMILO ERNESTO HERRERA CANO
INGENIERO CIVIL MSc

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL
BOGOTÁ D.C.
2021



Atribución-NoComercial-SinDerivadas 4.0 Internacional (CC BY-NC-ND 4.0)

This is a human-readable summary of (and not a substitute for) the [license](#). [Advertencia](#).

Usted es libre de:

Compartir — copiar y redistribuir el material en cualquier medio o formato

La licenciente no puede revocar estas libertades en tanto usted siga los términos de la licencia

Bajo los siguientes términos:



Atribución — Usted debe dar [crédito de manera adecuada](#), brindar un enlace a la licencia, e [indicar si se han realizado cambios](#). Puede hacerlo en cualquier forma razonable, pero no de forma tal que sugiera que usted o su uso tienen el apoyo de la licenciente.



NoComercial — Usted no puede hacer uso del material con [propósitos comerciales](#).



SinDerivadas — Si [remezcla, transforma o crea a partir](#) del material, no podrá distribuir el material modificado.

No hay restricciones adicionales — No puede aplicar términos legales ni [medidas tecnológicas que restrinjan legalmente a otras a hacer cualquier uso permitido por la licencia](#).

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/deed.es>

NOTA DE ACEPTACIÓN:

FIRMA DEL PRESIDENTE DEL JURADO

FIRMA JURADO

FIRMA JURADO

BOGOTÁ D.C.

DEDICATORIA

A mis padres, Ulises Figueroa y Yolanda Diaz, por sus sacrificios y esfuerzos he logrado lo que con ansias esperaba. Porque han creído en mí y me han enseñado el valor del trabajo y la constancia.

A mi abuelo, a mis hermanas y hermanos, que me han brindado su apoyo y siempre han estado para mí.

A todos, por su amor, unión y confianza.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a Dios en primer lugar, por guiarme siempre por el camino correcto.

*Agradezco al Ingeniero Camilo Ernesto Herrera Cano por brindarme su apoyo y
sabiduría durante el transcurso de este proyecto.*

*Agradezco a quienes me han acompañado a lo largo de esta etapa mientras
permanecí ensimismada días y noches.*

CONTENIDO

LISTA DE ABREVIATURAS.....	14
RESUMEN.....	15
INTRODUCCIÓN.....	17
1 GENERALIDADES	19
1.1 ANTECEDENTES	19
1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	21
1.2.1 Descripción del problema	21
1.2.2 Formulación del problema	22
1.3 OBJETIVOS.....	23
1.3.1 Objetivo general.	23
1.3.2 Objetivos específicos.....	23
1.4 JUSTIFICACIÓN	24
1.5 DELIMITACIÓN.....	25
1.5.1 Espacio.....	25
1.5.2 Tiempo.....	25
1.5.3 Contenido	25
1.5.4 Alcance.....	25
1.6 ESTADO DEL ARTE	26
1.7 MARCO REFERENCIAL.....	31
1.7.1 Marco teórico.....	31
1.7.2 Marco conceptual	43
1.7.3 Marco legal.....	51
1.8 METODOLOGÍA	52
1.8.1 Interpretación de la práctica del ensayo CPTu	53

1.8.2	Recopilación de información.....	53
1.8.3	Geolocalización de ensayos	55
1.8.4	Identificación de los ensayos.....	59
2	RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS	70
3	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	81
3.1	CONCLUSIONES	81
3.2	RECOMENDACIONES	83
4	BIBLIOGRAFÍA	84
	ANEXOS	87

LISTA DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1. Detalle de valores extremos descartados en el análisis.	26
Ilustración 2. Mecanismo de golpeo SPT.	32
Ilustración 3. Muestreador estándar de cuchara partida.....	33
Ilustración 4. Representación esquemática del penetrómetro de cono.	38
Ilustración 5. Comparación entre SBT no normalizado y SBTn normalizado de R_f.	41
Ilustración 6. Sección transversal de un depósito fluvial.	44
Ilustración 7. Falla por corte general.	49
Ilustración 8. Falla por punzonamiento.	50
Ilustración 9. Falla por corte local.	50
Ilustración 10. Diagrama de flujo de metodología.	52
Ilustración 11. Geolocalización ensayos CPTu y SPT en ArcGIS 10.6.....	56
Ilustración 12. Geolocalización ensayos SPT y CPTu en zona llanura B	57
Ilustración 13. Geolocalización ensayos SPT y CPTu en zona aluvial.....	58
Ilustración 14. Geolocalización ensayos SPT y CPTu en zonas lacustre A y B	58
Ilustración 15. Parámetros normalizados CPTu.....	68
Ilustración 16. Información obtenida a través de la encuesta.	70

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Corrección del muestreador.....	35
Tabla 2. Corrección de la longitud de la varilla.	35
Tabla 3. Correlación N con Dr.....	36
Tabla 4. Consistencia aproximada según el valor N y la cohesión no drenada en arcillas.	37
Tabla 5. Propuesta unificación de clasificación entre las 12 zonas SBT y las 9 zonas del SBTn.	42
Tabla 6. Ensayos In situ.	48
Tabla 7. Estimación de ensayos a correlacionar en la zona llanura B.....	59
Tabla 8. Estimación de ensayos a correlacionar en la zona aluvial.	60
Tabla 9. Estimación de ensayos a correlacionar en la zona lacustre A.....	60
Tabla 10. Estimación de ensayos a correlacionar en la zona lacustre B.....	61
Tabla 11. Estimación de ensayos a correlacionar en la zona aluvial.	61
Tabla 12. Confrontación ensayos SPT-07 y CPTu-02 zona aluvial.	62
Tabla 13. Confrontación ensayos SPT-47 y CPTu-06 zona lacustre A.....	63
Tabla 14. Información estadística zona llanura B.	71
Tabla 15. Información estadística zona aluvial.	73
Tabla 16. Información estadística zona lacustre A.	75
Tabla 17. Información estadística zona lacustre B.	76
Tabla 18. Información estadística suelos arcillosos de Bogotá.	78

LISTA DE GRÁFICAS

Gráfica 1. Relación cohesión en función del número de golpes SPT.	27
Gráfica 2. Relación entre la resistencia de la punta del cono y la velocidad de la onda de corte.	28
Gráfica 3. Relación entre G_{max} y N	29
Gráfica 4. Relación entre EPMT y N	30
Gráfica 5. Relación entre D_{50} y N	30
Gráfica 6. Variación de N con D_r	36
Gráfica 7. Primera clasificación de suelos basada en CPT para el cono mecánico de Begemann.	39
Gráfica 8. Carta de plasticidad.	46
Gráfica 9. Caracterización del IP zona llanura B.	63
Gráfica 10. Caracterización del LL zona llanura B.	64
Gráfica 11. Caracterización del IP zona aluvial.	64
Gráfica 12. Caracterización del LL zona aluvial.	65
Gráfica 13. Caracterización del IP zona lacustre A.	65
Gráfica 14. Caracterización del LL zona lacustre A.	66
Gráfica 15. Caracterización del LL zona lacustre B.	66
Gráfica 16. Caracterización del LL zona lacustre B.	67
Gráfica 17. Relación entre S_u y N	69
Gráfica 18. Desviación estándar de los datos de S_u zona llanura B.	71
Gráfica 19. Correlación zona llanura B.	72
Gráfica 20. Desviación estándar de los datos de S_u zona aluvial.	73

Gráfica 21. Correlación zona aluvial.	74
Gráfica 22. Desviación estándar de los datos de Su zona lacustre A.....	75
Gráfica 23. Correlación zona lacustre A.	76
Gráfica 24. Desviación estándar de los datos de Su zona lacustre B.....	77
Gráfica 25. Correlación zona lacustre B.	77
Gráfica 26. Desviación estándar de los datos de Su de los suelos arcillosos de Bogotá.	78
Gráfica 27. Correlación suelos arcillosos de Bogotá.	79
Gráfica 28. Comparación correlaciones (Su - N).....	80

LISTA DE ANEXOS

Anexo 1. Encuesta para conocer el estado de la práctica del CPTu.....	87
Anexo 2. Derecho de petición destinado al IDU.....	88
Anexo 3. Respuesta IDU.....	89
Anexo 4. Geolocalización ensayos SPT y CPTu zona llanura B.....	90
Anexo 5. Geolocalización ensayos SPT y CPTu zonas lacustre A y B.	90
Anexo 6. Geolocalización ensayos SPT y CPTu zona aluvial.....	91
Anexo 7. Ejemplo de confrontación en profundidad N_{45} (SPT-07) y S_u (CPTu-02).....	91
Anexo 8. Ejemplo de confrontación en profundidad N_{45} (SPT-01) y S_u (CPTu-01).....	92
Anexo 9. Ejemplo de confrontación en profundidad N_{45} (SPT-01) y S_u (CPTu-02).....	92
Anexo 10. Ejemplo de confrontación en profundidad N_{45} (SPT-05) y S_u (CPTu-01).....	92
Anexo 11. Ejemplo de confrontación en profundidad IP, LL, N_{45} (SPT-05) y S_u (CPTu-10).....	93
Anexo 12. Ejemplo de confrontación en profundidad IP, LL, N_{45} (SPT-02) y S_u (CPTu-06).....	93
Anexo 13. Ejemplo de confrontación en profundidad IP, LL, N_{45} (SPT-52) y S_u (CPTu-16).....	93
Anexo 14. Digitalización de la correlación de Hara Akio et al. (1974).	94

LISTA DE ABREVIATURAS

Símbolo	Significado
N	Resistencia a la penetración (Número de golpes SPT).
C_N	Factor de corrección por presión de confinamiento.
C_u	Cohesión no drenada en arcillas.
q_c	Resistencia por punta del cono.
q_t	Resistencia por punta corregida del cono.
u	Presión de poros.
D_r	Densidad relativa.
Q_t	Resistencia del cono normalizada.
F_r	Relación de fricción normalizada.
B_q	Relación de presión de poros.
Δu	Exceso de presión de poros.
σ_{vo}	Esfuerzo vertical total.
S_u	Resistencia al corte no drenado.
N_{kt}	Factor del cono.
P_a	Presión atmosférica.
σ'_o	Esfuerzo normal efectivo.
IP	Índice de plasticidad.
LL	Límite líquido.
$(N_1)_{60}$	Resistencia a la penetración corregida.
IGAC	Instituto Geográfico de Agustín Codazzi.
IDU	Instituto de Desarrollo Urbano.
ASTM	American Society for Testing and Materials.
INVÍAS	Instituto Nacional de Vías.
CTM-12	Sistema de proyección de coordenadas para Colombia.

RESUMEN

Caracterizar y clasificar adecuadamente el suelo cohesivo de la ciudad de Bogotá, Colombia, en el que se va a ejecutar la construcción de un proyecto de Ingeniería Civil, permite estimar y analizar las propiedades dinámicas que rigen el comportamiento del suelo cuando debe soportar cargas, debido a que la estructura se encuentra inevitablemente sujeta a los desplazamientos que actúan sobre los cimientos.

El diseño apropiado de una cimentación, que transmita las cargas que soporta de la estructura al suelo sin exceder su esfuerzo admisible en depósitos arcillosos, es complejo por la limitación de las pruebas de laboratorio y ensayos in situ convencionales que son implementados comúnmente en el distrito capital como lo es el ensayo de penetración estándar (SPT), un método poco confiable para comprender la mecánica de este tipo de suelo en su estado natural.

Por los motivos mencionados, la presente investigación se encuentra enfocada en relacionar la resistencia a la penetración (N_{45}) del SPT con la resistencia al corte no drenado (S_u) del CPTu de las zonas geotécnicas, lacustre A, lacustre B, aluvial y llanura B, que más dificultan los procesos constructivos, de modo que se determine una correlación general para el suelo arcilloso de la ciudad de Bogotá. La metodología implementada para el desarrollo de la investigación propone en primera medida conocer el estado de la práctica, mediante una encuesta, del ensayo in situ CPTu en proyectos de Ingeniería Civil realizados en la ciudad Bogotá, para interpretar el uso del ensayo en este tipo de suelo. De la base de datos del Instituto de Desarrollo Urbano (IDU) se obtuvieron los datos de información del proyecto de ampliación de la avenida ciudad de Cali al sistema Transmilenio de los ensayos SPT y CPTu, de igual manera, de la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá se obtuvo la información del proyecto de construcción del tramo 3 de la tubería Tibitoc – Casablanca para correlacionar los parámetros N_{45} en función de S_u .

La función potencial propuesta para relacionar los parámetros de cada zona geotécnica aportaba mejores resultados, sin embargo, la correlación de las variables, específicamente de las zonas lacustre y llanura B, es baja debido a la influencia del número limitado de ensayos efectuados en los sitios y, otro factor determinante de importancia es la ineficacia del método del ensayo SPT en suelos

arcillosos por la carencia del parámetro N_{45} que se evidenció en los registros. La zona aluvial arrojó una correlación estable del 85.86% por la alta cantidad de datos reportados, siendo esta la que incidió en gran medida en la correlación general del suelo cohesivo de la ciudad de Bogotá con un valor de relación del 83.66% de 113 registros de ambos parámetros, no obstante, mejorar la correlación mediante el uso de otros registros de ensayos es indispensable para asegurar un gráfico y una ecuación que representen el suelo real de la ciudad.

INTRODUCCIÓN

La geotecnia enfocada en la Ingeniería Civil es la rama que se encarga de estudiar, mediante la aplicación de los fundamentos de la mecánica de suelos, las propiedades mecánicas del terreno, como la resistencia al corte, la capacidad de soporte de carga, el origen de las partículas que lo conforman, la capacidad para drenar agua y la forma en la que este se comporta al someterse a diversos tipos de fuerzas.¹

Una adecuada caracterización y clasificación de un suelo permite conocer las propiedades hidráulicas y mecánicas, que influyen directamente en el comportamiento que desarrolla cuando le son transmitidas cargas provenientes desde la superficie por estructuras de construcción. Las pruebas in situ son un componente fundamental a implementar en el estudio de la ingeniería geotécnica para la caracterización de geomateriales, por la completa información que aportan y el alto grado de eficiencia respecto a las pruebas de laboratorio.

El ensayo de penetración de cono con medida de presión de poros (CPTu) es una prueba in situ que se realiza en la superficie del terreno por medio de la penetración de una punta cónica, la cual mide la resistencia por punta necesaria de penetración del suelo a una velocidad constante, el rozamiento lateral que ejerce dicha punta y la presión de poros, lo cual proporciona una estimación adecuada de perfiles estratigráficos. El ensayo SPT, es una de las pruebas in situ más antiguas en aplicación a nivel mundial, que consiste en la penetración, mediante golpeo, de un tomamuestras o cuchara partida a distintas profundidades desde la superficie para medir la resistencia a la penetración del suelo.

En diferentes sitios del mundo, el SPT es una prueba frecuente y básica para las investigaciones y aplicación en proyectos de Ingeniería Civil por el bajo costo que tiene al implementarla y la falta de disponibilidad de ensayos más avanzados y eficaces, sin embargo, el uso de este ensayo convencional no proporciona información confiable sobre la caracterización geotécnica y el comportamiento de los suelos cohesivos, Mayne et al (1989) cuestionan "el falso sentido de la realidad

¹ Braja.M. Das, *FUNDAMENTOS DE INGENIERÍA GEOTÉCNICA*, 2013.

en la capacidad del ingeniero geotécnico para evaluar todos y cada uno de los parámetros del suelo a partir del valor N único.”²

² Paul W Mayne et al., ‘Geomaterial Behavior and Testing’, *Proceedings of the 17th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering: The Academia and Practice of Geotechnical Engineering*, 2009.

1 GENERALIDADES

1.1 ANTECEDENTES

El libro de Jean Louis Briaud, *Ingeniería geotécnica: suelos saturados y no saturados*, establece que las pruebas in situ a lo largo de los años se han desarrollado para complementar los muestreos de laboratorio que se emplean para la caracterización de las propiedades del suelo, con la finalidad de equilibrar las técnicas de aplicación y disminuir la obtención de información no relacionada con el tipo de terreno que se encuentra en investigación. Las pruebas in situ más comúnmente utilizadas en los proyectos de Ingeniería Civil son; la prueba de penetración estándar, prueba de veleta de campo, prueba de penetración de cono y prueba del dilatómetro.³

El SPT es una de las pruebas más antiguas de la geotecnia y la más aplicada en cualquier tipo de terreno para la obtención de los parámetros mecánicos del suelo. En un principio, el ensayo era realizado manualmente por el operario, mediante la elevación y caída de un martinete acoplado a cuerdas y poleas para la estimación del número de golpes requeridos para penetrar cada 15 cm el suelo, sin embargo, estudios efectuados posteriormente indicaron que el método era poco fiable porque la energía de golpeo que se ejerce manualmente no se ajusta completamente a la energía teórica por las pérdidas derivadas de factores que influyen directamente en el proceso. Tras la ineficiencia que demostraba el método manual, se desarrollaron sistemas automáticos de elevación y caída para reducir considerablemente las pérdidas e incrementar la energía, con lo que el número de golpes N se normaliza como N_{60} por el factor de corrección de energía que debe aplicarse. Bosch y Ventayol Geoserveis, S.L. (1994), mediante la aplicación de métodos establecidos por Skempton, propusieron que el equipo SPT, instalado en máquinas Rolatec, suministraba un 75% de la energía teórica, de esta manera, la corrección a aplicar en la fórmula del N_{60} normalizado se ve reflejada en la aplicación del 75 como porcentaje de energía de golpeo obtenido a través del método automático.⁴

En el año 1932 fueron realizadas las primeras pruebas del ensayo de penetración de cono, en las cuales se utilizó un tubo de gas de 35 mm de diámetro exterior con

³Jean Louis Briaud, *Geotechnical Engineering: Unsaturated and Saturated Soils, Geotechnical Engineering*, 2013 <<https://doi.org/10.1002/9781118686195.ch7>>.

⁴ Alberth Ventayol y Carlos Fernandez, 'Medida de La Energía Del Ensayo SPT . Correcciones a Aplicar', *Geotecnia IGP*, 2011, 52–54.

varillas de empuje interior en acero de 15 mm y a las varillas se incorporó un ángulo de vértice de 60°, en el extremo inferior se encontraba una punta de cono que proyectaba un área de 10 cm² y, en el año 1935 se diseñó la primera máquina de penetración de cono, operada manualmente, por el laboratorio de mecánica de suelos de Delf. Posteriormente incluyeron un manguito de fricción en la parte trasera del cono, con la finalidad de incluir medición de la fricción y tras estudios y pruebas consideraron desarrollar un cono eléctrico que mejorara los procedimientos durante las pruebas continuas, evitando así obtener información incorrecta. Con el paso de los años, dedujeron que era necesario implementar al cono la medición de presión de poros para la exactitud de los parámetros geotécnicos, puesto que el agua es un factor que interviene en el comportamiento que va a adquirir el suelo cuando se somete a cargas superficiales.⁵

⁵ Peter.K Robertson y K.L Cabal, *GUIDE TO CONE TESTING PENETRATION*, 2015.

1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En el presente capítulo se plantea la descripción de la problemática que respecta a la inadecuada caracterización de un suelo por la carencia de información veraz obtenida mediante el empleo de pruebas geotécnicas no adecuadas.

1.2.1 Descripción del problema

La ciudad de Bogotá, D.C. de Colombia se caracteriza por ser un depósito aluvial enorme que posee a distintas profundidades, según la zona geológica, capas de suelo de arcillas, limos, arenas y rellenos por los depósitos de origen lacustre de la era cuaternaria⁶, por ende la humedad media y la densidad blanda que le caracteriza son propiedades significantes que influyen en los diseños estructurales de construcción, por lo anterior, la importancia de la práctica de ensayos in situ altamente calificados no debe despreciarse en ningún proyecto de ingeniería civil, independientemente del grado de dificultad, especialmente en este tipo de zonas que provocan inconvenientes durante la ejecución de las construcciones y generan un reto para los profesionales en el área geotécnica por el comportamiento geomecánico que desarrolla el suelo.

El alto valor que se le ha atribuido durante el transcurso de muchas décadas a la práctica de la prueba de penetración estándar, la cual es inadecuada y ambigua respecto a la evolución que han presentado otros tipos de pruebas in situ, se ve altamente reflejado en el uso universal para estudios geotécnicos requeridos previamente para el análisis de las propiedades hidráulicas y mecánicas que caracterizan el suelo y los parámetros de diseño de estructuras que deben considerarse en el área de la Ingeniería Civil y que en objeto, se debe garantizar la construcción de infraestructuras altamente estables y seguras, lo cual es poco probable si no se abandona progresivamente el uso de esta prueba estándar.

La práctica de la prueba de penetración estándar es muy frecuente en la ciudad de Bogotá por su bajo costo y facilidad de acceso por la amplia disponibilidad que hay en el país, no obstante, la técnica del ensayo, que no ha cambiado en absoluto desde hace décadas, altera y remoldea las muestras extraídas de suelos cohesivos afectando la caracterización del mismo, adicionando a esto que, todas las propiedades geomecánicas son altamente dependientes de un único valor de

⁶ Maria Castañeda, 'SUELOS ARCILLOSOS, UN RETO PARA LA URBANIZACIÓN EN BOGOTÁ', *StuDocu*, 2017, pp. 1–2 <<https://www.studocu.com/en-us/document/universidad-el-bosque/geologia-y-geomorfologia/suelo-de-bogota-caracteristicas-del-suelo-de-bogota/5827702>>.

número de golpes N que varía según la eficiencia energética del método, manual o automático, la longitud y el diámetro del tubo.

1.2.2 Formulación del problema

Durante el desarrollo de la descripción del problema, se ha formulado realizar correlaciones entre la resistencia a la penetración estándar del SPT y la resistencia al corte no drenado del CPTu de las formaciones geológicas más inestables del suelo de la ciudad de Bogotá con información obtenida a través de proyectos de infraestructura que emplearon simultáneamente los dos ensayos geotécnicos ya mencionados como estudio de suelos.

Tras la formulación ha surgido la siguiente cuestión, ¿Es posible encontrar una correlación válida de los suelos arcillosos de Bogotá entre la resistencia a la penetración estándar y la resistencia al corte no drenado, usando como ensayo de campo para la obtención de estos últimos parámetros, el SPT y el CPTu?.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo general.

Correlacionar la resistencia al corte no drenado in situ de los suelos arcillosos de la ciudad de Bogotá con la resistencia a la penetración estándar.

1.3.2 Objetivos específicos.

1. Estudiar la interpretación del ensayo SPT y CPTu.
2. Interpretar la práctica del ensayo CPTu en la ciudad de Bogotá.
3. Recopilar información existente en los repositorios oficiales y estudios de consultoría, donde se haya implementado tanto SPT como CPTu.
4. Implementar métodos estadísticos, visualización de datos cuantitativos mediante técnicas gráficas, para confrontar en profundidad y correlacionar los valores de resistencia a la penetración estándar y los valores in situ de la resistencia al corte no drenado para las zonas lacustre A y B, aluvial y llanura B de la ciudad de Bogotá.

1.4 JUSTIFICACIÓN

Durante años, la compresión inconfiada ha sido práctica usual en los diseños geotécnicos de cimentaciones en el distrito capital. El ensayo de compresión inconfiada tiene deficiencias como: dependencia de la humedad de la muestra, grado de alteración de la misma, la propia velocidad del ensayo y las desconocidas condiciones de drenaje en la muestra durante la ejecución del mismo.

Conforme a lo anterior, el presente proyecto de investigación, siendo el CPTu un ensayo in situ que incorpora celdas de carga y piezómetros para medir presiones de poro, estriba en la necesidad de considerar que esta prueba de campo tiene igual o mayor validez como ensayo de resistencia al corte que la prueba de penetración estándar convencional, la cual no es confiable al momento de estimar el comportamiento aproximado del suelo que permita al ingeniero geotécnico llevar a cabo diseños seguros y resistentes de acuerdo con el tipo de suelo.

Por tal razón, y a la luz de la necesidad de un valor de este parámetro de la resistencia al corte no drenado para el diseño de cimentaciones en la ciudad de Bogotá, se hace necesario ampliar el conocimiento de la correlación entre la resistencia a la penetración del suelo del SPT, de común usanza, con valores reales in situ de la resistencia al corte no drenado del CPTu de los suelos cohesivos de la ciudad.

1.5 DELIMITACIÓN

En el presente capítulo se describen los alcances y limitaciones de la investigación.

1.5.1 Espacio

El sitio escogido para correlacionar la resistencia a la penetración estándar con la resistencia al corte no drenado es el suelo arcilloso de Bogotá.

1.5.2 Tiempo

El estudio, desarrollo y análisis del proyecto se llevó a efecto en un lapso de tiempo de 12 meses, en el cual se encuentra incluido lo destinado a la elaboración de anteproyecto.

1.5.3 Contenido

El documento describe detalladamente la geolocalización de registros de datos, adquiridos por medio de proyectos de consultoría que implementaron las pruebas SPT y CPTu recopilados de los repositorios del IDU y la Empresa de Acueducto de Bogotá y los resultados de las correlaciones empleadas para las zonas estudiadas.

1.5.4 Alcance

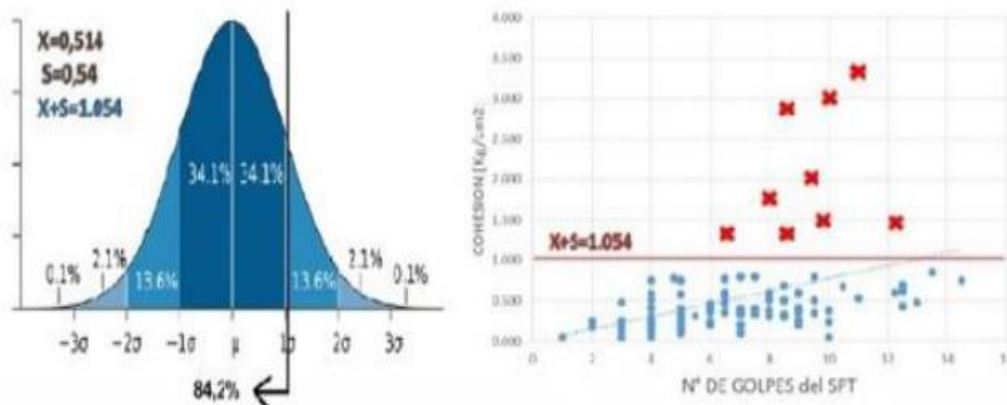
Correlacionar los suelos lacustres A y B, aluvial y llanura B de la ciudad de Bogotá entre la resistencia a la penetración estándar y la resistencia al corte no drenado, implementando la información de los parámetros extraída de pruebas SPT y CPTu aplicadas en los proyectos recopilados, para determinar una correlación válida de los suelos arcillosos de Bogotá.

1.6 ESTADO DEL ARTE

En este capítulo se exponen algunas investigaciones relacionadas al estudio de la resistencia al corte no drenado y resistencia a la penetración.

En la investigación realizada por Diego Reinert, Andrés Ayala y Osvaldo Mazal⁷, fue desarrollada con la finalidad de determinar una ecuación o gráfica que les permitiera correlacionar directamente el número de golpes obtenido de ensayos con la resistencia del suelo, puesto que, los suelos residuales de la Provincia de Misiones de Argentina se encuentra caracterizada por parámetros geotécnicos muy particulares, resultado del proceso de formación, que no pueden interpretarse a través del ensayo de penetración estándar o con los registros de antecedentes. Para desarrollar lo propuesto, utilizaron los parámetros resistentes del suelo en base a ciento dieciséis registros de ensayos SPT y los resultados del ensayo de laboratorio triaxial para obtener la cohesión y el ángulo de fricción del suelo.

Ilustración 1. Detalle de valores extremos descartados en el análisis.



Fuente: Hugo Reinert et al, *Correspondencia y capacidad de carga de suelos tropicales de Misiones Argentina* (2016).

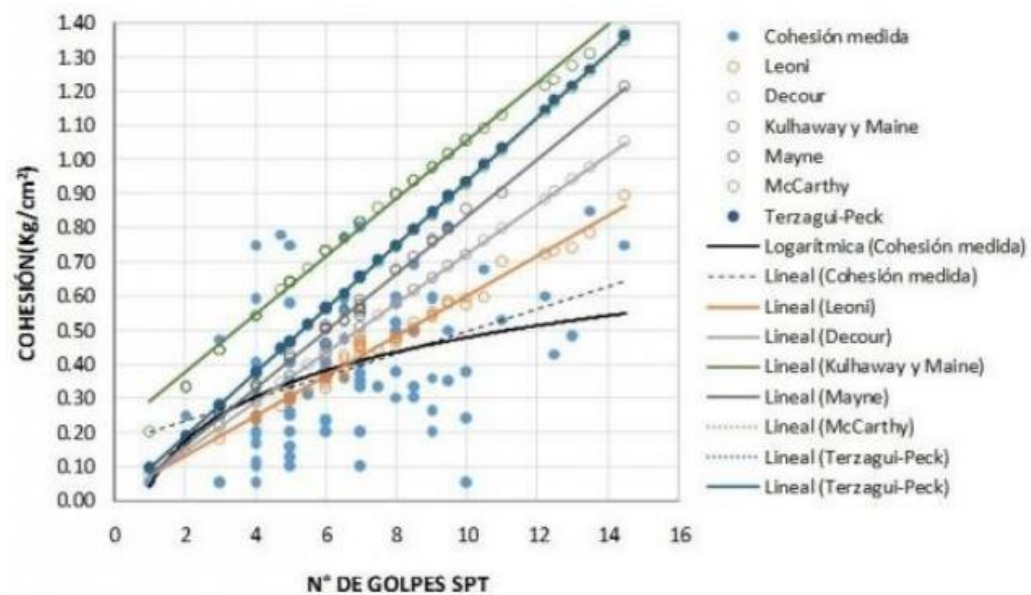
Durante el análisis de datos descartaron algunos valores de cohesión (kg/cm^2) que se encontraban muy por encima de lo normal, lo cual podría generar confusiones

⁷ Hugo Reinert, Andrés Ayala y Osvaldo Mazal, 'CORRESPONDENCIA ENTRE ENSAYO SPT Y CAPACIDAD DE CARGA DE SUELOS TROPICALES DE MISIONES, ARGENTINA', XXI Jornada de Pesquisa, 2016.

de la resistencia del suelo de la zona. Como se estima en la ilustración 1, los valores descartados son aquellos que se encuentran por encima de la media.

La gráfica 1 representa la cohesión obtenida de ensayos de laboratorio, el triaxial principalmente, en función del número de golpes del ensayo SPT, propuesto en distintas investigaciones por Leoni (2005), Decour (1989), Kulhawy y Mayne (1990), Mayne (2010), Terzaghi, McCarthy y Peck (1948).

Gráfica 1. Relación cohesión en función del número de golpes SPT.



Fuente: Hugo Reinert et al., *Correspondencia y capacidad de carga de suelos tropicales de Misiones Argentina* (2016).

Los autores de esta investigación optaron por representar la correlación en tendencia logarítmica porque era la que mejores resultados aportaba, los cuales tienden a ser más conservadores.

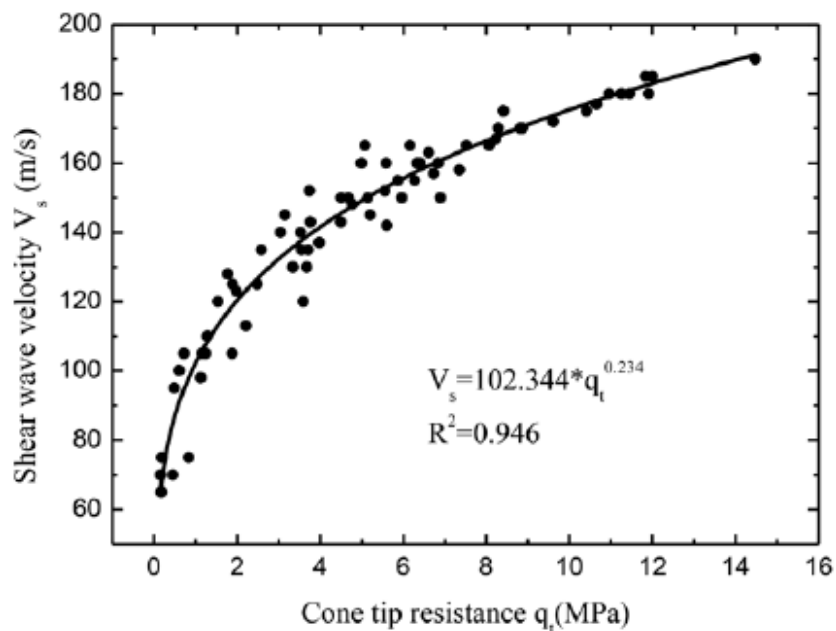
El artículo realizado por Ya Chu, Songyu Liu y Guojun Cai⁸, expone que en la mayoría de casos el Gmax para el análisis de la respuesta del sitio se evalúa en

⁸ Ya Chu, Songyu Liu y Guojun Cai, 'Characterization on the Correlation between Spt-n and Small Strain Shear Modulus Gmax of Jiangsu Silts of China', *Earth Sciences Research Journal*, 25 (2021), 1–11 <<https://doi.org/10.15446/esrj.v25n2.62287>>.

relación con la resistencia a la penetración (N) del SPT que puede encontrarse en distintas divulgaciones científicas desarrolladas para diferentes tipos de suelos como lo es la propuesta de Yoshimura (1970), Ohta et al. (1972), Ohsaki y Iwasaki (1973), Seed et al. (1983 – 1986). De acuerdo con esto, el eje principal de la investigación se encuentra enfocado en correlacionar los valores N del SPT y el G_{max} medido del SCPTU a partir de 50 registros de ambos parámetros. Inicialmente se estudió la relación entre la resistencia por punta del cono q_c y la velocidad de onda de corte V_s .

La gráfica 2 representa la relación entre la resistencia por punta del cono y la velocidad de onda de corte, en donde, este último se incrementa a medida que la resistencia de la punta del cono lo hace.

Gráfica 2. Relación entre la resistencia de la punta del cono y la velocidad de la onda de corte.

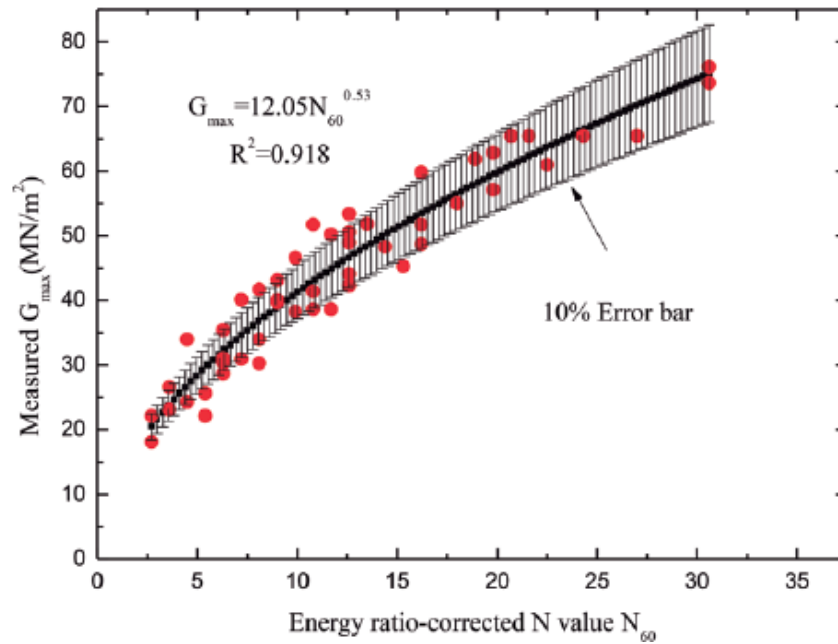


Fuente: Ya Chu et al., *Characterization on the Correlation between Spt-n and Small Strain Shear Modulus G_{max} of Jiangsu Silts of China* (2021).

Estudios anteriores, han utilizado los tipos de ecuaciones de los autores anteriormente nombrados para comprobar la mejor relación entre los valores del N y el G_{max} , los cuales han demostrado que la función exponencial relacionada

contenía un coeficiente de determinación más alto⁹, de acuerdo con esta información, los autores de este artículo decidieron correlacionar el módulo de cortante G_{max} con el N mediante una relación exponencial como puede observarse en la gráfica 3.

Gráfica 3. Relación entre G_{max} y N .



Fuente: Ya Chu et al., *Characterization on the Correlation between Spt-n and Small Strain Shear Modulus G_{max} of Jiangsu Silts of China* (2021).

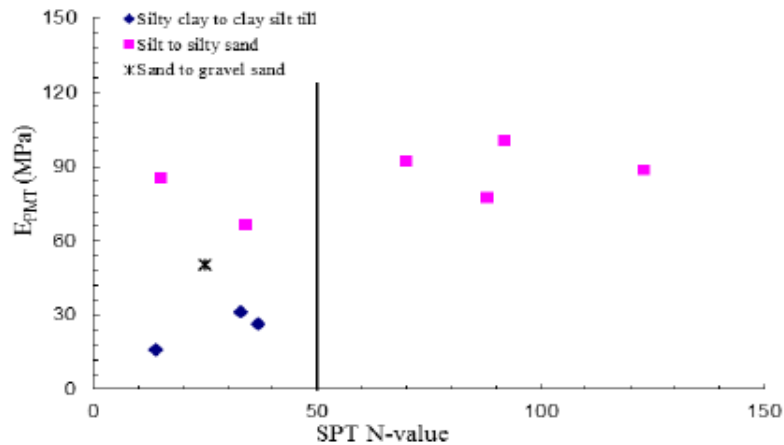
El informe de Yankun Liang, Laifa Cao y Jinyuan Liu¹⁰ fue realizado con la finalidad de encontrar correlaciones estadísticas de la resistencia a la penetración del SPT y otros parámetros geotécnicos del área metropolitana de Toronto. Se obtuvieron muestras de profundidades que oscilaban entre los 40 m y 55.4 m por debajo de la superficie terrestre, las cuales se clasificaron visualmente en el campo y se efectuó el respectivo procedimiento para dirigir las al laboratorio y realizar los correspondientes estudios, siendo de importancia la medición de la humedad natural, la densidad, el tamaño de los granos y el análisis de hidrómetro y consistencia (Atterberg). Por otra parte, realizaron y analizaron las pruebas de resistencia al corte no drenado con el ensayo de laboratorio triaxial de las muestras obtenidas mediante el tubo Shelby.

⁹ Chu, Liu y Cai.

¹⁰ Yankun Liang, Laifa Cao y Jinyuan Liu, 'Statistical Correlations between SPT N-Values and Soil Parameters', *Department of Civil Engineering, Ryerson University*, June, 2015.

Realizaron la relación entre el valor de N del SPT y el EPMT como puede apreciarse en la gráfica 4, donde el EPMT aumenta con el valor del N, pero la correlación entre estas dos variables es muy baja para el limo y la arena limosa debido a la influencia de cantos rodados y el número limitado de ensayos en el sitio.

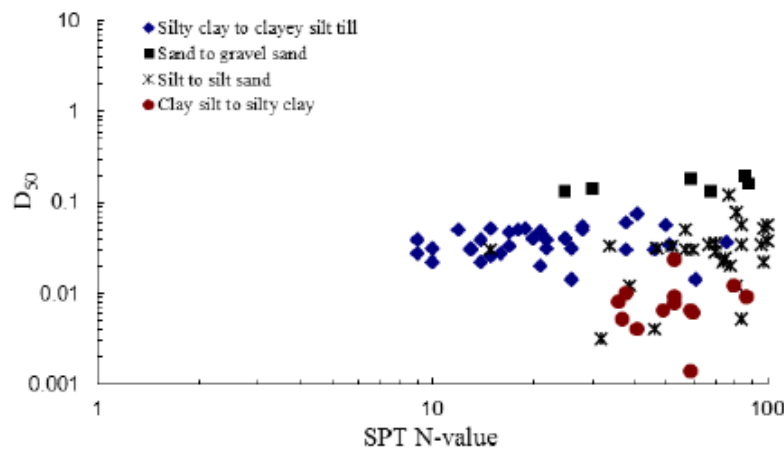
Gráfica 4. Relación entre EPMT y N.



Fuente: Yankun Liang et al., *Statistical Correlations between SPT N-Values and Soil Parameters* (2015).

la siguiente correlación realizada entre los valores del N del SPT y el tamaño de partícula (D_{50}) demostrada en la gráfica 5, expresa que no existe buena relación entre las variables del tipo de suelo arcilla limosa y limo.

Gráfica 5. Relación entre D_{50} y N.



Fuente: Yankun Liang et al., *Statistical Correlations between SPT N-Values and Soil Parameters* (2015).

1.7 MARCO REFERENCIAL

En el presente capítulo especifica la información conceptual fundamental para comprender la teoría que sustenta el desarrollo propuesto en la metodología.

1.7.1 Marco teórico

1.7.1.1 Ensayo de penetración estándar

El ensayo de penetración estándar (SPT) es una prueba que se realiza en campo para medir la resistencia aproximada del suelo a la penetración a través de un número de golpes N a varias profundidades de la superficie del suelo. Durante el ensayo, inicialmente se ejecuta la perforación en la zona donde se requiere analizar el subsuelo, la cual debe limpiarse por medio de inyección de agua hasta la profundidad a la que se desea extraer la muestra y luego se baja la cuchara partida enroscada al extremo de las barras de sondeo.

Una vez la cuchara llega al fondo de perforación comienza la penetración del subsuelo, lo que consiste en dejar caer libremente una masa de 63.5 Kg desde una altura de 76 cm sobre la cabeza de golpeo de las barras de sondeo para que el sacamuestras (cuchara partida) penetre los primeros 15 cm, luego se hince a 30 cm y finalmente a los 45 cm, de esta manera se toma el número de golpes que se requieren para penetrar cada espesor. Tras finalizarse la hincada se extrae la muestra, abriendo longitudinalmente la cuchara, colocándola en un recipiente hermético con las siguientes descripciones: cuchara partida (ref.) No de sondeo, número de muestra, profundidad, el valor de N y posteriormente se transporta al laboratorio.¹¹

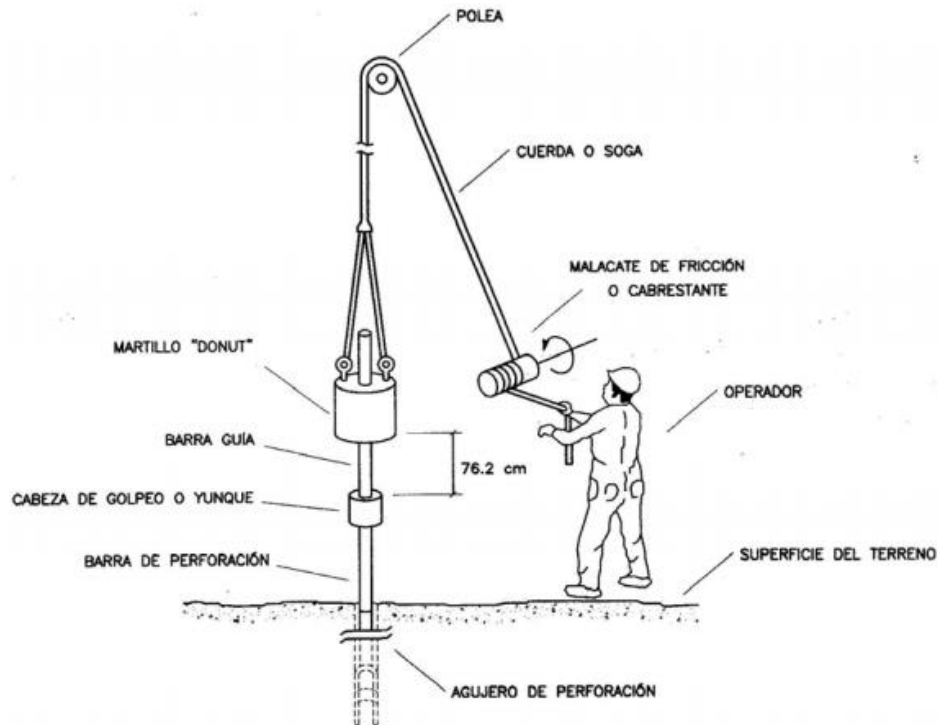
La energía de penetración debe corregirse por un factor de la energía total, esto debido a que la altura de caída a la cual el operador debe permitir la caída libre del martillo influye considerablemente en la energía real.¹²

¹¹ Jay Ameratunga, Nagaratnam Sivakugan y Braja.M Das, *Correlations of Soil and Rock Properties in Geotechnical Engineering*, 2016 <<http://www.springer.com/series/13410>>.

¹² Jéser Esaú de Jesus Nij Patzán, 'GUÍA PRÁCTICA PARA EL CÁLCULO DE CAPACIDAD DE CARGA EN CIMENTACIONES SUPERFICIALES, LOSAS DE CIMENTACIÓN, PILOTES Y PILAS PERFORADAS', Universidad de San Carlos de Guatemala, 2009 <http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08_3004_C.pdf>.

En la ilustración 2 se observa el mecanismo de aplicación de golpeo y especificación de los equipos que lo conforman.

Ilustración 2. Mecanismo de golpeo SPT.

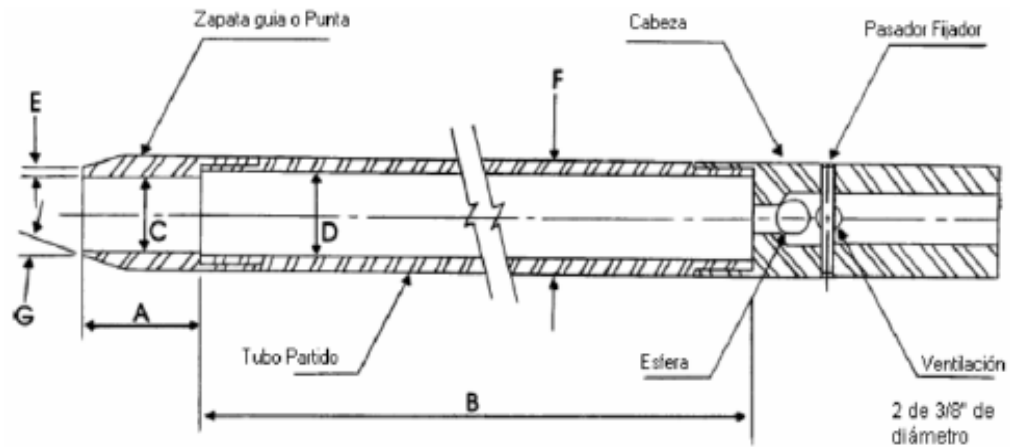


Fuente: INVIAS, ensayo normal de penetración (SPT) y muestreo de suelos con tubo partido (2013).

“La cuchara partida es el elemento tubular usado para ejecutar el ensayo de penetración estándar (SPT) y para la extracción de muestras del suelo en el fondo de un sondeo”¹³. A continuación, en la ilustración 3 se mencionan las partes que la componen.

¹³ Larryn Rojas, ‘DETERMINACIÓN DE LA VARIACIÓN EN LOS VALORES DEL NUMERO DE GOLPES DEL ENSAYO SPT DEBIDO A LA PERDIDA DE ENERGÍA CAUSADA POR DIFERENTES DIÁMETROS DE TUBERÍA.’, Universidad Católica de Colombia, 2017.

Ilustración 3. Muestreador estándar de cuchara partida.



Fuente: INVIAS, ensayo normal de penetración (SPT) y muestreo de suelos con tubo partido (2013).

“Es muy pertinente la expresión de Terzaghi “Sería muy extraño que este brutal tratamiento del subsuelo, no tuviera influencia en la estructura del mismo”, por ende, la relación geométrica que mide la alteración de las muestras extraídas es el índice de áreas (A_R) del sacamuestras que puede definirse como:”¹⁴

$$A_R(\%) = \frac{D_e^2 - D_i^2}{D_i^2} * 100$$

Donde:

A_R = Relación de área (relación entre el área alterada y el área total del suelo).

D_e = Diámetro externo del sacamuestras.

D_i = Diámetro interno del sacamuestras.

Para que una muestra obtenida por medio de la cuchara partida sea considerada como inalterada, el área debe ser menor o igual del 10% de la adquirida mediante ecuación A_R que aproximadamente es 112%.

¹⁴ Ameratunga, Sivakugan y Das.

Factor de corrección C_N

Algunas de las relaciones empíricas más comunes para determinar el factor de corrección C_N son:

Liao y Withman (1986)

Para arena fina:

$$C_N = \left(\frac{1}{\left(\frac{\sigma'_o}{Pa} \right)} \right)^{0,5}$$

Skempton (1986)

Para arena gruesa:

$$C_N = \frac{2}{1 + \left(\frac{\sigma'_o}{Pa} \right)}$$

Para arena sobreconsolidada:

$$C_N = \frac{1.7}{0.7 + \left(\frac{\sigma'_o}{Pa} \right)}$$

Corrección de la eficiencia energética del martillo

La eficiencia del martillo SPT se expresa de la siguiente manera:

$$E_r(\%) = \frac{\text{Energía del martillo real al muestreador}}{\text{Energía de entrada teórica}} * 100$$

El ensayo de penetración estándar básicamente consiste en expresar el valor de N con una corrección del factor de energía del 60% y el Er puede variar entre el 40% y 90%.¹⁵

Tabla 1. Corrección del muestreador.

Variable	n_s
Muestreador Estándar	1.0
con revestimiento para arena y arcilla densas	0.8
con revestimiento para arena suelta	0.9

Fuente: Brajas M. Das et al., *Correlations of Soil and Rock Properties in Geotechnical Engineering* (2015).

Tabla 2. Corrección de la longitud de la varilla.

Variable	n_R
>10	1.0
6-10	0.95
4-6	0.85
0-4	0.75

Fuente: Brajas M. Das et al., *Correlations of Soil and Rock Properties in Geotechnical Engineering* (2015).

Una vez se obtienen los valores de corrección se estandariza el número de penetración.

$$N_{60} = (N * \eta_H * \eta_B * \eta_S * \eta_R) / 60$$

De lo anterior, es posible corregir el valor de $(N1)_{60}$.

$$(N1)_{60} = C_N * N_{60}$$

¹⁵ Ameratunga, Sivakugan y Das.

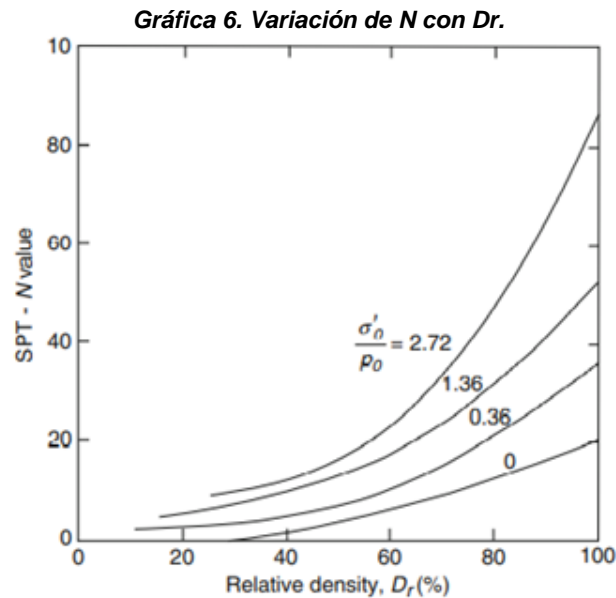
Densidad relativa

Gibbs y Holtz (1957) proporcionaron relaciones para el valor N de STP y densidad relativa, y posteriormente en el año 1979 presentaron la correlación de N y D_r en una forma más utilizable.¹⁶

Tabla 3. Correlación N con D_r .

Número de penetración estándar (N)	Densidad relativa (D_r)
0-4	Muy suelta
4-10	Suelta
10-30	Media
30-50	Densa
Más de 50	Muy densa

Fuente: Brajas M. Das et al., *Correlations of Soil and Rock Properties in Geotechnical Engineering* (2015).



Fuente: Brajas M. Das et al., *Correlations of Soil and Rock Properties in Geotechnical Engineering* (2015).

¹⁶ Ameratunga, Sivakugan y Das.

La siguiente tabla proporciona la consistencia aproximada según el valor N y la cohesión no drenada (C_u) de suelos arcillosos.

Tabla 4. Consistencia aproximada según el valor N y la cohesión no drenada en arcillas.

Consistencia	N	Cu (kN/m ²)
Muy suave	0-2	<12
Suave	2-4	12-25
Media	4-8	25-50
Rígido	8-15	50-100
Muy rígido	15-30	100-200
Duro	>30	>200

Fuente: Brajas M. Das et al., *Correlations of Soil and Rock Properties in Geotechnical Engineering* (2015).

1.7.1.2 Ensayo de penetración de cono con medida de presión de poros

El ensayo de penetración de cono con medida de presión de poros (CPTu) es una prueba in situ que consiste en penetrar por medio de una punta cónica el suelo a una velocidad constante para medir la resistencia a la penetración por punta a diferentes profundidades del subsuelo, la resistencia por fricción y la presión de poros. La prueba es principalmente utilizada para estimar las propiedades del suelo y analizar el comportamiento del mismo durante la ejecución de la prueba, debido a que no se extraen muestras del subsuelo porque el equipo interpreta directamente el resultado de los parámetros.¹⁷

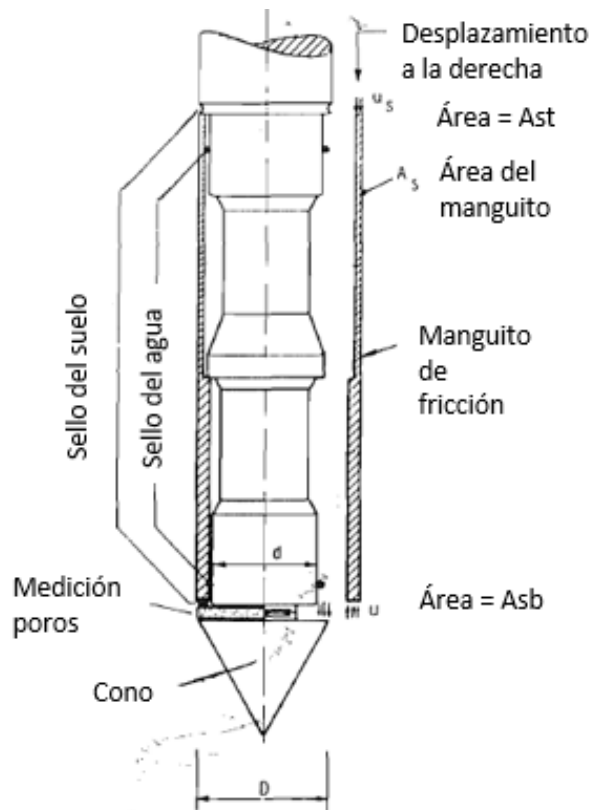
El cono que se encuentra en el extremo de una serie de varillas es empujado al suelo a una velocidad constante para medir la resistencia a la penetración del cono de manera continua, de esta manera, la resistencia del cono (q_c) es la relación de la fuerza total que actúa sobre el cono (Q_c) entre el área proyectada del cono (A_s). De igual manera, se estima la resistencia del manguito de fricción (f_s) como la

¹⁷ Libardo López y Jorge Enrique Durán, 'Uso Del Piezocono (CPTU) Para Determinar La Caracterización Geotécnica de Depósitos Arcillosos Blandos En Algunos Sitios Del Departamento de Boyacá', 2015, 1–11.

relación de la fuerza total que actúa sobre el manguito (F_s) entre el área de la superficie del manguito de fricción (A_s). “En 1948 el cono mecánico holandés original se mejoró agregando una parte cónica solo por encima del cono. El propósito de la geometría era evitar que el suelo entrara en el espacio que hay entre la carcasa y las varillas interiores”.¹⁸ Posteriormente, en la parte trasera del cono, se insertó el manguito de fricción con la finalidad de medir el rozamiento lateral ejercido por la penetración del cono y, fue la primera vez en la que se usó el parámetro de fricción para estimar el tipo de suelo.

La punta estándar es cónica, de 60° de 10 cm² de área proyectada del cono y 150 cm² del área del manguito de fricción. En la siguiente ilustración se describen las partes que componen el penetrómetro de cono.

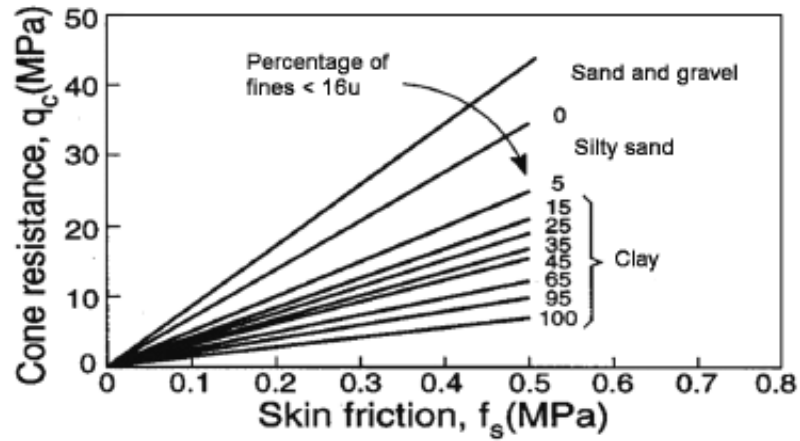
Ilustración 4. Representación esquemática del penetrómetro de cono.



Fuente: Peter.K. Robertson, *Soil Classification Using the Cone Penetration Test* (1990).

¹⁸ Robertson y Cabal.

Gráfica 7. Primera clasificación de suelos basada en CPT para el cono mecánico de Begemann.



Fuente: Peter.K. Robertson, *Guide to Cone Penetration Testing for Geotechnical Engineering* (2014).

Posteriormente, se implementó en el cono la medición de presión de poros, lo cual influía en la necesidad de corregir la resistencia del cono por la presión que ejerce el agua cuando se penetra el suelo, esencialmente en arcillas debido a la lenta disipación y exceso de la presión de poros por las características del suelo. Baligh (1981) y Campanella (1982) propusieron que debía realizarse una corrección a la resistencia del cono (q_c) como resistencia total del cono corregida (q_t) cuando se utilicen conos que midan la presión de poros¹⁹, mediante la siguiente ecuación:

$$q_t = q_c + (1 - a)u$$

Donde:

u = Presión de poros medida entre la punta del cono y el manguito de fricción.

a = Relación del área neta.

La relación del área neta viene dada por la siguiente ecuación:

$$a \approx \frac{d^2}{D^2}$$

¹⁹ Peter.K. Robertson, 'Soil Classification Using the Cone Penetration Test', *Canadian Geotechnical Journal*, 27.1 (1990), 151–58 <<https://doi.org/10.1139/t90-014>>.

Lunne et al. (1986) y Konrad (1987) sugirieron efectuar una corrección a la fricción que ejerce el manguito, como fricción del manguito de tensión total (f_t)²⁰, aportando la siguiente expresión:

$$f_t = f_s - (1 - \beta b)cu$$

Donde:

$$b = \frac{A_{st}}{A_{sb}} \quad c = \frac{A_{sb}}{A_s} \quad \beta = \frac{u_s}{u}$$

El gráfico de Senneset y Janbu (1984) utiliza la relación del parámetro de presión de poros, B_q definido como:

$$B_q = \frac{u - u_o}{q_t - \sigma_{vo}}$$

Los parámetros mencionados, resistencia total del cono corregida, la fricción de poros corregida y la relación de presión de poros deben normalizarse de acuerdo al esfuerzo total y al esfuerzo efectivo según Wroth (1988).²¹

Resistencia del cono normalizada

$$Q_t = \frac{q_t - \sigma_{vo}}{\sigma_{vo}}$$

Relación de fricción normalizada

$$F_r = \frac{f_s}{q_t - \sigma_{vo}}$$

Relación de presión de poros

$$B_q = \frac{\Delta u}{q_t - \sigma_{vo}}$$

²⁰ Peter.K. Robertson.

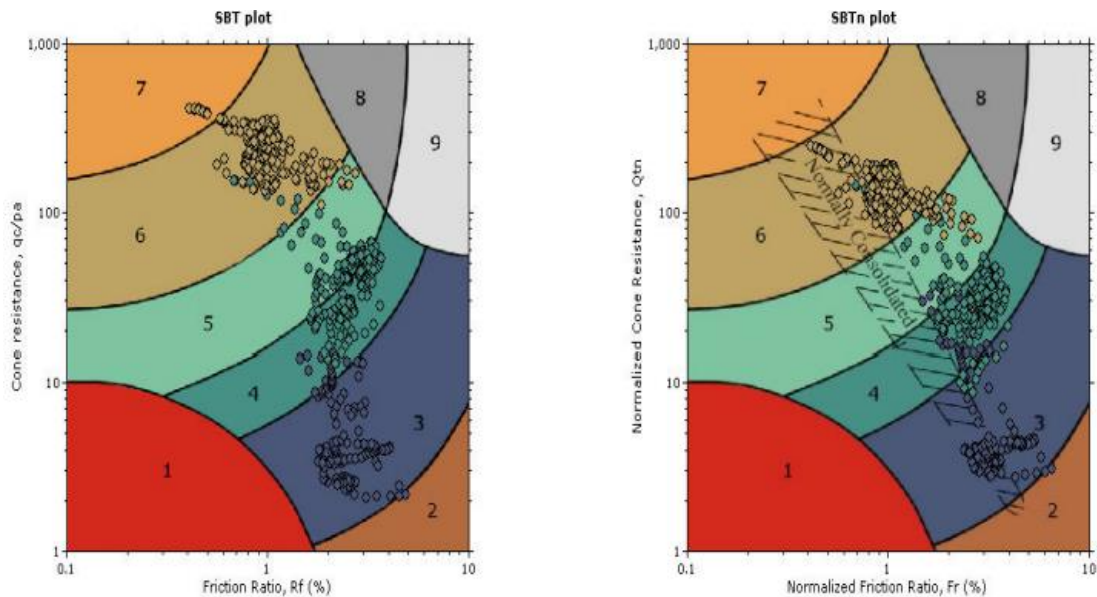
²¹ Gonzalo Díaz, 'Caracterización de Un Sitio Mediante Ensayo de CPTU', 2011.

“Como la anisotropía y la velocidad de deformación del suelo influyen todo ensayo en terreno, su interpretación necesariamente requerirá de un factor empírico para contrarrestar estos efectos. Muchas teorías indican que la relación entre la resistencia del cono y S_u ”²² viene dada por:

$$S_u = \frac{q_t - \sigma_v}{N_{kt}}$$

Robertson et al (1986) proponen el gráfico de clasificación de suelos como uso del ensayo CPT, basado en la resistencia del cono q_c y la relación de fricción R_f , el cual contiene 12 zonas para interpretar el tipo de suelo. Posteriormente Robertson (1990) propone una actualización al gráfico de clasificación de suelos, en donde normaliza los parámetros de resistencia por punta del cono, presión de poros y resistencia por fricción debido a los efectos que genera la presión de agua que actúa sobre el cono y reduce el número de zonas a 9 tipos de suelo.²³

Ilustración 5. Comparación entre SBT no normalizado y SBTn normalizado de R_f .



Fuente: Peter.K. Robertson, *Soil Behaviour Type from the CPT: An Update* (2010).

²² Díaz.

²³ Peter K Robertson, 'Soil Behaviour Type from the CPT: An Update', *2nd International Symposium on Cone Penetration Testing*, 2010.

Reducir el número de las zonas de SBT en el gráfico no normalizado, permite realizar una mejor comparación entre los SBT no normalizados y los SBT normalizados, de esta manera se facilita la interpretación del tipo de suelo para evitar confusiones con el uso de los gráficos.

La tabla 5 resume la propuesta de unificación entre las 12 zonas del SBT por Robertson et al (1986) y las 9 zonas del SBTn normalizado por Robertson (1990).

Tabla 5. Propuesta unificación de clasificación entre las 12 zonas SBT y las 9 zonas del SBTn.

Zona SBT – Robertson et al (1986)	Zona SBTn – Robertson (1990)	Propuesta común descripción SBT
1	1	Suelos finos sensitivos
2	2	Arcillas – suelos orgánicos
3	3	Arcillas: Arcillas a arcillas limosas
4 & 5	4	Mezclas de limos: Arcillas limosas y limos arcillosos
6 & 7	5	Mezclas de arenas: Arenas limosas a limos arenosos
8	6	Arenas: Arenas limpias y arenas limosas
9 & 10	7	Arena densa a arena gravosa
12	8	Arena firme a arena arcillosa (sobreconsolidada o cementada)
11	9	Suelos finos firmes (sobreconsolidado o cementado)

Fuente: Peter.K. Robertson, *Soil Behaviour Type from the CPT: An Update* (2010).

1.7.2 Marco conceptual

1.7.2.1 Depósito de suelo

Los depósitos de suelo son acumulaciones de diferentes partículas debido a los procesos geológicos y ambientales ocurridos en tiempos remotos, los cuales se caracterizan según su origen y el tipo de proceso que influyó en la formación del depósito. Las propiedades físicas y mecánicas del suelo, que se identifican mediante la composición mineralógica del mismo, son uno de los parámetros más importantes del suelo a tener en cuenta durante la planificación, el diseño y la construcción de estructuras, ya que los depósitos, según el origen, se caracterizan y comportan geológicamente diferente.²⁴

Estos depósitos se clasifican de la siguiente manera:

Depósitos coluviales

Estos depósitos se caracterizan por tener apariencia en forma de cono o abanico con espesores pequeños debido a que se forman mediante diferentes acumulaciones que no implican excesos de transporte y frecuentemente se encuentran en climas áridos y secos, sin embargo, en casos atípicos, están presentes en las cabeceras de terrazas aluviales.²⁵

Depósitos aluviales

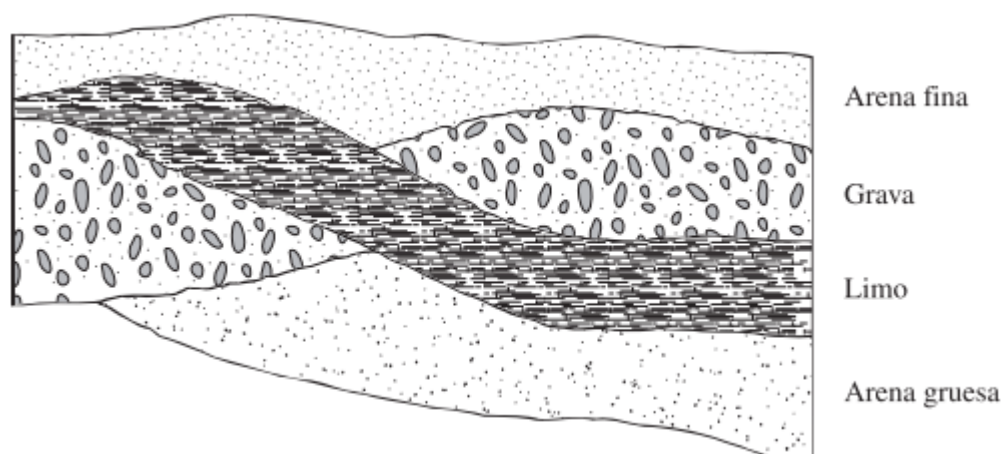
Este tipo de depósito se derivan de la acción de arroyos, ríos y quebradas y a diferencia de los coluviales se caracterizan por estar conformados de superficies topográficas amplias como valles y terrazas fluviales, que se componen de una granulometría que varía desde gravas de cantos hasta arenas. y son derivados de la acción de arroyos y ríos. Estos depósitos son categorizados de la siguiente manera:

- Depósitos en secuencias trenzadas
- Depósitos causados por el cinturón de meandros de los ríos

²⁴ Das.

²⁵ Luis Ayala, 'Clasificación de Los Depósitos Sedimentarios', Explorock Soluciones Geológicas <<https://www.explorock.com/clasificacion-de-los-depositos-sedimentarios/>>

Ilustración 6. Sección transversal de un depósito fluvial.



Fuente: Braja.M. Das, *fundamentos de ingeniería geotécnica* (2013).

Depósitos lacustres

En regiones áridas y húmedas las corrientes de agua de los ríos llevan sólidos en suspensión que, al momento de ingresar a un lago, estas partículas, gruesas y finas, se depositan en el fondo de manera alterna, es decir, se intercalan según el tipo de partícula.²⁶

Depósitos llanura

Las llanuras conformadas por acumulación o sedimentación por procesos geomórficos, estas se caracterizan por su particular topografía de un escaso relieve que predomina muy poco, las cuales se encuentran en contraposición a las áreas montañosas. Las llanuras pueden clasificarse según el origen principal como:

- Llanuras aluviales
- Llanuras eólicas
- Llanuras marinas
- Llanuras glaciales²⁷

²⁶ Das.

²⁷ Miguel Auge, 'Hidrogeología de Llanuras', *Universidad de Buenos Aires*, 2009, pp. 1–82 <<http://tierra.rediris.es/hidrored/ebooks/miguel/HidrogeoLlanuras.pdf>>.

1.7.2.2 Exploración de campo

Son métodos geotécnicos que debe aplicar el ingeniero de suelos para el estudio y análisis del terreno sobre el cual se va a efectuar una construcción estructural, en donde los diseños a evaluar se ven influenciados por las características de estratificación del subsuelo.

Los métodos más utilizados en la Ingeniería geotécnica son:

- Excavaciones a cielo abierto
- Perforaciones barrenadas manualmente
- Perforaciones barrenadas mecánicas
- Pruebas de lavado
- Ensayo de veleta
- Ensayo de penetración estándar
- Ensayo de penetración de cono dinámico y estático²⁸

1.7.2.3 Carta de plasticidad

La carta tiene aplicación en la clasificación e identificación de la naturaleza de suelos cohesivos mediante la estimación de los índices líquido y plástico. Casagrande (1932) fue quien propuso la carta de plasticidad, mediante el estudio de un amplio registro de información de suelos, que grafica el límite líquido en el eje de las abscisas y el índice de plasticidad en el eje de las ordenadas.²⁹

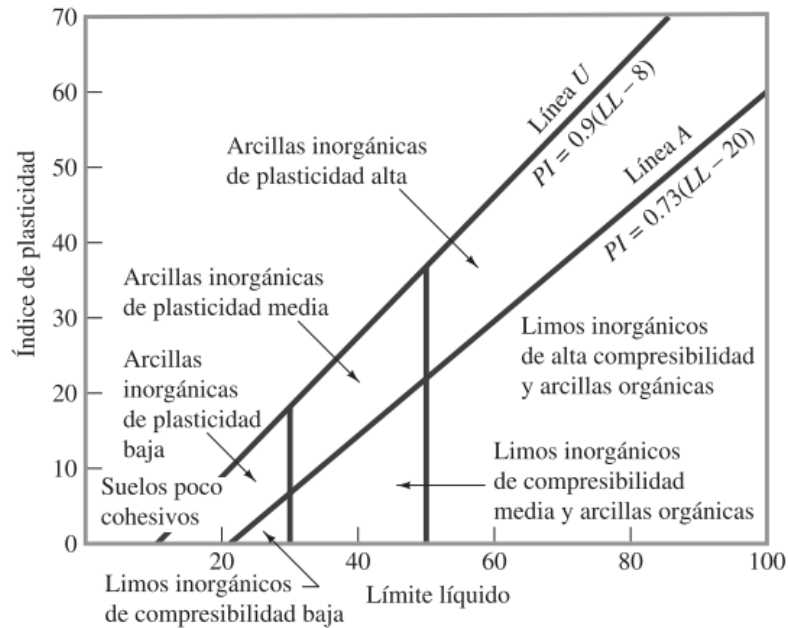
La línea A empírica, que está dada por la ecuación $PI = 0.73(LL-20)$, aparta las arcillas inorgánicas, que se encuentran por encima de la línea, de los limos inorgánicos, contrario a las arcillas se encuentran por debajo de la línea A. Los limos orgánicos se ubican en la misma zona de los limos inorgánicos y tienen un límite líquido entre 30 a 50, de igual manera, las arcillas orgánicas son ubicadas por debajo de la línea A y tienen un límite líquido mayor a 50.³⁰

²⁸ Gerencie, 'Métodos de Exploración', 2018, pp. 12–110 <<https://www.gerencie.com/metodos-de-depreciacion.html>>.

²⁹ Mauricio Bernal et al., 'Determinación de Límites de Consistencia En Jales Usando Conos Penetrantes', *XXIX Reunión Nacional de Ingeniería Geotécnica*, Noviembre 2018, 2021, 1–7.

³⁰ Das.

Gráfica 8. Carta de plasticidad.



Fuente: Braja.M. Das, fundamentos de ingeniería geotécnica (2013).

1.7.2.4 Toma de muestras

La toma de muestras representativas del suelo es uno de los aspectos más importantes en los ensayos de laboratorio para complementar los estudios de exploración geotécnica. Las muestras de suelo alteradas son realizadas para la obtención de información que respecta a la clasificación del suelo, por otra parte, las muestras de suelo inalteradas son aplicadas principalmente en conjunto con ensayos de resistencia y consolidación.³¹

La información obtenida y, oportuna según el criterio del ingeniero geotécnico, debe quedar registrada en los documentos correspondientes a estudios de suelos de manera que, cada muestra efectuada indique: el número de la muestra, el tipo de perforación, las coordenadas del sitio de ubicación, la profundidad, medida desde la superficie terrestre, a la que fue tomada la muestra y la profundidad a la que se encuentra el nivel freático específicamente en el sitio.

³¹ INVIAS, 'Manual de Diseño de Cimentaciones Superficiales y Profundas Para Carreteras', 2012.

Los muestreadores más comunes para la obtención de muestras alteradas del suelo son:

- Tubo partido. El método de penetración es el golpeo de un matillo de 64 kg y se recomienda emplearla en suelos más finos que la grava.
- Broca helicoidal y taladro de discos. Son ideales para aplicar en suelos sobre el nivel freático.

Por otra parte, los muestreadores más comunes para la obtención de muestras inalteradas del suelo son:

- Tubo Shelby. La penetración se realiza mediante presión en el terreno con movimientos relativamente rápidos y se emplea en suelos cohesivos o blandos.
- Pistón estacionario. La penetración se realiza mediante presión continua y se emplea en suelos arcillosos o limosos de consistencia media a blanda.³²

1.7.2.5 Ensayos in situ

El “Manual de diseño de cimentaciones superficiales y profundas para carreteras” (INVIAS, 2012), recomienda que los estudios de suelos sean efectuados en su mayoría por ensayos in situ para la obtención de los parámetros correspondientes a resistencia al corte, permeabilidad y compresibilidad, puesto que los ensayos de laboratorio son simplemente un complemento de las pruebas de campo que permiten ampliar la información de las propiedades del suelo.

Schnaid (2005) describe los ensayos in situ más utilizados para la caracterización de suelos, su designación, medición y aplicaciones más comunes, según la categoría a la que pertenezca³³. En la tabla 6 puede observarse lo mencionado.

³² INVIAS, ‘Manual de Diseño de Cimentaciones Superficiales y Profundas Para Carreteras’.

³³ Fernando Schnaid, *Geocharacterisation and Properties of Natural Soils by Insitu Tests*, *Ground Engineering*, 2005, xxxviii <<https://doi.org/10.3233/978-1-61499-656-9-3>>.

Tabla 6. Ensayos In situ.

CATEGORÍA	ENSAYO	DESIGNACIÓN	MEDICIÓN	APLICACIÓN COMÚN
Ensayos no destructivos o semi destructivos	Ensayos geofísicos:			Caracterización del terreno rigidez a pequeñas deformaciones G_0
	Refracción sísmica	SR	Ondas P en la superficie	
	Ondas superficiales	SASW	Ondas R en la superficie	
	Ensayo crosshole	CHT	Ondas P y S en las perforaciones	
	Ensayo downhole	DHT	Ondas P y S en una perforación profunda	
	Ensayos de presurómetro:			Módulo de corte, G resistencia al corte in situ esfuerzo horizontal
	Pre excavado	PMT	$G, (\Psi \times \varepsilon)$ curva	Propiedades de consolidación
	Auto excavado	SBPM	$G, (\Psi \times \varepsilon)$ curva	Rigidez y resistencia
	Placa de carga	PLT	Curva ($L \times$)	
Ensayos de penetración invasivos	Ensayo de penetración con cono:			Perfil del suelo
	Eléctrico	CPT	qc, fs	Resistencia al corte
	Piezocono	CPTu	qc, fs, u	Densidad relativa y propiedades de consolidación
	Ensayo de penetración estándar	SPT	Penetración (valor N)	Perfil del suelo ángulo de fricción interna
	Dilatómetro de placa plana	DMT	$P_o; P_l$	Rigidez resistencia al corte
	Ensayo de rigidez de Vane	VST	Torque	Resistencia al corte no drenado, S_u
Ensayos combinados (Masivos + no destructivo)	Presurómetro de cono	CPMT	$qc, fs, (+u), G, (\Psi \times \varepsilon)$	Perfil del suelo Módulo de rigidez, G Resistencia al corte Propiedades de consolidación
	Cono sísmico	SCPT	$qc, fs, V_p, V_s, (+u)$	Perfil del suelo Resistencia al corte Rigidez a pequeñas deformaciones
	Cono de resistividad	RCPT	qc, fs, ρ	Perfil del suelo Resistencia al corte
	Dilatómetro sísmico		$P_o; P_l; V_p, V_s$	Resistencia al corte Rigidez

Fuente: F. Schnaid, Geocharacterisation and properties of natural soils by in situ tests (2005).

1.7.2.6 Resistencia al corte

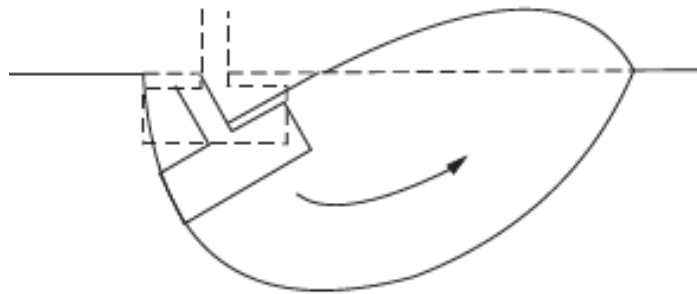
La falla por corte es un factor importante a tener en cuenta durante el análisis del comportamiento que puede adoptar el suelo, por ende, la importancia de identificar los tipos de falla para medir la resistencia al corte del suelo.³⁴

La falla por corte es debida al esfuerzo que ejerce el suelo para soportar las fundaciones de las estructuras y se puede presentar de las siguientes maneras:

Corte general

Este tipo de falla se presenta cuando la zona I del suelo (debajo de la base de cimentación), tras superar la capacidad portante ultima la estructura de cimentación, se desplaza hacia abajo junto con la cimentación empujando lateralmente la zona II, lo cual cauda un movimiento hacia arriba de la zona III. Posteriormente a la falla, se evidencia un abultamiento en ambos lados de la cimentación.

Ilustración 7. Falla por corte general.



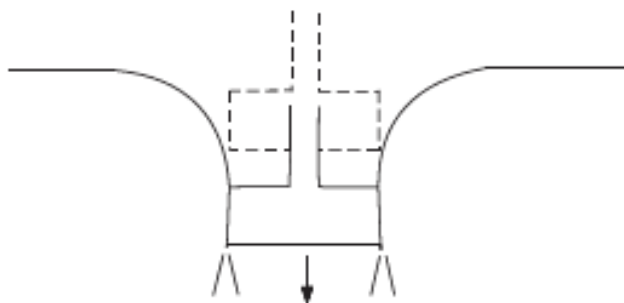
Fuente: INVIAS, *Manual de Diseño de Cimentaciones Superficiales y Profundas para Carreteras*, (2012).

Corte por punzonamiento

Este tipo de falla generalmente ocurre en suelos sueltos o compresibles, suelos débiles bajo condiciones de carga drenada y se presenta bajo la cimentación, en la zona de compresión, en donde la estructura de cimentación realiza un movimiento vertical.

³⁴ Diego Rivera del Rio, 'Determinación de Resistencia Al Corte Mediante Ensayo de Veleta Manual En Suelos Alofánicos de La Región de Ñuble', *Universidad de Chile*, 2018.

Ilustración 8. Falla por punzonamiento.

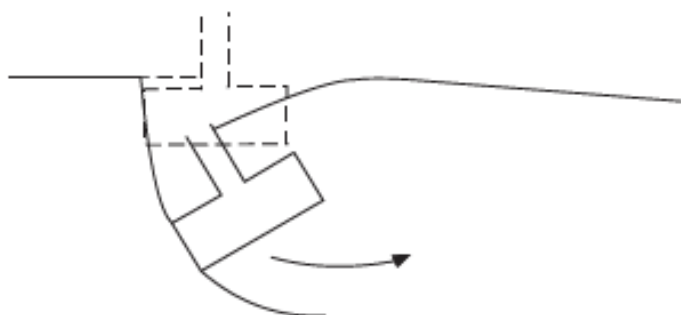


Fuente: INVIAS, *Manual de Diseño de Cimentaciones Superficiales y Profundas para Carreteras*, (2012).

Corte local

La falla local presenta compresión bajo la cimentación y abultamiento lateral, es decir, este tipo de falla junta los dos tipos descritos anteriormente y se presenta en suelos principalmente más sueltos que los relativamente incompresibles.

Ilustración 9. Falla por corte local.



Fuente: INVIAS, *Manual de Diseño de Cimentaciones Superficiales y Profundas para Carreteras*, (2012).

La combinación de la masa, es decir, la intercalación de los estratos que componen el suelo, en blandos y densos, es un factor determinante en el tipo de falla que pueda ocurrir por incidencia de la cimentación.³⁵

³⁵ INVIAS, 'Manual de Diseño de Cimentaciones Superficiales y Profundas Para Carreteras'.

1.7.3 Marco legal

A continuación, se hace mención a las normas encargadas de describir los procedimientos que deben cumplirse durante la ejecución de los ensayos in situ SPT y CPTu.

El “Manual de Diseño de Cimentaciones Superficiales y Profundas para Carreteras, Colombia 2012” describe los tipos de ensayo in situ, los suelos en donde es recomendable aplicarlos, las propiedades que se obtienen con la ejecución del mismo y las normas que los rigen. Específicamente en la “tabla 3.18” (Ensayos in situ) el manual hace mención a las normas INV/ASTM para cada tipo de ensayo y precisa que el INVIAS actualmente no cuenta con norma para el CPTu.³⁶

La norma INV E 111-13 “ENSAYO NORMAL DE PENETRACIÓN (SPT) Y MUESTREO DE SUELOS CON TUBO PARTIDO” describe los procedimientos a realizar durante el ensayo de campo SPT y los equipos a utilizar. En importancia y uso, la norma específica que este ensayo proporciona muestras alteradas y remoldeadas de suelo.³⁷

La norma ASTM D5778-12 “Standard Test Method for Electronic Friction Cone and Piezocone Penetration Testing of Soils” detalla el procedimiento a realizar durante el ensayo de campo CPTu, los equipos exigidos y los parámetros geotécnicos que pueden obtenerse cuando es realizada correctamente, lo cual proporciona una información más completa del suelo.³⁸

³⁶ INVIAS, ‘Manual de Diseño de Cimentaciones Superficiales y Profundas Para Carreteras’.

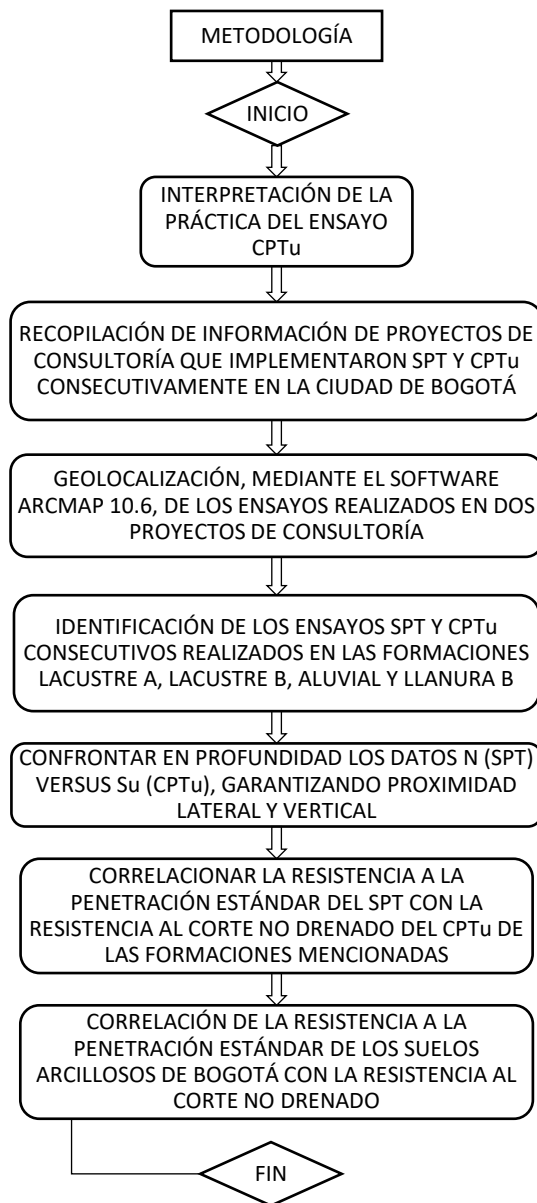
³⁷ INVIAS, ‘Sección 100 - SUELOS E-111’, 2013.

³⁸ ASTM, ‘Standard Test Method for Electronic Friction Cone and Piezocone Penetration Testing of Soils’, 2014 <<https://doi.org/10.1520/D5778-12.1>>.

1.8 METODOLOGÍA

En el presente capítulo se describe el proceso efectuado para desarrollar las actividades requeridas en el proyecto. La ilustración 10 especifica el proceso generalizado.

Ilustración 10. Diagrama de flujo de metodología.



Fuente: Propia

1.8.1 Interpretación de la práctica del ensayo CPTu

Conocer la práctica del ensayo CPTu en la ciudad de Bogotá es fundamental para entrar en detalle de los ensayos in situ que están implementando las empresas en los proyectos de construcción para obtener la información adecuada del perfil estratigráfico del suelo, el comportamiento del mismo ante esfuerzos, la rigidez y resistencia, por ende, en primera medida se vio la necesidad de realizar un análisis de la práctica del ensayo de exploración geotécnica CPTu en el distrito capital mediante una encuesta realizada a 20 empresas de ingeniería en geotecnia.

La encuesta se realizó por medio de llamada telefónica y se encontraba enfocada principalmente en cuestionar si ofrecían el servicio del ensayo de penetración de cono con medida de presión de poros y si habían realizado simultáneamente ensayos SPT y CPTu en la ciudad de Bogotá.

1.8.2 Recopilación de información

Para el desarrollo adecuado del proyecto se decidió obtener la información de los datos de estudio a través de dos proyectos de consultoría que han implementado el SPT y el CPTu consecutivamente en la ciudad de Bogotá, específicamente en la formación sabana, para ello, se realizó la búsqueda de los mismos en los repositorios del Instituto de Desarrollo Urbano (IDU) y La Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá. Lo siguiente respecta a la recopilación y análisis de información existente, que se extrajo de los documentos de los proyectos:

1.8.2.1 Factibilidad y actualización, complementación, ajustes de los estudios y diseños, y estudios y diseños para la ampliación y extensión de la avenida ciudad de Cali al sistema Transmilenio, entre la avenida circunvalar del sur y la avenida calle 170 y de los equipamientos urbanos complementarios, en Bogotá. Contrato No 1352 de 2017

“El Corredor Troncal Av. Ciudad de Cali se localiza en el sector occidental de la ciudad, en una extensión de 23.7 km desde la Av. Calle 70 (Av. San José) hasta la

Av. Terreros en el límite de Soacha pasando por las localidades de Suba, Engativá, Fontibón, Kennedy y Bosa.”³⁹

El proyecto atraviesa las unidades litológicas: complejo aluvial de conos, formación sabana, terraza alta, terraza baja, llanura aluvial y rellenos antrópicos. Para el plan de investigaciones, según la información de importancia para el desarrollo de este proyecto, las exploraciones geotécnicas realizadas para el tramo 1 las establecieron por tipo de estructura, siendo estaciones BRT, cruces con vía principal y puentes peatonales, estas fueron perforación mecánica (SPT) y piezocono (CPTu).

Tras el estudio de la información general de la localización del proyecto, se obtuvieron los datos de las coordenadas de los sitios en los que ejecutaron los ensayos de campo, en donde, en estaciones BRT se efectuaron 10 perforaciones mecánicas (149 m) y 11 piezoconos (156 m), en cruces principales 10 perforaciones mecánicas (495 m) y 18 piezoconos (541 m) y en puentes peatonales 5 perforaciones mecánicas (210 m) y 8 piezoconos (223 m).

1.8.2.2 Estudios y diseños para la construcción, conexión y puesta en operación de la nueva conducción del tramo 3 de la línea red matriz Tibitoc – Casablanca y sus obras complementarias. Consultoría No 1-02-25400-00923-2015

“El tramo 3 de la tubería Tibitoc – Casablanca, objeto de estudio por parte de la consultoría, tiene un diámetro de 78” y una longitud aproximada de 16,4 kilómetros desde la válvula 39 en la Avenida Boyacá con calle 80 hasta el tanque de Casablanca.”⁴⁰

La conducción del tramo 3 atraviesa las localidades de Engativá, Fontibón, Kennedy y Bosa, y parcialmente las localidades de Tunjuelito, Ciudad Bolívar y Puente Aranda, en donde, las unidades litológicas son formación sabana, terraza alta terraza baja y aluvial.

³⁹ Consorcio Troncales Bogotá, IDU, ‘Informe de Diseño Geotécnico Tramo 1’, 2019.

⁴⁰ Contelac, Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá, ‘PRODUCTO No. 05: ESTUDIOS Y DISEÑOS GEOTÉCNICOS’, 2018.

Posteriormente se identificaron los datos de información de interés que respectan a el programa de exploración geotécnica, que incluye perforación mecánica (SPT) ejecutados 51, y piezocono (CPTu) ejecutados 17, y las coordenadas de localización de los ensayos.

1.8.3 Geolocalización de ensayos

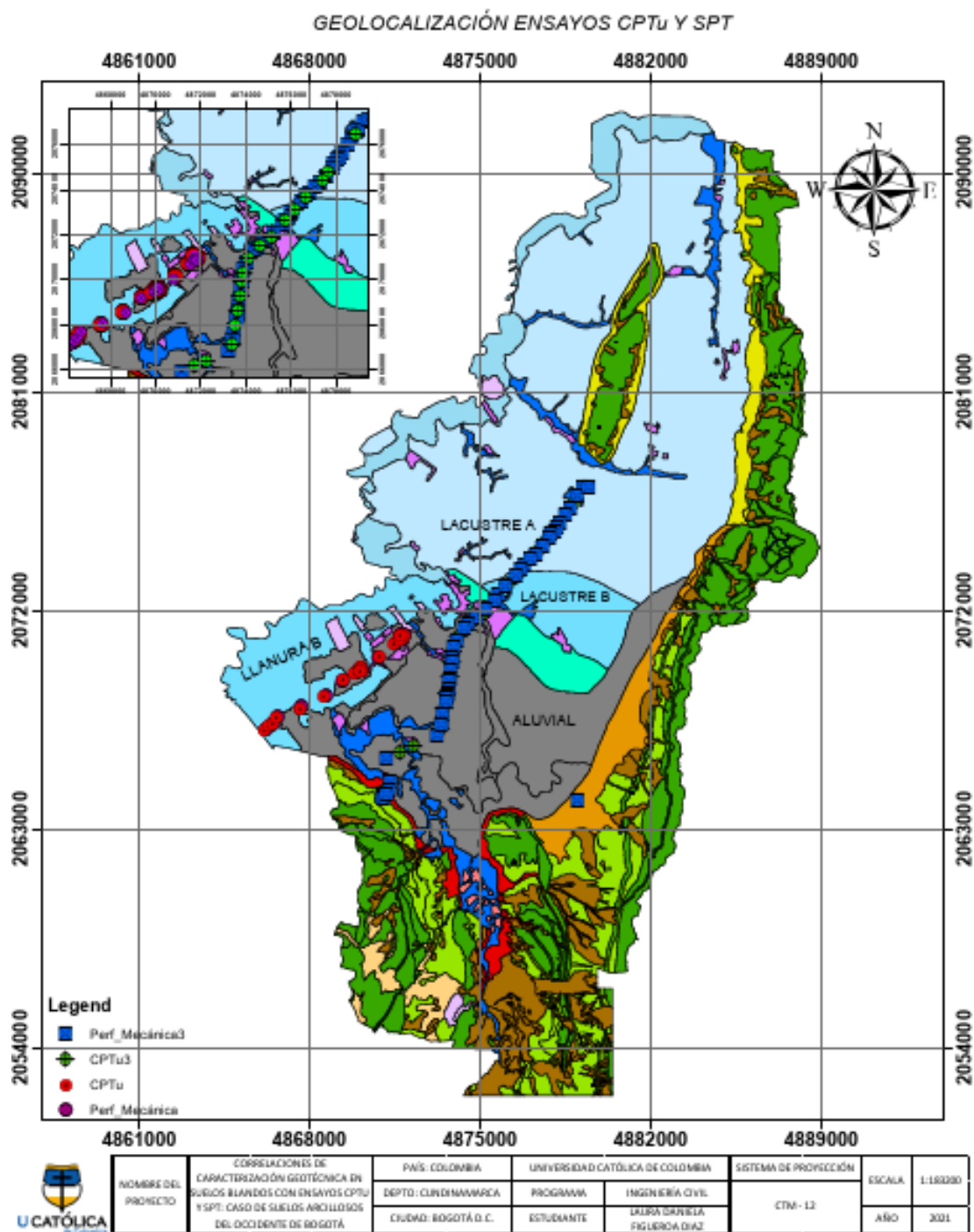
Teniendo en cuenta la información anterior, se geolocalizaron los ensayos SPT y CPTu mediante el software ArcGIS 10.6 para identificar con exactitud la ubicación por zonas geológicas. El desarrollo de esta actividad inició con la búsqueda de archivos indispensables para geolocalizar los puntos específicos, de esta manera, los Shapefile de las zonas geotécnicas y el mapa de Bogotá se descargaron directamente desde la base de “Datos Abiertos de Bogotá”⁴¹ para localizar principalmente el sitio de estudio y las zonas geotécnicas.

Las coordenadas de ubicación de la ejecución de los ensayos fueron convertidas al sistema de proyección para Colombia (CTM-12) mediante el servicio de conversión de coordenadas de la página del “Instituto Geográfico de Agustín Codazzi (IGAC)”⁴² para proceder a ingresarlas al software mediante una hoja de Excel. La ilustración 11 hace referencia al mapa elaborado con la información descrita previamente.

⁴¹ Datos Abiertos Bogotá, ‘Zonificación Geotécnica. Bogotá D.C’, *Plataforma Distrital de Datos Abiertos de Bogotá* <<https://datosabiertos.bogota.gov.co/dataset/zonificacion-geotecnica>>.

⁴² Instituto Geográfico de Agustín Codazzi, ‘Servicio de Conversión de Coordenadas’ <<https://origen.igac.gov.co/herramientas.html>>.

Ilustración 11. Geolocalización ensayos CPTu y SPT en ArcGIS 10.6.

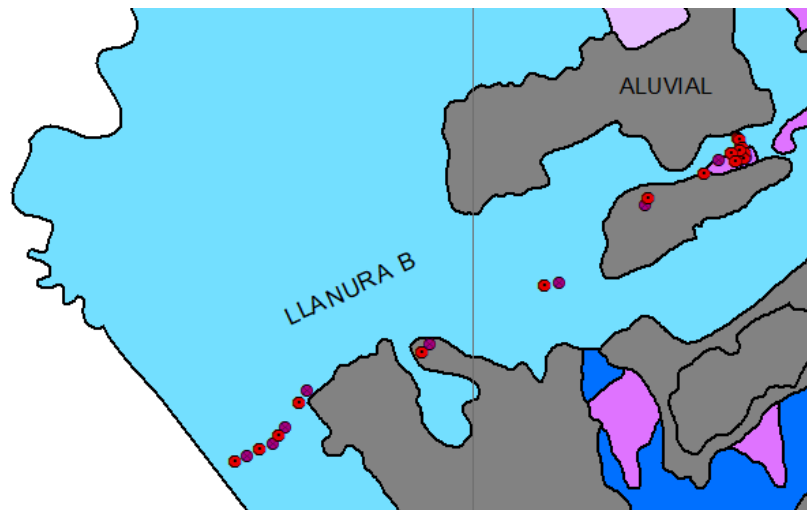


Fuente: Propia

Como se aprecia en el mapa, se encuentran geolocalizados los ensayos CPTu Y SPT de los dos proyectos mencionados, los cuales están ubicados en las 4 zonas geotécnicas de estudio: lacustre A, lacustre B, llanura B y aluvial. Los puntos que atraviesan las zonas lacustre A, lacustre B y aluvial son los ensayos ejecutados por el proyecto de construcción del tramo 3 de la tubería Tibitoc – Casablanca y los puntos restantes, ubicados en las zonas aluvial y llanura B, son los ensayos ejecutados por el proyecto de ampliación de la avenida ciudad de Cali al sistema Transmilenio.

Para mostrar en detalle la geolocalización y alternancia de los ensayos SPT y CPTu se presentan las siguientes ilustraciones, en donde se puede verificar la ubicación de los mismos por zonas. La ilustración 12 representa los ensayos ubicados en la zona llanura B, en donde los puntos rojos hacen referencia a los ensayos CPTu y los puntos morados a los ensayos SPT.

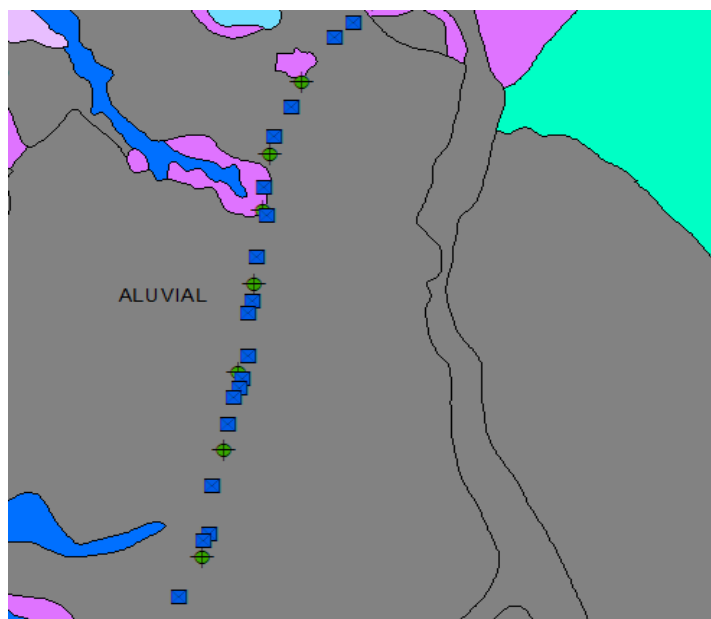
Ilustración 12. Geolocalización ensayos SPT y CPTu en zona llanura B



Fuente: Propia

Los ensayos ubicados en la zona aluvial, siendo los CPTu representados por puntos verdes y los SPT por puntos azules, se pueden apreciar detalladamente en la ilustración 13.

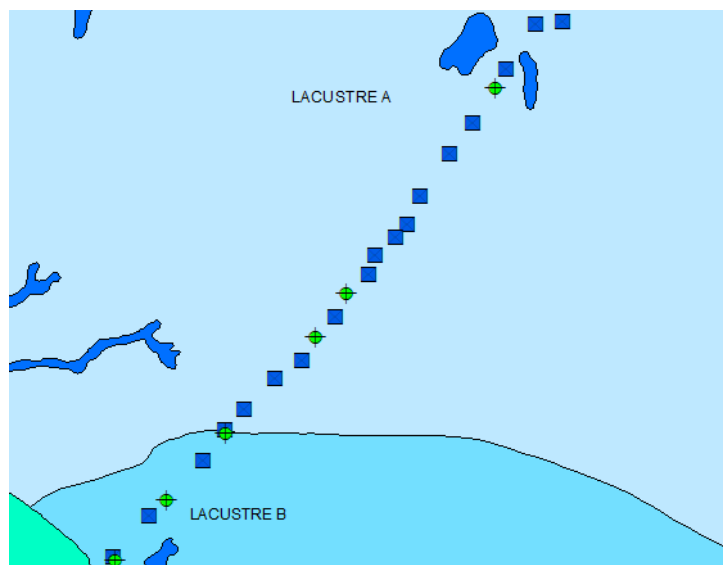
Ilustración 13. Geolocalización ensayos SPT y CPTu en zona aluvial



Fuente: Propia

La ilustración 14 es el detalle de las zonas lacustre A y B, siendo los CPTu representados por puntos verdes y los SPT por puntos azules.

Ilustración 14. Geolocalización ensayos SPT y CPTu en zonas lacustre A y B



Fuente: Propia

1.8.4 Identificación de los ensayos

Tras geolocalizar las pruebas in situ ejecutadas para cada proyecto se procedió a identificar para cada una de las 4 zonas geotécnicas de estudio los ensayos del CPTu y SPT que se realizaron consecutivamente, para obtener los datos de información de las exploraciones y estimar los ensayos a correlacionar como la resistencia al corte no drenado con la resistencia a la penetración estándar.

1.8.4.1 Proyecto de ampliación de la avenida ciudad de Cali al sistema Transmilenio

A continuación, se especifican los números de los ensayos a correlacionar para las dos zonas que atraviesa el proyecto de ampliación de la avenida ciudad de Cali al sistema Transmilenio. En la tabla 7, se puede apreciar el número correspondiente de ambos ensayos, la ubicación de ejecución y el tipo de estructura que, como se mencionó anteriormente en recopilación de información, las exploraciones geotécnicas las establecieron por el tipo de estructura. Para determinar los números del registro de ensayos SPT y CPTu a correlacionar se identificaron los que se encontraban consecutivamente en la zona llanura B.

Tabla 7. Estimación de ensayos a correlacionar en la zona llanura B.

ZONA LLANURA B			
No. SPT	No. CPTu	UBICACIÓN	TIPO DE ESTRUCTURA
01	01	Portal Américas	PUENTES PEATONALES
01	02		
01	03		
02	02		
02	03		
02	06		
04	06		
04	07		
01	01	Av. Bosa	ESTACIONES BRT
01	01	Térreos	
02	02		
03	03		
01	01	S. Bernardino	

Fuente: Propia

La siguiente tabla especifica el número de cada ensayo a correlacionar en la zona aluvial.

Tabla 8. Estimación de ensayos a correlacionar en la zona aluvial.

ZONA ALUVIAL			
No. SPT	No. CPTu	UBICACIÓN	TIPO DE ESTRUCTURA
01	01	Dg. 49 Sur	ESTACIONES BRT
01	01	Calle 70 Sur	
01	01	P. Bonito	
01	01	B. Tintal	
05	01	Avenida Américas	CRUCES PRINCIPALES
05	10		
06	01		
06	10		
07	02		
07	08		
08	09		
08	03		

Fuente: Propia

1.8.4.2 Proyecto de construcción del tramo 3 de la tubería Tibitoc – Casablanca.

De ideal manera, se identifican los números de los ensayos a correlacionar, en este caso para las tres zonas geotécnicas que atraviesa el proyecto de construcción del tramo 3 de la tubería Tibitoc – Casablanca. En la siguiente tabla se estiman los números de los ensayos a correlacionar para la zona lacustre A.

Tabla 9. Estimación de ensayos a correlacionar en la zona lacustre A.

LACUSTRE A	
No. SPT	No. CPTu
2.0	3.0
3.0	3.0
47.0	6.0
48.0	6.0

Tabla9. (Continuación)

49.0	6.0
49.0	7.0
50.0	7.0
7.0	7.0

Fuente: Propia

La siguiente tabla especifica el número de cada ensayo a correlacionar para la zona lacustre B.

Tabla 10. Estimación de ensayos a correlacionar en la zona lacustre B.

ZONA LACUSTRE B	
No. SPT	No. CPTu
09	08
10	10
11	11

Fuente: Propia

Para la tercera zona geotécnica (aluvial) que atraviesa el proyecto se estimaron los siguientes ensayos a correlacionar.

Tabla 11. Estimación de ensayos a correlacionar en la zona aluvial.

ALUVIAL	
No. SPT	No. CPTu
17.0	15.0
52.0	16.0
19.0	17.0
53.0	18.0
54.0	18.0
21.0	19.0
56.0	19.0
57.0	20.0

Tabla11. (Continuación)

23.0	20.0
50.0	21.0
24.0	21.0
25.0	21.0
28.0	24.0

Fuente: Propia

1.8.4.3 Confrontar los datos en profundidad

Se confrontan en profundidad las perforaciones SPT con los sondeos CPTu y se toman las parejas de datos del N_{45} y S_u para garantizar proximidad lateral y vertical en las correlaciones, es decir, se consideraron estas profundidades promedio registradas según el N_{45} y se determinaron los S_u a igual profundidad mediante el software Grapher, en donde se digitalizaron las gráficas del reporte que realiza el dispositivo tras medir a una velocidad constante de 2cm/s la resistencia a la penetración por punta del cono, la fricción en el fuste y la presión de poros. En la siguiente tabla se demuestra la confrontación del ensayo SPT-07 (N_{45}) con el CPTu-02 (S_u) a igual profundidad, los cuales fueron ejecutados en la zona aluvial por el proyecto de ampliación de la avenida ciudad de Cali al sistema Transmilenio.

Tabla 12. Confrontación ensayos SPT-07 y CPTu-02 zona aluvial.

PROF (m)	N_{45} SPT (Av-AMER-07)	S_u CPTu-02
1.80	5.00	66.62
5.00	2.00	25.78
8.30	7.00	48.59
11.00	5.00	20.93
14.30	7.00	19.61
16.20	7.00	27.30
19.00	50.00	61.02
21.00	28.00	42.58
23.00	17.00	28.82
25.50	14.00	26.27
27.00	16.00	27.51
29.80	9.00	38.18

Fuente: Propia

La tabla 13 es otro ejemplo demostrativo de confrontación realizado en la zona lacustre A para los ensayos SPT-47 (N) y CPTu-06 (Su), ejecutados por el proyecto de construcción del tramo 3 de la tubería Tibitoc – Casablanca, en este caso se aprecia la poca disponibilidad de datos respecto a la anterior confrontación.

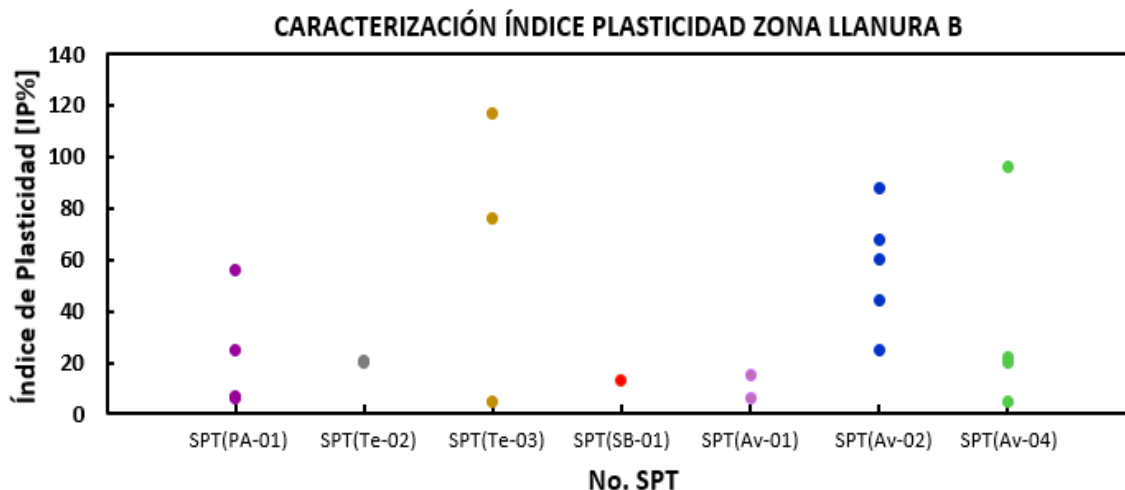
Tabla 13. Confrontación ensayos SPT-47 y CPTu-06 zona lacustre A.

PROF (m)	N ₄₅ SPT-47	Su CPTu-06
1.40	2.00	15.5594
1.95	2.00	17.6152
3.00	2.00	7.2544
4.05	2.00	13.4380
5.10	2.00	9.3502

Fuente: Propia

Tras confrontar los N₄₅ del SPT y Su del CPTu en profundidad, se expresó gráficamente el registro de caracterización del índice de plasticidad y el límite líquido a las profundidades de confrontación, según el número del ensayo SPT, para cada zona. La gráfica 9 indica el rango del índice de plasticidad entre 5 y 117 (%) de la zona llanura B, según los ensayos SPT efectuados, de acuerdo a la confrontación en profundidad entre 2.6m a 30.3m.

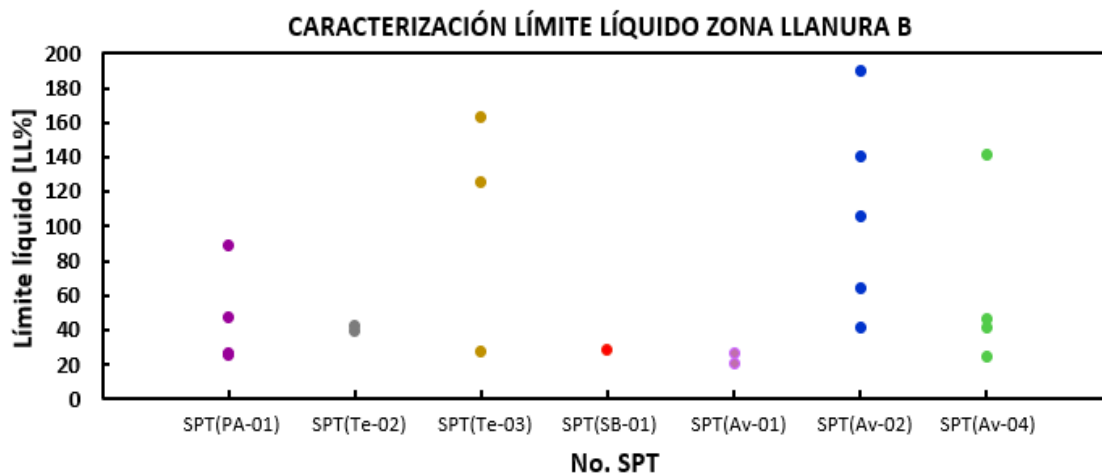
Gráfica 9. Caracterización del IP zona llanura B.



Fuente: Propia

La siguiente gráfica representa la caracterización del límite líquido que se encuentra entre 21 y 190 (%) de la zona llanura B según la confrontación en profundidad.

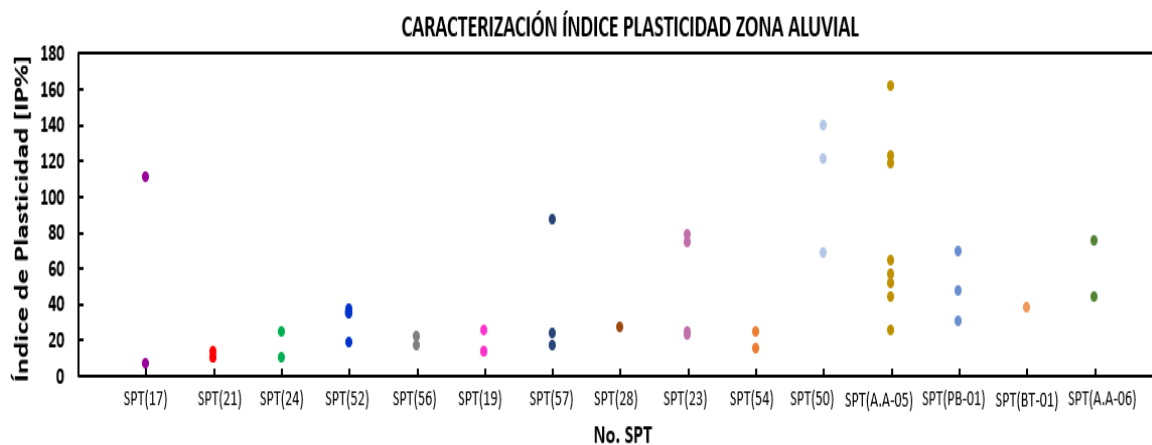
Gráfica 10. Caracterización del LL zona llanura B.



Fuente: Propia

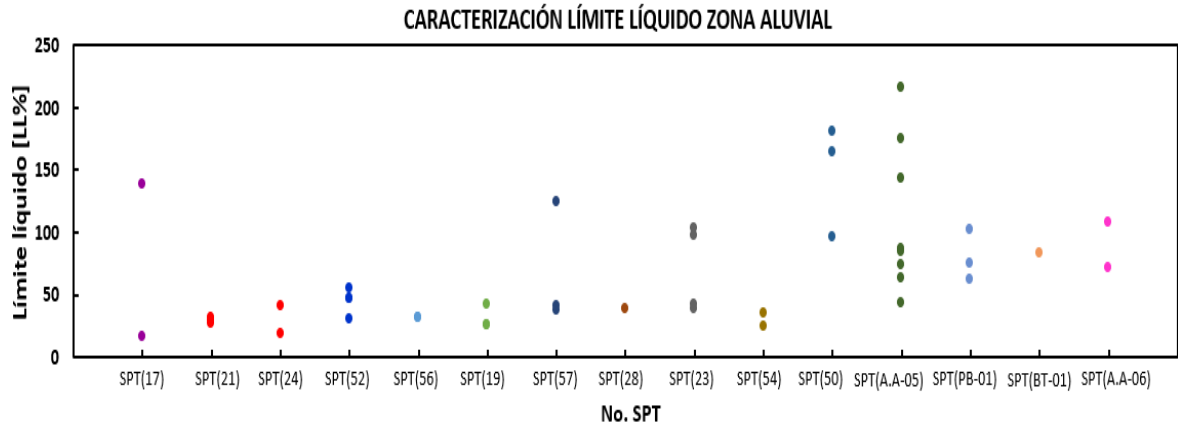
La zona aluvial se caracteriza principalmente por un índice de plasticidad de 6 a 161 (%) y el límite entre plasticidad y liquidez desde 16 hasta 216 (%).

Gráfica 11. Caracterización del IP zona aluvial.



Fuente: Propia

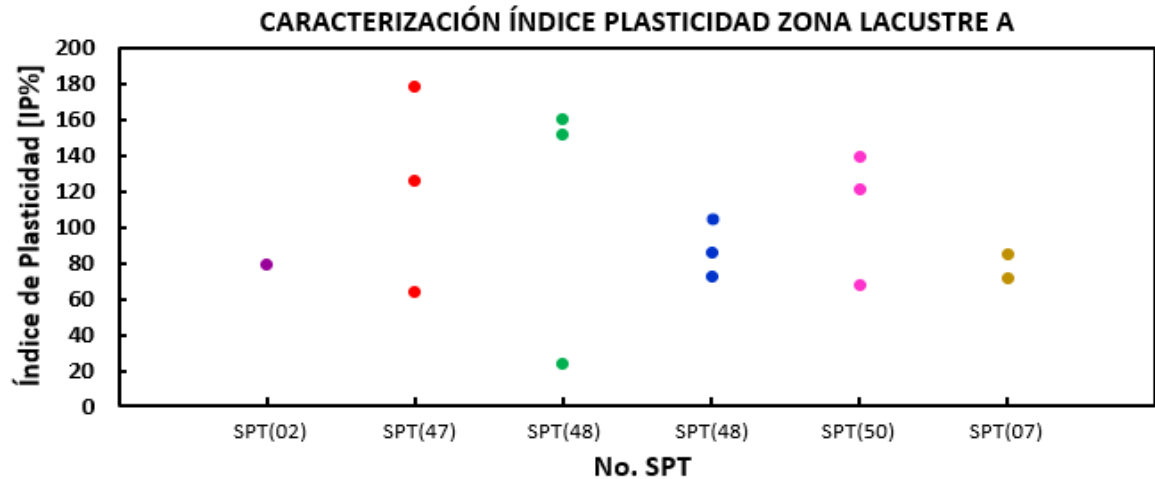
Gráfica 12. Caracterización del LL zona aluvial.



Fuente: Propia

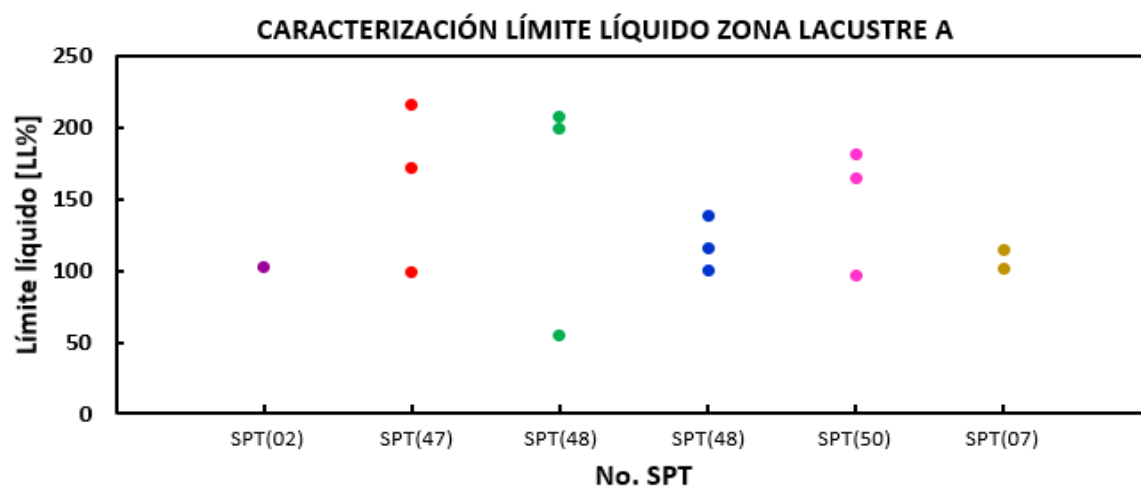
La caracterización del índice de plasticidad, de 24 a 178 (%), y límite líquido, de 55 a 215 (%), de la zona lacustre A se estimó en la siguiente gráfica pese a la poca disponibilidad de datos registrados por cada ensayo SPT que, en efecto, algunas de estas perforaciones confrontadas con el Su del CPTu no reportaban información correspondiente a los límites de Atterberg.

Gráfica 13. Caracterización del IP zona lacustre A.



Fuente: Propia

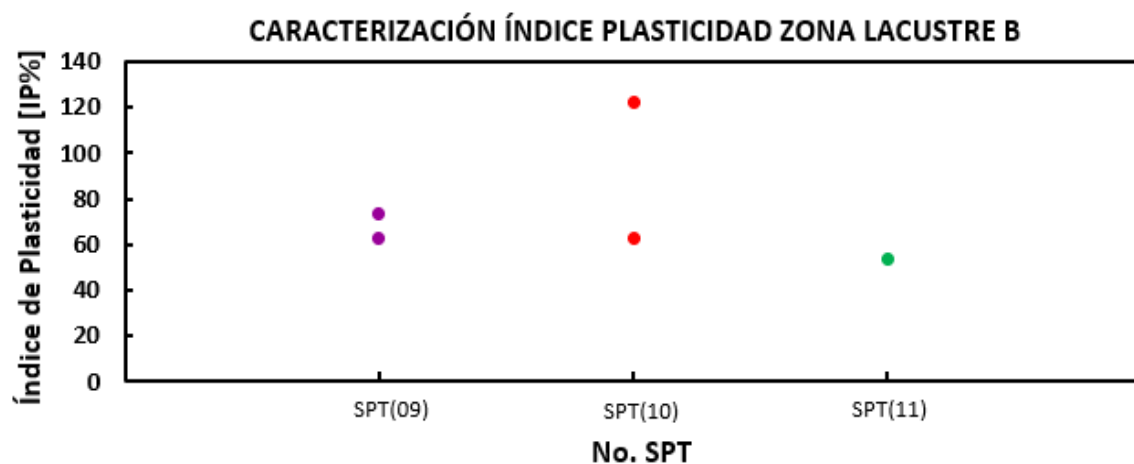
Gráfica 14. Caracterización del LL zona lacustre A.



Fuente: Propia

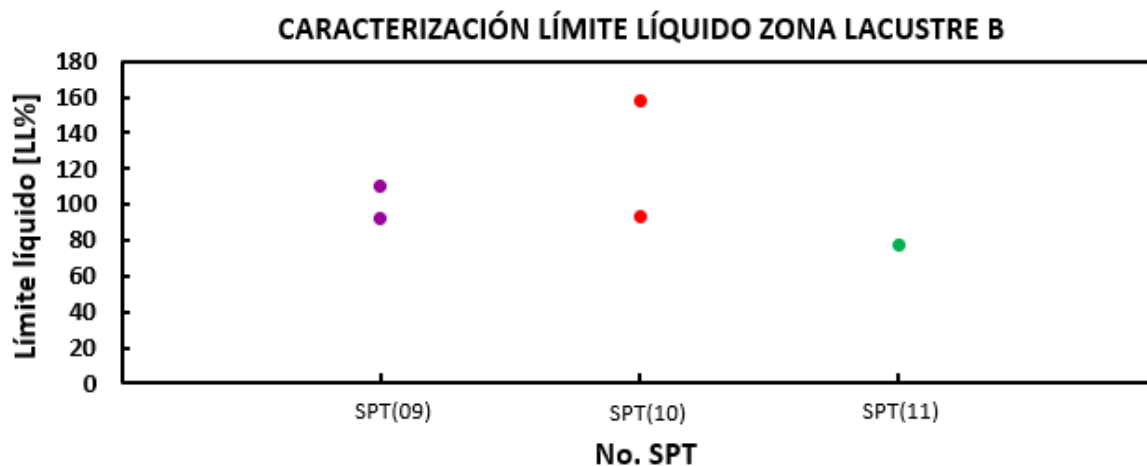
De igual manera, la zona lacustre B se caracterizó con poca disponibilidad de datos por el bajo número de ensayos ejecutados en el sitio, de modo que la carencia en los registros del valor N no corregido y el limitado uso del CPTu impidió confrontar en profundidad los parámetros. Para la zona, el índice de plasticidad se encuentra entre un rango de 54 a 122 (%) y el límite líquido entre 77 a 158 (%).

Gráfica 15. Caracterización del LL zona lacustre B.



Fuente: Propia

Gráfica 16. Caracterización del LL zona lacustre B.



Fuente: Propia

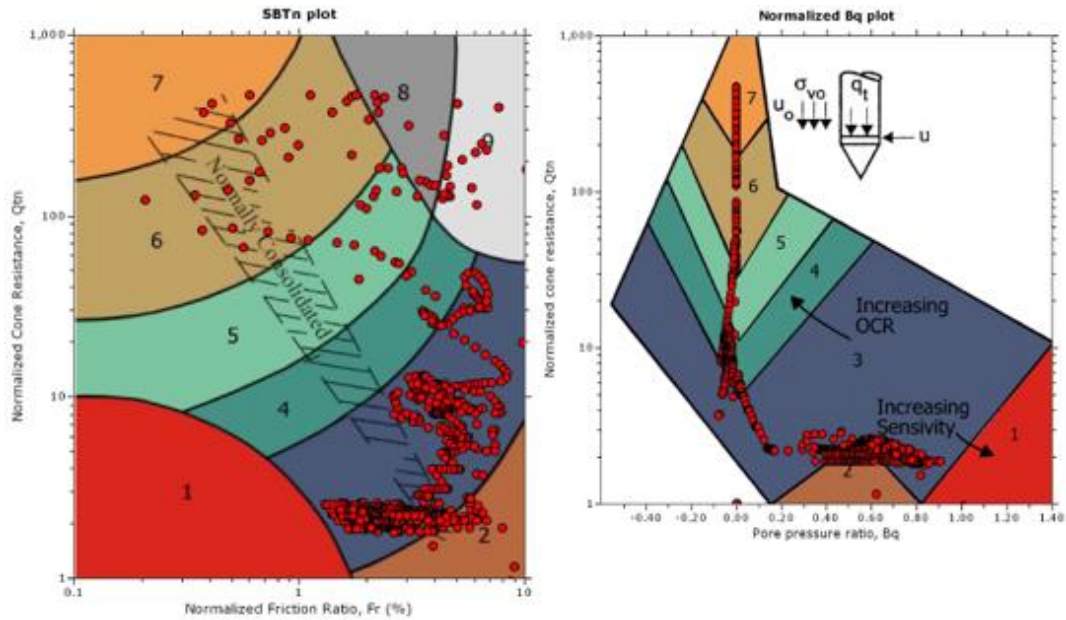
1.8.4.4 Información para correlaciones

Siguiente a la identificación de los ensayos y confrontación en profundidad de las parejas de datos de N_{45} y S_u se realizaron las respectivas correlaciones para las zonas llanura B, aluvial, lacustre A y lacustre B para determinar una correlación indispensable de los suelos arcillosos de Bogotá. Campanella y Robertson (1982) indican que q_c y f_s deben corregirse por la presión de agua que actúa sobre el cono, de esta manera el dispositivo del CPTu debe aplicar dichas correcciones a los datos registrados, sin embargo, en la norma ASTM se establece que los manguitos de fricción deben tener igual área final ($A_{st} = A_{sb}$) lo cual reduce el efecto de la presión de agua en las mediciones.⁴³

En los registros del CPTu de los proyectos empleados se observan las gráficas con las respectivas correcciones aplicadas y la normalización requerida en los gráficos según Robertson (1990) para estimar la estratigrafía del suelo mediante 9 zonas definidas y que, posteriormente en el año 2010 realizó una nueva actualización. La ilustración 15 es un ejemplo de la normalización de los parámetros medidos por el CPTu-03 del proyecto de Tibitoc - Casablanca, para confirmar la adecuada aplicación de las bases teóricas.

⁴³ Robertson y Cabal.

Ilustración 15. Parámetros normalizados CPTu.



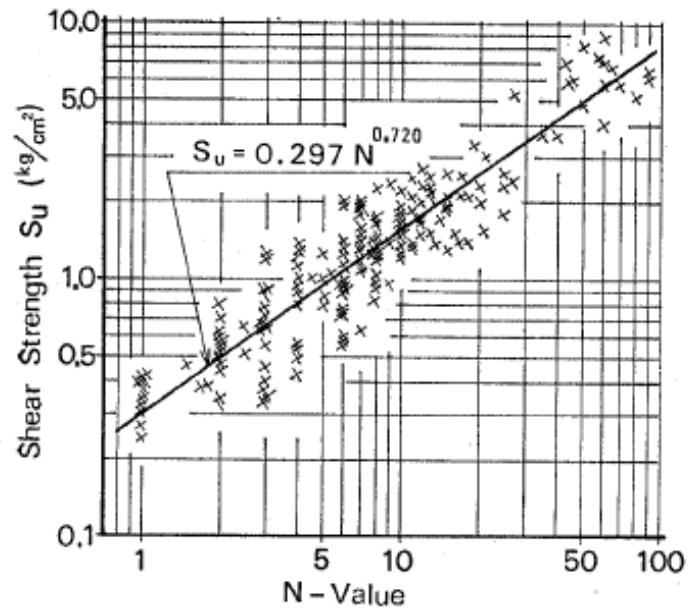
Fuente: Ingeniería y Georriesgos, proyecto de construcción del tramo 3 de la tubería Tibitoc – Casablanca, (2018).

Las correlaciones realizadas para las cuatro zonas de estudio permitieron ampliar los datos de información para desarrollar una correlación de los suelos arcillosos de Bogotá. En la investigación realizada por Akio Hara et al (1974) se propone la siguiente ecuación empírica obtenida de la correlación del N con S_u , en “Shear modulus and shear strength of cohesive soils”.⁴⁴

$$S_u = 0.297 N^{0.720}$$

⁴⁴ Akio Hara et al., ‘Shear Modulus and Shear Strength of Cohesive Soils’, *Soils and Foundations*, 14.3 (1974), 1–12 <https://doi.org/10.3208/sandf1972.14.3_1>.

Gráfica 17. Relación entre S_u y N .



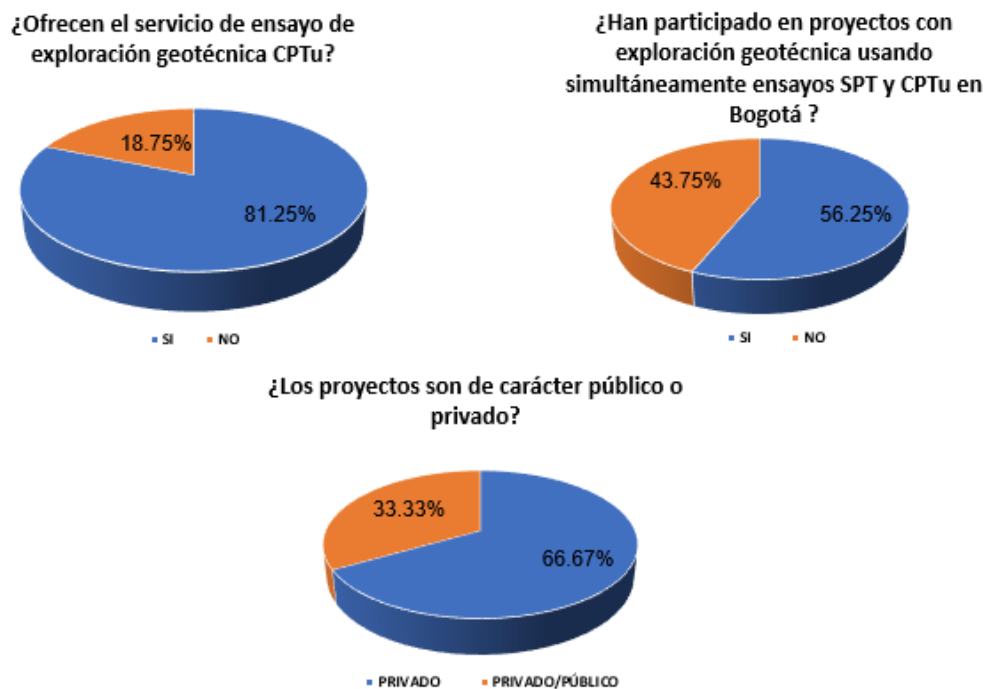
Fuente: A. Hara et al, *Shear modulus and shear strength of cohesive soils* (1974).

Con la información de la correlación de los suelos arcillosos de Japón, se realizará una comparación con la correlación de la resistencia a la penetración estándar (N_{45}) y la resistencia al corte no drenado (S_u) de los suelos arcillosos de Bogotá.

2 RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

En la ilustración 16 se realiza la interpretación de la información que proporcionaron las empresas consultadas a través de la encuesta:

Ilustración 16. Información obtenida a través de la encuesta.



Fuente: Propia

En representación de la encuesta se realizó la interpretación de las preguntas principales, enfocadas en conocer la práctica del ensayo CPTu en Bogotá para obtener información de los proyectos en los que habían participado estas empresas e implementar la información de los ensayos in situ en la determinación de las correlaciones, sin embargo, como puede estimarse en los porcentajes de la segunda pregunta, menos del 50% de las empresas cuestionadas habían implementado simultáneamente SPT y CPTu en Bogotá, además, aproximadamente el 66.7% de ellas realizaban contratación de carácter privado, lo cual impidió obtener información de este tipo de proyectos. De acuerdo con esto, se optó por encontrar del repositorio del IDU y el Acueducto la información.

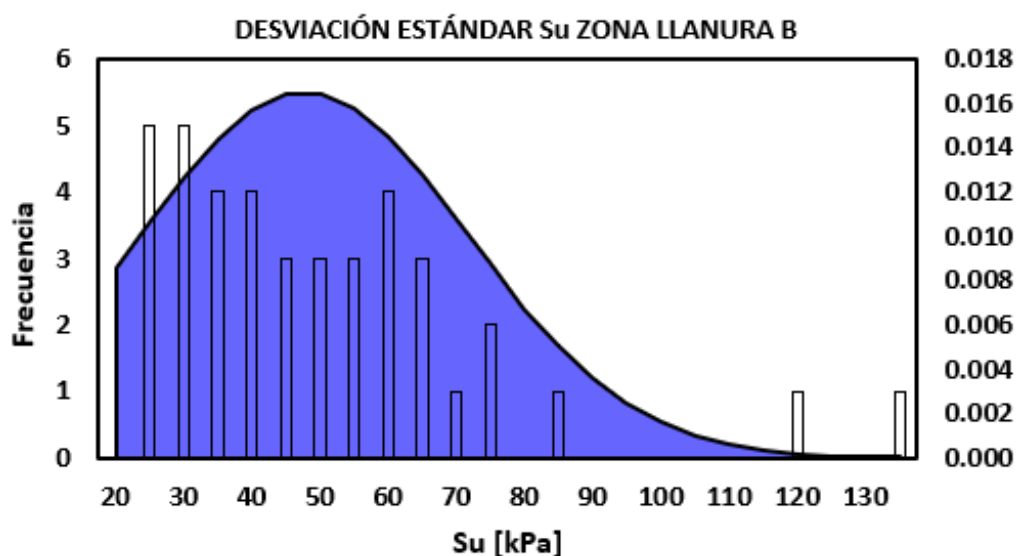
En la siguiente tabla se detalla el consolidado de la información estadística de importancia que representa los datos empleados de N_{45} y S_u para la correlación de la zona llanura B. En la gráfica 18 se representa la desviación estándar de los 40 datos de S_u empleados para la correlación, en donde, la dispersión respecto al promedio se evidencia entre 75 kPa y 134.89 kPa.

Tabla 14. Información estadística zona llanura B.

Consolidado de resultados estadísticos de N_{45} SPT		Consolidado de resultados estadísticos de S_u CPTu		Consolidado de resultados estadísticos de S_u de la correlación	
n	40.00	n	40.00	n	40.00
Promedio	10.63	Promedio	47.67	Promedio	44.45
Mediana	10.00	Mediana	42.69	Mediana	44.75
Moda	7.00	Moda	22.00	Moda	38.03
Desviación estándar	5.51	Desviación estándar	22.30	Desviación estándar	11.07
Curtosis	0.17	Curtosis	4.20	Curtosis	0.14
Coeficiente Asimetría	0.79	Coeficiente Asimetría	1.77	Coeficiente Asimetría	-0.01
Valor mínimo	2.00	Valor mínimo	20.07	Valor mínimo	21.5
Valor máximo	24.00	Valor máximo	134.89	Valor máximo	66.8

Fuente: Propia

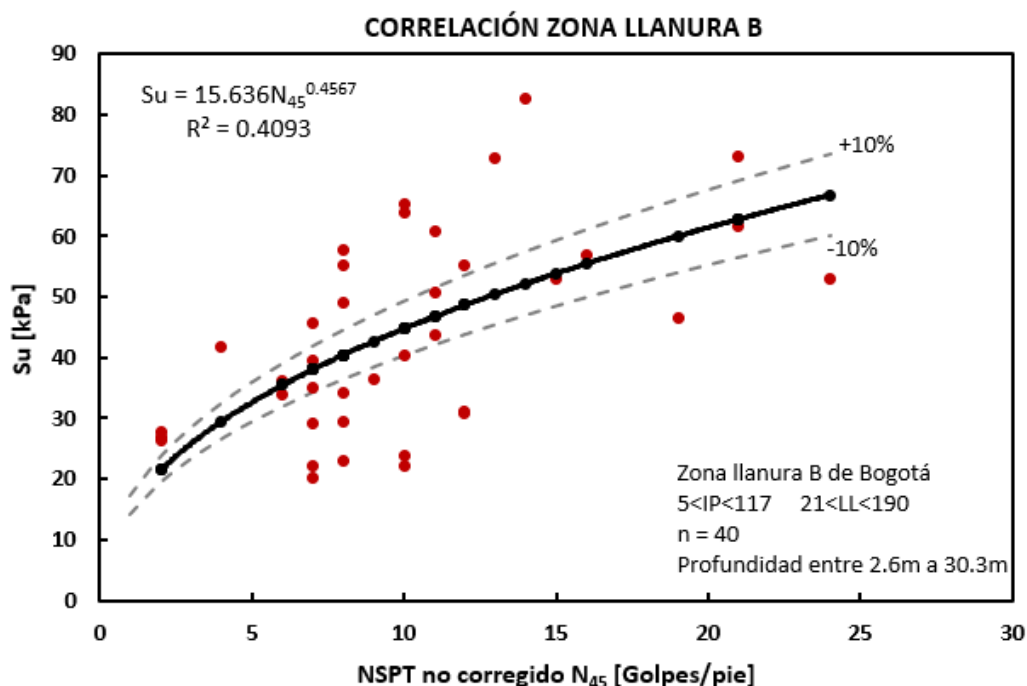
Gráfica 18. Desviación estándar de los datos de S_u zona llanura B.



Fuente: Propia

Respecto a la correlación realizada para la zona llanura B, una vez que se realizó la identificación de los ensayos consecutivos mediante la geolocalización de los mismos y la confrontación de los parámetros N_{45} y S_u , se presenta en la gráfica 19 la función potencial propuesta para la relación de la resistencia al corte no drenado con la resistencia a la penetración.

Gráfica 19. Correlación zona llanura B.



Fuente: Propia

La correlación para la zona llanura B se encuentra representada por 40 pares de datos de N_{45} y S_u , a una profundidad promedio de entre 2.6 m y 30.3 m. El índice de plasticidad de la zona está entre un rango de 5 a 117 (%) y el límite plástico entre 21 a 190 (%). Los valores de la resistencia al corte no drenado tienden a incrementarse con el aumento del número de golpes, sin embargo, la relación representada por un 40.93% entre los parámetros no es considerablemente alta, por ende, se estimó el 10% de error de los datos que se encontraban por encima y bajo la línea de tendencia y en efecto incide la poca disponibilidad de datos para la zona.

En cuanto a la zona aluvial, la siguiente tabla detalla el consolidado de la información estadística de importancia que representa los datos de N_{45} y S_u . En la

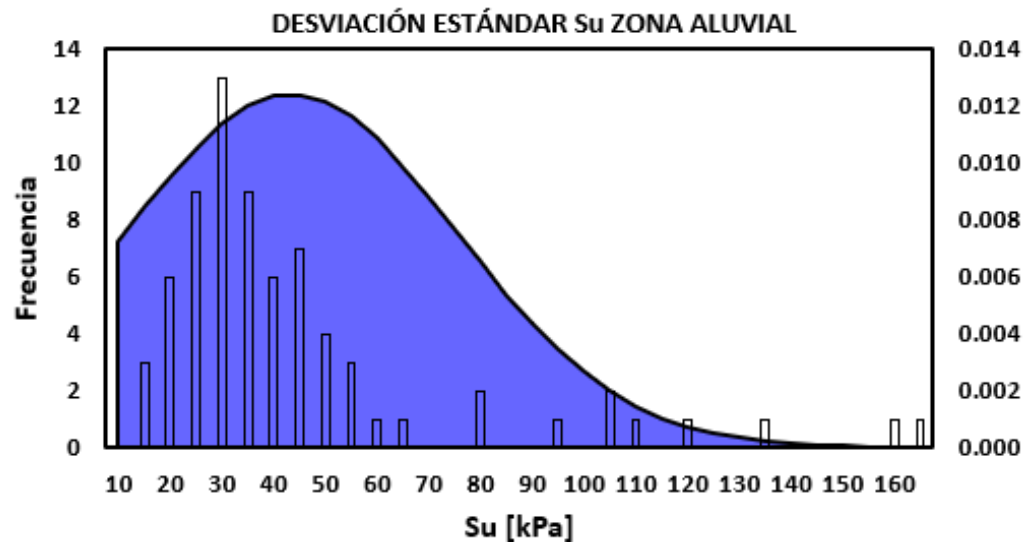
gráfica 20 se representa la desviación estándar de los 72 datos de Su empleados para la correlación, en donde, la dispersión respecto al promedio se evidencia entre 60 kPa y 164.71 kPa.

Tabla 15. Información estadística zona aluvial.

Consolidado de resultados estadísticos de N_{45} SPT		Consolidado de resultados estadísticos de S_u CPTu		Consolidado de resultados estadísticos de S_u de la correlación	
n	72.00	n	72.00	n	72.00
Promedio	10.25	Promedio	43.36	Promedio	41.57
Mediana	7.00	Mediana	33.29	Mediana	34.91
Moda	3.00	Moda	27.60	Moda	19.91
Desviación estándar	10.00	Desviación estándar	32.13	Desviación estándar	25.03
Curtosis	5.93	Curtosis	4.56	Curtosis	2.90
Coeficiente Asimetría	2.31	Coeficiente Asimetría	2.17	Coeficiente Asimetría	1.67
Valor mínimo	2.00	Valor mínimo	11.97	Valor mínimo	15.2
Valor máximo	51.00	Valor máximo	164.71	Valor máximo	130.2

Fuente: Propia

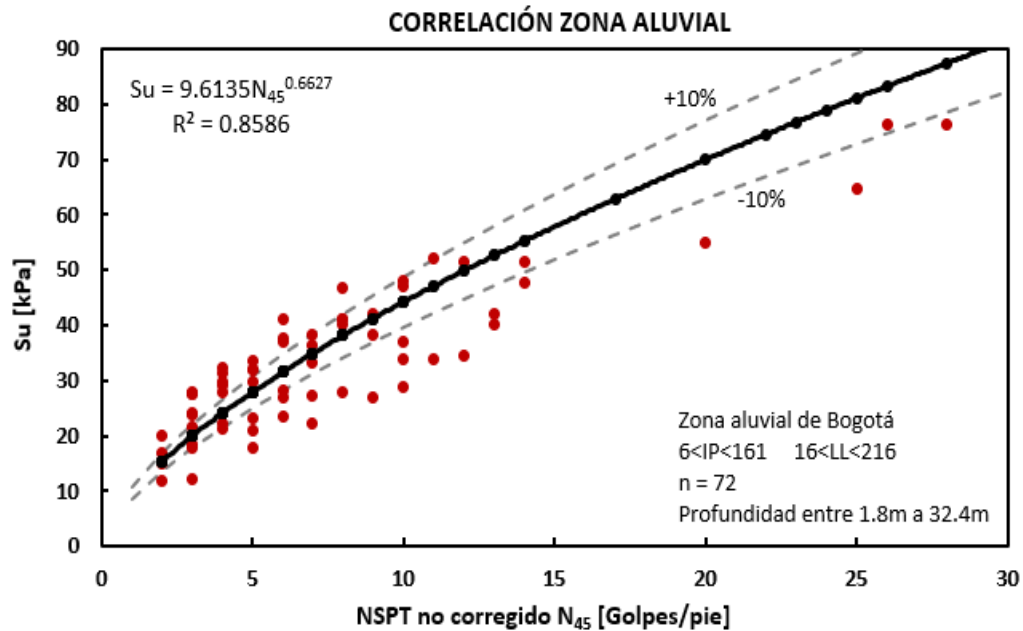
Gráfica 20. Desviación estándar de los datos de S_u zona aluvial.



Fuente: Propia

La zona aluvial, está representada por una muestra de 72 pares de datos de N_{45} y S_u que, a diferencia de la anterior zona, se ejecutaron más cantidades de ensayos de exploración en campo. Para este caso, como puede observarse en la gráfica 21, la correlación existente del 85.86% entre las dos variables es relativamente alta debido al número de parejas de datos y la concentración de los mismos. Por otra parte, se estima que los datos se encuentran orientados, en su mayoría, en las resistencias a la penetración menores a 10 golpes.

Gráfica 21. Correlación zona aluvial.



Fuente: Propia

Respecto a las zonas lacustre A y lacustre B la correlación existente es insignificante según el análisis de las gráficas 23 y 25, puesto que, se efectuaron pocos ensayos en las zonas y la carencia de registros de datos del SPT indican la ineficiencia del ensayo para determinar los parámetros del suelo con el valor N .

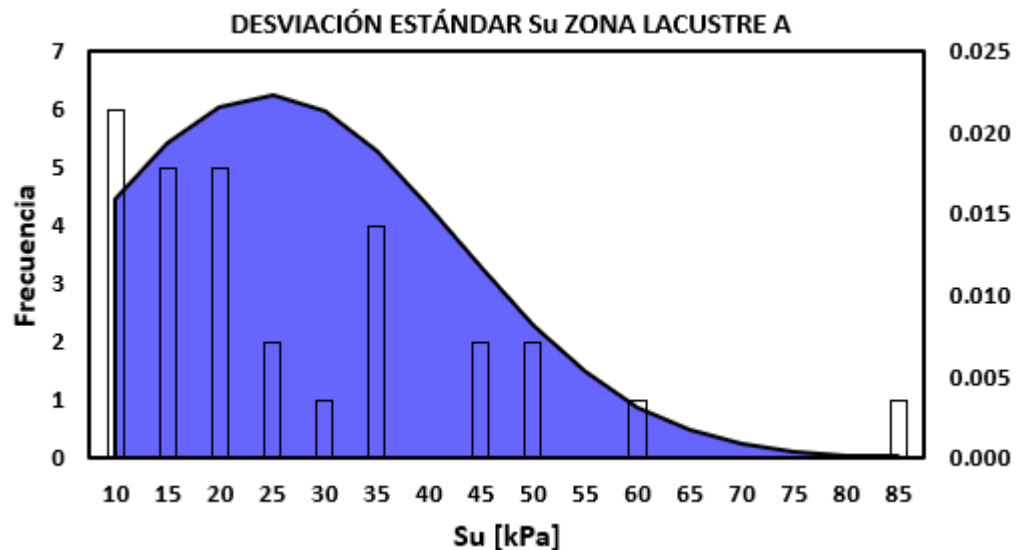
En lo que respecta a la zona lacustre A, la tabla 16 detalla el consolidado de la información estadística de importancia que representa los 29 datos de N_{45} y S_u . En la gráfica 22 se representa la desviación estándar de los datos de S_u empleados para la correlación, en donde, la dispersión respecto al promedio se evidencia entre 45 kPa y 81.18 kPa.

Tabla 16. Información estadística zona lacustre A.

Consolidado de resultados estadísticos de N_{45} SPT		Consolidado de resultados estadísticos de S_u CPTu		Consolidado de resultados estadísticos de S_u de la correlación	
n	29.00	n	29.00	n	29.00
Promedio	3.93	Promedio	24.67	Promedio	19.87
Mediana	3.00	Mediana	17.62	Mediana	18.95
Moda	2.00	Moda	15.56	Moda	16.73
Desviación estándar	2.48	Desviación estándar	17.85	Desviación estándar	3.63
Curtosis	0.64	Curtosis	2.20	Curtosis	-0.66
Coeficiente Asimetría	1.23	Coeficiente Asimetría	1.43	Coeficiente Asimetría	0.77
Valor mínimo	2.00	Valor mínimo	6.93	Valor mínimo	16.73
Valor máximo	10.00	Valor máximo	81.18	Valor máximo	27.47

Fuente: Propia

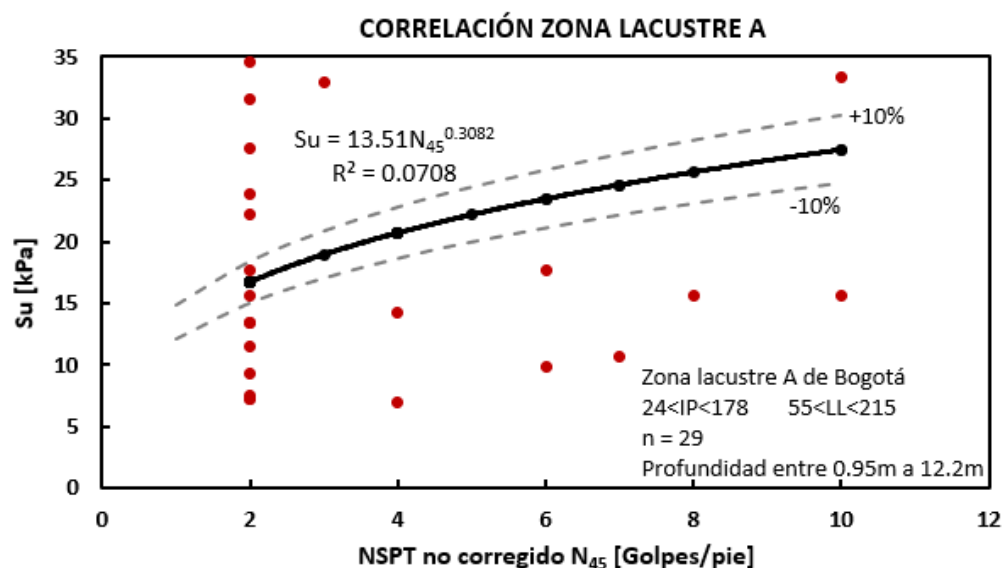
Gráfica 22. Desviación estándar de los datos de S_u zona lacustre A.



Fuente: Propia

La correlación de la zona lacustre A se realizó con una muestra de 29 pares de datos de N_{45} y S_u a una profundidad de 0.95 m a 12.2 m. De esta zona se infiere que, en su mayoría, la resistencia a la penetración estándar es representada por solo 2 golpes, o ningún número de golpes en otros casos, para penetrar cada 15 cm el suelo.

Gráfica 23. Correlación zona lacustre A.



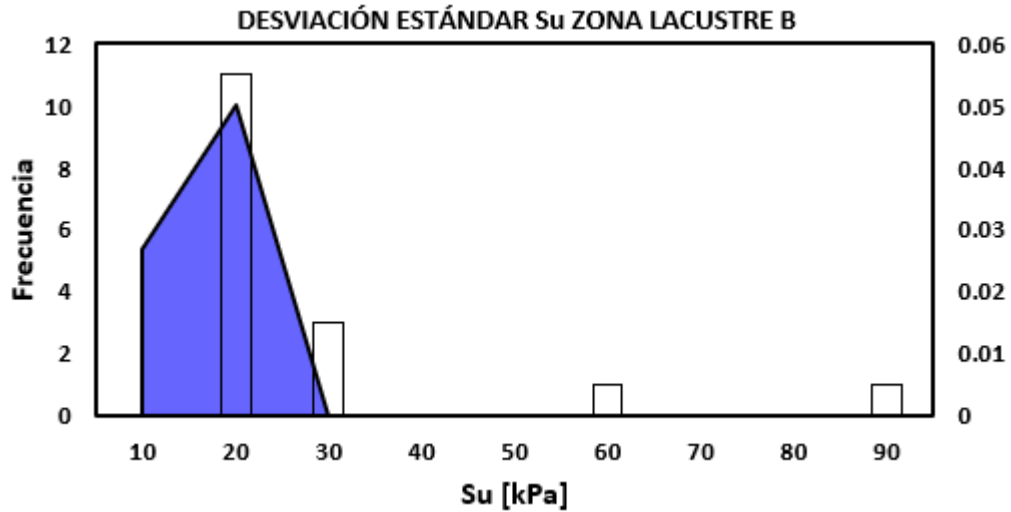
Para la zona lacustre B, la tabla 17 detalla el consolidado de la información estadística de importancia que representa los 16 datos de N_{45} y S_u . En la gráfica 24 se representa la desviación estándar de los datos de S_u empleados para la correlación de esta zona, en donde se aprecia que los datos no siguen una distribución normal, la cual puede estar determinada por el número de la muestra.

Tabla 17. Información estadística zona lacustre B.

Consolidado de resultados estadísticos de N_{45} SPT		Consolidado de resultados estadísticos de S_u CPTu		Consolidado de resultados estadísticos de S_u de la correlación	
n	16.00	n	16.00	n	16.00
Promedio	3.75	Promedio	23.99	Promedio	20.12
Mediana	4.00	Mediana	17.14	Mediana	21.12
Moda	4.00	Moda	19.20	Moda	21.12
Desviación estándar	1.18	Desviación estándar	20.22	Desviación estándar	3.71
Curtosis	-0.55	Curtosis	6.70	Curtosis	-0.64
Coeficiente Asimetría	0.00	Coeficiente Asimetría	2.61	Coeficiente Asimetría	-0.27
Valor mínimo	2.00	Valor mínimo	10.62	Valor mínimo	14.31
Valor máximo	6.00	Valor máximo	87.24	Valor máximo	26.53

Fuente: Propia

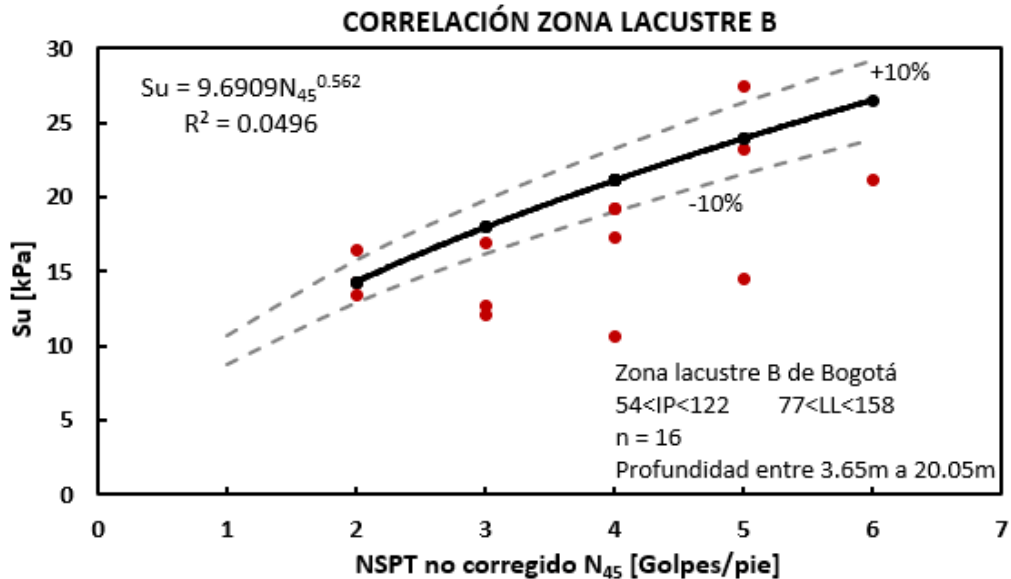
Gráfica 24. Desviación estándar de los datos de Su zona lacustre B.



Fuente: Propia

Para la correlación de la zona lacustre B se utilizó únicamente una muestra de 16 pares de datos de N_{45} y S_u , debido al bajo número de ensayos ejecutados en la zona, y para este caso las profundidades se encuentran entre 3.65 m a 20.05 m.

Gráfica 25. Correlación zona lacustre B.



Fuente: Propia

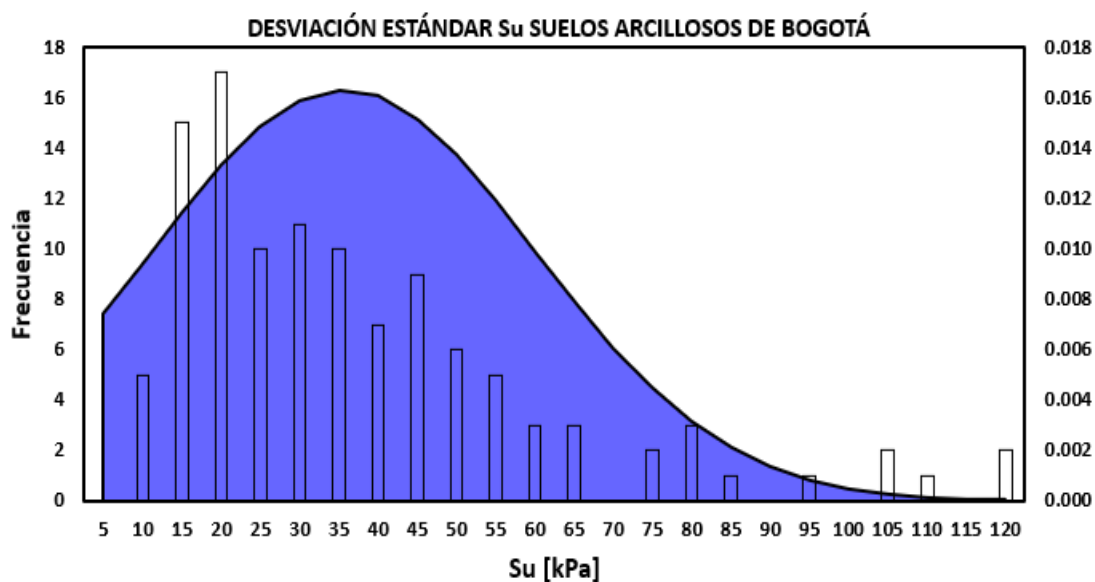
Para determinar una correlación general de los suelos arcillosos de la ciudad de Bogotá se unificó la información previamente descrita, la cual se detalla en la tabla 18. La desviación estándar se encuentra representada en la gráfica 26 que indica una dispersión respecto al promedio para datos de S_u mayores a 65 kPa.

Tabla 18. Información estadística suelos arcillosos de Bogotá.

Consolidado de resultados estadísticos de N_{45} SPT		Consolidado de resultados estadísticos de S_u CPTu		Consolidado de resultados estadísticos de S_u de la correlación	
n	113.00	n	113.00	n	113.00
Promedio	8.15	Promedio	35.61	Promedio	34.47
Mediana	6.00	Mediana	29.66	Mediana	27.98
Moda	2.00	Moda	7.25	Moda	11.46
Desviación estándar	6.51	Desviación estándar	24.43	Desviación estándar	21.92
Curtosis	3.48	Curtosis	2.27	Curtosis	2.21
Coeficiente Asimetría	1.79	Coeficiente Asimetría	1.51	Coeficiente Asimetría	1.48
Valor mínimo	2.00	Valor mínimo	7.25	Valor mínimo	11.46
Valor máximo	35.00	Valor máximo	118.32	Valor máximo	117.29

Fuente: Propia

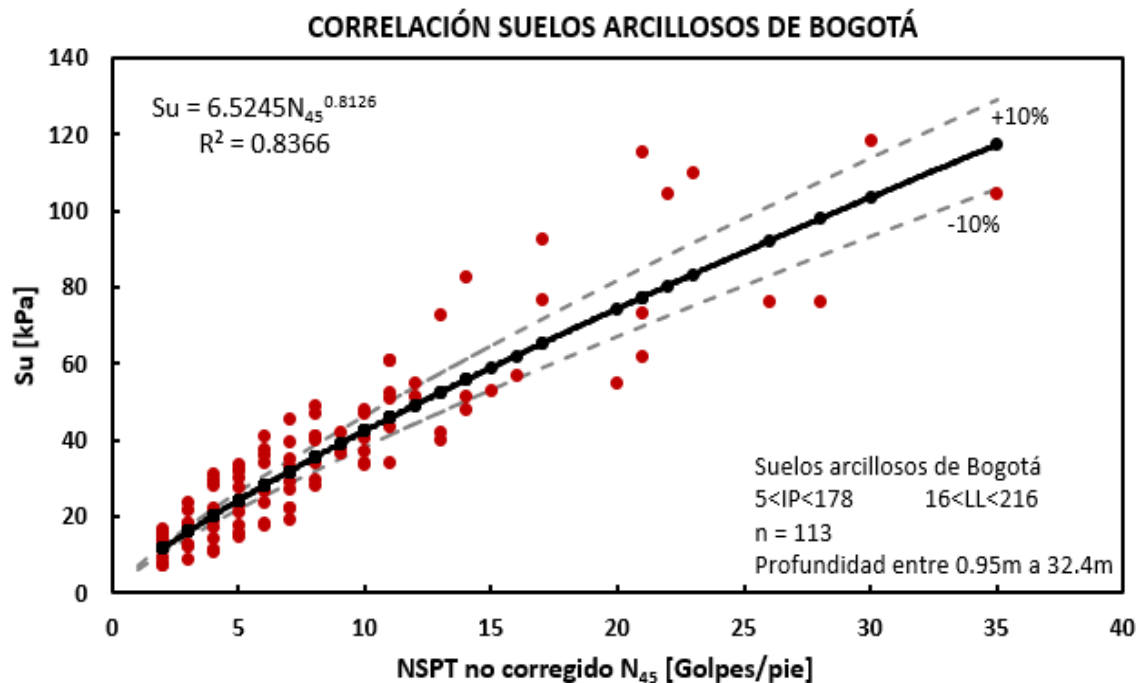
Gráfica 26. Desviación estándar de los datos de S_u de los suelos arcillosos de Bogotá.



Fuente: Propia

Con la información anterior se determinó la correlación general para los suelos arcillosos de la ciudad de Bogotá, en donde se emplearon 113 registros de pares de datos de N_{45} y S_u a una confrontación en profundidad entre 0.95 m a 32.4 m. De la gráfica 27 se puede analizar que existe una relación considerable entre los dos parámetros del 83.66%, en donde la resistencia al corte no drenado se encuentra influenciada por el incremento de la resistencia a la penetración, no obstante, la insuficiencia del SPT para establecer con precisión los criterios de comportamiento del suelo en su estado natural incide en la determinación del S_u a correlacionar según la profundidad de N_{45} .

Gráfica 27. Correlación suelos arcillosos de Bogotá.

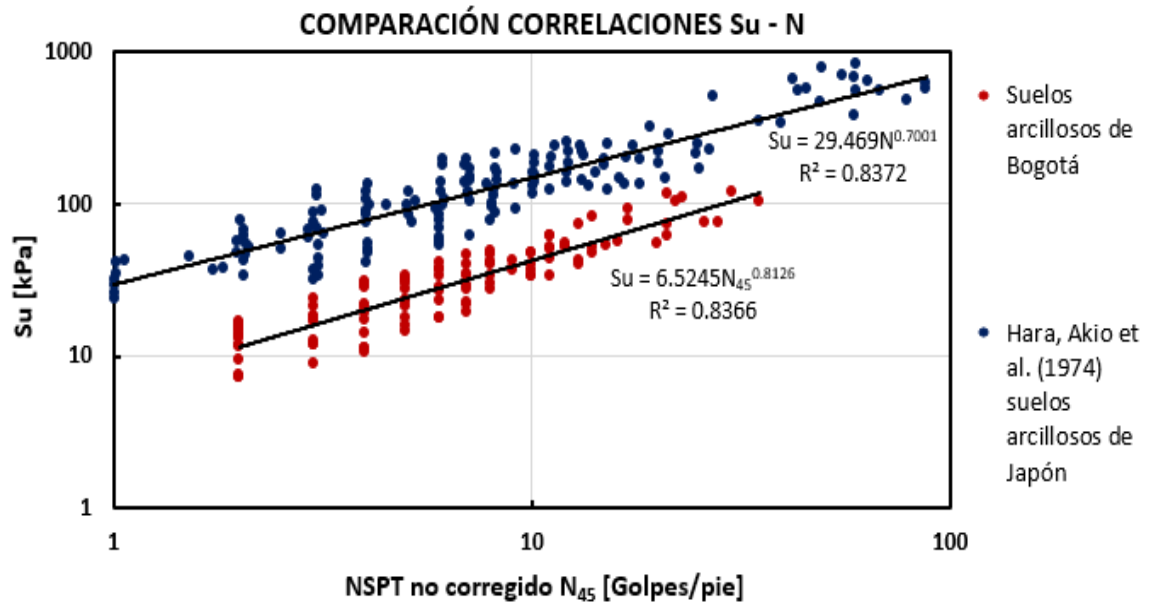


Fuente: Propia

La siguiente gráfica representa la comparación entre la correlación realizada en este proyecto para los suelos arcillosos de la ciudad de Bogotá y la correlación propuesta por Akio Hara et al (1974) para los suelos arcillosos de Japón, en donde obtuvieron pruebas de 15 depósitos aluviales, 9 depósitos diluviales y 1 depósito terciario para estimar la correlación.

Como se puede comprobar, la correlación determinada para los suelos de Bogotá se encuentra exactamente bajo los datos de la correlación de Hara, lo cual indica una igualdad en la proyección de los parámetros comprendidos y, la diferencia entre la resistencia al corte no drenado de los suelos de Bogotá respecto a los suelos de Japón que tienden a deformarse menos.

Gráfica 28. Comparación correlaciones ($S_u - N$).



Fuente: Propia

De lo anterior se puede estimar la siguiente ecuación empírica aproximada para los suelos de Bogotá:

$$S_u = 6.5245 N_{45}^{0.8126}$$

En el siguiente capítulo se proponen recomendaciones para futuras investigaciones en el área, puesto que la correlación entre las variables tendría un incremento al emplearse más registros de datos de ensayos.

3 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

3.1 CONCLUSIONES

Recopilar información correspondiente a los proyectos de ingeniería que emplearon ensayos SPT y CPTu en Bogotá para el estudio del suelo generó más tiempo de lo planificado, puesto que se esperaba obtener la información a través de la encuesta, pero las empresas consultadas han efectuado proyectos de carácter privado, por ende, no existía la oportunidad de obtener información de esos proyectos. Por otra parte, obtener información directamente desde el repositorio del IDU sin nombre y número de contrato de proyectos era complicado, de modo que, se preparó un derecho de petición con solicitud de los proyectos dirigido al IDU.

Como se puede observar en el mapa de geolocalización y en la información expuesta del proyecto del tramo 3 de la tubería Tibitoc – Casablanca, la prueba in situ SPT fue la que más se empleó incluso en las zonas lacustre A y lacustre B, los cuales son unos de los suelos más complejos de Bogotá por la presencia de arcillas de alta plasticidad y nivel freático cercano a la superficie terrestre, en consecuencia, los valores del N_{45} , para estimar adecuadamente las características del suelo, son nulos según el registro de las pruebas, esto respalda la idea de abandonar el uso del SPT en suelos cohesivos.

Como se mencionaba, la carencia del N_{45} impidió correlacionar las 4 zonas de estudio por separado con un mayor número de datos representativos, especialmente la zona lacustre, a pesar de ello, la unificación de toda la información derivó en una correlación general del 83.66% para el suelo de Bogotá, en donde se aprecia mayor influencia de los datos de la zona aluvial.

La correlación propuesta por Hara et al para los suelos de Japón compuestos principalmente por arcilla, se realizó por medio de la información obtenida de pruebas empleadas en 25 sitios, en donde, usaron el SPT y el CPTu en el mismo sitio, esto genera mayor precisión y relación entre los parámetros N_{45} y S_u . Para el desarrollo de este proyecto se realizaron las correlaciones empleando la misma metodología, puesto que los dos proyectos empleados ejecutaban dos o tres pruebas SPT con una CPTu en el mismo sitio o con poca diferencia de coordenadas, a excepción de la zona lacustre que efectuaron 18 ensayos de penetración estándar y 6 de penetración de cono con medida de presiones a largas distancias.

La investigación aborda información de proyectos de consultoría para construcciones de importancia, por ello, se entiende que los ensayos se utilizaron adecuadamente con un mínimo porcentaje de error incidente en los datos y que, la correlación determinada se hizo mediante las condiciones reales del suelo de Bogotá pero, la relación existente entre la resistencia a la penetración y la resistencia al corte no drenado debe mejorarse a través del uso de información de ensayos in situ de otros proyectos de Ingeniería Civil que aseguren una ecuación que represente adecuadamente el suelo cohesivo de la ciudad de Bogotá.

3.2 RECOMENDACIONES

La correlación determinada para los suelos arcillosos de Bogotá debe emplearse para futuras investigaciones enfocadas en el estudio de suelos cohesivos con plasticidad preferiblemente que se encuentre dentro del rango de 5 a 178 (%) y límite líquido entre 16 a 216 (%) a una profundidad entre 0.95 m a 32.4 m. En caso de que se desee continuar con el estudio de esta investigación, los ensayos in situ a utilizar deben ser ejecutados en el mismo sitio con poca diferencia en distancia y, las pruebas con carencia de los valores N_{45} deben descartarse para obtener mayor relación en las variables.

Mejorar la correlación para los suelos de Bogotá que asegure una ecuación apropiada para determinar la resistencia al corte no drenado a través del N_{45} implica ejecutar propiamente dos o más ensayos CPTu por cada ensayo SPT, específicamente en toda la sabana de Bogotá, para disminuir la distancia de ejecución de los mismos y obtener mayor información de pares de datos de N_{45} y S_u .

El estudio de esta investigación debe continuar con el uso de mayor información proporcionada por proyectos de Ingeniería Civil que analizaron los comportamientos del suelo de Bogotá mediante los ensayos in situ SPT y CPTu, específicamente aquellos que se han aplicado en las zonas lacustre.

Las investigaciones que requieran hacer uso del tema de este trabajo de investigación deben tener o adquirir conocimientos sobre el uso de las herramientas disponibles de sistemas de información geográfica para geolocalizar los ensayos directamente en el lugar de estudio e identificarlos para correlacionar los que se encuentren en el mismo sitio pues, dentro de los registros no se encuentra información acorde.

Es importante comparar esta correlación con otras investigaciones desarrolladas en diferentes sitios del mundo actualmente, como lo realizado con la correlación de Hara para los suelos de Japón, de esta manera se comprende el estado de la práctica que permite ampliar los conocimientos en el tema y comparar métodos y resultados.

4 BIBLIOGRAFÍA

- Ameratunga, Jay, Nagaratnam Sivakugan, and Braja.M Das, *Correlations of Soil and Rock Properties in Geotechnical Engineering*, 2016 <<http://www.springer.com/series/13410>>
- ASTM, 'Standard Test Method for Electronic Friction Cone and Piezocone Penetration Testing of Soils', 2014 <<https://doi.org/10.1520/D5778-12.1>>
- Auge, Miguel, 'Hidrogeología de Llanuras', *Universidad de Buenos Aires*, 2009, pp. 1–82 <<http://tierra.rediris.es/hidrored/ebooks/miguel/HidrogeoLlanuras.pdf>>
- Ayala, Luis, 'Clasificación de Los Depósitos Sedimentarios', *Explorock Soluciones Geológicas* <<https://www.explorock.com/clasificacion-de-los-depositos-sedimentarios/>> [accessed 31 October 2021]
- Bernal, Mauricio, Osvaldo Flores, Jonatan Candelaria, Adrián Guzmán, and Sergio Hernández, 'Determinación de Límites de Consistencia En Jales Usando Conos Penetrantes', *XXIX Reunión Nacional de Ingeniería Geotécnica*, Noviembre 2018, 2021, 1–7
- Briaud, Jean Louis, *Geotechnical Engineering: Unsaturated and Saturated Soils, Geotechnical Engineering*, 2013 <<https://doi.org/10.1002/9781118686195.ch7>>
- Castañeda, Maria, 'SUELOS ARCILLOSOS, UN RETO PARA LA URBANIZACIÓN EN BOGOTÁ', *StuDocu*, 2017, pp. 1–2 <<https://www.studocu.com/en-us/document/universidad-el-bosque/geologia-y-geomorfologia/suelo-de-bogota-caracteristicas-del-suelo-de-bogota/5827702>>
- Chu, Ya, Songyu Liu, and Guojun Cai, 'Characterization on the Correlation between Spt-n and Small Strain Shear Modulus Gmax of Jiangsu Silts of China', *Earth Sciences Research Journal*, 25 (2021), 1–11 <<https://doi.org/10.15446/esrj.v25n2.62287>>
- Consorcio Troncales Bogotá, and IDU, 'Informe de Diseño Geotécnico Tramo 1', 2019
- Contelac, and Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá, 'PRODUCTO No. 05: ESTUDIOS Y DISEÑOS GEOTÉCNICOS', 2018
- Das, Braja.M., *FUNDAMENTOS DE INGENIERÍA GEOTÉCNICA*, 2013
- Datos Abiertos Bogotá, 'Zonificación Geotécnica. Bogotá D.C', *Plataforma Distrital de Datos Abiertos de Bogotá* <<https://datosabiertos.bogota.gov.co/dataset/zonificacion-geotecnica>>
- Díaz, Gonzalo, 'Caracterización de Un Sitio Mediante Ensayo de CPTU', 2011
- Gerencie, 'Métodos de Exploración', 2018, pp. 12–110

-
- <<https://www.gerencie.com/metodos-de-depreciacion.html>>
- Hara, Akio, Tokiharu Ohta, Masanori Niwa, Shumpei Tanaka, and Tadashi Banno, 'Shear Modulus and Shear Strength of Cohesive Soils', *Soils and Foundations*, 14.3 (1974), 1–12 <https://doi.org/10.3208/sandf1972.14.3_1>
- Instituto Geográfico de Agustín Codazzi, 'Servicio de Conversión de Coordenadas' <<https://origen.igac.gov.co/herramientas.html>> [accessed 4 November 2021]
- INVIAS, 'Manual de Diseño de Cimentaciones Superficiales y Profundas Para Carreteras', 2012
- , 'Sección 100 - SUELOS E-111', 2013
- Liang, Yankun, Laifa Cao, and Jinyuan Liu, 'Statistical Correlations between SPT N-Values and Soil Parameters', *Department of Civil Engineering, Ryerson University*, June, 2015
- López, Libardo, and Jorge Enrique Durán, 'Uso Del Piezocono (CPTU) Para Determinar La Caracterización Geotécnica de Depósitos Arcillosos Blandos En Algunos Sitios Del Departamento de Boyacá', 2015, 1–11
- Mayne, Paul W, Matthew R Coop, Sarah M Springman, An-Bin Huang, and Jorge G Zornberg, 'Geomaterial Behavior and Testing', *Proceedings of the 17th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering: The Academia and Practice of Geotechnical Engineering*, 2009
- Nij Patzán, Jéser Esaú de Jesus, 'GUÍA PRÁCTICA PARA EL CÁLCULO DE CAPACIDAD DE CARGA EN CIMENTACIONES SUPERFICIALES, LOSAS DE CIMENTACIÓN, PILOTES Y PILAS PERFORADAS', *Universidad de San Carlos de Guatemala*, 2009 <http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08_3004_C.pdf>
- Reinert, Hugo, Andrés Ayala, and Osvaldo Mazal, 'CORRESPONDENCIA ENTRE ENSAYO SPT Y CAPACIDAD DE CARGA DE SUELOS TROPICALES DE MISIONES, ARGENTINA', *XXI Jornada de Pesquisa*, 2016, 1–6
- Rivera del Rio, Diego Sebastián, 'Determinación de Resistencia Al Corte Mediante Ensayo de Velea Manual En Suelos Alofánicos de La Región de Ñuble', *Universidad de Chile*, 2018
- Robertson, Peter.K., 'Soil Classification Using the Cone Penetration Test', *Canadian Geotechnical Journal*, 27.1 (1990), 151–58 <<https://doi.org/10.1139/t90-014>>
- Robertson, Peter.K, and K.L Cabal, *GUIDE TO CONE TESTING PENETRATION*, 2015
- Robertson, Peter K, 'Soil Behaviour Type from the CPT: An Update', *2nd International Symposium on Cone Penetration Testing*, 2010
-

Rojas, Larryn, 'DETERMINACIÓN DE LA VARIACIÓN EN LOS VALORES DEL NUMERO DE GOLPES DEL ENSAYO SPT DEBIDO A LA PERDIDA DE ENERGÍA CAUSADA POR DIFERENTES DIÁMETROS DE TUBERÍA.', *Universidad Católica de Colombia*, 2017


Schnaid, Fernando, *Geocharacterisation and Properties of Natural Soils by Insitu Tests*, *Ground Engineering*, 2005, xxxviii <<https://doi.org/10.3233/978-1-61499-656-9-3>>

Ventayol, Alberth, and Carlos Fernandez, 'Medida de La Energía Del Ensayo SPT . Correcciones a Aplicar', *Geotecnia IGP*, 2011, 52–54

ANEXOS

A continuación, se adjunta información de importancia que complementa el trabajo de investigación.

Anexo 1. Encuesta para conocer el estado de la práctica del CPTu.

 <p>UNIVERSIDAD CATÓLICA DE COLOMBIA FACULTAD DE INGENIERÍA INGENIERÍA CIVIL</p> <p>Observaciones: La presente encuesta tiene como finalidad conocer el estado de la práctica del ensayo de exploración geotécnica CPTu en la ciudad de Bogotá en pro de la masificación.</p> <p>Nombre de la empresa: _____</p> <ol style="list-style-type: none">1. ¿Ofrecen el servicio de ensayo de exploración geotécnica CPTu?2. ¿Han realizado dicho ensayo en la ciudad de Bogotá?3. ¿Han participado en proyectos con exploración geotécnica usando simultáneamente ensayos SPT Y CPTu en Bogotá?4. ¿Cuántos de esos proyectos han sido en Bogotá?5. ¿Los estudios de campo se han realizado precisamente sobre la formación Sabana?6. ¿Han sido proyectos públicos con el distrito o cualquier otro ente regional o nacional?7. ¿Podría indicar los nombres de los proyectos para buscarlos directamente en los repositorios?

Fuente: Propia

El anexo 2 hace referencia al derecho de petición remitido al IDU con la finalidad de acceder fácilmente al nombre y número de contrato de proyectos que han implementado SPT y CPTu simultáneamente como estudio geotécnico en la ciudad de Bogotá.

Anexo 2. Derecho de petición destinado al IDU.

Honda, 10 de mayo de 2021

Señores
Oficina Asesora de Comunicaciones
INSTITUTO DE DESARROLLO URBANO "I.D.U."
Bogotá

Asunto: Derecho de petición e información

LAURA DANIELA FIGUEROA DIAZ mayor de edad, identificado con C.C. No. **1105793161** de Honda, haciendo uso del derecho de petición consagrado en el artículo 23 de la Constitución Política, así como en las normas concordantes del CPACA, mediante el presente escrito, respetuosamente solicito, por temas académicos, información completa de dos proyectos de infraestructura vial realizados en la ciudad de Bogotá con implementación de ensayos CPTU. De forma subsidiaria ruego que si esta información puede ser encontrada en el repositorio de la página de la entidad, me sea comunicado los nombres de los proyectos y la forma de encontrarlos.

HECHOS

1. Con fin de terminar mis estudios en la Universidad Católica de Colombia, es deber del estudiante adelantar su respectiva tesis de grado.
2. Que para la información requerida para la elaboración de la tesis de grado necesito acudir ante ustedes para que se me sea brindada de forma eficaz lo solicitado.
3. Que, esta información solicitada a ustedes respetuosamente se utilizará únicamente con fines académicos.

De conformidad con los anteriores hechos, elevamos las siguientes:

PETICIONES

1. información completa de dos proyectos de infraestructura vial realizados en la ciudad de Bogotá con implementación de ensayos CPTU.
2. De forma subsidiaria, de no ser posible la primera petición, ruego que, si esta información puede ser encontrada en el repositorio de la página de la entidad, me sea comunicado los nombres de los proyectos y la forma de encontrarlos.

FUNDAMENTOS DE DERECHO

1. Artículo 23 de la Constitución Política de Colombia "Toda persona tiene derecho a presentar peticiones respetuosas a las autoridades por motivos de interés general o particular y a obtener pronta resolución. El legislador podrá reglamentar su ejercicio ante organizaciones privadas para garantizar los derechos fundamentales".

NOTIFICACIONES

Favor remitir respuesta al presente derecho de petición a la siguiente dirección electrónica:

lafigueroa52@ucatolica.edu.co

Atentamente,

LAURA DANIELA FIGUEROA DIAZ
C.C. 1105793161 de Honda
Estudiante de Ingeniería Civil
Universidad Católica de Colombia

Fuente: Propia

Anexo 3. Respuesta IDU.



Instituto de
Desarrollo Urbano



DTP
20212250758431
Información Pública

Al responder cite este número

Bogotá D.C., mayo 24 de 2021

Señora:

Laura Daniela Figueroa Diaz

Dirección: Carrera 13 #28-52 Obrero

Email: ldfigueroa52@ucatolica.edu.co

Teléfonos: 3213050034-3213050

La ciudad

REF: Respuesta a su solicitud con radicado IDU 20211250766532, Derecho de Petición e Información

Asunto: Solicitud información completa de dos proyectos de infraestructura vial realizados en la ciudad de Bogotá con implementación de ensayos CPTu

Respetada Señora Laura Daniela

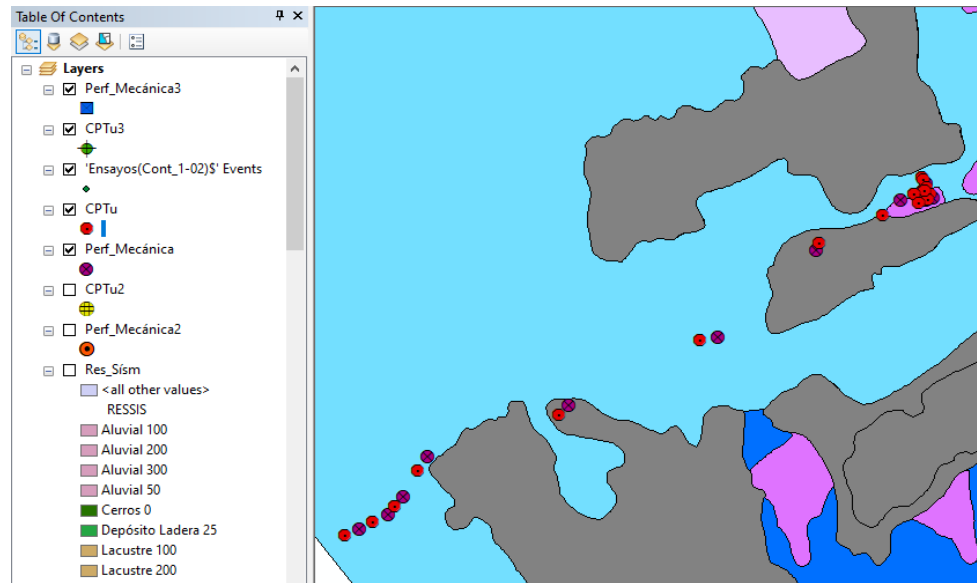
La información solicitada puede ser consultada en el repositorio de la Entidad, a continuación se indican los links correspondientes a los Estudio Geotécnicos de algunos contratos de consultoría del Instituto, en los cuales se realizaron ensayos de CPTu.

No. Cto	Objeto	Documento	Link de ubicación en el repositorio
Contrato IDU 1345 de 2017	Factibilidad, estudios y diseños para la adecuación al sistema Transmilenio de la Troncal Avenida Congreso Eucarístico (Carrera 88) desde la Carrera 7 hasta la Autopista Sur y de los equipamientos urbanos complementarios, en Bogotá, D.C.	Capítulo 5 Componente geotecnia y pavimentos	https://webidu.idu.gov.co/jspui/handle/123456789/125913
Contrato	Factibilidad y actualización,	Componente geotecnia. Tramo 1.	https://webidu.idu.gov.co/jspui/handle/123456789/126231
No. Cto	Objeto	Documento	Link de ubicación en el repositorio
IDU 1352 de 2017	complementación, ajustes de los estudios y diseños, y estudios y diseños para la ampliación y extensión de la Avenida Ciudad de Cali al sistema Transmilenio, entre la Avenida Circunvalar del Sur y la Avenida Calle 170 y de los equipamientos urbanos complementarios, en Bogotá.		
IDU-849-2013	Diseño para la primera línea del metro en el marco del sistema integrado de transporte público SITP para la ciudad de Bogotá	Estudio geotécnico, Plan de auscultación para la PLMB (registros 2)	https://webidu.idu.gov.co/jspui/browse?type=contrato&sort_by=1&order=ASC&mp=20&etal=-1&value=Contrato+IDU+849+de+2013&offset=260

Fuente: Propia

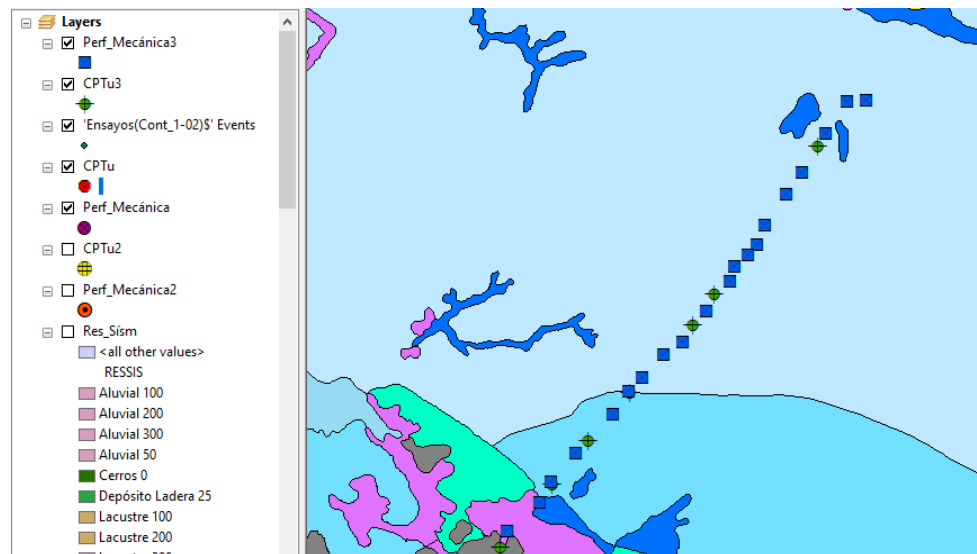
Los siguientes anexos relacionados a la geolocalización de los ensayos mediante el software ArcGIS 10.6 son de importancia para comprender la información explicada en la metodología.

Anexo 4. Geolocalización ensayos SPT y CPTu zona llanura B.



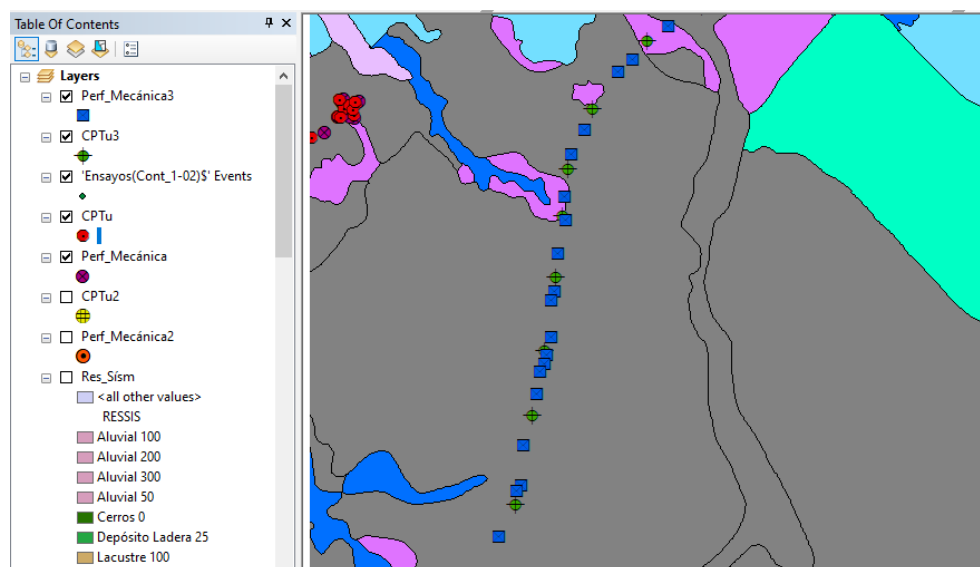
Fuente: Propia

Anexo 5. Geolocalización ensayos SPT y CPTu zonas lacustre A y B.



Fuente: Propia

Anexo 6. Geolocalización ensayos SPT y CPTu zona aluvial.



Fuente: Propia

Anexo 7. Ejemplo de confrontación en profundidad N_{45} (SPT-07) y S_u (CPTu-02).

PROF (m)	N_{45} SPT (Av-AMER-07)	S_u CPTu-02
1.80	5.00	66.6294
5.00	2.00	25.7836
8.30	7.00	48.5963
11.00	5.00	20.9390
14.30	7.00	19.6119
16.20	7.00	27.3020
19.00	50.00	61.0297
21.00	28.00	42.5808
23.00	17.00	28.8228
25.50	14.00	26.2702
27.00	16.00	27.5115
29.80	9.00	38.1842

Fuente: Propia

Anexo 8. Ejemplo de confrontación en profundidad N_{45} (SPT-01) y S_u (CPTu-01).

PROF (m)	N_{45} SPT(P-AMER-01)	S_u CPTu-01
6.20	13.00	72.8090
11.70	10.00	22.1755
13.40	7.00	22.0509
17.20	19.00	19.9672
21.20	8.00	22.8438
25.00	45.00	28.7146

Fuente: Propia

Anexo 9. Ejemplo de confrontación en profundidad N_{45} (SPT-01) y S_u (CPTu-02).

PROF (m)	N_{45} SPT(P-AMER-01)	S_u CPTu-02
6.20	13.00	21.8587
10.00	21.00	73.2470
11.70	10.00	23.8544
13.40	7.00	39.5213
17.20	19.00	18.2826
19.20	7.00	29.2094
21.20	8.00	34.0721
25.00	45.00	107.4238

Fuente: Propia

Anexo 10. Ejemplo de confrontación en profundidad N_{45} (SPT-05) y S_u (CPTu-01).

PROF (m)	N_{45} SPT(Av-AMER-05)	S_u CPTu-01
4.70	3.00	27.4601
7.70	3.00	23.8613
10.70	6.00	41.1052
13.20	4.00	21.2324
16.70	3.00	12.0621
19.70	13.00	16.7231
21.40	11.00	61.0599
24.40	6.00	26.8238
27.40	6.00	28.1613
30.40	7.00	33.1669
32.40	9.00	42.0319

Fuente: Propia

Anexo 11. Ejemplo de confrontación en profundidad IP, LL, N_{45} (SPT-05) y Su (CPTu-10).

PROF (m)	IP	LL	N_{45} SPT(Av-AMER-05)	Su CPTu-10
4.70	44.00	63.00	3.00	24.1483
7.70	51.00	73.00	3.00	38.0492
10.70	122.00	175.00	6.00	37.0942
13.20	25.00	43.00	4.00	22.0870
16.70	64.00	86.00	3.00	36.7064
24.40	161.00	216.00	6.00	62.7823
27.40	56.00	84.00	6.00	37.7416
30.40	118.00	143.00	7.00	38.3263

Fuente: Propia

Anexo 12. Ejemplo de confrontación en profundidad IP, LL, N_{45} (SPT-02) y Su (CPTu-06).

PROF (m)	IP	LL	N_{45} SPT(P-AMER-02)	Su CPTu-06
16.20	44.00	64.00	2.00	26.3389
20.20	88.00	140.00	7.00	45.6576
23.20	25.00	42.00	11.00	43.5680
26.20	68.00	190.00	12.00	28.1021
29.20	60.00	106.00	6.00	33.8860

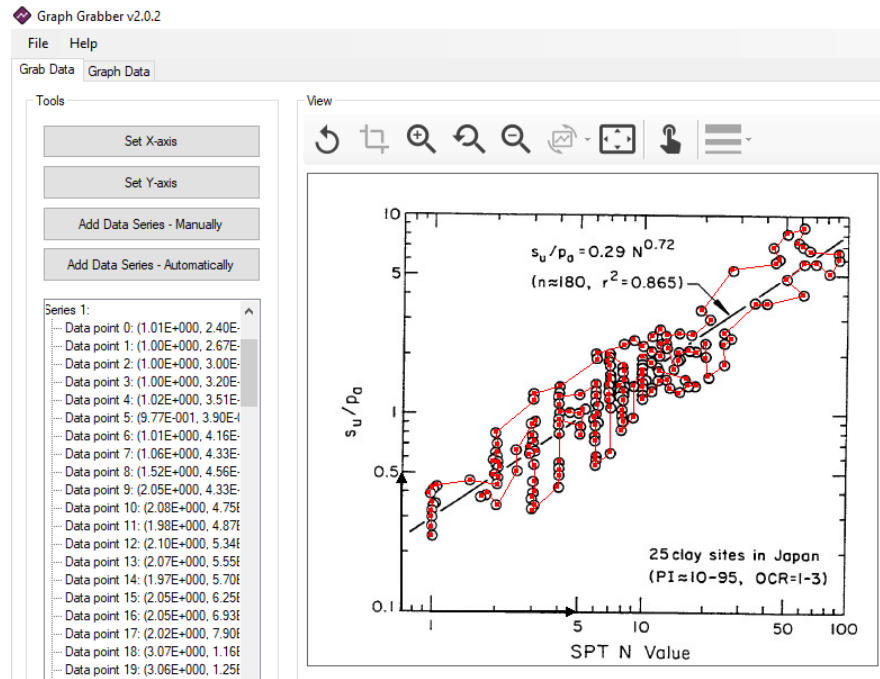
Fuente: Propia

Anexo 13. Ejemplo de confrontación en profundidad IP, LL, N_{45} (SPT-52) y Su (CPTu-16).

PROF (m)	IP	LL	N_{45} SPT(52)	Su CPTu-16
1.10	36.70	54.90	15.00	13.932
1.55	34.50	46.88	22.00	104.661
2.00	34.50	46.88	24.00	133.742
3.35	18.10	30.07	2.00	11.971

Fuente: Propia

Anexo 14. Digitalización de la correlación de Hara Akio et al. (1974).



Fuente: Propia