



Universidad
LATINA

LAUREATE INTERNATIONAL UNIVERSITIES®

UNIVERSIDAD LATINA DE COSTA RICA
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL

Licenciatura en Ingeniería Civil

Tesis de Grado

ANÁLISIS COMPARATIVO DEL BULBO DE PRESIONES CON PRUEBA
DE PENETRACIÓN DINÁMICA SÚPER PESADA (D.P.S.H) Y EL ENSAYO DE
PENETRACIÓN ESTÁNDAR (S.P.T.)

José Brayan Carrillo Jiménez

Heredia, mayo de 2018

TRIBUNAL EXAMINADOR

Este proyecto titulado: "ANÁLISIS COMPARATIVO DEL BULBO DE PRESIONES CON PRUEBA DE PENETRACIÓN DINÁMICA SÚPER PESADA (D.P.S.H) Y EL ENSAYO DE PENETRACIÓN ESTÁNDAR (S.P.T.)", fue aprobado por el Tribunal Examinador de la carrera de Licenciatura en Ingeniería Civil de la Universidad Latina, Sede Heredia, como requisito para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería Civil:



ING. ALICIA ALPÍZAR BARQUERO

TUTOR



ING. OSCAR ANDRÉS CALVO CARRANZA

LECTOR



ING. SIRLEY ALVAREZ GONZÁLEZ

REPRESENTANTE DE RECTORÍA

COMITÉ ASESOR

ING. ALICIA ALPÍZAR BARQUERO
TUTOR

ING. OSCAR ANDRÉS CALVO CARRANZA
LECTOR

ING. SIRLEY ALVAREZ GONZÁLEZ
REPRESENTANTE DE RECTORÍA



**CARTA DE APROBACIÓN POR PARTE DEL PROFESOR TUTOR DEL
TRABAJO FINAL DE GRADUACIÓN MODALIDAD TESIS DE GRADO**

Heredia, 08 de 05, de 2018

Sres.
Miembros del Comité de Trabajos Finales de Graduación
SD

Estimados señores:

He revisado y corregido el Trabajo Final de Graduación, modalidad Tesis de Grado bajo el título ANÁLISIS COMPARATIVO DEL BULBO DE PRESIONES CON PRUEBA DE PENETRACIÓN DINÁMICA SÚPER PESADA (D.P.S.H) Y EL ENSAYO DE PENETRACIÓN ESTÁNDAR (S.P.T.) por parte del estudiante: José Brayan Carrillo Jiménez, como requisito para que el citado estudiante puedan optar por la Licenciatura en Ingeniería Civil.

Considero que dicho trabajo cumple con los requisitos formales y de contenido exigidos por la Universidad, y por tanto lo recomiendo para su defensa oral ante el Consejo Asesor.

Suscribe cordialmente,

Alicia Alpizar Barquero



**CARTA DE APROBACIÓN POR PARTE DEL PROFESOR LECTOR DEL
TRABAJO FINAL DE GRADUACIÓN MODALIDAD TESIS DE GRADO**

Heredia, 08 de 05, de 2018

Sres.
Miembros del Comité de Trabajos Finales de Graduación
SD

Estimados señores:

He revisado y corregido el Trabajo Final de Graduación, modalidad Tesis de Grado bajo el título ANÁLISIS COMPARATIVO DEL BULBO DE PRESIONES CON PRUEBA DE PENETRACIÓN DINÁMICA SÚPER PESADA (D.P.S.H) Y EL ENSAYO DE PENETRACIÓN ESTÁNDAR (S.P.T.) por parte del estudiante: José Brayan Carrillo Jiménez, como requisito para que el citado estudiante puedan optar por la Licenciatura en Ingeniería Civil.

Considero que dicho trabajo cumple con los requisitos formales y de contenido exigidos por la Universidad, y por tanto lo recomiendo para su defensa oral ante el Consejo Asesor.

Suscribe cordialmente,



Oscar Calvo Cartaza.

Alajuela, 15 de mayo de 2018

Señores

Comisión de Trabajos Finales de Graduación

Facultad de Ingeniería y Arquitectura

Escuela de Ingeniería Civil

Universidad Latina de Costa Rica

Estimados señores:

Se comunica la revisión y corrección estilística del Trabajo Final de Graduación *Análisis comparativo del bulbo de presión con prueba de penetración dinámica súper pesada (D. P. S. H.) y el ensayo de penetración estándar (S. P. T.)*, para optar por el grado académico de Licenciatura en Ingeniería Civil; a petición del sustentante: José Brayan Carrillo Jiménez, portador de la cédula de identidad 207110496, a cargo de la suscrita profesional en Filología Española.

Cordialmente,



Isabel Cristina Solís Moreira

Filóloga y Docente

Inscripción: 94-771; 412-154

Licda. Cristina Solís M.
☎ 8312-4262
Colegio Profesional COLYPRO 030715
✉ kristy.solism@gmail.com



“Carta Autorización del autor(es) para uso didáctico del Trabajo Final de Graduación”

Vigente a partir del 31 de Mayo de 2016

Instrucción: Complete el formulario en PDF, imprima, firme, escanee y adjunte en la página correspondiente del Trabajo Final de Graduación.

Yo (Nosotros):

Escriba Apellidos, Nombre del Autor(a). Para más de un autor separe con " ; "

José Brayan Carrillo Jiménez

De la Carrera / Programa: Ingeniería Civil

autor (es) del (de la) (Indique tipo de trabajo): Tesis de grado
titulado:

Análisis comparativo del bulbo de presiones con prueba de penetración dinámica súper pesada (D.P.S.H.) y el ensayo de penetración estándar (S.P.T.)

Autorizo (autorizamos) a la Universidad Latina de Costa Rica, para que exponga mi trabajo como medio didáctico en el Centro de Recursos para el Aprendizaje y la Investigación (CRAI o Biblioteca), y con fines académicos permita a los usuarios su consulta y acceso mediante catálogos electrónicos, repositorios académicos nacionales o internacionales, página web institucional, así como medios electrónicos en general, internet, intranet, DVD, u otro formato conocido o por conocer; así como integrados en programas de cooperación bibliotecaria académicos dentro o fuera de la Red Laureate, que permitan mostrar al mundo la producción académica de la Universidad a través de la visibilidad de su contenido.

De acuerdo con lo dispuesto en la Ley No. 6683 sobre derechos de autor y derechos conexos de Costa Rica, permita copiar, reproducir o transferir información del documento, conforme su uso educativo y debiendo citar en todo momento la fuente de información; únicamente podrá ser consultado, esto permitirá ampliar los conocimientos a las personas que hagan uso, siempre y cuando resguarden la completa información que allí se muestra, debiendo citar los datos bibliográficos de la obra en caso de usar información textual o paráfrasis de esta.

La presente autorización se extiende el día (Día, fecha) **Jueves 17** del mes **Mayo** del año **2018** a las **1:00pm**. Asimismo declaro bajo fe de juramento, conociendo las consecuencias penales que conlleva el delito de perjurio: que soy el autor(a) del presente trabajo final de graduación, que el contenido de dicho trabajo es obra original del (la) suscrito(a) y de la veracidad de los datos incluidos en el documento. Eximo a la Universidad Latina; así como al Tutor y Lector que han revisado el presente, por las manifestaciones y/o apreciaciones personales incluidas en el mismo, de cualquier responsabilidad por su autoría o cualquier situación de perjuicio que se pudiera presentar.

Firma(s) de los autores Según orden de mención al inicio de ésta carta:

AGRADECIMIENTOS

Agradezco de gran manera a la empresa IIG Consultores por permitirme llevar a cabo de manera muy profesional todos los procedimientos para poder culminar con mi trabajo final de graduación.

A la ingeniera Alicia Alpízar por brindarme su tiempo de calidad y guiarme en la elaboración del proyecto.

A la Universidad Latina, Campus Heredia por brindarme todo el conocimiento requerido para poder ejercer la carrera como Ingeniero Civil.

DEDICATORIA

Esta etapa de mi vida se la dedico a mi Dios que me ha acompañado en todo momento de mi vida y a mis padres, que han formado a quien soy hoy en día.

A mi familia, la cual ha estado siempre a mi lado y ha compartido todos mis triunfos.

A mi novia Gabriela quien ha me ha brindado un apoyo incondicional en todo momento.

RESUMEN

El presente trabajo de investigación se basa en un análisis comparativo, de un método comúnmente utilizado en Costa Rica para el estudio de suelos, llamado “Ensayo de Penetración Estándar (SPT por sus siglas en inglés)” con un método similar denominado “Ensayo de Penetración Dinámica Súper Pesado (DPSH por sus siglas en inglés)” que trae consigo mayores beneficios en la aplicación, y resultados obtenidos.

En ambos ensayos se analizará la profundidad alcanzada y se evaluará cuáles cumplen con la profundidad mínima del bulbo de presiones para distintas complejidades de edificaciones.

Por medio del trabajo de investigación se mostrará el proceso, el equipo y la norma que rige para aplicar correctamente un DPSH en suelos de la gran área metropolitana (GAM) y la zona norte.

El ensayo de penetración estándar posee desventajas o limitaciones que encarecen un correcto estudio de suelos, y, por este motivo, se llevará a cabo el análisis comparativo para demostrar si efectivamente el DPSH es un método más eficaz que el SPT.

Palabras clave: Caracterización de suelos, Bulbo de presiones, ensayo de penetración estándar, ensayo de penetración dinámico súper pesado.

SUMMARY

The present research work is based on a comparative analysis of a method commonly used in Costa Rica for soil analysis called Standard Penetration Test (SPT) with a similar method called Dynamic Probing Super Heavy (DPSH) that brings with it higher benefits in the application, and results obtained. In both tests, the depth reached will be analyzed and the ones that comply with the minimum depth of the pressure bulb will be evaluated for different complexities of buildings.

Through the research work will be shown the process, equipment and norm that applies to correctly apply a DPSH in soils of the Greater Metropolitan Area and the North Zone.

The standard penetration test has disadvantages or limitations that make it more expensive to study soils, and for this reason the comparative analysis will be carried out to demonstrate whether DPSH is actually a more effective method than SPT.

Key words: Soil characterization, Pressure bulb, standard penetration test, super heavy dynamic penetration test.

Contenido

CAPÍTULO I	1
1.1 Introducción	1
1.1.1 Antecedentes	3
1.1.2 Hipótesis	5
1.1.3 Planteamiento del problema	5
1.1.4 Justificación	8
1.2 Objetivos.....	9
1.2.1 Objetivo general:.....	9
1.2.2 Objetivos específicos:	9
1.3 Alcances y limitaciones.....	10
1.3.1 Alcances	10
1.3.2 Limitaciones	10
CAPÍTULO II MARCO TEÓRICO	11
2.1 Marco situacional.....	11
2.2 Marco teórico.....	11
2.2.1 Introducción a la Mecánica de suelos	11
2.2.1.1 Importancia de la mecánica de los suelos	12
2.2.1.2 Reconocimiento	13
2.2.1.3 Tipos de exploración de suelos.....	14
2.2.2 Sistemas de clasificación de los suelos	18
2.2.2.1 Límites de Atterberg	19
2.2.2.2 Sistema unificado de clasificación de suelos (S.U.C.S.)	20
2.2.3 Propiedades del suelo importantes en la ingeniería:.....	24

2.2.4 Mapas de zonificación según el código de cimentaciones de Costa Rica	24
2.2.5 Presiones verticales en el suelo situado debajo de una carga concentrada.....	28
2.2.6 Ensayo de penetración estándar (S.P.T.)	30
2.2.7 Prueba de penetración dinámica superpesada (D.P.S.H).....	32
2.2.7.1 Aparatos y materiales necesarios:	33
2.2.8 Correlaciones del DPSH y SPT.....	38
2.2.9 Variabilidad de energía por factor humano.	38
3.1 Definición del enfoque y método de investigación	39
3.2 Fuentes de información	39
3.3 Definición de variables.....	40
3.4 Técnicas y equipo utilizados en la recolección de datos	40
CAPITULO IV ANALISIS DE RESULTADOS	41
4.1 Datos Obtenidos.....	41
4.2 Bulbo de presiones	41
4.3 DATOS SPT y DPSH en GAM.....	44
4.3.1 Datos SPT en GAM.....	45
4.3.2 DATOS DPSH en GAM.....	47
4.4 Datos SPT y DPSH en Zona Norte.....	50
4.4.1 Datos SPT en Zona Norte.....	50
4.4.2 Datos DPSH en Zona Norte.....	54
4.5 Interpretación de resultados	57
CAPITULO V CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	63
5.1 Conclusiones	63
5.2 Recomendaciones	67

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS..... 69

Anexos 71

Índice de Figuras

Figura 1. Calicata (TodoAgro, 2011, en línea).....	15
Figura 2. Sondeo (Martínez, 2010, en línea).	16
Figura 3. Penetrómetro (Berrospi, 2013, en línea).....	17
Figura 4. Ensayos Geofísicos (Agencia Nacional de Hidrocarburos, 2009, p,23). 18	
Figura 5. Corte de la taza para determinar el límite líquido con la pasta de suelo (según A. Casagrande citado por Terzaghi y Peck, 1973, p. 31).....	19
Figura 6. Tipos de suelos (civilgeeks,2017, en línea).	23
Figura 7. Tipos de suelos de la hoja de San José (Asociación Costarricense de Geotecnia, 2009, p. 181).	25
Figura 8. Tipos de suelos de la hoja de Liberia (Asociación Costarricense de Geotecnia, 2009, p. 177).	26
Figura 9. Bulbo de presiones por una carga puntual (González, 2012, en línea). 28	
Figura 10. Ecuación de Boussinesq (Das, 2001, p.220).....	29
Figura 11. Esfuerzo vertical en el punto A, causado por una carga puntual sobre la superficie (Das, 2001, p.220).....	30
Figura 12. Cono.	33
Figura 13. Varillaje.....	34
Figura 14. Maza.	35
Figura 15. Cabeza de Impacto.....	35
Figura 16. Guiadera.....	36
Figura 17. Sistema de elevación y escape.	37
Figura 18. Bulbos de presiones.	43
Figura 19. Ubicación de Cartago en Mapa de San José según CCCR.	44
Figura 20 Ubicación de Upala y Birmania en mapa de Liberia según CCCR.	51
Figura 21. Gráfico NSPT en GAM (Mapa San José).	72
Figura 22. Gráfico Clasificación SUCS en GAM.	72
Figura 23. Gráfico NDPSH en GAM (Mapa San José).	74
Figura 24. Gráfico NSPT en Zona Norte (Mapa Liberia).....	74
Figura 25. Gráfico Clasificación SUCS en Zona Norte.	75
Figura 26. Gráfica de DPSH en Zona Norte.	77

Índice de Tablas

Tabla 1 Cantidad de construcciones del 2014 al 2017	4
Tabla 2 Requisitos mínimos para la exploración de campo.....	6
Tabla 3 Símbolos de grupo SUCS.....	20
Tabla 4 Tipología en suelos.....	21
Tabla 5 Sistema unificado de clasificación de suelos (SUCS).....	22
Tabla 6 Descripción de simbologías en mapas de zonificación.....	27
Tabla 7 Correlación entre N_{DPSH} Y N_{SPT}	38
Tabla 8 Análisis de presiones a distintas profundidades (Bulbo de presiones en KPa).....	42
Tabla 9 Resultados obtenidos de SPT en el GAM.....	45
Tabla 10 Caracterización SUCS del SPT en GAM	46
Tabla 11 Rangos mínimos, medios y máximos de SPT en GAM	46
Tabla 12 Resultados obtenidos DPSH en GAM	47
Tabla 13 Rangos mínimos, medios y máximos de DPSH en GAM	49
Tabla 14 Resultados obtenidos SPT en Zona Norte.....	52
Tabla 15 Caracterización SUCS del SPT en Zona Norte.....	53
Tabla 16 Rangos mínimos, medios y máximos de DPSH en Zona Norte.....	53
Tabla 17 Resultados obtenidos DPSH Zona Norte.....	54
Tabla 18 Rangos mínimos, medios y máximos de DPSH en Zona Norte.....	57
Tabla 19 Análisis de resultados SPT en GAM.....	58
Tabla 20 Análisis de resultados DPSH en GAM.....	59
Tabla 21 Análisis de resultados SPT en Zona Norte	60
Tabla 22 Análisis de resultados DPSH en Zona Norte	61
Tabla 23 Cumplimiento de profundidad de prueba por piso	62

CAPÍTULO I

1.1 Introducción

En la Ingeniería Civil es requerido saber con precisión las características físico – mecánicas de los suelos y su estratigrafía para poder diseñar correctamente las cimentaciones de diferentes obras civiles. Estos estudios de suelos son fundamentales y deben ser tomados en consideración cuando se diseña cualquier tipo de estructura, debido a que Costa Rica posee mucha sismicidad y tierras relativamente nuevas. Se pueden encontrar gran cantidad de tipos de suelos con diferentes características que podrían resultar perjudiciales sino son tomados en consideración en el diseño estructural de una obra civil.

En fundaciones y mecánica de suelos, más que en cualquier otra rama de la ingeniería civil, es necesaria la experiencia para actuar con éxito. El proyecto de las estructuras comunes fundadas sobre suelos, o de aquellas destinadas a retener suelos, debe necesariamente basarse sobre simples reglas empíricas, así que éstas pueden ser utilizadas con propiedad solamente por el ingeniero que posee bagaje suficiente de experiencia. Las obras de mayor vuelo, con características poco comunes, suelen justificar la aplicación extensiva de métodos científicos en su proyecto, pero, a menos que el ingeniero a cargo de ellas posea una gran experiencia, no podrá preparar inteligentemente el programa de ensayos requeridos ni interpretar sus resultados en la forma debida (Terzaghi y Peck, 1973, p.3).

Un suelo es un material complejo que posee diferentes propiedades dependiendo de su formación y composición incluyendo agregados no cementados de granos minerales y materia orgánica descompuesta, y se utiliza como material de construcción en diferentes proyectos de la ingeniería civil y con

cimientos estructurales. Por esta razón, los ingenieros civiles de Costa Rica y todo el mundo debe tener conocimientos precisos acerca de las propiedades físico – mecánicas de los suelos como lo son el origen del suelo, estratigrafía, resistencia al corte, capacidad soportante y la capacidad para drenar el agua; todos estos aspectos son de suma importancia para poder diseñar de manera óptima una estructura.

Una de las ramas de la ingeniería civil más importante es la mecánica de suelos. En esta área de estudio existen gran variedad de pruebas y ensayos efectuados con el fin de obtener las distintas características y parámetros descriptores de un suelo y son de mucha importancia para los especialistas encargados del procesamiento de los datos recolectados en estos ensayos. Estos son de vital importancia porque determinan las características de los distintos tipos de suelos en los que se construirá una obra civil con un diseño específico, y de esta manera, tomar en consideración las ventajas o limitantes presentes en el terreno.

Los ensayos *in situ* son conformados por una serie de técnicas que permiten medir de forma directa o indirecta los parámetros de resistencia de un suelo con un objetivo en común que obtener la caracterización mecánica de las capas que componen el subsuelo a través de parámetros medidos en el medio natural.

En Costa Rica se conoce el “Ensayo de Penetración Estándar (SPT)”, por sus siglas en inglés, *Standard Penetration Test* bajo la norma ASTM D1586 que es un ensayo *in situ* muy económico y sencillo de realizar para obtener las distintas características de los suelos, como lo dice el código de cimentaciones de Costa Rica:

“De las pruebas in situ, la prueba de Penetración estándar (SPT) es la más usada en Costa Rica” (Asociación Costarricense de Geotecnia, 2009, p.158)

El Ensayo de Penetración Estándar (S.P.T.) consiste en hincar un muestreador de caña partida para obtener una muestra representativa de suelo y

medir la resistencia del suelo a la penetración del muestreador contabilizando la cantidad de golpes en caída libre definida y una masa determinada.

La Prueba de Penetración dinámica súper pesada o conocida por sus siglas en inglés *Dynamic Probing Super Heavy* (D.P.S.H.) se rige bajo la norma española UNE-103-801-94 y consiste en hincar un cono de acero cilíndrico que se encuentra situado en el extremo de una varilla la cual que posee un diámetro inferior al del cono. La hinca en el terreno se logra golpeando el conjunto en la parte superior con una maza en caída libre.

Hasta hace pocas décadas, la exploración del suelo era simple inadecuada e incompleta porque aún no se habían desarrollado métodos racionales para el ensayo de los suelos. Ahora, por el contrario, con frecuencia, el número de ensayos y los refinamientos empleados en su técnica de realización se hallan bastante fuera de proporción cuando se los compara con el valor práctico de sus resultados. Con el objeto de evitar estas condiciones extremas, hay que adaptar el programa de exploración a las condiciones del suelo y tamaño del proyecto (Terzaghi y Peck, 1973, p. 285).

1.1.1 Antecedentes

Ante la disyuntiva del cambio en la tendencia constructiva que está experimentando el país y los problemas geotécnicos que enfrentamos los ingenieros todos los días, que son cada vez más evidentes a la realidad pública, pues las fallas del terreno afectan a estructuras, carreteras y poblaciones, a diferencia de hace algunos años en los que esos problemas se daban mayoritariamente en terrenos abiertos donde sus consecuencias no eran tan evidentes (Alpízar, 2017, p.2).

Según los datos del Instituto Nacional de Estadísticas y Censos (INEC) Costa Rica muestra un importante crecimiento de infraestructura en edificios de 6 o más pisos como se muestra en la siguiente tabla

Tabla 1

Cantidad de construcciones del 2014 al 2017

Autor: Carrillo, 2018

Costa Rica 2014-2017		Numero de Pisos											
		1 nivel		2 niveles		3 niveles		4 niveles		5 niveles		6 o mas niveles	
Año	Total Edificios	Edificios	%	Edificios	%	Edificios	%	Edificios	%	Edificios	%	Edificios	%
2014	21955	17549	79.93%	4262	19.41%	83	0.38%	25	0.11%	8	0.04%	28	0.13%
2015	24734	19313	78.08%	5170	27.52%	180	0.73%	30	0.12%	14	0.06%	27	0.11%
2016	26117	21002	80.42%	4750	25.28%	298	1.14%	28	0.11%	8	0.03%	31	0.12%
2017	22426	17549	78.25%	4604	24.51%	195	0.87%	27	0.12%	8	0.04%	43	0.19%

Fuente: Elaboración propia con datos tomados del INEC (2018)

La empresa consultora *INGENIEROS CONSULTORES SOCIEDAD ANÓNIMA (IMNSA)*, contratada por la Comisión Nacional de Emergencias (CNE), reveló por medio de un estudio que los suelos donde se levanta Nueva Cinchona, en Cariblanco de Alajuela, “son blandos”. “El terreno presenta una consistencia blanda, lo cual incide en una baja capacidad de soporte dicta el informe.” (Alfaro, 2011, párr.2).”.

En la nota se mencionan problemas en los suelos en los que a futuro podrían presentarse una catástrofe en la cual se ponen en riesgo la infraestructura, y en el peor de los casos, vidas humanas, por falta de los respectivos estudios geotécnicos.

Un ingeniero civil debe enfrentarse con distintos problemas con diferentes grados de dificultad planteados por el terreno, debido a que prácticamente todas las estructuras de ingeniería civil (casas, puentes, y túneles.) se deben asentar o cimentar sobre la tierra o dentro de ella y para esto requiere de los estudios de suelos con las características físico – mecánicas con la mayor precisión de manera que se pueda diseñar correctamente la obra deseada.

La capacidad de carga de una cimentación se puede definir a partir de formulaciones teóricas o mediante pruebas *in situ*. Entre las pruebas *in situ* más importantes que podrán usarse para esa finalidad figuran las pruebas

de carga con placas rígidas o la utilización de presiómetros, CPT y otros. (Asociación Costarricense de Geotecnia, 2009,54).

Un ensayo similar al D.P.S.H. llamado DPM en el documento: **ENSAYOS GEOTÉCNICOS DE PENETRACIÓN DINÁMICA IN-SITU, (DPM) APLICACIONES Y RESULTADOS**, realizado por el Laboratorio de Geomecánica de la Universidad de Costa Rica, muestra el procedimiento de un ensayo de penetración dinámica con los mismos principios al D.P.S.H.

En el estudio se concluye que este tipo de ensayo (DPM) agiliza considerablemente la aplicación del ensayo ya que se realiza en menos tiempo que un ensayo de penetración estándar ya que este último requiere de la instalación de un trípode, mazo y motor. Además, es de suma importancia el apego a la norma sobre la que están establecidos los parámetros por seguir. Los cuales en un ensayo común como el SPT, donde, a causa de la manipulación humana, se pueden ver afectados los procedimientos del ensayo, y, por ende, la alteración de los resultados obtenidos; y, en consecuencia, la invalidez del ensayo.

1.1.2 Hipótesis

Demostrar que mediante la aplicación del ensayo de penetración dinámica superpesada (D.P.S.H.) se logran obtener resultados más efectivos para alcanzar la profundidad mínima del bulbo de presiones, al basarse en el Código de Cimentaciones de Costa Rica.

1.1.3 Planteamiento del problema

El Código de Cimentaciones de Costa Rica establece normativas y filosofías de diseño de acatamiento obligatorio para todos los ingenieros del país.

El objetivo del código es procurar que las cimentaciones de las edificaciones sean proyectadas y construidas, de tal manera que, bajo condiciones normales de carga, no se produzcan daños que obstaculicen la operación del edificio o pongan en peligro su integridad estructural. Se ha procurado agregar la consideración de factores, para que, en condiciones

sísmicas extraordinarias, no se produzcan fallas en la cimentación que puedan llevar al colapso de la superestructura (Asociación Costarricense de Geotecnia, 2009, p.25)

Por esta razón es que actualmente se requieren ensayos con equipo especializado y tecnología de punta para obtener resultados mucho más exactos que el ensayo, más comúnmente, utilizado en Costa Rica, el cual es el Ensayo de Penetración Estándar (SPT). El ensayo de Penetración Dinámica Súper Pesada (DPSH) requiere un equipo más sofisticado, se considera un método más sencillo para determinar las resistencias de las diferentes capas de suelo, así como su relativa rapidez y economía de ejecución. Cada vez en Costa Rica los requerimientos de los estudios de suelos se vuelven más exigentes y esto sugiere que los ingenieros del país deben utilizar nuevos métodos para la exploración geotécnica como lo es el DPSH.

Según la tabla 2.1 del Código de cimentaciones de Costa Rica, las exploraciones geotécnicas se deberían de basar en la siguiente tabla:

Tabla 2

Requisitos mínimos para la exploración de campo

Magnitud de la obra ^(A)	Complejidad Geotécnica ^(B)		
	Baja	Media	Alta
Baja	N Mín: 2 E Máx: 60m P Mín.: $D_f + 2m$	N Mín: 3 E Máx: 40m P Mín: $D_f + 3m$	N Mín: 4 E Máx: 30m P Mín: $D_f + 4m$
Media	N Mín: 2 E Máx: 50m P Mín: $D_f + 3m$	N Mín: 3 E Máx: 350m P Mín: $D_f + 3m$	N Mín: 4 E Máx: 25m P Mín: $D_f + 4m$
Alta	N Mín.: 2 E Máx.: 40m P Mín: $D_f + 4m$	N Mín: 3 E Máx: 30m P Mín: $D_f + 3m$	N Mín: 4 E Máx: 20m P Mín: $D_f + 5m$
Especial	La campaña de exploración de campo depende del proyecto y será		

N Mín: Número mínimo de perforaciones o puntos de exploración.

E Máx: Espaciamiento Máximo entre puntos de sondeo o de exploración.

P Mín: Profundidad mínima de los sondeos, en m.

D: Profundidad de desplante estimada de cimentaciones, en m.

Notas:

- En el caso de obras de magnitud baja y en condiciones de complejidad geotécnica igualmente baja, las perforaciones podrían sustituirse por pozos o trincheras de exploración siempre y cuando se puedan alcanzar con ellas la profundidad mínima exigida en la tabla.
- La profundidad mínima de exploración deberá garantizar además que se estudie el terreno existente dentro del bulbo de presión significativa de la cimentación.

(A): Magnitud de la obra

- Baja: Construcciones menores de 3 niveles; incluye residencias, bodegas y urbanizaciones, entre otras.
- Media: Edificaciones de 4 a 10 niveles o cargas menores de 3000kN por apoyo y naves industriales.
- Alta: Edificaciones mayores de 10 niveles o cargas mayores de 3000kN por apoyo.
- Especial: Construcciones que, por su magnitud, requieren de estudios particulares. Casos especiales de cimentación como losas, pilotes, cajones de cimentación, entre otros.

(B): Complejidad Geotécnica

- A definir por el profesional responsable que estará a cargo del estudio correspondiente.

Fuente: Asociación Costarricense de Geotecnia, 2009, p.37.

El ensayo de penetración estándar y el de penetración dinámica superpesada se aplica únicamente para obras de magnitud baja a media y con cualquier complejidad geotécnica que la define el profesional responsable, ya que si se solicita una obra con magnitud alta se requerirá otros ensayos que brinden resultados mucho más exactos que los que brindan los 2 ensayos en estudio.

El ensayo de penetración estándar (S.P.T.) es un ensayo muy utilizado en Costa Rica ya que tiene un costo de aplicación bajo, es fácil y rápido de aplicar, además de poseer instrumentación muy accesible a los diferentes terrenos, pero se dificulta obtener resultados certeros a muy poca profundidad por motivos de fricción del suelo e inclusive la energía aplicada por el operador.

Por otra parte, el ensayo de penetración dinámica súper pesada es un ensayo que al igual que el S.P.T. tiene un costo de aplicación bajo, es práctico, rápido y fácil de aplicar, con la ventaja de que se alcanzan mayores profundidades a la hora la aplicación, la cual ayuda a encontrar realmente cual sería la

profundidad mínima donde el bulbo de presiones no afecta el suelo y poder tener los resultados confiables para poder llevar a cabo una construcción determinada.

1.1.4 Justificación

El presente trabajo de investigación se realizará con el fin de brindar una herramienta importante y útil para los especialistas encargados de ejecutar pruebas de campo, con nuevos métodos de exploración para suelos. Actualmente se dispone de gran cantidad de métodos estandarizados en el ámbito internacional para el estudio de los suelos y por este motivo es que se busca realizar un estudio de gran utilidad y a un bajo costo, obteniendo los resultados más precisos con la tecnología de punta siguiendo los estándares internacionales.

En la mecánica de los suelos se utilizan actualmente diversos métodos para determinar las propiedades físico-mecánicas del suelo, estos ensayos dependen de la precisión, costo y facilidad de efectuar el ensayo en la gran cantidad de retos constructivos para la ingeniería que se llevan a cabo actualmente.

Las normas aplicadas para el método de penetración estándar (SPT) y penetración dinámica súper pesada (DPSH) brindan una guía de uso que se debe seguir estrictamente para evitar discrepancias en sus resultados- A pesar de que en Costa Rica es utilizado, comúnmente, el método SPT para el análisis de los suelos, también se cuenta con el equipo para poder ejecutar el ensayo penetración dinámica súper pesada (DPSH) facilitado por la empresa IIG Consultores para el análisis de resultado. Este análisis es de suma importancia para los especialistas en el análisis de los suelos porque se obtienen resultados a mayores profundidades de estudio con el ensayo D.P.S.H.

Un correcto estudio geotécnico puede garantizar la estabilidad de un proyecto de construcción, tanto en su levantamiento como en su vida útil. Siendo Costa Rica un lugar con distintos tipos de suelos, fallas geológicas, zonas

vulcanológicas y propenso a distintos desastres naturales, se le debería dar más importancia al estudio preliminar del suelo antes de iniciar una construcción en el sitio. A pesar de que en el Código de Cimentaciones ya se contempla, se debe recordar que Costa Rica todavía cuenta con la ejecución de proyectos de clase baja, y en estos es donde se presentan la mayor cantidad de problemas, producto del poco o nulo conocimiento del subsuelo.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo general:

Analizar los bulbos de presiones con los Ensayos de Penetración Estándar (S.P.T.) y penetración dinámica súper pesada (D.P.S.H), mediante la aplicación de ambas pruebas para la verificación del cumplimiento de los parámetros mínimos según el Código de Cimentaciones de Costa Rica.

1.2.2 Objetivos específicos:

1. Definir la normativa y equipo que aplican en el ensayo de penetración estándar (S.P.T.) y la prueba de penetración dinámica súper pesada (D.P.S.H).
2. Recopilar datos mediante la aplicación de ensayos S.P.T. y D.P.S.H.
3. Evaluar los resultados obtenidos a un suelo por medio del ensayo de penetración estándar (S.P.T.) y la prueba de penetración dinámica súper pesada (D.P.S.H).

1.3 Alcances y limitaciones

1.3.1 Alcances

- Aplicar la prueba de penetración estándar (S.P.T.) y la prueba de penetración dinámica súper pesada (D.P.S.H) en los mapas de Liberia y San José según los mapas de zonificación del Código de Cimentaciones de Costa Rica.
- Se analizarán los resultados obtenidos mediante informes geotécnicos recolectados en la aplicación de las distintas pruebas.
- Se realizará un análisis comparativo de los resultados obtenidos por ambos ensayos.

1.3.2 Limitaciones

- Se limita únicamente a la aplicación de pruebas de penetración estándar (S.P.T.) y la prueba de penetración dinámica súper pesada (D.P.S.H).
- La prueba de penetración estándar se rige bajo la norma ASTM D1586 y se analizará únicamente la cantidad de golpes para alcanzar las distintas profundidades.
- Actualmente, se conoce de un único equipo completo para la elaboración de la prueba de penetración dinámica súper pesada (D.P.S.H) en Costa Rica que se rige bajo la norma española UNE-103-801-94.
- Las pruebas se aplicarán a suelos “AM” y “V3” según la tabla 6 del presente documento.
- Dado que los datos fueron brindados por la empresa IIG consultores y corresponden a proyectos privados, el trabajo de investigación abarca áreas aproximadas en el mapa de San José y Liberia, a no puntos específicos en el sitio.
- Dado que los resultados de las pruebas son empíricos y Costa Rica cuenta con variedad de suelos, se mostrará de manera gráfica los resultados obtenidos basados en un análisis estadístico de datos.
- El trabajo de investigación no abarca la determinación de propiedades físicas y mecánicas de suelos.

CAPÍTULO II MARCO TEÓRICO

2.1 Marco situacional

En este trabajo de investigación se aplicará la prueba de penetración estándar (S.P.T.) y la prueba de penetración dinámica súper pesada (D.P.S.H.) para analizar los resultados obtenidos y poder comparar las profundidades que alcanzó cada ensayo en los distintos puntos del país. Previamente se presentará al lector información de suma importancia para llevar a cabo ambos métodos y poder procesar la información obtenida de los resultados de las pruebas, como por ejemplo consistencias de suelos, tipos de ensayos *in situ*, etc.

2.2 Marco teórico

2.2.1 Introducción a la Mecánica de suelos

La mecánica de suelos es la rama de la ingeniería que implica el estudio de las propiedades de los suelos y su comportamiento bajo esfuerzos y las deformaciones en condiciones idealizadas. La cimentación aplica los principios de la mecánica de suelos y la geología en la planeación, el diseño y la construcción de cimentaciones de edificios, carreteras, tráfico vehicular, etc. A partir de las condiciones idealizadas de la mecánica de suelos son necesarias las aproximaciones y deducciones para el diseño adecuado de cimientos, ya que, en la mayoría de los casos, los depósitos naturales del suelo no son homogéneos. Sin embargo, para que una estructura funcione correctamente, estas aproximaciones pueden ser realizadas sólo por un ingeniero que tenga una buena formación en mecánica de suelos (Das, 2015, p.15) (La cursiva no pertenece al original).

Todas las obras de ingeniería civil son apoyadas sobre un suelo de alguna manera y en muchas ocasiones se utiliza el mismo suelo como un elemento de construcción, como por ejemplo para terraplenes, diques o rellenos en general. Por estos motivos su estabilidad, comportamiento funcional y estético estarán determinados por el desempeño del material de asiento que conforma el subsuelo.

Si se superan los límites de capacidad de resistencia del suelo, o sin llegar a este límite, se sufren deformaciones considerables, se pueden generar esfuerzos secundarios en las estructuras que probablemente no fueron tomadas en consideración cuando se diseñó la estructura, y de esta manera, se producen grietas o fisuras, y en casos extremos, hasta el colapso completo de la estructura.

2.2.1.1 Importancia de la mecánica de los suelos

De este modo, previamente a la construcción de una obra civil, el estudio geotécnico del suelo permitirá conocer el tipo de materiales y las diferentes resistencias que se encuentran en el subsuelo donde se cimentará la obra. También, posibilita identificar la presencia de suelos con grandes peligros para las estructuras como arcillas expansivas, suelos orgánicos o rellenos de escombros, etc. Además, durante un ensayo de penetración se puede encontrar con la aparición del nivel de agua (nivel freático) y se debe tomar en consideración en el diseño ya que, conlleva a un diferente comportamiento en los suelos.

Para aplicar adecuadamente los distintos métodos de la mecánica de los suelos el ingeniero necesita conocer de forma clara y precisa el medio sobre el que va a trabajar y realizar un reconocimiento del terreno que contemple el medio que rodea el sitio donde se va a realizar la construcción de la obra civil y sus colindancias, como, por ejemplo: consistencia del terreno, inclinación, estratigrafía, espesor de las diferentes capas de suelo y el nivel freático.

La falta de conocimiento del subsuelo ha producido, en numerosos casos, fallas importantes en obras, aumentos en los costos, atrasos durante el proceso constructivo, colapso parcial, falla funcional e incluso pérdida de vidas. Son frecuentes los problemas asociados con asentamientos importantes, empujes y baja capacidad de soporte, entre otros, que podrían detectarse a priori con tan solo un poco de atención sobre estas situaciones (Asociación Costarricense de Geotecnia, 2009, p. 27).

Por este motivo se realizan ensayos *in situ*, que permiten un estudio de suelos en su medio natural y sin necesidad de transportar la muestra a un laboratorio, lo cual podría alterar sus resultados por su método de extracción, manipulación y transporte hasta el laboratorio.

Los ensayos de laboratorio para obtener cálculos de estabilidad o predicciones de asentamiento se realizaban a partir de parámetros geotécnicos, obtenidos mediante ensayos de laboratorio, efectuados a muestras del terreno que supuestamente estaban inalteradas, pero las formulas teóricas, que comúnmente utilizaban, estos parámetros mecánicos de laboratorio producían en muchas ocasiones contradicciones con la experiencia ingenieril.

Claramente, en un laboratorio se pueden estudiar las condiciones de un suelo siempre y cuando sean estrictamente controladas.

2.2.1.2 Reconocimiento

Según el autor Braja M. Das (2015) el ingeniero a cargo de una obra siempre tiene que inspeccionar visualmente el sitio en estudio como la siguiente:

1. La topografía del sitio y la posibilidad de que existan zanjas de drenajes, tiraderos u otros materiales, también cuando a simple vista se

observan taludes, grietas anchas y profundas a intervalos espaciados regularmente que indican la presencia de suelos expansivos.

2. Las estratigrafías del suelo en cortes del terreno profundo se pueden observar donde se llevaron a cabo construcciones de carreteras o vías férreas a los alrededores del sitio.
3. La vegetación predominante del sitio indica la naturaleza del suelo.
4. Las marcas de agua en las pilas de puentes o en las orillas de los edificios.
5. El nivel freático observado por medio de la revisión de pozos cercanos al terreno en estudio.
6. Las características de las construcciones cercanas, además de grietas en muros

2.2.1.3 Tipos de exploración de suelos

Existen distintos métodos *in situ* para la investigación o exploración de suelos como los siguientes:

1. Calicatas o pozos: una calicata es una excavación que se surca en la superficie del suelo con distintas medidas, por lo general de 1m x 1m x 1m es un método simple y efectivo para analizar directamente el suelo en estudio y, por lo tanto, es un método que brinda información clara y completa. Además, determina el nivel freático con gran exactitud, este tipo de excavaciones no suele exceder los 5 metros de profundidad.

Figura



Figura 1. Calicata (TodoAgro, 2011, en línea).

2. Sondeos: los sondeos pueden ser mecánicos o manuales y consisten en perforar el suelo, generalmente, con un diámetro pequeño para obtener las muestras y realizar diferentes ensayos *in situ*, también permite reconocer la naturaleza y localización de las diferentes capas del terreno y se pueden obtener profundidades superiores a las conseguidas con las calicatas.

Figura

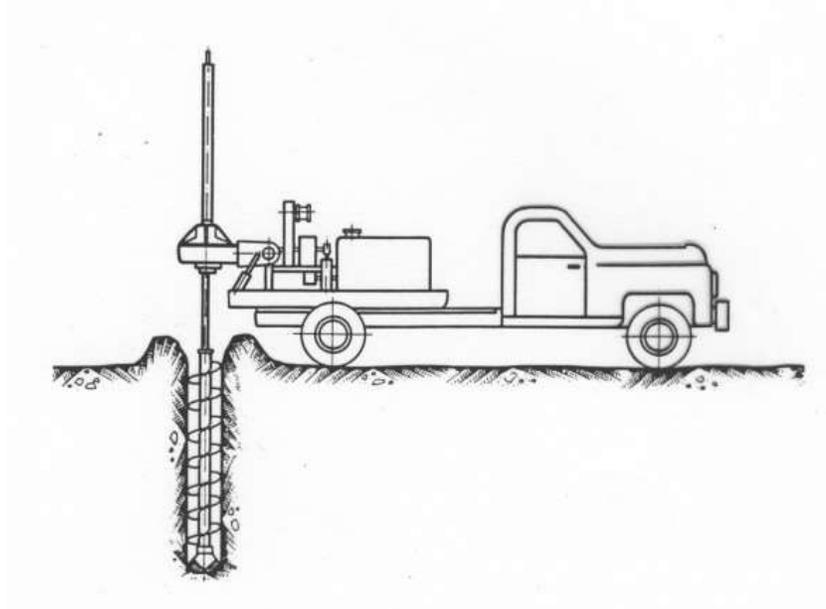


Figura 2. Sondeo (Martínez, 2010, en línea).

3. Penetrómetros: puede ser del tipo estático, dinámico o normal, el penetrómetro estático consiste en la hincada por presión de un tornillo sin fin, el cual brinda un registro continuo de la resistencia del terreno, y, por otra parte, el penetrómetro dinámico consiste en la hincada de un elemento con punta, por lo general cónica, en el terreno midiendo la energía mediante la cantidad de golpes por una masa determinada y longitud definida. También, el ensayo de penetración normal consiste en contar la cantidad de golpes de una masa determinada para hincar un muestreador de tubo partido a la mitad hasta una profundidad establecida.

Figura

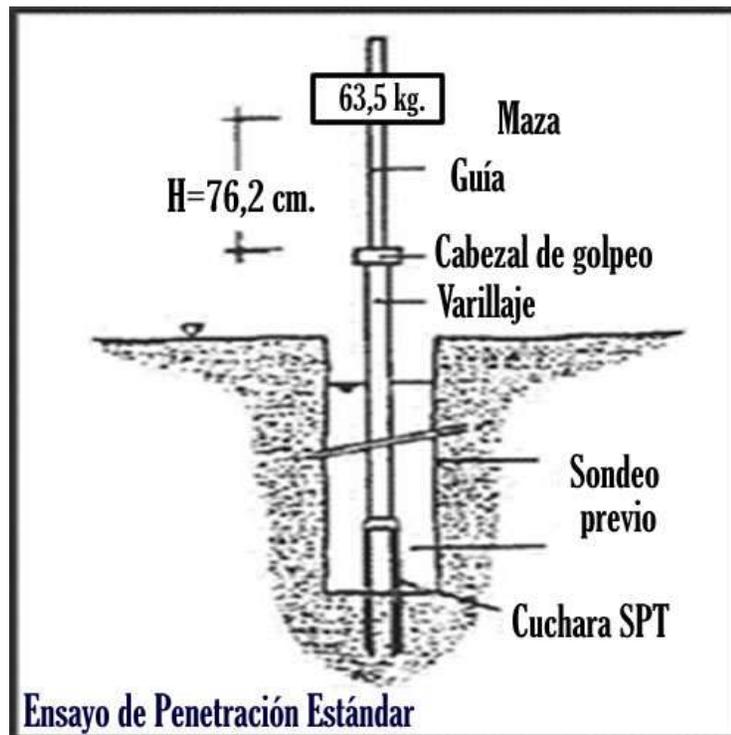


Figura 3. Penetrómetro (Berrospi, 2013, en línea).

4. Ensayos Geofísicos: los ensayos geofísicos son utilizados para la investigación del subsuelo, con la finalidad de obtener parámetros de velocidad de ondas P o S, los cuales permiten determinar sus propiedades dinámicas y definir las características de la estratigrafía en un lugar dado.

Figura

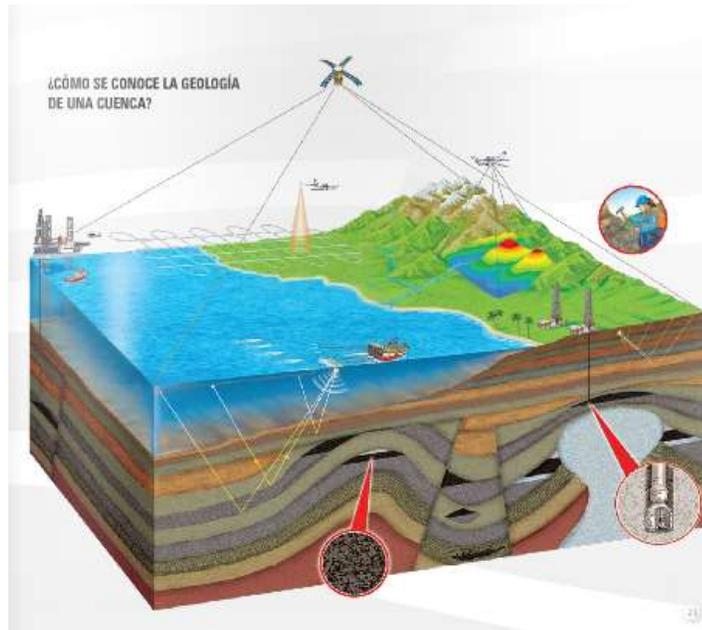


Figura 4. Ensayos Geofísicos (Agencia Nacional de Hidrocarburos, 2009, p,23).

2.2.2 Sistemas de clasificación de los suelos

Los sistemas de clasificación proporcionan un lenguaje común para expresar de forma concisa las características generales de los suelos, que son infinitamente variadas, sin una descripción detallada. En la actualidad, dos elaborados sistemas de clasificación que utilizan la distribución granulométrica y la plasticidad de los suelos son comúnmente utilizados para aplicaciones ingenieriles, se trata del *American Association of State Highway Officials (AASHTO)* y el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos. En Estados Unidos, el sistema AASHTO es utilizado principalmente por los departamentos de carreteras estatales y del condado, mientras que los ingenieros geotécnicos normalmente prefieren utilizar el Sistema Unificado (Das, 2015, p. 78).

Este trabajo de investigación se enfocará únicamente en el sistema unificado de clasificación de suelos ya que es el sistema utilizado en Costa Rica por el Código de cimentaciones de Costa Rica.

2.2.2.1 Límites de Atterberg

2.2.2.1.1 Límite Líquido

Según Terzaghi y Peck (1973), el límite líquido (L_w), es el contenido de humedad en porcentaje necesario para que dos partes de un mismo suelo alcancen a tocarse sin unirse cuando la taza en la que está incluida el suelo reciba una cantidad fija de golpes verticales secos.

Figura

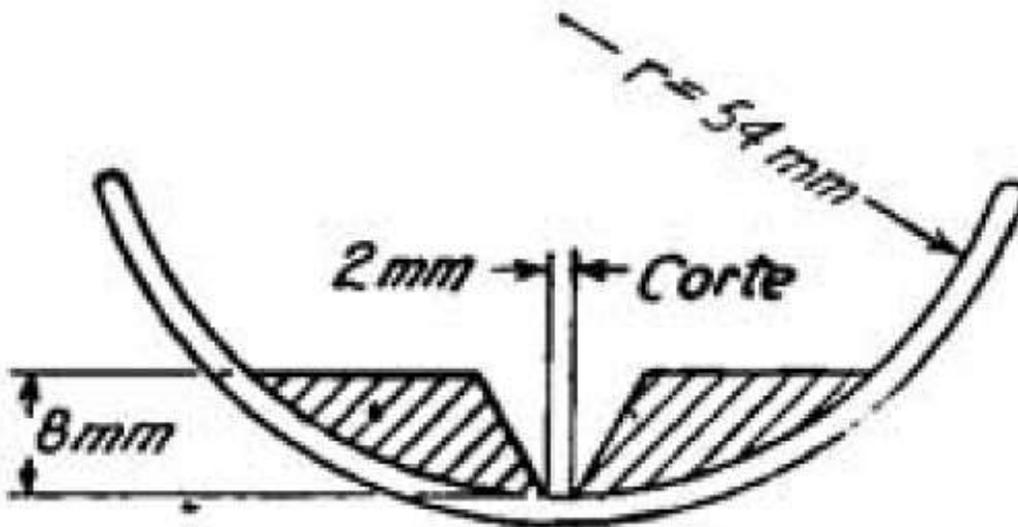


Figura 5. Corte de la taza para determinar el límite líquido con la pasta de suelo (según A. Casagrande citado por Terzaghi y Peck, 1973, p. 31).

2.2.2.1.2 Límite Plástico

“El límite plástico, P_w , o límite inferior del estado plástico, es el contenido de humedad para el cual el suelo comienza a fracturarse cuando es amasado en pequeños cilindritos, haciendo rodar la masa de suelo entre la mano y una superficie lisa” (Terzaghi y Peck, 1973, p.31).

2.2.2.1.3 Límite de contracción

El límite de contracción, S_w , o límite inferior de cambio de volumen, es el contenido de humedad por debajo del cual una pérdida de humedad por evaporación no trae aparejada una reducción de volumen. Cuando el contenido de humedad pasa por debajo del límite contracción el suelo cambia de color, tornándose más claro (Terzaghi y Peck, 1973, p.32).

2.2.2.2 Sistema unificado de clasificación de suelos (S.U.C.S.)

El sistema cubre los suelos gruesos y los finos, distinguiendo ambos por el cribado a través de la malla 200; las partículas gruesas son mayores que dicha malla y las finas, menores. Un suelo se considera grueso si más del 50% de sus partículas son gruesas, y fino, si más de la mitad de sus partículas, en peso, son finas (Juárez Badillo & Rico Rodríguez, 1973, p. 112).

Esta clasificación utiliza símbolos de grupos basados en un prefijo que designa la composición del suelo y un sufijo caracterizado por sus propiedades, en la tabla #3 se muestran dichos símbolos y su significado:

Tabla 3

Símbolos de grupo SUCS

TIPO DE SUELO	PREFIJO	SUBGRUPO	SUFIJO
Grava	G	Bien graduado	W
Arena	S	Pobrementemente graduado	P
Limo	M	Limoso	M
Arcilla	C	Arcilloso	C
Orgánico	O	Límite líquido alto (>50)	L
Turba	Pt	Límite líquido bajo (<50)	H

Fuente: Bañón y José, 2000, p. 21.

Tabla 4

Tipología en suelos

SÍMBOLO	Características generales		
GW GP GM GC	GRAVAS (>50% en tamiz #4 ASTM)	Limpias (Finos<5%)	Bien graduadas
			Pobrementemente graduadas
		Con finos (Finos>12%)	Componente limoso
			Componente arcilloso
SW SP SM SC	ARENAS (<50% en tamiz #4 ASTM)	Limpias (Finos<5%)	Bien graduadas
			Pobrementemente graduadas
		Con finos (Finos>12%)	Componente limoso
			Componente arcilloso
ML MH	LIMOS	Baja plasticidad (LL<50)	
		Alta plasticidad (LL>50)	
CL CH	ARCILLAS	Baja plasticidad (LL<50)	
		Alta plasticidad (LL>50)	
OL OH	SUELOS ORGÁNICOS	Baja plasticidad (LL<50)	
		Alta plasticidad (LL>50)	
Pt	TURBA	Suelos altamente orgánicos	

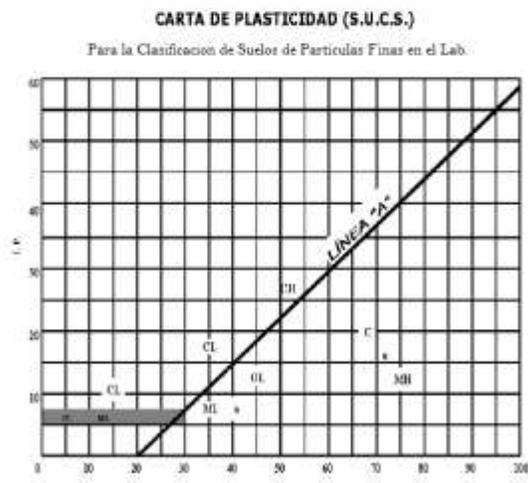
Fuente: Bañón y José, 2000, p. 21

Tabla 5

Sistema unificado de clasificación de suelos (SUCS)

DIVISIÓN MAYOR		SÍMBOLO	NOMBRES TÍPICOS	CRITERIO DE CLASIFICACIÓN EN EL LABORATORIO	
SUELOS DE PARTICULAS GRUESAS Más de la mitad del material es retenido en la malla número 200 @	GRAVAS Más de la mitad de la fracción gruesa es retenida por la malla No. 4 PARA CLASIFICACION VISUAL PUEDE USARSE 1/2 cm. COMO EQUIVALENTE A LA ABERTURA DE LA MALLA No. 4	GW	Gravas bien graduadas, mezclas de grava y arena con poco o nada de finos	COEFICIENTE DE UNIFORMIDAD C_u : mayor de 4 COEFICIENTE DE CURVATURA C_c : entre 1 y 3. $C_u = D_{60} / D_{10}$ $C_c = (D_{30})^2 / (D_{10})(D_{60})$	
		GP	Gravas mal graduadas, mezclas de grava y arena con poco o nada de finos		
		* GM u	Gravas limosas, mezclas de grava, arena y limo	LÍMITES DE ATTERBERG ABAJO DE LA "LÍNEA A" O I.P. MENOR QUE 4.	Arriba de la "línea A" y con I.P. entre 4 y 7 son casos de frontera que requieren el uso de símbolos dobles.
			GC		
		ARENAS Más de la mitad de la fracción gruesa pasa por la malla No. 4 PARA CLASIFICACION VISUAL PUEDE USARSE 1/2 cm. COMO EQUIVALENTE A LA ABERTURA DE LA MALLA No. 4	SW	Arenas bien graduadas, arena con gravas, con poca o nada de finos.	No satisfacen todos los requisitos de graduación para SW
			SP	Arenas mal graduadas, arena con gravas, con poca o nada de finos	
	ARENAS CON FINOS Cantidad apreciable de partículas finas	* SM u	Arenas limosas, mezclas de arena y limo.	LÍMITES DE ATTERBERG ABAJO DE LA "LÍNEA A" O I.P. MENOR QUE 4.	Arriba de la "línea A" y con I.P. entre 4 y 7 son casos de frontera que requieren el uso de símbolos dobles.
		SC	Arenas arcillosas, mezclas de arena y arcilla		
	SUELOS DE PARTICULAS FINAS Más de la mitad del material pasa por la malla número 200 @ Las partículas de 0.074 mm de diámetro (la malla No. 200) son, aproximadamente, las más pequeñas visibles a simple vista.	LIMOS Y ARCILLAS Límite Líquido menor de 50	ML	Limos inorgánicos, polvo de roca, limos arenosos o arcillosos ligeramente plásticos.	EQUIVALENCIA DE SÍMBOLOS G-Grava, M-Limo, O-Suelo Orgánico, W bien graduado, S-Arena, C-Arcilla, PI-Turba, P-mal graduado, L-Baja compresibilidad, H-alta compresibilidad
			CL	Arcillas inorgánicas de baja o media plasticidad, arcillas con grava, arcillas arenosas, arcillas limosas, arcillas pobres.	
OL			Limos orgánicos y arcillas limosas orgánicas de baja plasticidad.		
LIMOS Y ARCILLAS Límite Líquido Mayor de 50		MH	Limos inorgánicos, limos micáceos o diatomeos, más elásticos.	LÍMITES DE ATTERBERG ARRIBA DE LA "LÍNEA A" CON I.P. MAYOR QUE 7.	Arriba de la "línea A" y con I.P. entre 4 y 7 son casos de frontera que requieren el uso de símbolos dobles.
		CH	Arcillas inorgánicas de alta plasticidad, arcillas francas.		
		OH	Arcillas orgánicas de media o alta plasticidad, limos orgánicos de media plasticidad.		
SUELOS ALTAMENTE ORGÁNICOS		PI	Turbas y otros suelos altamente orgánicos.		

DETERMINARSE LOS PORCENTAJES DE GRAVA Y ARENA DE LA CURVA GRANULOMÉTRICA, DEPENDIENDO DEL PORCENTAJE DE FINOS (fracción que pasa por la malla No. 200) LOS SUELOS GRUESOS SE CLASIFICAN COMO SUCS: Menos del 5% GW, GP, SW, SP; más del 12% GM, GC, SM, SC. Entre 5% y 12%, Casos de frontera que requieren el uso de símbolos dobles **



** CLASIFICACIÓN DE FRONTERA. LOS SUELOS QUE POSEAN LAS CARACTERÍSTICAS DE DOS GRUPOS SE DESIGNAN CON LA COMBINACIÓN DE LOS DOS SÍMBOLOS; POR EJEMPLO GW-GC, MEZCLA DE ARENA Y GRAVA BIEN GRADUADAS CON CEMENTANTE ARCILLOSO.
 @ TODOS LOS TAMAÑOS DE LAS MALLAS EN ESTA CARTA SON LOS U.S. STANDARD.
 * LA DIVISIÓN DE LOS GRUPOS GM Y SM EN SUBDIVISIONES d Y u SON PARA CAMINOS Y AEROPUERTOS ÚNICAMENTE. LA SUB-DIVISIÓN ESTA BASADA EN LOS LÍMITES DE ATTERBERG EL SUFICIO d SE USA CUANDO EL L.L. ES DE 28 O MENOS Y EL I.P. ES DE 6 O MENOS. EL SUFICIO u ES USADO CUANDO EL L.L. ES MAYOR QUE 28.

Para una completa identificación de un suelo, es requerido diferentes pruebas o ensayos aplicados a una muestra del terreno para poder obtener las características específicas del terreno como, por ejemplo: Tamaño de las partículas, granulometría, forma o angularidad, entre otros.

Figura

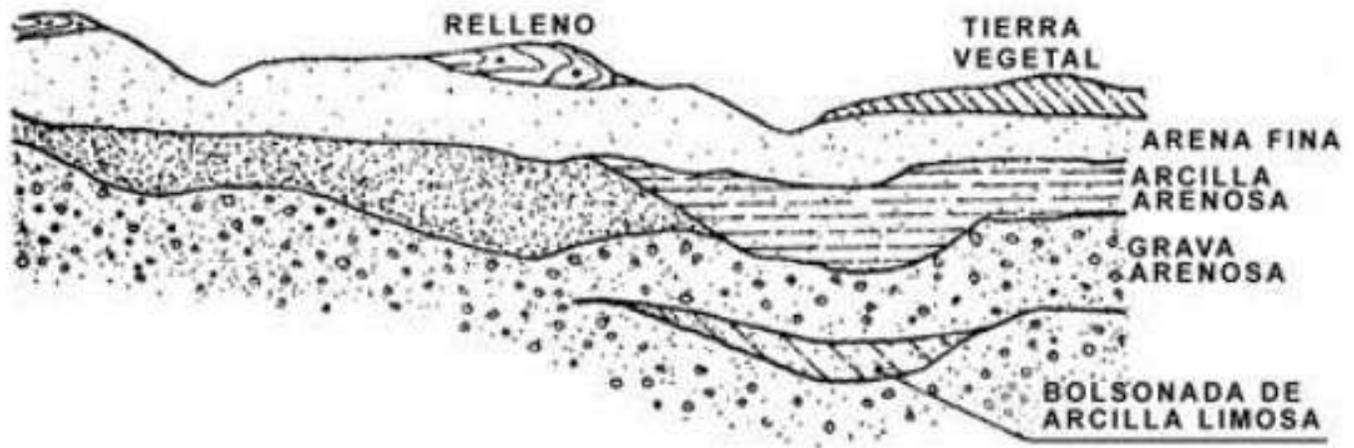


Figura 6. Tipos de suelos (civilgeeks,2017, en línea).

Una correcta investigación del suelo en la Ingeniería Civil se basa en que es posible tener información suficiente para encontrar soluciones a diversos problemas y establecer parámetros de diseño en proyectos de construcción de distintas magnitudes, por lo que un completo estudio de suelos abarca la investigación de los siguientes aspectos:

1. Naturaleza de los depósitos del suelo: geología, excavaciones, inundaciones, trabajos subterráneos entre otros.
2. Profundidad de la roca y sus características.
3. Profundidad y variaciones del nivel freático
4. Profundidad, espesor y composición de cada estrato del subsuelo.

2.2.3 Propiedades del suelo importantes en la ingeniería:

Densidad: en el suelo se consideran dos tipos de densidad: densidad aparente y densidad real

1. Densidad aparente (d_a): es la masa contenida en una unidad de volumen de una muestra de suelo tal y como es, incluyendo el volumen ocupado por los poros. Para determinarla, se divide el peso de un determinado volumen de tierra secada en horno por ese volumen de suelo, y se expresa el resultado en kg/m^3
2. Densidad real (d_r): es la densidad de las partículas sólidas del suelo. Se determina dividiendo el peso del suelo secado en horno por el volumen que ocupan los sólidos.

Fricción Interna: es la resistencia al deslizamiento causado por la fricción que hay entre las superficies de contacto de las partículas y de su densidad. Como los suelos granulares tienen superficies de contacto mayores y sus partículas, especialmente si son angulares, presentan una buena trabazón, tendrán fricciones internas altas. En cambio, los suelos finos las tendrán bajas.

Compresibilidad: es una característica que posee un suelo o roca para alcanzar su susceptibilidad a decrecer el volumen cuando está sujeto a carga.

Permeabilidad: es la capacidad que tiene un suelo para permitir el paso de un fluido (en términos particulares, el agua) sin que dicho tránsito altere la estructura interna

2.2.4 Mapas de zonificación según el código de cimentaciones de Costa Rica

En el código de cimentaciones de Costa Rica se encuentran mapas de zonificación que indican aproximadamente los tipos de suelos en los distintos sectores del país, la investigación se enfoca en ensayos aplicados los mapas de San José y Liberia.

Figura

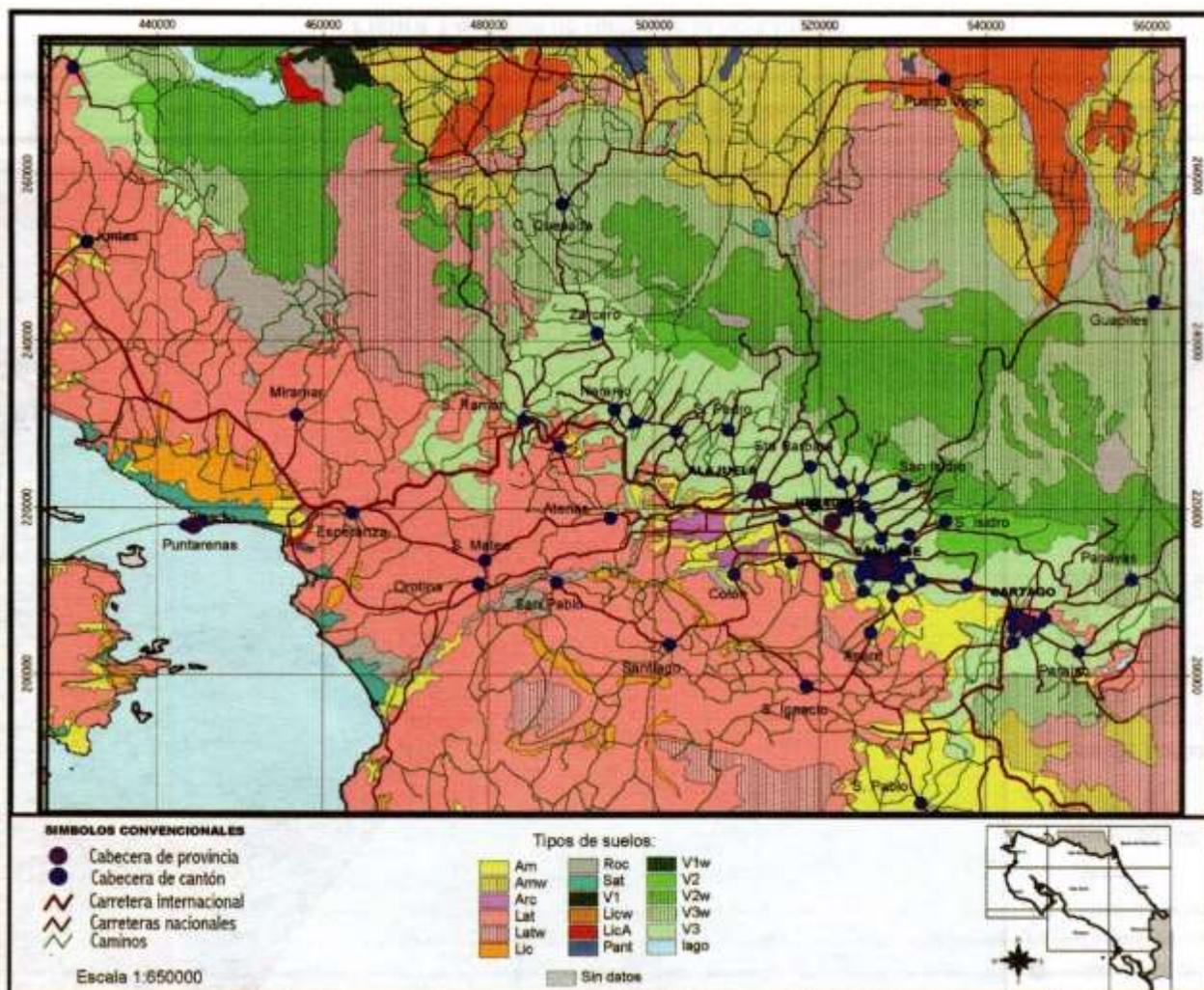


Figura 7. Tipos de suelos de la hoja de San José (Asociación Costarricense de Geotecnia, 2009, p. 181).

Figura

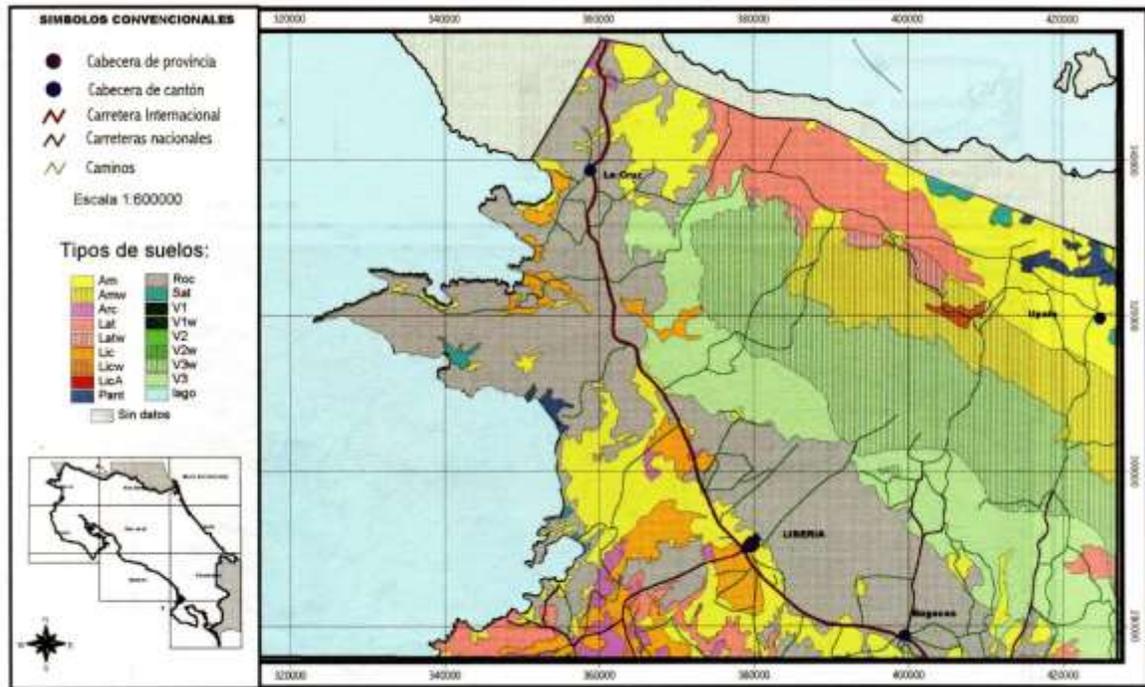


Figura 8. Tipos de suelos de la hoja de Liberia (Asociación Costarricense de Geotecnia, 2009, p. 177).

Cada mapa de zonificación cuenta con diferentes tipos de suelos y su simbología esta descrita en la siguiente tabla:

Tabla 6

Descripción de simbologías en mapas de zonificación

<u>Descripción</u>	<u>Características ingenieriles</u>
 Am – Suelos residuales de color amarillento	Suelos blandos, alto contenido de humedad, buena permeabilidad.
 Amw – Suelos residuales de color amarillento en zonas húmedas	Humedades naturales muy altas, con frecuencia superiores al 100%
 Arc – Suelos arcillosos de alto potencial de expansión	Muy baja permeabilidad, potencial de expansión puede ocasionar problemas
 Lat – Suelos residuales rojizos	Susceptibilidad a inestabilidad de taludes (reptación y deslizamientos)
 Latw – Suelos residuales rojizos en zonas húmedas	Humedades naturales muy altas, con frecuencia superiores al 100%
 Lic – Suelos aluviales	Susceptibilidad a licuarse, blandos y permeables
 Licw – Suelos aluviales en zonas húmedas	Humedades naturales muy altas, con frecuencia superiores al 100%
 LicA – Suelos arenosos	Susceptibilidad a licuarse, poco consolidados, nivel freático superficial
 Pant – Suelos aluviales pantanosos	Condiciones desfavorables: inundados, blandos, propensos a licuación
 Roc – Suelos de poco espesor	Roca alterada, baja permeabilidad
 Sat – Suelos aluviales saturados	Muy blandos, problemas de estabilidad en cortes, mejoramiento requerido
 V1 – Suelos volcánicos compuestos por ceniza fresca	Alta relación de vacíos, alta humedad, bajo peso unitario, colapsable, blando
 V1 – Suelos volcánicos compuestos por ceniza fresca en zonas húmedas	Humedades naturales muy altas, con frecuencia superiores al 100%
 V2 – Suelos volcánicos con gran contenido de minerales amorfos	Igual que V1, cambian propiedades al secarse
 V2 – Suelos volcánicos con gran contenido de minerales amorfos en zonas húmedas	Humedades naturales muy altas, con frecuencia superiores al 100%
 V3 – Suelos residuales de origen volcánico	Igual que V1 y V2, son del tipo MH o ML según el SUCS
 V3w – Suelos residuales de origen volcánico en zonas húmedas	Humedades naturales muy altas, con frecuencia superiores al 100%
 Sin datos	

Fuente: Asociación Costarricense de Geotecnia, 2009, p. 186.

2.2.5 Presiones verticales en el suelo situado debajo de una carga concentrada

Según los autores Terzaghi y Peck (1973) la presión aplicada verticalmente sobre cualquier sección horizontal disminuye desde un punto máximo que va a ser el punto situado directamente por debajo de la carga hasta un valor cero a una distancia determinada del punto directo de presión. La distribución de presiones de este tipo se puede ilustrar en forma de campana o domo como se muestra en la ilustración #9

Figura

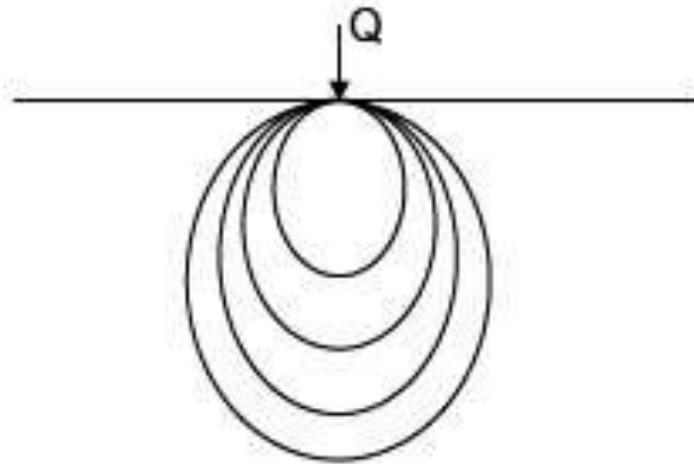


Figura 9. Bulbo de presiones por una carga puntual (González, 2012, en línea).

Como el esfuerzo aplicado se distribuye en profundidad cada vez mayor, la presión máxima representada en el bulbo de presiones disminuye conforme la profundidad va incrementando sobre una superficie cada vez mayor, la presión máxima.

El bulbo de presiones es la zona del suelo donde se producen incrementos de carga vertical considerables por efecto de una carga aplicada del tipo que sea y está conformado por isobaras que son curvas unidas por puntos con un mismo valor de presión.

El quehacer diario en el sector de la Consultoría Geotécnica, evidencia que, al desarrollar proyectos con un mayor número de pisos, sótanos o en zonas de riesgo geotécnico, se modifica de manera drástica los bulbos de presión a los cuales se está sometiendo el terreno, y los modelos de análisis de los sistemas constructivos requieren parámetros mecánicos y físicos precisos para que su aplicación sea eficiente (Alpízar, 2017, p.4).

En 1885, Boussinesq desarrolló las relaciones matemáticas para la determinación de los esfuerzos normal y de corte en un punto cualquiera dentro de medios homogéneos, elásticos e isotrópicos debido a una carga puntual concentrada localizada en la superficie, (Das, 2001, p.220).

Según el autor Braja M. Das (2001) el aumento del esfuerzo vertical en el punto A, ocasionado por la carga puntual de magnitud P es:

Figura

$$\Delta p = \frac{3P}{2\pi z^2 \left[1 + \left(\frac{r}{z}\right)^2\right]^{5/2}}$$

Figura 10. Ecuación de Boussinesq (Das, 2001, p.220).

Donde:

$$r = \sqrt{x^2 + y^2}$$

x, y, z = coordenadas del punto A

Figura

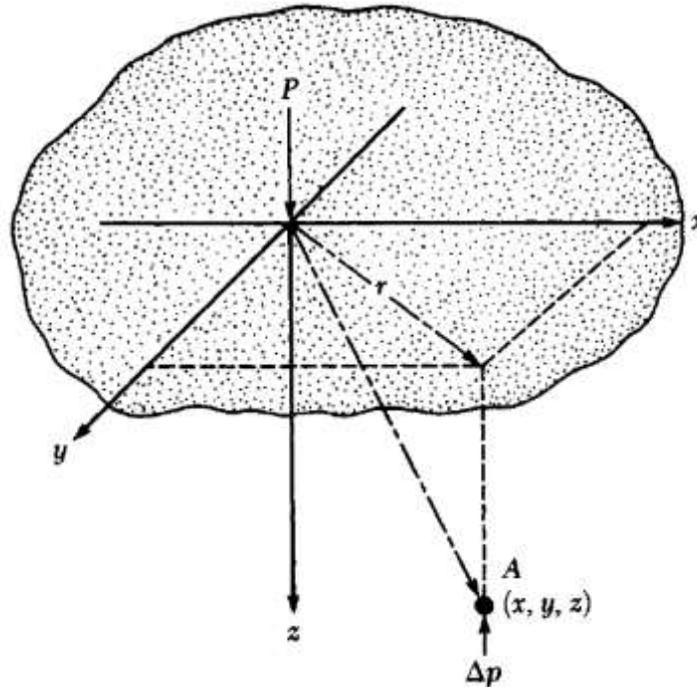


Figura 11. Esfuerzo vertical en el punto A, causado por una carga puntual sobre la superficie (Das, 2001, p.220).

2.2.6 Ensayo de penetración estándar (S.P.T.)

Según la norma ASTM-1586 el ensayo de penetración estándar consiste en hincar 45cm (18") en el terreno contabilizando la cantidad de golpes requeridos para penetrar el suelo en tramos de 15cm (6") utilizando un muestreador de caña partida con un diámetro exterior de 50mm (2") y un diámetro interior de 35mm (1-3/8"), el muestreador es hincado mediante un mazo normado de 63.5 kilogramo fuerza (140lb) que cae desde una altura de 76cm (30").

El N_{spt} se obtiene contabilizando la cantidad de golpes necesarios para hincar el cono los primeros 15cm (N0-15).

Seguidamente se introducen otros 30cm y se anota la cantidad de golpes requeridos para penetrar en intervalos de 15cm (N15-30 y N30-45).

De esta manera se obtiene la resistencia a la penetración estándar de golpes requerido para la hincia en cada intervalo de 15 cm de penetración (N15 – 30 y N30– 45).

Por medio del ensayo se obtiene la resistencia a la penetración estándar:

$$N_{spt} = N_{15-30} + N_{30-45}$$

El resultado del ensayo es el golpeo SPT o resistencia a la penetración estándar: La prueba de SPT permite conocer la capacidad de los suelos y en suelos plásticos permite adquirir una idea aproximada de la resistencia a la compresión simple. Los resultados obtenidos en la prueba plantean que los resultados del número de golpes se puedan relacionar con las propiedades de las arenas gruesas y finas, gravas con diferentes porcentajes de humedad y para suelos cohesivos saturados o parcialmente saturados, pero cuando el suelo es cohesivo y el contenido de humedad es bajo, el ensayo puede brindar resultados no confiables del comportamiento del suelo.

La limitación está regida fundamentalmente por el hecho de que en el tomamuestras se desarrollan dos fricciones: la primera, es la que se presenta entre el suelo y la parte exterior del muestreador. Por lo cual en el caso de ser este muy largo, se desarrolla una fricción excesiva la que incrementa linealmente con la longitud y al presentarse fricción excesiva, y se producen resultados engañosos, correspondientes más bien a la fricción lateral y no a la resistencia encontrada por la punta, que es lo que interesa. El segundo tipo de fricción afecta la extracción de la muestra, se presenta entre el material por recuperar y el interior del muestreador, en el caso de que este sea muy largo, la fricción interna puede incrementarse lo suficiente como para impedir la entrada de más material,

perdiéndose valiosa información, que es la que permite elaborar el perfil del suelo (Prada, 1986, p.47).

2.2.7 Prueba de penetración dinámica superpesada (D.P.S.H).

“Con esta prueba se determina la resistencia del terreno a la penetración de un cono cuando es golpeado según el procedimiento establecido (UNE, 1994, p.1)”.

La prueba de penetración dinámica está especialmente indicada para suelos granulares.

Su utilización permite:

- 1. Determinar la resistencia a la penetración dinámica de un terreno*
- 2. Evaluar la compacidad de un suelo granular. Cuando el suelo contenga partículas de tamaños tales que obstaculicen la penetración del cono en el terreno el resultado de la prueba puede no ser representativo.*
- 3. Investigar la homogeneidad o anomalías de una capa de suelo.*
- 4. Comprobar la situación en profundidad de una capa cuya existencia se conoce (UNE, 1994, p.1). (La cursiva no es del original).*

El sistema permite la determinación de la consistencia del terreno a lo largo del perfil. Mediante un sistema de golpeo automático mejora la precisión del dato al evitar errores de energía asociados al técnico, que son propios de los sistemas manuales (Alpizar, 2017, p.10).

2.2.7.1 Aparatos y materiales necesarios:

Cono: “es una pieza de acero cilíndrica que termina en forma cónica con ángulo de 90°” (UNE, 1994, p. 2). El cono podrá ser perdido o recuperable con las configuraciones respectivas que se reflejan en la siguiente figura.

Figura



Figura 12. Cono.

Fuente: Elaboración propia (Carrillo, 2018).

A – Área Nominal de la sección 20cm^2 .

D - Diámetro $50,5\text{ mm} \pm 0,5\text{mm}$

L₁– Longitud parte cónica $25\text{ mm} \pm 0,2\text{ mm}$

L₂– Longitud parte cilíndrica $50\text{ mm} \pm 0,5\text{ mm}$

L₃– Longitud parte troncocónica $< 50\text{ mm}$

Varillaje: “Conjunto de varillas de acero macizas que se utilizan para transmitir la energía de golpeo desde la cabeza del varillaje hasta el cono” (UNE, 1994, p.2).

Figura



Figura 13. Varillaje.

Fuente: Elaboración propia (Carrillo, 2018).

D – Diámetro 33 mm \pm 2 mm

Masa (Máx.) 8kg/m.

Deflexión (Máx.) -0,2%

Excentricidad en las conexiones (Máx.) 0,2 mm

Maza: “cuerpo de acero de $63.5\text{kg} \pm 0,5\text{kg}$ de masa” (UNE,1994, p.2).

Figura



Figura 14. Maza.

Fuente: Elaboración propia (Carrillo, 2018).

Cabeza de impacto: “Cuerpo de acero que recibe el impacto de la maza y que queda unido solidariamente a la parte superior del varillaje, sin que durante el golpe pueda existir desplazamiento relativo entre ambos” (UNE, 1994, p.2).

Figura



Figura 15. Cabeza de Impacto.

Fuente: Elaboración propia (Carrillo, 2018).

Guiadera: “elemento de acero que guía suavemente la maza durante su caída”
(UNE, 1994, p.2)

Figura



Figura 16. Guiadera.

Fuente: Elaboración propia (Carrillo, 2018).

Sistema de elevación y escape: “Mecanismo mediante el cual se eleva la maza a una altura de $760\text{mm} \pm 10\text{mm}$, se libera y permite su caída libre por la guidera hasta la cabeza de impacto. La velocidad de la maza cuando se libere será nula” (UNE, 1994, p.2).

Figura



Figura 17. Sistema de elevación y escape.
Fuente: Elaboración propia (Carrillo, 2018)

2.2.8 Correlaciones del DPSH y SPT

Existen diferentes correlaciones para el SPT y DPSH para poder obtener de una manera rápida y efectiva los parámetros de los suelos estudiados en la exploración geotécnica

Tabla 7

Correlación entre N_{DPSH} Y N_{SPT}

Correlación entre N_{DPSH} y N_{SPT}					
Suelos cohesivos			Suelos granulares		
DPSH: N° de golpes/20 cm	Consistencia	SPT: N° de golpes/30 cm	DPSH: N° de golpes/20 cm	Consistencia	SPT: N° de golpes/30 cm
0-2	Muy blanda	0-2	0-2	Muy suelta	0-4
2-4	Blanda	3-5	2-5	Suelta	4-10
4-10	Media	6-15	5-15	Media	10-30
10-15	Firme	15-25	15-25	Densa	30-50
>15	Muy Firme	>25	>25	Muy Densa	>50

Fuente: Blanca, 2011, p.12.

2.2.9 Variabilidad de energía por factor humano.

Sergio Bonilla Hernández (2010) en su trabajo titulado “*Verificación de correlaciones de parámetros geomecánicos en arcillas costarricenses mediante la prueba SPT dinámica*” menciona la importancia de contar con equipo y personal calificado para aplicar correctamente la prueba de SPT.

El investigador concluye que es de vital importancia conocer las características, velocidad y calidad del trabajo realizado por cada perforador y llevar un control del rendimiento de cada cuadrilla perforadora y en cómo puede afectar la experiencia del perforador los resultados certeros de una prueba SPT.

El DPSH cuenta con la ventaja de que, al ser un sistema automatizado, se contará siempre con la misma energía en cada impacto, garantizando así, resultados más confiables en la exploración geotécnica.

CAPITULO III MARCO METODOLÓGICO

3.1 Definición del enfoque y método de investigación

El presente trabajo de investigación se considera cuantitativo debido a que se comparan dos diferentes métodos de ensayo de penetración entre sí para analizar y comparar los resultados obtenidos del S.P.T y D.P.S.H. También se considera exploratorio por el motivo de que es un ensayo con poco estudio en Costa Rica y la escasez de registros o antecedentes de aplicación del ensayo D.P.S.H. en Costa Rica.

El trabajo de investigación se realizará en tres etapas para lograr los objetivos.

1. Etapa I: Se realizará una investigación teórica de ambos ensayos, basándose en sus diferentes normas; UNE 103-801-94 para el D.P.S.H. y ASTM D1586 para el S.P.T.
2. Etapa II: En esta etapa se recolectarán los resultados del S.P.T y D.P.S.H. aplicados en el Gran Área Metropolitana y la zona norte de Costa Rica a un mismo suelo en cada sector, el equipo será suministrado por la empresa IIG Consultores
3. Etapa III: En esta etapa es donde se reúnen los resultados obtenidos por la aplicación del S.P.T y D.P.S.H. y llegar a las conclusiones.

3.2 Fuentes de información

Como fuentes de información primaria se utilizaron distintos libros de autores mundialmente reconocidos por sus amplios estudios en el área de la geotécnica como el libro “Fundamentos de ingeniería geotécnica” de Braja M. Das y “Mecánica de suelos en la ingeniería práctica” de Karl Terzaghi y Ralph B. Peck.

También se utilizó el “Código Sísmico de Costa Rica 2010” como parte de las referencias y siendo la base de esta investigación ya que este código es de acatamiento obligatorio para los profesionales del Colegio Federado de Ingenieros y Arquitectos.

3.3 Definición de variables

El trabajo de investigación es del tipo cuantitativo por lo que se cuenta con distintas variables que podrían afectar de diferentes maneras los resultados.

1. **Tipo de Suelo:** la estructura de un suelo es la distribución y ordenamiento geométrico de las partículas, el aire y el agua presentes de un material, como consecuencia de las características propias de ese material e influenciados por fuerzas externas. Los suelos pueden ser gravas y arenas que son llamados suelos de grano grueso y a los limos y arcillas se les llama suelos de grano fino. Según Terzaghi y Peck (1973) se categorizan en arenas, y las gravas o ripios o cantos rodados, limos inorgánicos, limos orgánicos, arcillas orgánicas, turbas.
2. **Zonificación:** los estudios se realizarán a ensayos aplicados en el mapa de zonificación de San José y Liberia según el Código de Cimentaciones de Costa Rica.
3. **Profundidad de estudio:** la profundidad de estudio varía dependiendo a la importancia o magnitud de la obra.

3.4 Técnicas y equipo utilizados en la recolección de datos

El ensayo S.P.T. y D.P.S.H. son guiados bajo las normas internacionales ASTM D1586 y UNE-103-801-94 respectivamente y basándose en los estudios realizados en la etapa I de este proyecto de investigación.

La etapa II y III se llevará a cabo basándose en la investigación obtenida de la etapa I con la ayuda del equipo para el S.P.T. y D.P.S.H. brindado por la empresa IIG Consultores.

Debido a que ambos ensayos cuentan con normas internacionales y se cuenta con el equipo completo y en óptimas condiciones para llevar a cabo con éxito los ensayos, se tiene un muy alto grado de confiabilidad y validez de los datos recolectados en el presente proyecto de investigación.

CAPITULO IV ANALISIS DE RESULTADOS

4.1 Datos Obtenidos

En esta sección se muestran los resultados obtenidos por la ecuación 1 para obtener las diferentes presiones isobáricas a lo largo de la zona de influencia a distintas profundidades cuando es aplicada una carga P en un área de 1m^2 , considerándose el modelo de ecuación con un ancho de placa $B=1\text{m}$.

De igual manera se muestran las profundidades alcanzadas del SPT y DPSH en suelos del GAM y de la zona norte de Costa Rica.

4.2 Bulbo de presiones

Según la tabla 2 para edificaciones de magnitud baja a media y complejidad geotécnica media se debe considerar una profundidad mínima de sondeo P_{\min} : $D_f + 3\text{m}$; tomando en cuenta que se debe eliminar la capa vegetal y la edificación se levantara sobre suelo firme, se puede suponer que D_f es igual a 0m . Por lo que tenemos que el P_{\min} : 3m .

Para la ecuación de Boussinesq se calculan las diferentes presiones a cada 0.5 metros, considerando que la placa es de $1\text{m} \times 1\text{m}$ se obtiene $r= 0.71$ metros que es el punto donde se realizarán los estudios y suponiendo una carga puntual $P=9.81\text{KPa}$ para edificaciones de un piso, $P= 19.61\text{KPa}$ para 2 pisos, $P= 29.42\text{KPa}$ para 3 pisos y 39.23KPa para 4 pisos, y así sucesivamente, hasta 11 niveles.

Tomando una profundidad mínima de sondeo (P_{\min}) de 3m y por medio de la ecuación Boussinesq se obtienen las presiones a cada 0.5m para una edificación de 1 nivel y se obtiene 0.45kPa , y se observa que aproximadamente en 0.5kPa el bulbo de presiones decrece linealmente (Figura 18), por lo que se toma 0.5kPa como límite para definir el bulbo de presiones.

Los ensayos SPT y DPSH presentan profundidades mínimas, medias y máximas de perforación que son tomadas para establecer parámetros en los distintos ensayos y observar la cantidad de pruebas que se encuentran en cada parámetro

Tabla 8

Análisis de presiones a distintas profundidades (Bulbo de presiones en KPa)

Profundidad (m)	1 Piso		2 Pisos		3 Pisos		4 Pisos		5 Pisos		6 Pisos		7 Pisos		8 Pisos		9 Pisos		10 Pisos		11 Pisos	
	P1		P2		P3		P4		P5		P6		P7		P8		P9		P10		P11	
	9.8 KPa		19.6 KPa		29.4 KPa		39.2 KPa		49.0 KPa		58.8 KPa		68.6 KPa		78.5 KPa		88.3 KPa		98.1 KPa		107.9 KPa	
Z1	0.5 m	1.201	2.403	3.604	4.806	6.007	7.209	8.410	9.612	10.813	12.015	13.216										
Z2	1.0 m	1.699	3.398	5.097	6.797	8.496	10.195	11.894	13.593	15.292	16.992	18.691										
Z3	1.5 m	1.260	2.520	3.780	5.040	6.300	7.561	8.821	10.081	11.341	12.601	13.861										
Z4	2.0 m	0.872	1.744	2.616	3.488	4.360	5.232	6.104	6.976	7.848	8.720	9.592										
Z5	2.5 m	0.618	1.236	1.854	2.472	3.090	3.708	4.326	4.944	5.562	6.180	6.799										
Z6	3.0 m	0.454	0.909	1.363	1.818	2.272	2.727	3.181	3.636	4.090	4.545	4.999										
Z7	3.5 m	0.346	0.692	1.038	1.383	1.729	2.075	2.421	2.767	3.113	3.459	3.804										
Z8	4.0 m	0.271	0.542	0.813	1.084	1.355	1.626	1.897	2.168	2.439	2.710	2.981										
Z9	4.5 m	0.218	0.435	0.653	0.870	1.088	1.305	1.523	1.740	1.958	2.175	2.393										
Z10	5.0 m	0.178	0.356	0.535	0.713	0.891	1.069	1.248	1.426	1.604	1.782	1.961										
Z11	5.5 m	0.149	0.297	0.446	0.594	0.743	0.891	1.040	1.189	1.337	1.486	1.634										
Z12	6.0 m	0.126	0.251	0.377	0.503	0.628	0.754	0.880	1.005	1.131	1.257	1.382										
Z13	6.5 m	0.108	0.215	0.323	0.430	0.538	0.646	0.753	0.861	0.969	1.076	1.184										
Z14	7.0 m	0.093	0.186	0.279	0.373	0.466	0.559	0.652	0.745	0.838	0.932	1.025										
Z15	7.5 m	0.081	0.163	0.244	0.326	0.407	0.489	0.570	0.651	0.733	0.814	0.896										
Z16	8.0 m	0.072	0.144	0.215	0.287	0.359	0.431	0.502	0.574	0.646	0.718	0.789										
Z17	8.5 m	0.064	0.127	0.191	0.255	0.318	0.382	0.446	0.510	0.573	0.637	0.701										
Z18	9.0 m	0.057	0.114	0.171	0.228	0.285	0.342	0.398	0.455	0.512	0.569	0.626										
Z19	9.5 m	0.051	0.102	0.154	0.205	0.256	0.307	0.358	0.409	0.461	0.512	0.563										
Z20	10.0 m	0.046	0.092	0.139	0.185	0.231	0.277	0.324	0.370	0.416	0.462	0.509										
Z21	10.5 m	0.042	0.084	0.126	0.168	0.210	0.252	0.294	0.336	0.378	0.420	0.462										
Z22	11.0 m	0.038	0.077	0.115	0.153	0.192	0.230	0.268	0.306	0.345	0.383	0.421										
Z23	11.5 m	0.035	0.070	0.105	0.140	0.175	0.210	0.246	0.281	0.316	0.351	0.386										
Z24	12.0 m	0.032	0.064	0.097	0.129	0.161	0.193	0.226	0.258	0.290	0.322	0.355										
Z25	12.5 m	0.030	0.059	0.089	0.119	0.149	0.178	0.208	0.238	0.268	0.297	0.327										
Z26	13.0 m	0.028	0.055	0.083	0.110	0.138	0.165	0.193	0.220	0.248	0.275	0.303										
Z27	13.5 m	0.026	0.051	0.077	0.102	0.128	0.153	0.179	0.204	0.230	0.255	0.281										
Z28	14.0 m	0.024	0.047	0.071	0.095	0.119	0.142	0.166	0.190	0.214	0.237	0.261										
Z29	14.5 m	0.022	0.044	0.066	0.089	0.111	0.133	0.155	0.177	0.199	0.221	0.244										
Z30	15.0 m	0.021	0.041	0.062	0.083	0.103	0.124	0.145	0.166	0.186	0.207	0.228										
Z31	15.5 m	0.019	0.039	0.058	0.078	0.097	0.116	0.136	0.155	0.174	0.194	0.213										
Z32	16.0 m	0.018	0.036	0.055	0.073	0.091	0.109	0.127	0.146	0.164	0.182	0.200										
Z33	16.5 m	0.017	0.034	0.051	0.068	0.086	0.103	0.120	0.137	0.154	0.171	0.188										
Z34	17.0 m	0.016	0.032	0.048	0.065	0.081	0.097	0.113	0.129	0.145	0.161	0.177										
Z35	17.5 m	0.015	0.030	0.046	0.061	0.076	0.091	0.107	0.122	0.137	0.152	0.167										
Z36	18.0 m	0.014	0.029	0.043	0.058	0.072	0.086	0.101	0.115	0.130	0.144	0.158										
Z37	18.5 m	0.014	0.027	0.041	0.055	0.068	0.082	0.095	0.109	0.123	0.136	0.150										
Z38	19.0 m	0.013	0.026	0.039	0.052	0.065	0.078	0.090	0.103	0.116	0.129	0.142										
Z39	19.5 m	0.012	0.025	0.037	0.049	0.061	0.074	0.086	0.098	0.110	0.123	0.135										
Z40	20.0 m	0.012	0.023	0.035	0.047	0.058	0.070	0.082	0.093	0.105	0.117	0.128										

Fuente: Elaboración propia (Carrillo, 2018).

En la figura 18 se muestra cómo se comporta el bulbo de presiones de las diferentes cargas P aplicada por nivel, con las distintas profundidades, considerando una carga puntual aplicada sobre un área idealizada de 1m^2 con un radio $r=0.71\text{m}$,

Figura

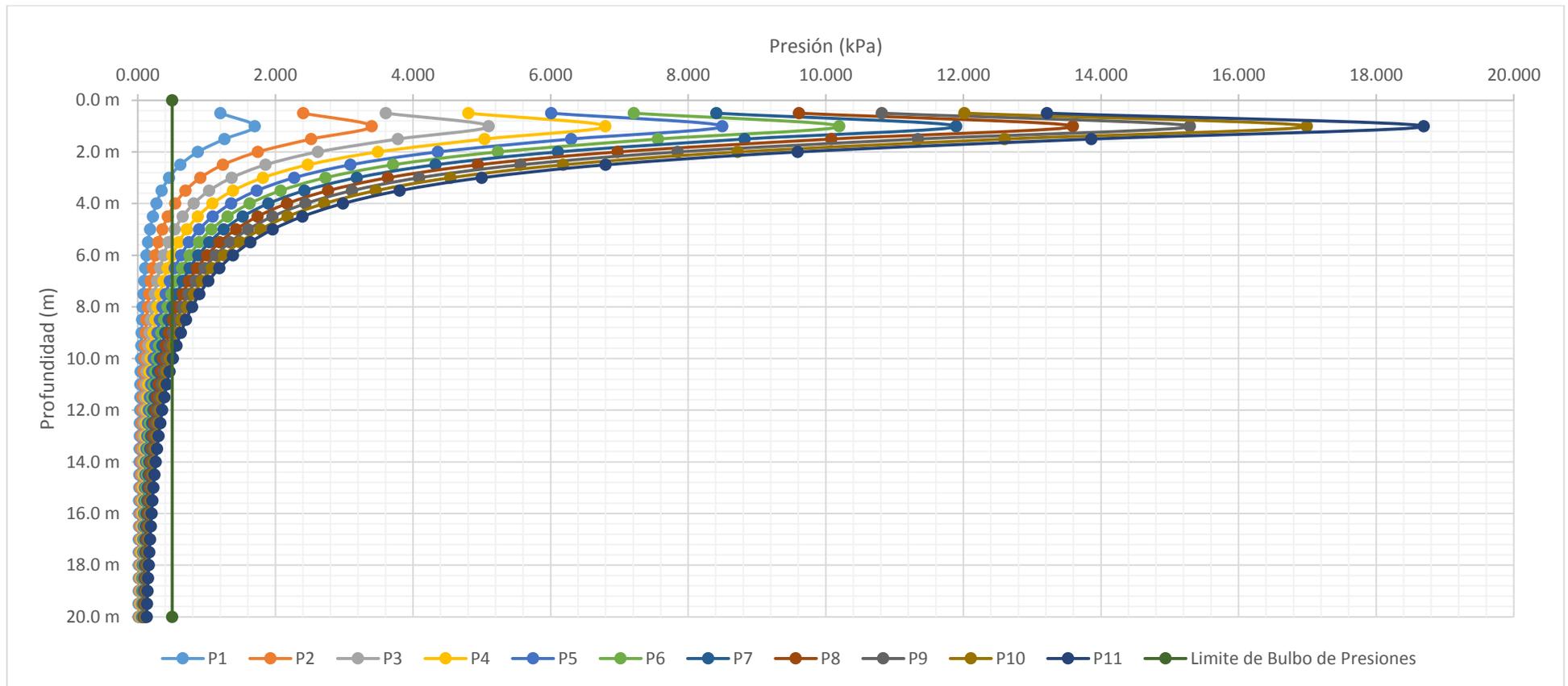


Figura 18. Bulbos de presiones.

Fuente: Elaboración propia (Carrillo, 2018).

4.3 DATOS SPT y DPSH en GAM

Los ensayos de SPT y DPSH se aplicaron en la zona de Cartago, ubicado en el mapa de San José según los mapas de zonificación del Código de Cimentaciones de Costa Rica. En este sector predomina el tipo de suelo “V3” el cual indica según la tabla 6 que son suelos residuales de origen volcánico, igual que V1 y V2, son del tipo MH o ML según el SUCS.

Figura

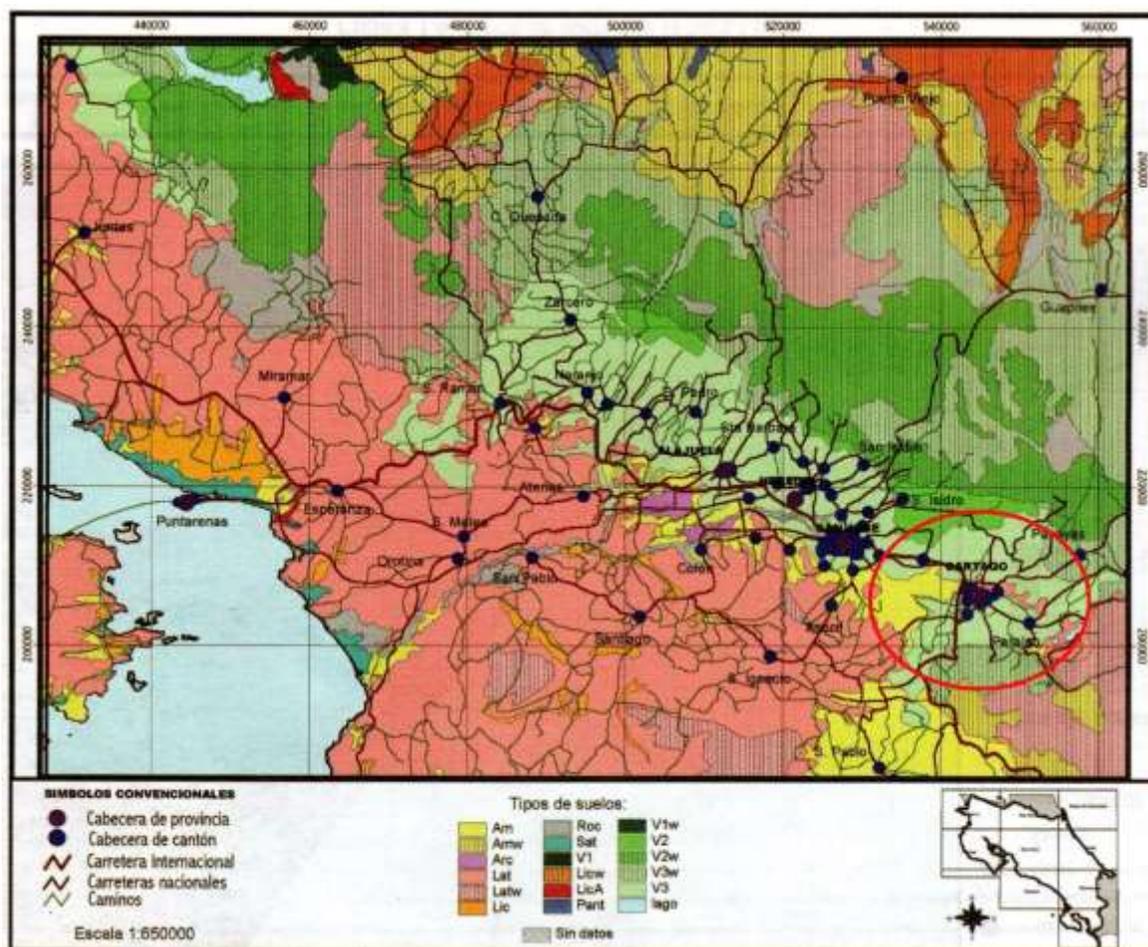


Figura 19. Ubicación de Cartago en Mapa de San José según CCCR.

Fuente: Asociación Costarricense de Geotecnia, 2009, p.181.

4.3.1 Datos SPT en GAM

Tabla 9

Resultados obtenidos de SPT en el GAM

Profundidad (Z)	SPT1	SPT2	SPT3	SPT4	SPT5	SPT6	SPT7	SPT8	SPT9	SPT10
	Nspt ₁	Nspt ₂	Nspt ₃	Nspt ₄	Nspt ₅	Nspt ₆	Nspt ₇	Nspt ₈	Nspt ₉	Nspt ₁₀
0.5m	11	12	6	4	3	3	3	2	4	9
1.0m	11	26	22	5	6	2	7	3	9	8
1.5m	18	17	24	4	7	4	28	30	8	9
2.0m	25	19	25	8	5	6	3	12	23	4
2.5m	17	17	24	10	10	4	4	10	50	3
3.0m	14	23	23	12	9	4	5	12	42	4
3.5m	9	37	13	10	9	4	7	16	66	5
4.0m	13	21	14	7	35	13	10	19	29	8
4.5m	20	20	28	4	47	46	10	46	14	9
5.0m	23	13	20	3	56	57	28	27	15	4
5.5m	20	18	16	4			51	0	13	4
6.0m	37	20	10	0				0	10	0
6.5m	28	30	20	0				0	10	0
7.0m	17	50	5	0				0	11	0
7.5m	14		7	1				0	5	0
8.0m	5		11	4				0		5
8.5m	8							9		
9.0m	8							10		
9.5m	13							4		
10.0m								9		
10.5m										

Fuente: Elaboración propia (Carrillo, 2018).

En el área de Cartago se obtuvieron las muestras de suelo mediante el ensayo SPT y se encontraron suelos tipo CH, SC, SM y CL según la clasificación de suelos SUCS, en cada ensayo se registraron las profundidades acumuladas en metros de cada tipo de suelo y se determinó que el tipo de suelo CH es el que más predomina en la zona con un 61.03% tal y como se muestra en la tabla 10.

Tabla 10
Caracterización SUCS del SPT en GAM

SUCS	SPT1	SPT2	SPT3	SPT4	SPT5	SPT6	SPT7	SPT8	SPT9	SPT10	TOTAL	% EXPLORADO
CH	3.0m	3.0m	4.5m	1.5m	2.5m	4.0m	5.0m	7.0m	3.5m	7.5m	41.5m	61.03%
SC	0.5m	3.5m									4.0m	5.88%
SM	3.5m		3.0m	6.0m	2.0m	1.0m		2.5m	2.5m		20.5m	30.15%
CL	2.0m										2.0m	2.94%
											68.0m	100.00%

Fuente: Elaboración propia (Carrillo, 2018).

Tabla 11
Rangos mínimos, medios y máximos de SPT en GAM

SPT GAM		
Profundidad		
P _{min} = 5.0m		
P _{med} = 7.35m		
P _{max} = 10.0m		
Rango	Cantidad de Pruebas	%
0.0m a 5.0m	2	20.00%
5.0m a 7.5m	2	20.00%
7.5m a 10.0m	6	60.00%

Fuente: Elaboración propia (Carrillo, 2018).

4.3.2 DATOS DPSH en GAM

Tabla 12
Resultados obtenidos DPSH en GAM

Profundidad	N DPSH 1	N DPSH 2	N DPSH 3	N DPSH 4	N DPSH 5	N DPSH 6	N DPSH 7	N DPSH 8	N DPSH 9	N DPSH 10
0.2m	6	4	5	6	7	0	3	5	20	19
0.4m	6	4	4	7	6	0	3	5	28	10
0.6m	7	6	5	9	6	20	4	10	15	8
0.8m	6	5	7	6	6	8	8	15	23	10
1.0m	7	4	5	5	5	6	15	23	18	12
1.2m	6	4	8	5	11	4	10	22	15	12
1.4m	6	5	7	8	22	4	10	22	14	10
1.6m	5	5	3	7	8	3	8	25	10	7
1.8m	3	5	7	7	7	2	8	25	10	7
2.0m	4	1	7	8	6	3	15	28	9	5
2.2m	6	5	7	7	6	10	20	29	9	6
2.4m	6	5	3	7	6	8	20	34	9	5
2.6m	100	7	7	7	100	5	25	45	9	7
2.8m		6	7	7		4	25	47	8	7
3.0m		6	8	8		5	28	50	22	6
3.2m		5	10	11		6	30	54	25	5
3.4m		6	7	9		5	15	65	18	20
3.6m		5	9	9		3	12	70	10	18
3.8m		6	10	8		3	10	70	10	11
4.0m		6	8	7		2	10	75	12	7
4.2m		6	11	7		3	8	75	10	3
4.4m		6	12	7		1	6		7	5
4.6m		6	10	7		0	6		6	6
4.8m		6	8	8		1	6		5	6
5.0m		6	7	8		1	5		5	15
5.2m		6	8	8		1	5		5	8
5.4m		6	10	8		4	5		5	8
5.6m		7	7	9		3	10		5	8
5.8m		10	9	8		2	12		5	8
6.0m		8	7	9		3	12		5	5

Profundidad	N DPSH 1	N DPSH 2	N DPSH 3	N DPSH 4	N DPSH 5	N DPSH 6	N DPSH 7	N DPSH 8	N DPSH 9	N DPSH 10
6.2m		8	11	10		3	18		4	7
6.4m		7	7	10		3	20		5	7
6.6m		8	5	11		3	32		25	8
6.8m		9	6	11		11	40		18	8
7.0m		8	4	15		21	55		15	8
7.2m		10	5	16		46	67		25	8
7.4m		10	4	15		100	75		42	8
7.6m		13	7	16			75		55	8
7.8m		12	13	15					64	8
8.0m		14	5	12					68	8
8.2m		15	3	22					67	8
8.4m		19	2	18					74	10
8.6m		15	7	20					75	10
8.8m		18	9	21					75	10
9.0m		22	5	23						11
9.2m		21	5	32						11
9.4m		25	6	23						12
9.6m		27	7	23						15
9.8m		17	8	34						14
10.0m		21	28	33						14
10.2m		23	42	31						15
10.4m		21	41	35						40
10.6m		18	33	35						65
10.8m		19	37	62						68
11.0m		21	23	44						76
11.2m		28	35	48						75
11.4m		23	28	47						
11.6m		26	10	38						
11.8m		24	27	37						
12.0m		27	11	50						
12.2m		30	9	41						
12.4m		23	13	56						
12.6m		22	16	54						
12.8m		23	16	57						
13.0m		25	18	73						
13.2m			24	55						

Profundidad	N DPSH 1	N DPSH 2	N DPSH 3	N DPSH 4	N DPSH 5	N DPSH 6	N DPSH 7	N DPSH 8	N DPSH 9	N DPSH 10
13.4m			20	62						
13.6m			24	72						
13.8m			24	73						
14.0m			18	70						
14.2m			24	67						
14.4m			27	74						
14.6m			24	77						
14.8m			34	82						
15.0m			27	100						
15.2m			30							
15.4m			37							
15.6m			48							
15.8m			44							
16.0m			53							
16.2m			51							
16.4m			53							
16.6m			56							
16.8m			36							
17.0m			40							
17.2m			52							
17.4m			50							
17.6m			57							
17.8m			54							
18.0m			34							
18.2m			51							
18.4m			71							
18.6m			74							
18.8m			76							
19.0m										
19.2m										
19.4m										
19.6m										
19.8m										
20.0m										

Fuente: Elaboración propia (Carrillo, 2018).

Tabla 13

Rangos mínimos, medios y máximos de DPSH en GAM

DPSH GAM		
Profundidad		
P _{min} = 2.6m		
P _{med} = 9.12m		
P _{max} = 18.8m		
Rango	Cantidad de Pruebas	%
0.0m a 2.6m	2	20.00%
2.6m a 9.2m	4	40.00%
9.2m a 18.8m	4	40.00%

Fuente: Elaboración propia (Carrillo, 2018).

4.4 Datos SPT y DPSH en Zona Norte

4.4.1 Datos SPT en Zona Norte

Los ensayos de SPT y DPSH fueron aplicados en la zona de Birmania y Upala ubicados en el mapa de Liberia según los mapas de zonificación del código de cimentaciones de Costa Rica, en este sector predominan suelos “Am” el cual indica según la tabla 6 que son suelos residuales de color amarillento, blandos con alto contenido de humedad y buena permeabilidad

Figura

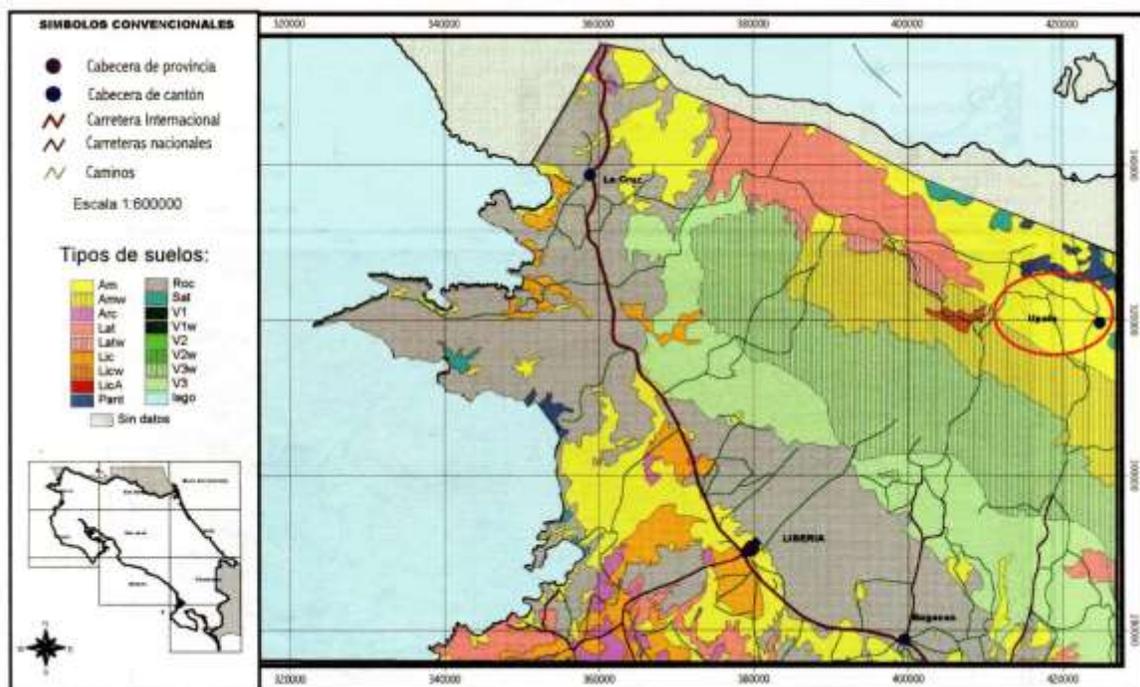


Figura 20 Ubicación de Upala y Birmania en mapa de Liberia según CCCR.

Fuente: Asociación Costarricense de Geotecnia, 2009, p.177.

Tabla 14
Resultados obtenidos SPT en Zona Norte

Profundidad (Z)	SPT1	SPT2	SPT3	SPT4	SPT5	SPT6	SPT7	SPT8	SPT9	SPT10
	Nspt ₁	Nspt ₂	Nspt ₃	Nspt ₄	Nspt ₅	Nspt ₆	Nspt ₇	Nspt ₈	Nspt ₉	Nspt ₁₀
0.5m	3	4	2	0	0	1	0	1	6	4
1.0m	4	6	17	9	13	15	8	8	2	2
1.5m	15	9	65	16	35	40	17	4	1	1
2.0m	41	22	74	21	74	95	8	3	1	2
2.5m	43	35		64			11	4	4	3
3.0m	45	41		87			10	3	3	6
3.5m	51	54					13	2	25	27
4.0m	71	65					18	15	6	22
4.5m		75					21	12	61	12
5.0m							28	15		36
5.5m										51
6.0m										
6.5m										
7.0m										
7.5m										
8.0m										
8.5m										
9.0m										
9.5m										
10.0m										
10.5m										

Fuente: Elaboración propia (Carrillo, 2018).

En los sectores de Upala y Birmania se obtuvieron las muestras de cada tipo de suelo acumulado por cada ensayo, al igual que en la zona de Cartago. En estos sitios se encontraron suelos del tipo CH, SM y MH según el SUCS y se encontró que el suelo tipo CH es el que predomina en la zona con un 39.68%, tal y como se muestra en la tabla 15.

Tabla 15
Caracterización SUCS del SPT en Zona Norte

Caracterización SUCS												
SUCS	SPT1	SPT2	SPT3	SPT4	SPT5	SPT6	SPT7	SPT8	SPT9	SPT10	TOTAL	% EXPLORADO
CH	3.5m	3.5m	1.5m	2.0m	1.0m	1.0m					12.5m	39.68%
SM									4.0m	4.0m	8.0m	25.40%
MH	0.5m	1.0m	0.5m	1.0m	1.0m	1.0m	3.0m	2.0m		1.0m	11.0m	34.92%
											31.5m	100.00%

Fuente: Elaboración propia (Carrillo, 2018).

Tabla 16
Rangos mínimos, medios y máximos de DPSH en Zona Norte

SPT ZONA NORTE				
Profundidad				
P _{min} = 2.0m				
P _{med} = 3.75m				
P _{max} = 5.5m				
Rango		Cantidad de Pruebas		%
0.0m	a 2.0m	3		30.00%
2.0m	a 4.0m	2		20.00%
4.0m	a 5.5m	5		50.00%

Fuente: Elaboración propia (Carrillo, 2018).

4.4.2 Datos DPSH en Zona Norte

Tabla 17

Resultados obtenidos DPSH Zona Norte

Profundidad	N DPSH 1	N DPSH 2	N DPSH 3	N DPSH 4	N DPSH 5	N DPSH 6	N DPSH 7	N DPSH 8	N DPSH 9	N DPSH 10
0.2m	7	7	7	4	6	7	3	5	4	24
0.4m	7	7	6	4	7	7	4	5	4	33
0.6m	5	6	5	3	4	7	4	3	5	15
0.8m	5	6	5	3	4	8	4	3	3	11
1.0m	3	5	4	4	3	3	5	2	3	6
1.2m	3	4	5	3	3	4	4	6	3	9
1.4m	3	3	3	3	4	6	4	6	3	6
1.6m	3	5	3	5	5	6	4	7	2	5
1.8m	5	5	3	3	6	5	4	5	3	6
2.0m	5	3	3	3	4	7	4	4	3	5
2.2m	3	3	2	3	3	5	3	3	3	11
2.4m	4	5	3	3	4	4	3	3	4	5
2.6m	5	6	2	3	3	4	3	3	5	5
2.8m	5	5	1	3	3	4	2	5	6	11
3.0m	7	4	2	4	3	4	1	3	7	6
3.2m	6	4	5	4	3	5	1	2	6	6
3.4m	4	3	11	3	5	5	3	3	5	12
3.6m	3	3	7	4	100	5	3	3	3	21
3.8m	5	3	9	4		6	6	3	3	21
4.0m	4	4	5	3		3	8	4	3	17
4.2m	5	4	6	3		1	8	3	3	15
4.4m	5	4	6	2		2	7	4	3	15
4.6m	13	4	7	2		2	7	2	5	16
4.8m	6	7	5	4		3	8	3	5	15
5.0m	4	7	5	21		2	6	2	4	9
5.2m	3	7	5	11		2	5	3	4	9
5.4m	6	11	5	9		3	6	3	4	7
5.6m	5	28	6	31		8	10	2	4	9
5.8m	4	23	7	15		4	10	3	4	12
6.0m	6	8	8	9		5	8	1	6	6

Profundidad	N DPSH 1	N DPSH 2	N DPSH 3	N DPSH 4	N DPSH 5	N DPSH 6	N DPSH 7	N DPSH 8	N DPSH 9	N DPSH 10
6.2m	5	10	8	14		5	8	2	7	4
6.4m	19	8	10	100		8	10	2	8	7
6.6m	13	8	31			7	8	2	7	11
6.8m	8	9	43			8	9	2	5	13
7.0m	9	8	63			8	8	4	3	6
7.2m	23	8	100			9	11	3	4	8
7.4m	67	8				13	7	4	4	7
7.6m	19	10				100	6	4	4	11
7.8m	32	9					14	4	3	13
8.0m	37	7					9	7	3	10
8.2m	31	8					13	8	4	9
8.4m	24	8					12	9	4	8
8.6m	21	9					15	10	5	10
8.8m	25	9					13	12	5	11
9.0m	36	5					36	12	4	6
9.2m	74	4					38	12	2	8
9.4m	27	4					35	15	3	10
9.6m	21	6					50	17	3	16
9.8m	44	6					100	18	3	19
10.0m	28	6						23	4	12
10.2m	26	8						22	5	11
10.4m	46	17						27	5	12
10.6m	33	21						28	5	14
10.8m	23	14						29	5	18
11.0m	22	15						26	6	13
11.2m	33	14						31	6	20
11.4m	26	18						37	7	21
11.6m	66	15						41	6	20
11.8m	50	53						40	7	24
12.0m	26	100						38	7	16

Profundidad	N DPSH 1	N DPSH 2	N DPSH 3	N DPSH 4	N DPSH 5	N DPSH 6	N DPSH 7	N DPSH 8	N DPSH 9	N DPSH 10
12.2m	38							42	8	14
12.4m	22							43	8	15
12.6m	23							42	7	15
12.8m	79							56	8	16
13.0m	108								10	9
13.2m									10	16
13.4m									14	38
13.6m									16	24
13.8m									16	20
14.0m									17	11
14.2m									13	11
14.4m									15	14
14.6m									23	38
14.8m									21	53
15.0m									20	71
15.2m									23	100
15.4m									25	
15.6m									28	
15.8m									23	
16.0m									26	
16.2m									34	
16.4m									28	
16.6m									28	
16.8m									47	
17.0m									54	
17.2m									68	
17.4m									100	
17.6m										
17.8m										
18.0m										

Fuente: Elaboración propia (Carrillo, 2018).

Tabla 18

Rangos mínimos, medios y máximos de DPSH en Zona Norte.

DPSH ZONA NORTE				
Profundidad				
P _{min} = 3.6m				
P _{med} = 10.5m				
P _{max} = 17.4m				
Rango		Cantidad de Pruebas		%
0.0m	a	3.5m	1	10.00%
3.5m	a	10.5m	4	40.00%
10.5m	a	17.5m	5	50.00%

Fuente: Elaboración propia (Carrillo, 2018).

4.5 Interpretación de resultados

Por medio de los diferentes resultados obtenidos por el SPT y DPSH en el GAM y la zona norte se logra determinar que mediante el ensayo DPSH se logra alcanzar mayores profundidades llegando a una profundidad máxima de 18.8 metros en el GAM y 17.4 metros en la zona norte, a diferencia del SPT que obtuvo una profundidad máxima de 10 metros en la GAM y 5.5 metros en la zona norte.

Utilizando la tabla 8 de bulbo de presiones y las tablas 11, 13,16 y 18 de rangos mínimos, medios y máximos de exploración en cada ensayo, se muestra cómo se relacionan los porcentajes de los datos obtenidos de cada ensayo con los límites de bulbo de presión para los distintos pisos de una construcción.

En los ensayos SPT aplicados en el GAM se obtuvo que un 20% de los ensayos alcanzaron la profundidad mínima de sondeo (de 0.0m a 5.0m) que se requiere para construcciones de hasta 3 pisos, 30% alcanzó la profundidad media de sondeo (de 5.0m a 7.5m), estas profundidades permiten construir obras de

hasta 6 pisos y finalmente un 50% de las pruebas realizadas alcanzaron el rango de profundidad máxima (de 7.5m a 10.0m) permitiendo la construcción de edificios de hasta 11 plantas tal y como se muestra en la tabla 19.

Tabla 19
Análisis de resultados SPT en GAM

SPT en GAM						
Prof. (m)	Profundidad Significativa Maxima	Limite de bulbo de presiones por piso (Kpa)		Rangos		
				P _{min}	P _{med}	P _{max}
				5.0m	7.5m	10.0m
Z1	0.5 m				20.00%	
Z2	1.0 m					
Z3	1.5 m					
Z4	2.0 m					
Z5	2.5 m					
Z6	3.0 m		1 Piso	0.45KPa		
Z7	3.5 m					
Z8	4.0 m		2 Pisos	0.54KPa		
Z9	4.5 m					
Z10	5.0 m	SPT 5 y 6	3 Pisos	0.53KPa		
Z11	5.5 m	SPT 7			30.00%	
Z12	6.0 m		4 Pisos	0.5KPa		
Z13	6.5 m		5 Pisos	0.54KPa		
Z14	7.0 m	SPT 2	6 Pisos	0.56KPa		
Z15	7.5 m	SPT 9				
Z16	8.0 m	SPT 3,4 y 10	7 Pisos	0.5KPa	50.00%	
Z17	8.5 m		8 Pisos	0.5KPa		
Z18	9.0 m		9 Pisos	0.51KPa		
Z19	9.5 m	SPT 1	10 Pisos	0.51KPa		
Z20	10.0 m	SPT 8	11 Pisos	0.51KPa		
Z21	10.5 m					

Fuente: Elaboración propia (Carrillo, 2018).

Los ensayos DPSH en el Gran Área Metropolitana muestran como el 20% de los ensayos alcanzan el rango de profundidad mínima (de 0.0m hasta 2.5m), las cuales no son suficientes para una construcción de 1 nivel. Un 40% de las pruebas alcanzó el rango de profundidad media (de 2.5m hasta 9.5m) que permite construcciones de hasta 10 pisos y un 40% de las pruebas alcanzan el rango de profundidades máximas (9.0m a 19.0m) que permiten desarrollar construcciones de hasta 11 niveles tal y como se muestra en la tabla 20.

Tabla 20
Análisis de resultados DPSH en GAM

DPSH en GAM					Rangos		
Prof. (m)	Profundidad Significativa Maxima	Limite de bulbo de presiones por piso (Kpa)	Rangos				
			Pmin	Pmed	Pmax		
			2.5m	9.0m	19.0m		
Z1	0.5 m						
Z2	1.0 m						
Z3	1.5 m						
Z4	2.0 m						
Z5	2.5 m	DPSH 1 y 5					
Z6	3.0 m		1 Piso	0.45KPa			
Z7	3.5 m						
Z8	4.0 m	DPSH 8	2 Pisos	0.54KPa			
Z9	4.5 m						
Z10	5.0 m		3 Pisos	0.53KPa			
Z11	5.5 m						
Z12	6.0 m		4 Pisos	0.5KPa			
Z13	6.5 m		5 Pisos	0.54KPa			
Z14	7.0 m		6 Pisos	0.56KPa			
Z15	7.5 m	DPSH 6 y 7					
Z16	8.0 m		7 Pisos	0.5KPa			
Z17	8.5 m		8 Pisos	0.5KPa			
Z18	9.0 m	DPSH 9	9 Pisos	0.51KPa			
Z19	9.5 m		10 Pisos	0.51KPa			
Z20	10.0 m		11 Pisos	0.51KPa			
Z21	10.5 m						
Z22	11.0 m	DPSH 10					
Z23	11.5 m						
Z24	12.0 m						
Z25	12.5 m						
Z26	13.0 m	DPSH 2					
Z27	13.5 m						
Z28	14.0 m						
Z29	14.5 m						
Z30	15.0 m	DPSH 4					
Z31	15.5 m						
Z32	16.0 m						
Z33	16.5 m						
Z34	17.0 m						
Z35	17.5 m						
Z36	18.0 m						
Z37	18.5 m						
Z38	19.0 m	DPSH 3					
Z39	19.5 m						
Z40	20.0 m						

Fuente: Elaboración propia (Carrillo, 2018).

Los ensayos SPT en la Zona norte muestran como un 30% de las pruebas están dentro del rango mínimo (0.0m a 2.0m) no alcanzan la profundidad deseada por el bulbo de presiones para construcciones de 1 nivel como mínimo, el 20% de los ensayos alcanzaron el rango de profundidades medias (2.0m a 4.0m) permitiendo la construcción de edificaciones de hasta 2 pisos y finalmente se obtuvieron los rangos máximos con un 50% permitiendo construcciones de hasta 3 pisos. A continuación, se muestran estos resultados.

Tabla 21
Análisis de resultados SPT en zona norte

SPT ZONA NORTE					
Prof. (m)	Profundidad Significativa Maxima	Limite de bulbo de presiones por piso (Kpa)	Rangos		
			Pmin	Pmed	Pmax
			2.0m	4.0m	5.5m
Z1	0.5 m		30.00%		
Z2	1.0 m				
Z3	1.5 m				
Z4	2.0 m	SPT 3,5 y 6			
Z5	2.5 m		20.00%		
Z6	3.0 m	SPT 4		1 Piso	0.45KPa
Z7	3.5 m				
Z8	4.0 m	SPT 1		2 Pisos	0.54KPa
Z9	4.5 m	SPT 2 y 9	50.00%		
Z10	5.0 m	SPT 7 y 8		3 Pisos	0.53KPa
Z11	5.5 m	SPT 10			
Z12	6.0 m				
Z13	6.5 m				
Z14	7.0 m				
Z15	7.5 m				
Z16	8.0 m				
Z17	8.5 m				
Z18	9.0 m				
Z19	9.5 m				
Z20	10.0 m				
Z21	10.5 m				

Fuente: Elaboración propia (Carrillo, 2018).

Las pruebas DPSH aplicadas en la Zona Norte del país muestran como solo un 10% de los ensayos alcanzo el rango mínimo (0.0m a 3.5m) el cual permite construcciones de hasta 1 piso, 40% de los ensayos entran en el rango medio (3.5m a 10.5m) permitiendo construcciones de hasta 11 pisos y el 50% de los ensayos sobrepasan el área en estudio (10.5m a 17.5m)

Tabla 22
Análisis de resultados DPSH en zona norte

DPSH ZONA NORTE						
Prof. (m)	Profundidad Significativa Maxima	Limite de bulbo de presiones por piso (Kpa)	Rangos			
			Pmin 3.5m	Pmed 10.5m	Pmax 17.5m	
Z1	0.5 m		10.00%			
Z2	1.0 m					
Z3	1.5 m					
Z4	2.0 m					
Z5	2.5 m					
Z6	3.0 m	1 Piso		0.45KPa		
Z7	3.5 m	DPSH 5				
Z8	4.0 m	2 Pisos	0.54KPa	40.00%		
Z9	4.5 m					
Z10	5.0 m	3 Pisos	0.53KPa			
Z11	5.5 m					
Z12	6.0 m	4 Pisos	0.5KPa			
Z13	6.5 m	DPSH 4	5 Pisos		0.54KPa	
Z14	7.0 m	DPSH 3	6 Pisos		0.56KPa	
Z15	7.5 m	DPSH 6				
Z16	8.0 m	7 Pisos	0.5KPa			
Z17	8.5 m	8 Pisos	0.5KPa			
Z18	9.0 m	9 Pisos	0.51KPa			
Z19	9.5 m	10 Pisos	0.51KPa			
Z20	10.0 m	DPSH 7	11 Pisos	0.51KPa		
Z21	10.5 m			50.00%		
Z22	11.0 m					
Z23	11.5 m					
Z24	12.0 m	DPSH 2				
Z25	12.5 m					
Z26	13.0 m	DPSH 1 y 8				
Z27	13.5 m					
Z28	14.0 m					
Z29	14.5 m					
Z30	15.0 m	DPSH 10				
Z31	15.5 m					
Z32	16.0 m					
Z33	16.5 m					
Z34	17.0 m					
Z35	17.5 m	DPSH 9				
Z36	18.0 m					
Z37	18.5 m					
Z38	19.0 m					
Z39	19.5 m					
Z40	20.0 m					

Fuente: Elaboración propia (Carrillo, 2018).

Las diferentes pruebas SPT y DPSH alcanzaron profundidades a las que dependiendo la complejidad de obra se determina si cumplen o no para edificaciones de distintos niveles tal y como se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 23
Cumplimiento de profundidad de prueba por piso

		Cantidad de Niveles										
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	≥ 11
Bulbo (m)		3	4	5	6	6.5	7	8	8.5	9	9.5	10
Magnitud de Obra		Baja			Media							Alta
% de Ensayos que alcanzaron Bulbo de Presiones	GAM	SPT	100%			70%		50%	20%			10%
		DPSH	80%		70%			50%			40%	
	ZN	SPT	70%	60%	30%							
		DPSH	100%	90%			80%		60%			

Fuente: Elaboración propia (Carrillo, 2018).

Como se observa en la tabla 23 los ensayos DPSH alcanzan profundidades mayores permitiendo con estos ensayos poder llevar a cabo edificaciones con mayor complejidad.

El ensayo DPSH muestra que, en el GAM, 4 de las pruebas aplicadas cumplen para edificios de hasta 11 niveles y en la ZN 5 de las pruebas están cumpliendo el parámetro mínimo para edificaciones de 11 niveles.

Por otra parte, el ensayo SPT se ve como solo 1 prueba en el GAM cumple para edificaciones de 11 niveles y en ZN alcanza hasta edificaciones de 3 niveles.

CAPITULO V CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones

1. De acuerdo con la nota 2 del cuadro 2.1 del Código de Cimentaciones vigente, en el que se indica textualmente “*La profundidad mínima de exploración deberá garantizar además que se estudie el terreno existente dentro del bulbo de presión significativa de la cimentación*” (Asociación Costarricense de Geotecnia, 2009, p.37). Se concluye que el método de exploración por emplear en cualquier estudio de suelos debe garantizar información suficiente que abarque el bulbo de presiones correspondiente a las obras propias del proyecto, y el análisis de este estudio permitió identificar el grado de eficiencia de ambos métodos en el cumplimiento de esta especificación del Código.
2. Gracias a los datos recolectados y el análisis de resultados se obtuvo que el ensayo DPSH alcanzó profundidades máximas de 18.8m en el GAM y 17.4m en ZN, mientras que el ensayo SPT alcanzó profundidades máximas de 10m y 5.5m respectivamente; dejando en evidencia que el ensayo SPT alcanza un 53% de la capacidad máxima de profundizar del DPSH en la GAM y un 32% en la ZN.
3. Para las edificaciones de magnitud media (hasta 10 pisos), el ensayo DPSH demostró cumplir con el límite mínimo del bulbo de presiones para este tipo de edificaciones; un total de 9 pruebas para un 45% de efectividad, en cambio el SPT alcanzó solo en 2 pruebas este límite para un 10% de efectividad. Lo cual deja en evidencia que se requiere complementar este tipo de ensayos con algún otro método que permita alcanzar las profundidades requeridas para cumplir con el límite del bulbo de presiones ya que, de no alcanzar este límite, se podría poner en riesgo las edificaciones, y, además, estaría incumpliendo los requerimientos mínimos establecidos por el Código de Cimentaciones de Costa Rica.

4. Los ensayos SPT tienen la característica de recuperar una muestra del suelo; gracias a estas muestras se determinó que en el GAM predomina el tipo de suelo CH con un 61.03% de los suelos analizados y en la zona norte predomina igualmente el CH con un 39.68% del total de pruebas aplicadas, lo cual demuestra que, en ambos sectores, las pruebas fueron aplicadas al grupo de limos y arcillas según la caracterización SUCS.
5. A pesar de que el DPSH no obtiene muestras del suelo, determina parámetros de resistencia a la capacidad soportante mediante distintas correlaciones para interpretar los resultados que brindan los ensayos; al tener datos reales de profundidades mayores se logra alcanzar o sobrepasar el objetivo mínimo de exploración solicitado por el Código de Cimentaciones de Costa Rica en la tabla 2
6. Al ser el DPSH una prueba automatizada, se logra reducir el “factor humano” que interfiere en la aplicación del ensayo SPT, un operador puede alterar considerablemente los resultados por la variación de la energía en la caída del mazo durante el ensayo.
7. El ensayo de SPT garantiza alcanzar siempre el bulbo de presiones en obras de magnitud baja en la GAM y posee de un 70% a un 60% de probabilidad para alcanzarlo en la ZN, aunque, en edificaciones de 3 niveles solo lo alcanza en un 30%. La probabilidad de alcanzar el bulbo de presiones en obras de magnitud media se limita hasta 7 niveles con un rango entre el 50% y el 70% del total de ensayos ejecutados y únicamente en la GAM, dado que no logró alcanzar estas profundidades en la ZN. Probabilidades de menos del 50% se consideran descartadas como opción de aplicación del método de ensayo.
8. Por su parte, el ensayo de DPSH posee una probabilidad de alcanzar el bulbo de presiones de obras de magnitud baja de entre un 70% y un 80% en la GAM, mientras que en la ZN fue de entre un 90% y un 100%. La probabilidad de alcanzar el bulbo de presiones en obras de magnitud media se limita hasta 9 niveles en la GAM, con un rango entre el 50% y

el 70% del total de ensayos ejecutados, mientras que en la ZN el alcance si es aplicable para todo el rango de obras de magnitud media con probabilidades de entre el 60% y el 90%.

9. El tiempo de maniobrabilidad de ambos equipos representa un 25% más en el caso del SPT respecto al DPSH, dado que el primero requiere de un promedio de 25min mientras que el segundo requiere 20min; sin embargo, la diferencia mayor está en el tiempo de ejecución de la prueba dado que para una profundidad de referencia de 10m de exploración, el SPT requiere en promedio 3 horas, mientras que el DPSH solamente 2 horas, lo que quiere decir que para realizar un ensayo de SPT se requiere en promedio un 50% más de tiempo que si se realiza un ensayo de DPSH.
10. En general el ensayo de SPT posee probabilidades adecuadas de aplicación en Obras de Magnitud Baja, pero presenta limitaciones en obras de magnitud media en edificaciones de hasta 7 niveles.
11. Por su parte el ensayo de DPSH posee probabilidades adecuadas de aplicación en obras de magnitud baja y media.
12. La tendencia del país es la de incrementar la ejecución de obra de magnitud media considerando que se pasó de 28 edificaciones de 6 o más pisos para el año 2014 a 43 edificaciones de 6 o más niveles en el 2017, por lo cual el ensayo DPSH muestra ser un método efectivo para el cumplimiento del requisito de exploración del bulbo de presiones de las obras que están en tendencia de crecimiento del sector construcción, además de ser más eficiente que el ensayo tradicional SPT.
13. Al igual que el ensayo de SPT, el DPSH es un método para la determinación de capacidad de soporte por correlaciones de suelos, cuyas tablas de referencia corresponden a bases de datos de otros países, por lo que tiene las mismas limitaciones de análisis y posibles rangos de variación como los indicados por el autor Sergio Bonilla (2010) para el ensayo de SPT.

14. Al ser el DPSH un ensayo de reciente introducción al mercado nacional, se considera que esta primera evaluación es el inicio para la exploración de otros aportes que puede dar este método y otros similares en la geotecnia nacional.

5.2 Recomendaciones

1. Considerando que el ensayo DPSH es de reciente aplicación en el país, y que, al igual que el SPT, posee correlaciones con bases de datos de suelos de otros países. Se recomienda realizar un análisis comparativo de datos que permita correlacionar el N_{SPT} y el N_{20} con aplicación directa en los suelos nacionales.
2. En el SPT manual, el diámetro de la perforación es ligeramente mayor que el diámetro del varillaje que transmite los golpes a la puntaza; mientras que en el ensayo DPSH la puntaza es maciza y el varillaje tiene igualmente una sección ligeramente menor que la de la puntaza. Por lo cual, se recomienda para futuras investigaciones, analizar la influencia del rozamiento del terreno en el tren de varillaje de ambos ensayos y evaluar la incidencia del resultado en ambos.
3. Se propone, además, extender el análisis de la efectividad del ensayo DPSH en suelos arenosos y comparar su aplicación respecto al SPT, dado que esta investigación se limitó a suelos limosos y arcillosos.
4. Se recomienda a las empresas encargadas de la exploración de suelos, verificar que los métodos de exploración que utilizan para dar recomendaciones de cimentación cumplan con la especificación de profundidad mínima de análisis igual o superior al bulbo de presiones correspondiente ya que se demostró que Costa Rica tiene gran tendencia a construcciones de 6 o más niveles que años anteriores.
5. Dado que la principal correlación entre el ensayo de SPT y el DPSH es el rango de consistencia. Se recomienda efectuar un análisis comparativo de los perfiles de consistencia que se obtienen a partir de ambos ensayos y verificar el efecto de esta variación en las recomendaciones de cimentación de un determinado proyecto.
6. Considerando que el país se encuentra en la búsqueda de nuevas tecnologías para mejorar la calidad de los estudios de suelos ejecutados actualmente. Se recomienda ampliar la base de datos de análisis tanto de este método como de mecanismos similares, tal como el equipo de

ensayos DPM, que también se encuentra en fase de introducción al país por el Laboratorio de Geomecánica de la Escuela Centroamericana de Geología, y corresponde a un equipo de penetración dinámica, pero de menor energía de aplicación en el ensayo.

7. Se recomienda a la Universidad fomentar el desarrollo de trabajos de investigación enfocándose en el ensayo de equipos alternativos a los equipos tradicionales, ya que, a lo largo de la elaboración del presente trabajo, no se encontraron registros previos de esta prueba ni similares.
8. Se recomienda nacionalmente, buscar y utilizar nuevos métodos para estudios de suelos enfocados a las obras de magnitud media y alta, ya que el ensayo de SPT no demuestra ser un ensayo capaz de asegurar información suficiente para obras de esta magnitud y se requieren métodos más efectivos que brinden resultados más confiables para poder llevar a cabo las construcciones de la actualidad. Además, diariamente surgen nuevas tecnologías, normas y materiales que hacen de la construcción un mundo explorativo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Alfaro, X. (16 de Febrero de 2011). Estudio revela suelo 'blando' en Nueva Cinchona. *La Nación*. Recuperado de http://www.nacion.com/archivo/Estudio-revela-blando-Nueva-Cinchona_0_1177882255.html

Alpízar, A. (2017). *La Ingeniería Geotécnica y su actualización ante los nuevos retos del sector construcción*. San José, Costa Rica. XIV Encuentro Iberoamericano de Mujeres dirigido a ingenieras, arquitectas y agrimensoras de Iberoamérica.

Asociación Costarricense de Geotecnia. (2009). *Código de Cimentaciones de Costa Rica CCCR*. Cartago: Editorial Tecnológica de Costa Rica.

Bañón Blázquez, L., y José, B. F. (2000). *Manual de carreteras. Volumen II: construcción y mantenimiento*. Ortiz e Hijos, Contratista de Obras, S.A.

Berrosipi, E. C. (12 de 6 de 2013). Ensayos de penetración estándar. *slideshare*. Recuperado de <https://es.slideshare.net/ErikCortezBerrosipi/ensayos-de-penetracin-estndar-spt>

Blanca, M. Á. (2011). *Geotecnico para centro de emprendedores C/ Nosquera, Málaga*. Málaga.

civilgeeks. (7 de Julio de 2017). Estudios de Suelos. Recuperado de <http://civilgeeks.com/2011/11/29/estudios-de-los-suelos/>

Agencia Nacional de Hidrocarburos.. (2009). *Cartilla Nacional de Hidrocarburos*. Colombia: Ministerio de Minas y Energías. Recuperado de <https://es.scribd.com/document/97976712/CARTILLA-Geologia-Geofisica-c4>

ASTM INTERNATIONAL (2011). *Standard Test Method for Standard Penetration Test (SPT) and Split-Barrel Sampling of Soils*. Recuperado de: <https://www.astm.org/Standards/D1586.htm>

Das, B. M. (2001). *Principios de ingeniería de cimentaciones*. México: International Thomson Editores.

Das, B. M. (2015). *Fundamentos de Ingeniería Geotécnica*. México: Cengage Learning.

González L., Ferrer, M., Ortuño, L., y Oteo, C. (2002). *Ingeniería Geológica*. Madrid: PEARSON EDUCACIÓN.

González, M. (9 de enero de 2012). *La Guía*. Recuperado de <https://fisica.laguia2000.com/dinamica-clasica/fuerzas/mecanica-del-suelo-bulbos-de-tension>

Hurtado, J. E. (s.f.). *Diseño de cimentaciones*. Fondo Editorial ICG.

Jiménez, J., y Justo, J. (1975). *Geotecnia y cimientos*. Madrid España: Rueda.

Juárez, E., & Rico, A. (1973). *Mecánica de Suelos*. Mexico: Editorial Limusa.

Martínez, F. (25 de Abril de 2010). Sondeos Horizontales. [*mensaje en un blog*]. Recuperado de <http://elbuscapiedras.blogspot.com/2010/04/sondeos-horizontales.html>

Prada, I. (1986). *Proposición para la introducción del cono dinámico como prueba complementaria al ensayo de penetración estándar* (tesis de licenciatura). Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica.

Terzaghi, K., y Peck, R. (1973). *Mecánica de Suelos en la Ingeniería Práctica*. ESPAÑA: EL ATENEO S.A.

TodoAgro. (1 de Abril de 2011). Calicata en el INTA Expone Región Pampeana. Recuperado de <http://www.todoagro.com.ar/noticias/nota.asp?nid=15363>

UNE, A. (1994). *Prueba de penetración dinámica superpesada*. Recuperado de: <https://es.scribd.com/document/228372738/UNE-103801-1994-Penetracion-Dinamica-Superpesada-DPSH>

Villalaz, C. (2004). *Mecánica de Suelos y cimentaciones*. Mexico: Limusa

S.A.

Anexos

Figura

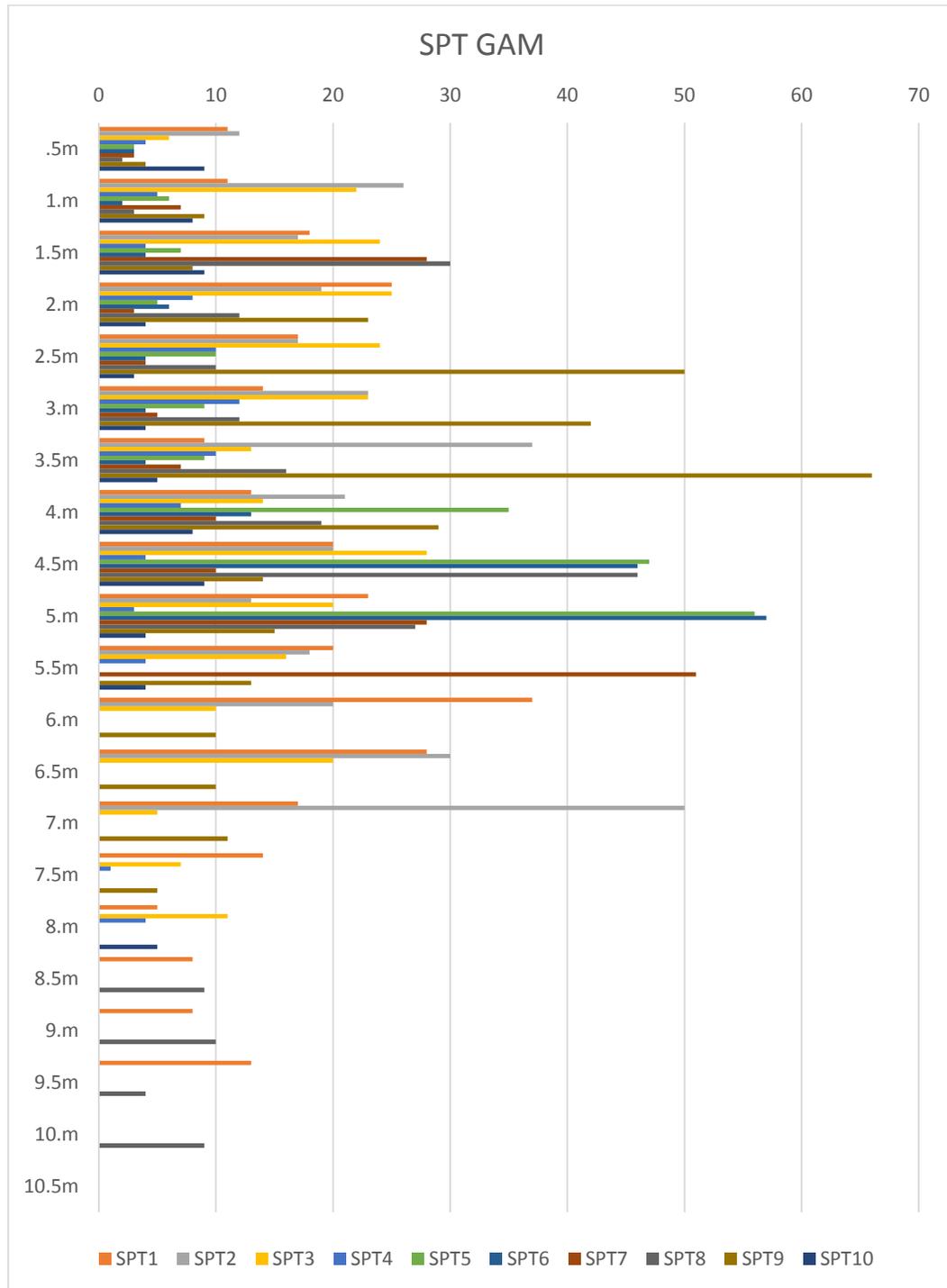


Figura 21. Gráfico NSPT en GAM (Mapa San José).

Fuente: Elaboración propia (Carrillo, 2018).

Figura

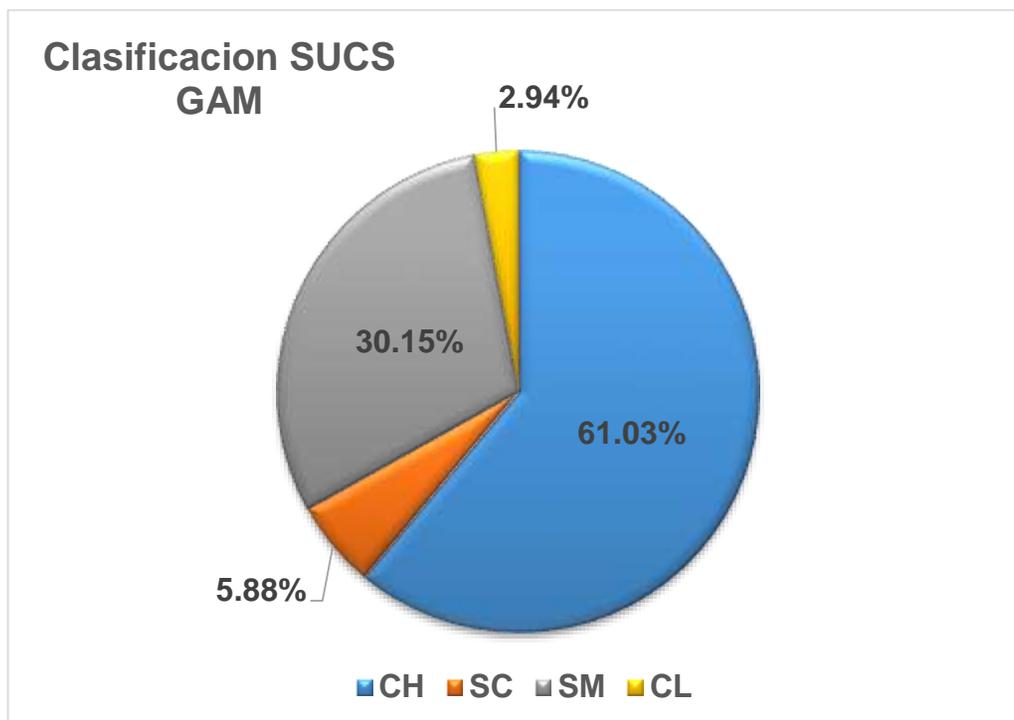


Figura 22. Gráfico Clasificación SUCS en GAM.

Fuente: Elaboración propia (Carrillo, 2018).

Figura

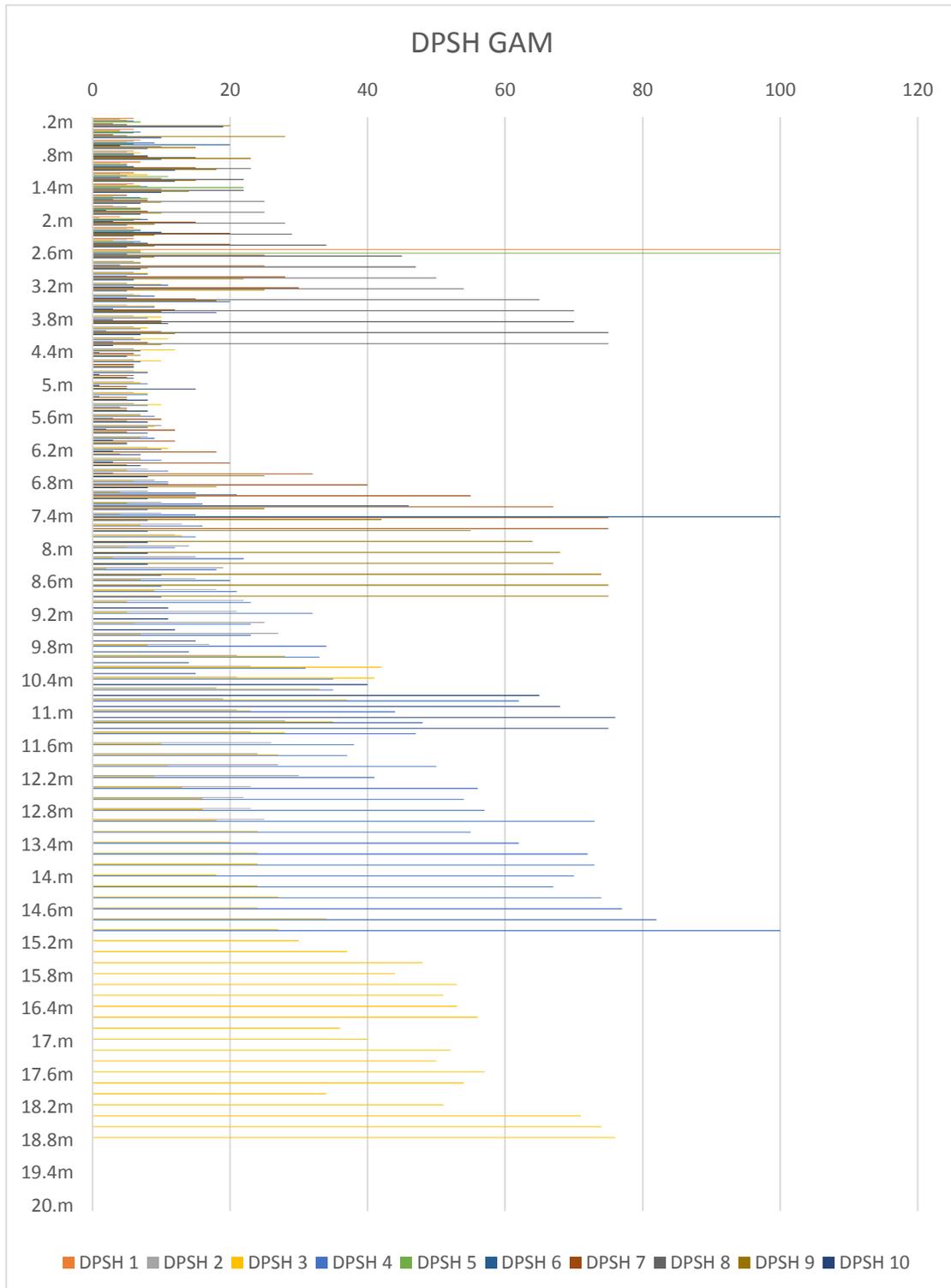


Figura 23. Gráfico NDPSH en GAM (Mapa San José).

Fuente: Elaboración propia (Carrillo, 2018).

Figura

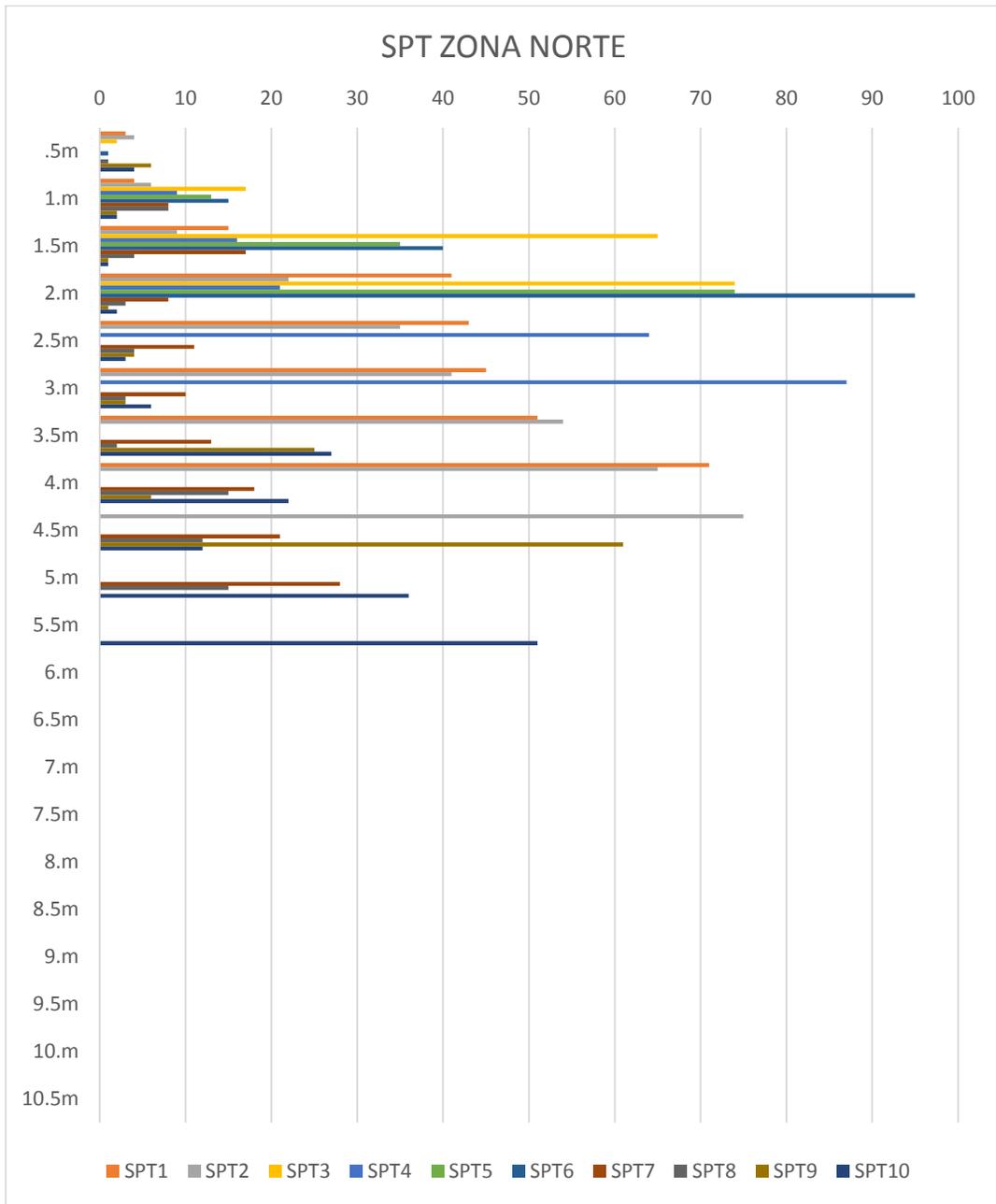


Figura 24. Gráfico NSPT en Zona Norte (Mapa Liberia).

Fuente: Elaboración propia (Carrillo, 2018).

Figura

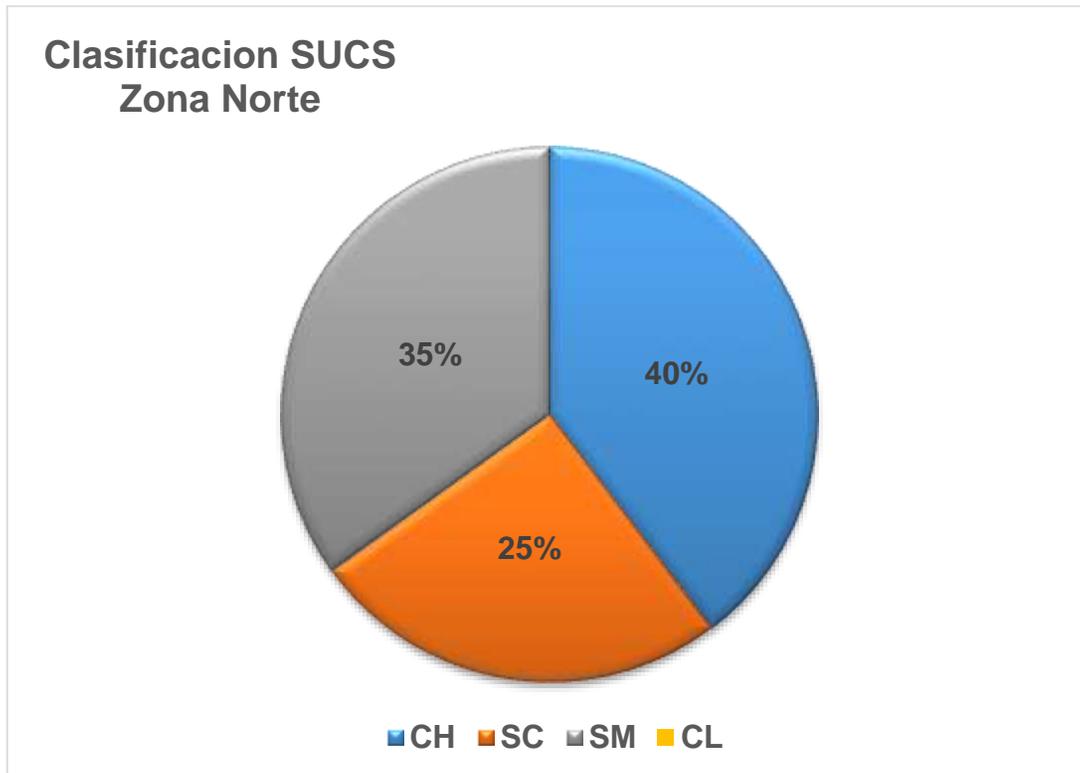


Figura 25. Gráfico Clasificación SUCS en Zona Norte.

Fuente: Elaboración propia (Carrillo, 2018).

Figura

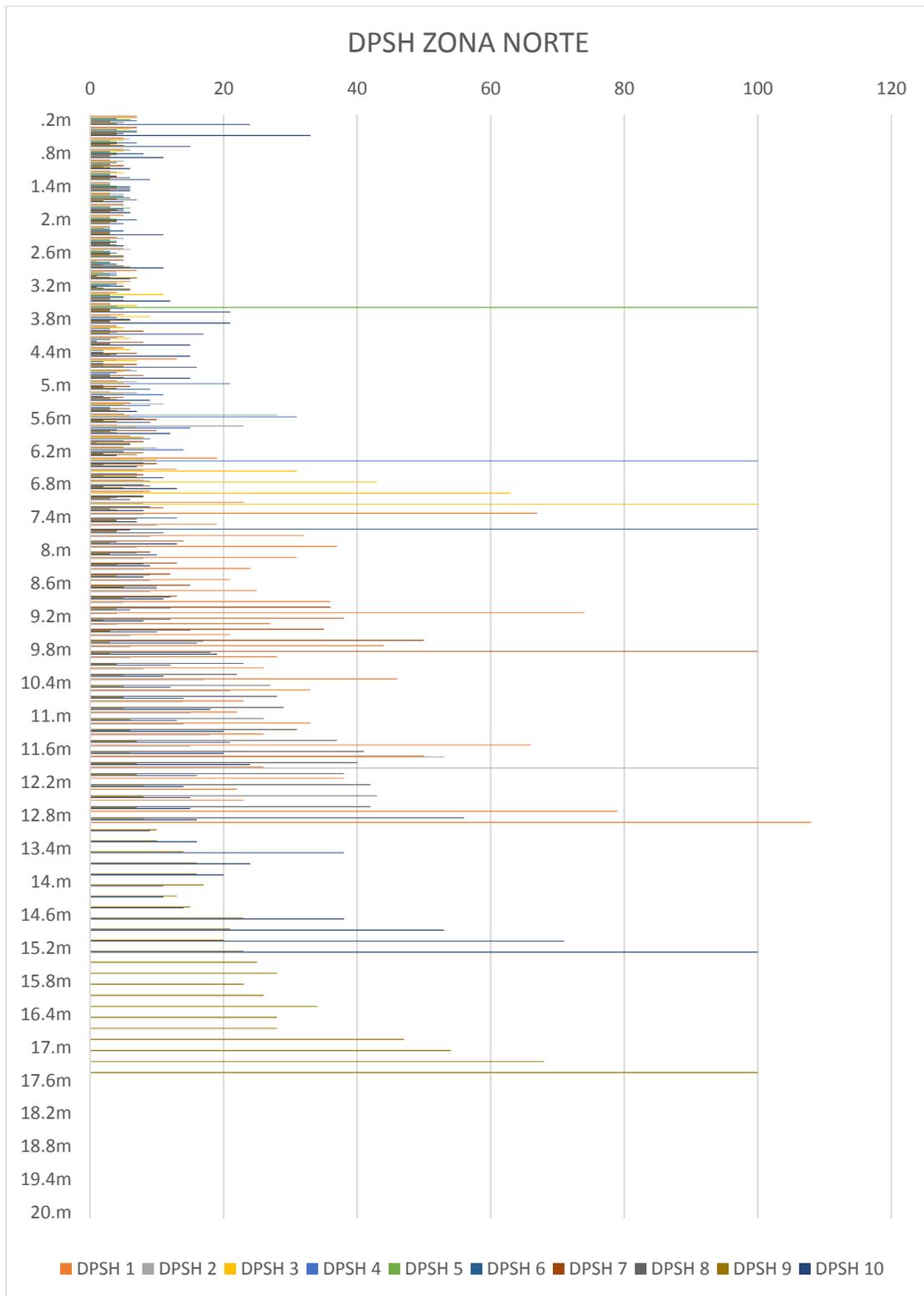


Figura 26. Gráfica de DPSH en Zona Norte.
Fuente: Elaboración propia (Carrillo, 2018).