

**Instituto Superior Politécnico José Antonio
Echeverría CUJAE**



ANÁLISIS Y CLASIFICACIÓN GEOTÉCNICA DE LA FORMACIÓN GUEVARA

Wilfredo David González Fonseca

La Habana, 2012



Tesis de Maestría

Análisis y clasificación geotécnica de la formación Guevara. – La Habana : Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría (CUJAE), 2012. – Tesis (Maestría).

Dewey: 600 - Tecnología (Ciencias aplicadas).

Registro No.: Maestria872 CUJAE.



(cc) Wilfredo David González Fonseca, , 2012.

Licencia: *Creative Commons de tipo Reconocimiento, Sin Obra Derivada.*

En acceso perpetuo: <http://www.e-libro.com/titulos>



Instituto Superior Politécnico
José Antonio Echeverría
cujae

Facultad de Ingeniería Civil
Departamento de Ingeniería Civil

Maestría en Ingeniería Civil. Mención Geotecnia

Título: Análisis y Clasificación Geotécnica de la
Formación Guevara.

Autor: Ing. Wilfredo David González Fonseca.

Tutor: MSc. Ing. Eddy Hernández Hernández
MSc. Lic. Carlos A. García Fernández



Empresa Nacional de Investigaciones Aplicadas
Unidad de investigaciones para la Construcción
Ciudad Habana

Ciudad Habana 2010.

AGRADECIMIENTO:

A mi familia por soportar durante este tiempo mis tensiones y angustias.

A mis compañeros de trabajo por su comprensión.

A mi tutor por su apoyo y dedicación.

Resumen

En este trabajo se evalúan los parámetros físicos y mecánicos que caracterizan los suelos de la formación geológica Guevara, representada por arcillas abigarradas del período Cuaternario, con el objetivo de establecer criterios de variación estadística y clasificación geotécnica, mediante la utilización de una base de datos de 426 muestras (863 ensayos físicos y 298 ensayos mecánicos) obtenidas de 19 investigaciones realizadas en las provincias habaneras.

En la actualidad las investigaciones Ingeniero Geológicas que se realizan en dicho territorio, donde se encuentra esta formación geológica, se ejecutan sin tener en cuenta el gran volumen de información existente, por lo que son tratadas de forma muy local y aislada. Con la presente investigación pretendemos optimizar las investigaciones y pronosticar el comportamiento geotécnico de los suelos, incluyendo la subdivisión geotécnica de los mismos.

INDICE

	Pag.
Introducción.....	6
 CAPITULO I. ESTADO DEL ARTE	
1.1 Sobre las características geológicas.	9
1.1.1 Origen de los suelos.	9
1.1.2 Edad.	9
1.1.3 Distribución geográfica.	9
1.1.4 Litología.	10
1.1.5 Espesor.	11
1.2 Sobre la caracterización geotécnica.	12
1.3 Sobre los métodos de evaluación geotécnica de las arcillas.	14
1.4 Sobre la evaluación estadística de los datos.....	15
1.5 Conclusiones parciales.	17
 CAPITULO II. EVALUACIÓN POR OBRA.	
2.1 Introducción.	19
2.2 Base de datos.....	19
2.3 Casos de estudio.....	20
2.3.1 Área del CENSA.	20
2.3.2 Área del Instituto de Riego y Drenaje.	22
2.3.3 Área del Centro Nacional de Biopreparados.....	23
2.3.4 Área de la Comunidad Desembarco del Granma.	24

2.3.5 Área de la obra Antenas Bauta.	27
2.4 Análisis del Coeficiente de Variación.	29
2.5 Conclusiones parciales.	30

CAPITULO III. EVALUACIÓN GENERAL.

3.1. Evaluación de las propiedades físicas generales.	32
3.1.1 Humedad.	32
3.1.2 Contenido de arcilla.	34
3.1.3 Peso específico natural de la masa de suelo.	35
3.1.4 Límite líquido.	37
3.1.5 Límite Plástico.	38
3.1.6 Peso específico relativo de los sólidos.	40
3.2 Variación en profundidad de los parámetros físicos.	41
3.3 Clasificación de los suelos.	42
3.3.1 Índice de Consistencia (IC).	42
3.3.2 Actividad coloidal (A_c).	43
3.3.3 Clasificación de los suelos según la carta de plasticidad.	45
3.4 Características mecánicas de las arcillas de la formación Guevara.	45
3.4.1 Ensayo edométrico.	45
3.4.2 Ensayo Triaxial Rápido (UU).	49
3.4.3 Ensayo Cortante Directo.	50
3.4.4 Conclusiones parciales.	52

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.	56
---	-----------

BIBLIOGRAFÍA.	59
---------------------------	-----------

ANEXOS.	68
1 Obras incluidas en la base de datos.....	69
2 Valores recomendados del coeficiente de variación (CV) y el coeficiente de precisión de la estimación (δ) (Tabla IV. León González, Miguel; 1977)...	70
3. Carta de plasticidad para clasificar suelos de grano fino.....	71
4. Criterios de Clasificación.....	72
5. Criterios para describir la consistencia de los suelos arcillosos.....	73
6. Criterio para describir la plasticidad de los suelos.....	74
7. Base de datos.....	75

INTRODUCCIÓN

Esta tesis estudia la variación de los parámetros físicos-mecánicos de los suelos de la formación geológica Guevara, ubicada en los territorios de las provincias occidentales, para valorar si los mismos pueden considerarse como un solo elemento ingeniero geológico y poder establecer los criterios de clasificación geotécnica mediante el uso de la estadística y el análisis integral de la información, contenida en una base de datos de ensayos ejecutados a 426 muestras de suelos obtenidas en 149 calas realizadas en obras construidas en las provincias habaneras.

Nota: Debido al uso del término *muestra*, tanto en Geotecnia como en Estadística, en esta tesis se usa *muestra de suelo* para designar a una porción de suelo obtenida en su condición “in situ” y *muestra estadística* para designar el conjunto de valores de un parámetro del suelo para su tratamiento estadístico.

Cada investigación geotécnica que se realiza en estos suelos se trata de forma independiente y con criterios aislados de investigación, sin tener en cuenta el gran volumen de información existente, por lo que nos proponemos realizar un estudio regional que nos permita responder la siguiente cuestión: ¿es la formación Guevara un solo elemento ingeniero geológico?

Como aspectos novedosos de esta tesis debemos señalar que podremos contar con un estudio que inicie la valoración geotécnica regional de estos suelos y el pronóstico de su comportamiento geotécnico. Además, permitirá optimizar las nuevas investigaciones enfocando el trabajo hacia los aspectos relevantes.

- **Objetivos de la investigación.**

1. Estimar mediante técnicas estadísticas los parámetros físicos y mecánicos de los suelos de la formación Guevara, mediante el uso de los ensayos de humedad, peso específico de la masa de suelo, peso específico de los sólidos, límite líquido, límite plástico, contenido de arcilla, cortante directo, triaxial rápido y edométrico.
2. Clasificar y caracterizar geotécnicamente los suelos de esta formación geológica mediante la carta de plasticidad, el índice de consistencia y la actividad coloidal.

- **Hipótesis de la investigación.**

- Los suelos de la formación Guevara se consideran como un solo tipo de elemento ingeniero geológico.
- Estos suelos clasifican como CH y de alta plasticidad según el sistema unificado de clasificación de los suelos (SUCS).

- **Diseño Metodológico.**

En esta investigación, del tipo **aplicada**, se ejecutaron las siguientes actividades:

- Creación de una base de datos en Microsoft Office Excel con los parámetros geotécnicos de los suelos de la formación Guevara encontrados en las obras investigadas en el territorio de interés.
- Tratamiento estadístico de cada parámetro que consiste en la depuración de los datos y en la estimación de los parámetros.
- Correlacionar cada parámetro con la profundidad.
- Clasificar geotécnicamente los suelos según la Norma Cubana NC 59. 2000.
- Analizar la información obtenida y comprobar las hipótesis planteadas.
- Elaboración del informe de la Tesis de Maestría.

- **Aporte práctico.**

El pronóstico del comportamiento geotécnico de los suelos en la región permite optimizar las investigaciones geotécnicas, enfocando el trabajo hacia los aspectos más relevantes, contrastar los resultados obtenidos en las investigaciones de las obras y contribuir, de esta forma, al mejor conocimiento de los suelos cubanos.

- **Campo de aplicación.**

Los resultados de esta Tesis se aplican de inmediato en las investigaciones geotécnicas que se realicen en la región. Pone a disposición de los investigadores herramientas teóricas, analíticas y prácticas que posibilitan la aplicación de soluciones ingenieriles, integradas en una metodología para el estudio geotécnico de estos suelos. Los resultados son de especial interés para el Ministerio de la Construcción de la República de Cuba, en particular para la Empresa Nacional de Investigaciones Aplicadas o cualquier otra empresa u organismo que pueda realizar investigaciones geotécnicas; así como para las empresas de proyectos estructurales, hidráulicas o de obras viales.

CAPITULO I. ESTADO DEL ARTE.

CAPITULO 1. ESTADO DEL ARTE

1.1 Sobre las características geológicas.

Estos suelos han sido estudiados por diferentes autores como parte de los trabajos detallados de investigaciones geológicas realizadas en el país en las décadas de los años 70 y 80, por expediciones científicas del antiguo Campo Socialista.

1.1.1 Origen de los suelos.

Según los autores que la describieron inicialmente (I. P. Kartashov et al, 1976)¹, esta formación tiene génesis marina. Ellos señalaron que sus depósitos aparentemente fueron dejados por una de las transgresiones marinas glacioeustáticas del Pleistoceno y agregan que las peculiaridades litológicas de los depósitos de la formación, la forma de su ocurrencia y la estrecha relación espacial con las llanuras costeras y con las superficies de planación, que constituyen relictos de plataformas marinas de abrasión, no dejan prácticamente, ninguna duda acerca del origen marino de estos depósitos.

Los depósitos de la Formación Guevara fueron dejados por una de las transgresiones marinas glacioeustáticas ocurridas en el Pleistoceno de Cuba. En la etapa posterior a su sedimentación, “sus depósitos fueron sometidos a la fuerte intemperización química subaerea, la que dejó huellas indelebles en la misma” (Peñalver L. L. et al, 2008)².

1.1.2 Edad.

“Por su posición estratigráfica se le ha asignado una edad de Pleistoceno Inferior-Medio” (Peñalver L. L. y otros, 2008)².

1.1.3 Distribución geográfica.

“Se encuentra en todas las provincias de Cuba, ubicándose sobre las llanuras planas y onduladas y en algunas cumbres planas del relieve montañoso, otras aflorando en cortes naturales y artificiales debajo de la Formación Villaroja” debido a que es mas joven que la formación Guevara. “Su potencia promedio es de 5-15 m, alcanzando a menudo valores entre 30-50 m” (I. P. Kartashov et al, 1976)¹. “En Cuba Occidental esta unidad constituye la

Análisis y clasificación geotécnica de la formación Guevara.

superficie de gran parte de la Llanura Sur de Pinar del Río, penetrando en la Llanura Sur Habana-Matanzas, donde en ocasiones se distingue en la superficie de la misma, y en la Llanura Central de La Habana, en la que predomina ampliamente en los alrededores de Catalina de Güines y otras localidades. Otras zonas donde se distingue la misma son las llanuras Amarillas-Aguada de Pasajeros, así como de Máximo Gómez y norte de San José de los Ramos”(Peñalver L. L. et al, 2008)².

1.1.4 Litología.

El Léxico Estratigráfico de Cuba (Franco Alvarez G. L. et al. 1994)³ la describe como “arcillas plásticas (montmorilloníticas y montmorillonito-caoliníticas), arenas, gravas finas, fragmentos de corazas ferríticas (hardpan) y cantos. La componente clástica es oligomíctica, con predominio de las rocas silíceas. El cemento arcilloso tiene como principal componente la esmectita, aunque también puede encontrarse esmectita alumino-ferruginosa y caolinita-esmectita. Presenta alto contenido de pisolitas y nódulos ferríticos”.

Los autores de la formación Guevara (I. P. Kartashov et al, 1976)¹ señalan que esta unidad está constituida por “arcillas y arenas arcillosas abigarradas con gravas, a veces con guijarros e incluso con cantos rodados: poseen una estratificación horizontal no clara, enmascarada por los procesos de meteorización, que forman manchas y franjas de color blanquecino, gris verdoso y rojo”.

El material clástico de la Formación Guevara posee composición oligomíctica. Tanto en la fracción de guijarros y gravas, como en las de arenas y limos, predomina el cuarzo. En algunos cortes, el material clástico contiene, además de cuarzo, una notable cantidad de fragmentos de rocas silíceas. En forma de granos aislados se encuentran feldespatos de potasio y micas dioctahédricas. En esta formación hay una gran cantidad de guijarros y gravas de concreciones y nódulos ferruginosos, obtenidos de otras formaciones. Particularmente de las corazas lateríticas de la Formación Guane y de la erosión de horizontes de la cortezas de intemperismo de rocas pre -Cuaternarias.

Las asociaciones de minerales arcillosos en el cemento de los depósitos inalterados de la Formación Guevara, está representada por dos tipos de facies: hidromicácea caolinítica y esmectítica.

Análisis y clasificación geotécnica de la formación Guevara.

Los depósitos con cemento arcilloso hidromicáceo caolinítico se hallan espacialmente relacionados con los afloramientos de la Formación Guane, a cuyos depósitos se asemejan mucho por la composición, y a veces con los afloramientos de los esquistos metamórficos. Para este tipo de depósito de la Formación Guevara, al igual que para la Formación Guane, son características la caolinita imperfecta, la caolinita esmectita interestratificada, las micas dioctaedricas y las micas esmectitas. A diferencia de la Formación Guane, estos depósitos contienen clorita-esmectita; las cloritas y esmectitas se hallan presentes en los mismos en mayor cantidad que en los depósitos de la Formación Guane. La composición de los minerales arcillosos de estos depósitos atestigua su origen a expensas de la erosión de los depósitos infrayacentes de la Formación Guane y parcialmente de los esquistos metamórficos.

Los depósitos de la Formación Guevara con cemento arcilloso esmectítico se distribuyen dentro de los límites de desarrollo de las rocas carbonatadas y margosas del Mioceno y con menos frecuencia de las rocas volcánicas alteradas. El principal componente del cemento arcilloso está representado por las esmectitas. En algunos cortes, sobre la base del análisis termográfico, Kartashov y sus colaboradores encontraron esmectita aluminio-ferruginosa. A veces, además de las esmectitas, se encuentran en el cemento arcilloso cantidades apreciables de caolinita-esmectitas e impurezas insignificantes de otros minerales arcillosos tales como caolinita imperfecta, cloritas, poligorskita. En dirección ascendente del corte, el contenido de esmectitas en el material arcilloso “desciende y comienzan a predominar las caolinitas-esmectitas con adición de caolinita preexistente poco cristalizada, en algunos cortes”.

(Peñalver L. L. et al, 2008)².

1.1.5 Espesor.

En las investigaciones practicadas en el territorio el espesor toma valores desde 2-3 m hasta 15 m y la profundidad hasta 20 m. “Según los reportes geológicos los espesores visibles de estos suelos no sobrepasa los 5 m, aunque por datos de perforaciones prácticamente toda la llanura sur de Pinar del Río sobrepasa los 10 m como promedio, e inclusive se han perforado en diferentes lugares de dicha llanura más de 30 m, que no solamente abarcan la llanura meridional de Pinar del Río, sino también otros territorios de Cuba Occidental”(Peñalver L. L. et al, 2008)².

1.2 Sobre la caracterización geotécnica.

Estos suelos se han valorado localmente para las soluciones de cimentación de las obras construidas en cada territorio (ver Anexo 1) mediante el estudio de sus propiedades físicas, empleando los ensayos de límites de consistencia (límite líquido y límite plástico), peso específico de las partículas sólidas, peso específico de la masa de suelo, tamaño de partículas, humedad natural e hinchamiento libre y su comportamiento bajo cargas mediante los ensayos de NSPT (número de golpes según el Standard Penetration Test), consolidación, triaxial no drenado, cortante directo y compresión simple. Estos ensayos se han realizado desde 1971 hasta la actualidad, en el Laboratorio de Mecánica de Suelos de la Empresa Nacional de Investigaciones Aplicadas, (ENIA), del MICONS en Ciudad de la Habana, bajo las metodologías de ensayos vigentes en cada época y siempre compatibles con las normas ASTM. En los estudios realizados se destacan por su amplitud los realizados para la construcción del CENSA (de la Torre T. 1971)⁴, en el municipio San José de las Lajas; del Instituto de Riego y Drenaje (Ganchev B. 1981)⁵, en el municipio San José de las Lajas; del Centro Nacional de Biopreparados (de las Cuevas C. 1986)⁶, en el municipio de Bejucal y de una base de antenas en el municipio de Bauta (Hernández E. 2003)⁷.

En estos estudios las arcillas de esta formación geológica se agruparon en un solo tipo de suelo o se vincularon, por no existir aún criterios geológicos de diferenciación, a los suelos de la formación Villaroja (CENSA e Instituto de Riego y Drenaje) que la cubre en algunas regiones, y aunque también se formó en el cuaternario, presentan características particulares que las diferencian de los suelos de la formación Guevara. Se clasificaron como CH en base a los ensayos físicos, usando el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS).

La valoración de las características deformacionales de los suelos de la formación Guevara se realizó mediante los ensayos de consolidación con presiones que no excedían al principio 800 kPa y posteriormente se ampliaron a 1 600 kPa y 3 200 kPa, con el propósito de precisar la presión de preconsolidación.

La resistencia de los suelos se valoró mediante los ensayos de triaxial rápido (UU), cortante directo y en menor medida por compresión simple.

Corteza de intemperismo (meteorización).

La zona de intemperización tiene una potencia de 1.5 m a 3.0 m y a veces ocupa toda la formación; en su parte superior, a 0.5 m de profundidad, frecuentemente se encuentra un

Análisis y clasificación geotécnica de la formación Guevara.

horizonte poco potente de concreciones ferruginosas. “Durante el intemperismo, la montmorillonita es la que mas intensamente se destruye y se sustituye por caolinita-montmorillonita. La zona de meteorización, dentro de cuyos límites los depósitos presentan coloración abigarrada, posee una profundidad de 2-4 m y en la mayor parte de los casos, abarca toda la formación y roca infrayacente”. “Sólo en algunos cortes los estratos inferiores de la formación se hallan representados por depósitos inalterados de color gris amarillo-verdoso. En los cortes en que los estratos superiores de la formación se preservaron de la denudación, los depósitos de estos se encuentran notablemente empobrecidos de material arcilloso y también poseen una monótona coloración parda amarilla o gris blanquecina” (I. P. Kartashov et al, 1976)¹.

La composición de la corteza de intemperismo de estos suelos está asociada a las facies hidromicáceo caolinítica y esmectítica.

“El intemperismo de los depósitos con cemento arcilloso hidromicáceo-caolinítico conduce principalmente a la destrucción de cierta cantidad de componentes roentgenoamórficos, y mal cristalizados del sistema, a la redistribución del pigmento ferruginoso primario y a la formación de coloraciones abigarradas secundarias. En los depósitos con cemento esmectítico el efecto del intemperismo es notablemente más apreciable. Las investigaciones de I. P. Kartashov, mostraron que el material arcilloso de las partes inferiores del horizonte abigarrado se asemeja aún a las arcillas grises inalteradas de los cortes, diferenciándose de estas principalmente por la débil intensidad de los máximos de difracción, lo que permite suponer la aparición de combinaciones roentgenoamorfos” (Peñalver L. L. et al, 2008)².

“La caolinización de las esmectitas, proceso que ocurre en estos depósitos, se acompaña con la movilización de ciertas cantidades de aluminio y de cantidades notablemente más grandes de hierro, que no forma parte de la estructura de la caolinita. Como resultado de este surgen coloraciones abigarradas de los depósitos y concreciones ferruginosas. En las partes inferiores de las pendientes suaves y las depresiones del relieve en la porción superior del corte de la formación Guevara, las concreciones y perdigones de hierro se fusionan constituyendo las conocidas lateritas o macarreros. Estas lateritas están formadas por goethita y combinaciones roentgenoamorfos de hierro, con una adición pequeña e inestable de hematina” (Peñalver L. L. et al, 2008)².

“En el límite sur de las provincias de La Habana y Pinar del Río, todavía en la actualidad, se pueden observar grandes bloques de laterita que tienen hasta 1 m de longitud. En otras regiones de Cuba Occidental, como algunas zonas próximas a San Juan y Martínez, en partes de la Llanura Sur Habana-Matanzas, así como de la Llanura Central de La Habana, si bien es cierto que es difícil encontrar bloques de laterita bien consolidados, es común distinguir la capa ferruginosa con un alto contenido de fragmentos de hardpan y perdigones de hierro, con un espesor promedio de unos 50 cm, ubicada en la parte alta del corte de la formación Guevara, debajo de su suelo moderno, o separando las formaciones Guevara de Villarroja, en las zonas en que ambas concurren en la misma localidad”(Peñalver L. L. et al, 2008)².

“La zona de meteorización, dentro de cuyos límites los depósitos presentan coloración abigarrada, posee una profundidad de 2 a 4 m y en la mayor parte de los casos, abarca toda la formación y roca infrayacente. Solo en algunos cortes los estratos inferiores de la formación se hallan representados por depósitos inalterados de color gris amarillo-verdoso. En los cortes en que los estratos superiores de la formación se preservaron de la denudación, los depósitos se encuentran notablemente empobrecidos de material arcilloso y también poseen una monótona coloración parda amarilla o gris blanquecina” (Peñalver L. L. et al, 2008)².

1.3 Sobre los métodos de evaluación geotécnica de los suelos arcillosos.

En la literatura consultada aparecen varios casos de suelos típicos que se han sometido a valoraciones sistemáticas de sus propiedades físicas y comportamiento bajo cargas. Dentro de estas se encuentran la arcilla de Londres, la arcilla azul de Boston, la arcilla de Chicago, la arcilla de la ciudad de México, entre otros. Algunas de ellas se han estudiado detalladamente empleando métodos de ensayos que simulan el comportamiento del suelo con pequeñas y grandes deformaciones, como es el caso de la arcilla de Londres que presenta diferentes comportamientos según los niveles de cargas utilizados debido a su preconsolidación.

Apolonia Gasparre (Apolonia, G. 2005)⁸, presenta en su Tesis de Doctorado una amplia valoración de las arcillas de Londres en más de 500 páginas donde evalúa sus características geológicas, estructurales, mineralógicas, litológicas y físicas; además evalúa el comportamiento de los suelos con deformaciones pequeñas y elevadas, así como varios efectos como el de la historia geológica (de tensiones) reciente. La disponibilidad de equipos de laboratorio

apropiados y recursos financieros en las investigaciones de importantes obras a cimentar en estos suelos posibilitó la adquisición de los datos primarios imprescindibles.

Las arcillas de Londres, depositadas en un ambiente marino en el eoceno inferior hace 50 millones de años, están constituidas por arcillas, arcillas limosas y lentes de arena fina con limo y arcilla. Presenta cinco unidades litológicas formadas cronológicamente durante los procesos de elevación y subsidencia del fondo marino. El espesor total actual de esta formación varía entre 50 m y 150 m. Esta formación sufrió la acción de la orogenia Alpina que plegó y fracturó los estratos sometidos a fuertes tensiones horizontales. Se reconoce que entre 150 m y 300 m del espesor original de la formación se erosionó siendo la causa fundamental de la preconsolidación de estos suelos.

La zona intemperizada de las arcillas de Londres varía entre 3 m y 6 m dependiendo de la litología de cada lugar. Esta provoca la alteración de los suelos, la fisuración por desecación y el agua con abundante oxígeno transforma el hierro en óxido férrico, además de cambios de coloración de la arcilla del azul al carmelita. En su composición mineralógica intervienen la ilita, esmectita, caolinita, montmorillonita y clorita; predominando la ilita y la esmectita.

Se observa cierta homogeneidad en las propiedades índices de la arcilla de Londres en las diferentes unidades litológicas. La humedad varía entre 22.4 % y 25.8 %, el límite líquido entre 59 % y 74 %, el límite plástico entre 21 % y 32 %, la actividad coloidal entre 0.67 y 0.86 y la fracción arcillosa (menor de 2 μ m) entre 42 % y 60 %. Los ensayos edométricos se realizaron con presiones verticales de hasta 12 800 kPa y se muestra que el cambio de compresibilidad se produce a partir de 2 000 kPa con bastante uniformidad para todas las unidades litológicas.

1.4 Sobre la evaluación estadística de los datos.

La valoración de las propiedades físicas que caracterizan un determinado tipo de suelo y el establecimiento de sus fronteras, requiere del empleo de técnicas estadísticas para el análisis de los resultados de los ensayos. La gran heterogeneidad de los suelos, especialmente en su estado natural, hace difícil su división en capas de similares propiedades geotécnicas y la obtención de los parámetros de cálculo para el diseño de las estructuras. En muchas investigaciones no se emplean técnicas estadísticas por falta de suficientes datos.

Las propiedades de los suelos arcillosos que se suelen tratar estadísticamente son aquellas obtenidas directamente de ensayos de laboratorio y que intervienen en la definición del

elemento ingeniero geológico, tales como el peso específico de los sólidos, peso específico natural, humedad natural, límite líquido y límite plástico. Otras propiedades que caracterizan el comportamiento de los suelos ante la aplicación de las cargas como la cohesión, la fricción y el módulo de deformación, también se pueden tratar estadísticamente, si la cantidad de valores obtenidos lo permite.

Los estadígrafos a determinar son la media aritmética, la desviación estándar, la varianza, la curtosis, la asimetría, el rango, el coeficiente de variación, el intervalo de confianza de la media y otros, que suelen ser utilizados en la comprobación de la normalidad de la muestra, como la desviación media absoluta muestral (ϕ), el error cuadrático medio de la amplitud (S_A), el error cuadrático medio del exceso sobre la curtosis (S_E). Los criterios a utilizar permiten comprobar la normalidad de las distribuciones, la homogeneidad individual y general de los elementos y el rechazo de valores dudosos (León González, Miguel; 1977)⁹.

El criterio fundamental para valorar la normalidad de la distribución se basa en la comparación del exceso sobre la curtosis (E) y la asimetría (A) de la distribución normal con aquella que estamos evaluando; así se tiene que en la distribución normal E y A toman valores de 0 y se alejan de este valor cuando la curtosis es poco esbelta o muy esbelta y la asimetría es unilateral. En el artículo “Tratamiento estadístico de las propiedades físico-mecánicas de los suelos”, Miguel León González ofrece los pasos a seguir para el tratamiento estadístico de las propiedades físicas de los suelos y comprobar la división en elementos en un área determinada.

- Hacer una división inicial de los suelos en estratos.
- Hallar la cantidad mínima de determinaciones que se deben tener para establecer los valores de norma y diseño.
- Determinar para propiedad física las siguientes magnitudes media, valores extremos, desviación estándar, varianza, simetría y curtosis.
- Comprobar que tipo de distribución sigue cada propiedad.
- Determinar los valores dudosos de cada propiedad.
- Analizar los valores rechazados e investigar los motivos (ensayos defectuosos, posibilidad de pertenecer a otro estrato, etc.).

- Valorar la homogeneidad individual del estrato para cada propiedad y la homogeneidad general del mismo y, en caso de no ser homogéneo, analizar una nueva división de estratos.
- Analizar la posibilidad de unión de elementos geológicos contiguos.
- Determinar los valores de norma y diseño de cada propiedad.

1.5 Conclusiones parciales.

Del análisis de la literatura consultada podemos considerar lo siguiente:

1. La formación Guevara ha sido estudiada por geólogos vinculados al Instituto de Geología y Paleontología, los cuales definieron su origen, edad, distribución geográfica y espesores.
2. Se destaca en los estudios geológicos realizados por estos especialistas el proceso de caolinización de las esmectitas debido al intemperismo de los suelos, acompañado con la movilización de ciertas cantidades de aluminio y de cantidades notablemente más grandes de hierro, surgiendo las coloraciones abigarradas de los depósitos y las concreciones ferruginosas.
3. Aunque se han realizado estudios locales sobre las arcillas rojas, estos no han profundizado en la caracterización geotécnica de los suelos de la formación Guevara. Las valoraciones realizadas están relacionadas con los estudios para el diseño de los cimientos de las obras.
4. Los estudios estadísticos realizados tienen un carácter local y no abarcan todas las propiedades físicas de los suelos de esta formación.

CAPÍTULO II. EVALUACIÓN POR OBRA.

CAPITULO 2. EVALUACIÓN POR OBRA.

2.1 Introducción.

El área que abarca este estudio corresponde con el territorio actual de la provincia de La Habana e implícitamente Ciudad de la Habana. La ubicación de las obras incluidas cubre prácticamente todo el territorio mencionado. El territorio comprende la Llanura Sur Habana-Matanzas y la Llanura Central de La Habana, regiones con un potencial agrícola muy elevado y donde se han asentado poblaciones cuyo sustento fundamental es el cultivo de la tierra.

El espesor actual de estos suelos no sobrepasa los 15 m a 20 m en el territorio que se estudia, aunque como promedio está entre 5 m y 10 m. Se encuentran cubiertos en gran parte por la formación Villarroja y cubren rocas carbonatadas y margosas del Mioceno.

La formación Guevara está compuesta litológicamente por arcillas plásticas de composición montmorillonítica y montmorillonito-caolínica, arenas, gravas finas, fragmentos de corazas ferríticas (hardpan) y cantos. A veces en el corte las arcillas se encuentran penetradas por una gran cantidad de fragmentos de las rocas subyacentes, fundamentalmente por calizas, que impiden la toma de muestras de suelo para su análisis.

Por su poco espesor en muchas ocasiones no resulta evidente la presencia de la corteza de meteorización del suelo.

2.2 Base de datos.

Se utilizó una base de datos de 426 muestras de suelos obtenidas en 19 investigaciones geotécnicas ubicadas en las provincias habaneras, en las que se realizaron 863 ensayos físicos y 298 ensayos mecánicos. Los ensayos físicos realizados para la clasificación de los suelos son: peso específico relativo de los sólidos, humedad natural, límites de consistencia y peso específico natural de la masa de suelo. Los ensayos mecánicos realizados fueron: edométrico, triaxial rápido y cortante directo.

El tratamiento estadístico de los parámetros del suelo se realizó utilizando el programa STATGRAPHICS Plus. Primero se identificaron valores atípicos utilizando los test de Gubbs y Dixon. Posteriormente se determinaron los valores de la media, desviación estándar, varianza de la muestra, curtosis, coeficiente de asimetría, rango, mínimo, máximo y coeficiente de variación. El programa evalúa si los datos presentan una distribución normal.

Análisis y clasificación geotécnica de la formación Guevara.

2.3 Casos de estudio.

La evaluación se realizó en las obras con una cantidad de muestras de suelo que permitieran un tratamiento estadístico representativo de las condiciones locales del suelo. Para ello se seleccionaron las obras CENSA, Instituto de Riego y Drenaje, Centro Nacional de Biopreparados, Comunidad Desembarco del Granma y Antenas Bauta.

2.3.1 Área del CENSA.

La investigación para el diseño de la cimentación del CENSA (de la Torre, T. 1971)⁴, ubicado en el municipio San José de las Lajas, de la provincia de La Habana, se realizó mediante la perforación de calas, el empleo del SPT y la obtención, en trincheras, de muestras grandes inalteradas de suelo. Se ensayaron 97 muestras de suelos de 16 calas y dos calicatas. A continuación el tratamiento estadísticos de los parámetros físicos que caracterizan los suelos.

Tabla 2.1 Valores estadísticos de las características físicas de las arcillas en CENSA.

CENSA	Peso específico Relativo de los sólidos	% de arcilla (< 0.002 mm)	Humedad (%)	Peso específico natural (kN/m ³)	Límite Líquido (%)	Límite Plástico (%)
n	35	44	90	79	38	38
Media	2.82	66	34.10	18.69	74.07	37.79
Desviación estándar	0.023	16.990	2.981	0.393	12.446	4.331
Varianza de la muestra	0.0005	288.788	8.887	0.154	154.910	18.759
Curtosis	-0.975	-0.899	0.584	-0.252	-0.143	-0.647
Coeficiente de asimetría	-0.128	-0.408	0.125	-0.093	0.868	0.339
Rango	0.08	59	17	1.89	48.5	17.2
Mínimo	2.78	33	25.6	17.82	58.0	30.2
Máximo	2.86	92	42.6	19.71	106.5	47.4
Coeficiente de variación	0.008	0.25	0.087	0.021	0.168	0.115
Coeficiente de variación recomendado (León González, Miguel; 1977) ¹⁰	0.01	--	0.15	0.05	0.15	0.15

Solo la humedad natural y el peso específico natural de la masa de suelo presentan variación con la profundidad. En el gráfico 2.1 se observa que los valores mayores de humedad se detectan a

Análisis y clasificación geotécnica de la formación Guevara.

partir de ocho metros de profundidad. Los valores mayores de peso específico natural de la masa de suelo, según el gráfico 2.2, se detectan por encima de 10 metros de profundidad aunque no se puede establecer una correlación apropiada. El peso específico natural alto, en los primeros metros, se pudiera asociar al alto contenido de óxidos ferrosos en la zona meteorizada.

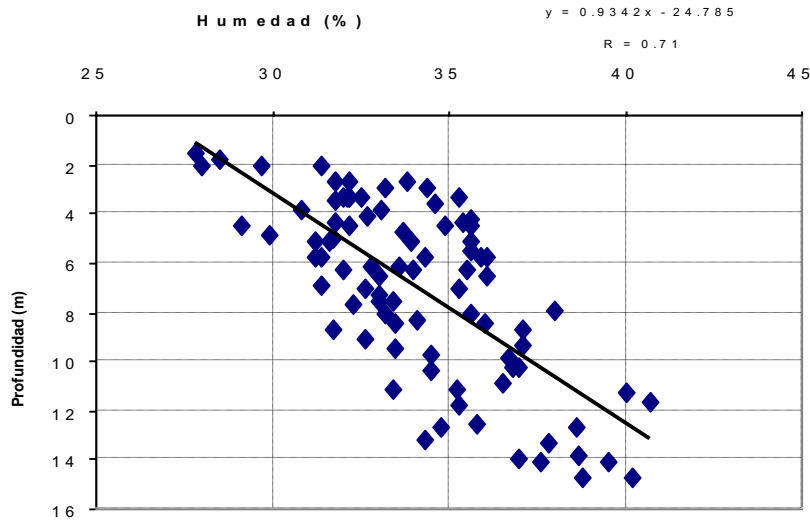


Gráfico 2.1 Correlación entre el la humedad natural y la profundidad.

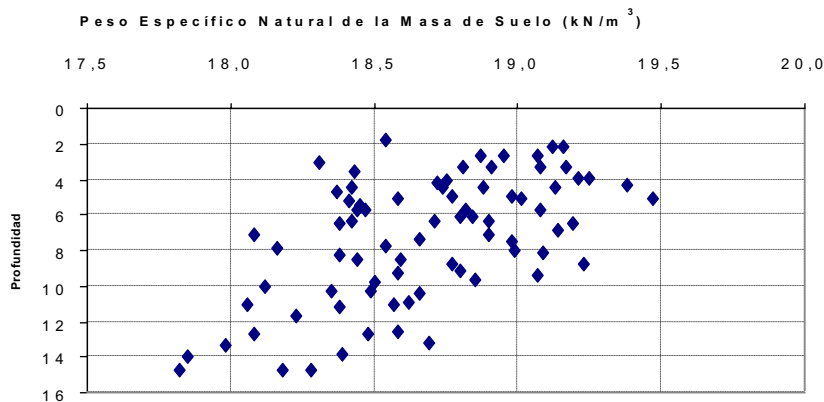


Gráfico 2.2 Correlación entre el peso específico natural de la masa de suelo y la profundidad.

Todos los parámetros presentan una distribución normal determinado mediante la utilización de los coeficientes de asimetría y curtosis estandarizados. En estos casos, los valores del coeficiente de asimetría estandarizado están dentro del rango esperado para los datos de una distribución normal. Los valores de los coeficientes de curtosis estandarizados están dentro del rango esperado para los datos de una distribución normal.

El coeficiente de variación de los parámetros en todos los casos es inferior al valor límite (León González, Miguel; 1977)⁹ excepto en el límite líquido donde es ligeramente superior.

2.3.2 Área del Instituto de Riego y Drenaje.

Ubicado en el municipio San José de las Lajas, de la provincia de La Habana, la investigación para el diseño de la cimentación del Instituto de Riego y Drenaje (Ganchev, V. 1971)⁵ se realizó mediante la perforación de calas. Se ensayaron 100 muestras de suelo de 32 calas. A continuación el tratamiento estadísticos de los parámetros físicos que caracterizan los suelos.

Tabla 2.2 Valores estadísticos de las características físicas de las arcillas en el Instituto de Riego y Drenaje.

Instituto de Riego y Drenaje	Peso específico relativo	% de arcilla (< 0.002)	Humedad (%)	Peso específico natural (kN/m ³)	Límite Líquido (%)	Límite Plástico (%)
n	23	24	18	18	25	25
Media	2.75	51.3	35.3	17.68	90.2	36.9
Desviación estándar	0.051	18.839	5.176	0.659	15.295	1.631
Varianza de la muestra	0.0025	354.679	26.795	0.434	233.948	2.661
Curtosis	0.846	-1.253	- 0.342	-0.007	-1.095	0.980
Coeficiente de asimetría	-0.440	0.103	0.201	0.890	0.309	-0.134
Rango	0.22	55	18.2	2.23	53.4	7.3
Mínimo	2.62	25	27.4	16.45	65	33.0
Máximo	2.84	80	45.6	19.13	118.4	40.3
Coeficiente de variación	0.018	0.36	0.146	0.037	0.170	0.044

El análisis de la variación de cada parámetro con la profundidad mostró que solo la humedad presenta correlación ($R = 0.65$) incrementándose en más de 10 %. El resto de los parámetros no presenta correlación con la profundidad.

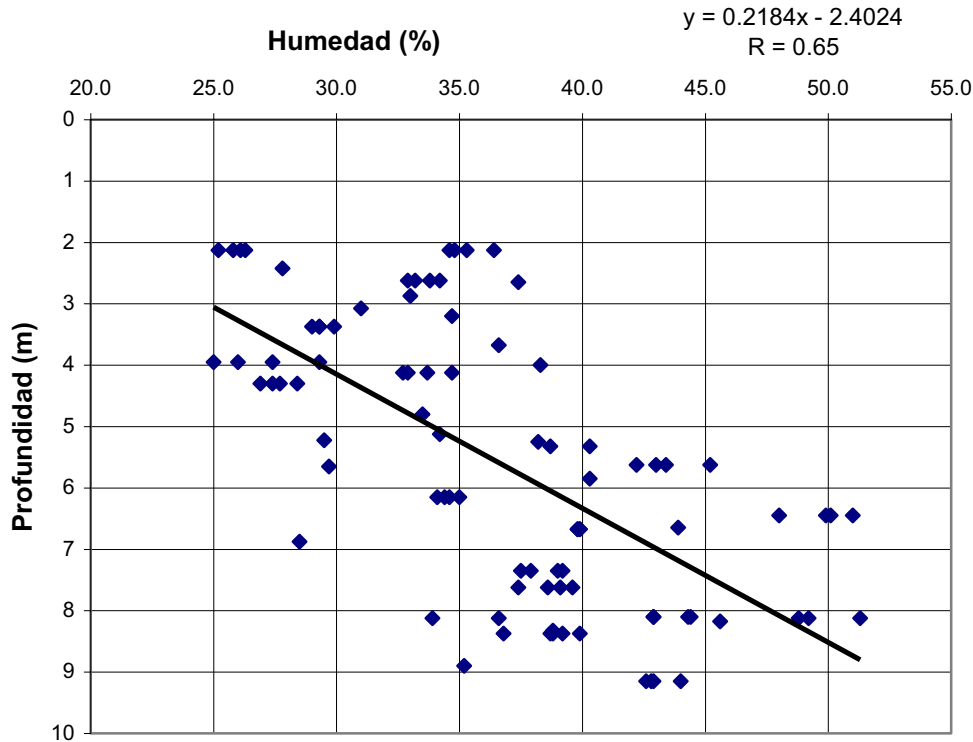


Gráfico 2.3 Correlación entre la humedad natural y la profundidad.

Todos los parámetros presentan una distribución normal determinado mediante la utilización de los coeficientes de asimetría y curtosis estandarizados.

El coeficiente de variación de los parámetros del suelo en todos los casos es inferior al valor límite (León González, Miguel; 1977)⁹, excepto en el límite líquido y el peso específico relativo donde es ligeramente superior.

2.3.3 Área del Centro Nacional de Biopreparados.

Ubicado en el municipio Bejucal, de la provincia de La Habana, la investigación para el diseño de la cimentación del Instituto de Riego y Drenaje (de las Cuevas, C. 1983)⁶ se realizó mediante

Análisis y clasificación geotécnica de la formación Guevara.

la perforación de calas. Se ensayaron 47 muestras de suelo, de 13 calas. A continuación el tratamiento estadísticos de los parámetros físicos que caracterizan los suelos.

Tabla 2.3 Valores estadísticos de las características físicas de las arcillas en el Centro Nacional de Biopreparados.

Centro Nacional de Biopreparados	Peso específico relativo	% de arcilla (< 0.002)	Humedad (%)	Peso específico natural (kN/m ³)	Limite Líquido (%)	Limite Plástico (%)
n	21	9	16	9	22	23
Media	2.77	47	36.04	18.16	87.7	35.2
Desviación estándar	0.048	14.380	4.188	0.813	19.534	5.066
Varianza de la muestra	0.002	206.778	17.546	0.661	381.604	25.661
Curtosis	-0.585	-0.110	-0.009	0.538	-0.820	-0.032
Coefficiente de asimetría	0.399	0.911	0.861	-0.725	0.752	0.549
Rango	0.17	42	14.4	2.57	62.2	19.7
Mínimo	2.7	33	30.6	16.57	64	26
Máximo	2.87	75	45.0	19.14	126.2	45.7
Coefficiente de variación	0.017	0.30	0.116	0.044	0.222	0.144

Todos los parámetros presentan una distribución normal determinado mediante la utilización de los coeficientes de asimetría y curtosis estandarizados.

El coeficiente de variación en todos los casos es inferior al valor límite (León González, Miguel; 1977)⁹, excepto en el límite líquido y el peso específico relativo, donde es superior debido a la presencia de algunos valores altos.

El análisis de la variación de cada parámetro con la profundidad, mostró que no presentan correlación.

2.3.4 Área de la Comunidad Desembarco del Granma.

Ubicado en el municipio Nueva Paz, de la provincia de La Habana, la investigación para el diseño de la cimentación de la Comunidad Desembarco del Granma (Martínez, E. 1992)¹⁰ se realizó mediante la perforación de calas. Se ensayaron 22 muestras de suelo, de 26 calas.

A continuación el tratamiento estadísticos de los parámetros físicos que caracterizan los suelos.

Tabla 2.4 Valores estadísticos de las características físicas de las arcillas en la Comunidad Desembarco del Granma.

Comunidad Desembarco del Gramma	Peso específico Relativo de los sólidos	% de arcilla (< 0.002 mm)	Humedad (%)	Peso específico natural (kN/m ³)	Límite Líquido (%)	Límite Plástico (%)
n	15	10	8	8	6	7
Media	2.75	84.3	38.2	18.2	86.0	35.1
Desviación estándar	0.020	6.700	2.965	0.398	7.520	3.511
Varianza de la muestra	0.0004	44.900	8.793	0.159	56.558	12.326
Curtosis	-1.360	0.045	-1.897	-0.715	1.773	-2.092
Coeficiente de asimetría	0.210	-0.848	0.033	-0.588	0.508	0.357
Rango	0.06	20	7.7	1.13	23.0	8.3
Mínimo	2.73	73	34.4	17.51	75.5	31.3
Máximo	2.79	93	42.1	18.64	98.5	39.6
Coeficiente de variación	0.007	0.079	0.077	0.021	0.087	0.100

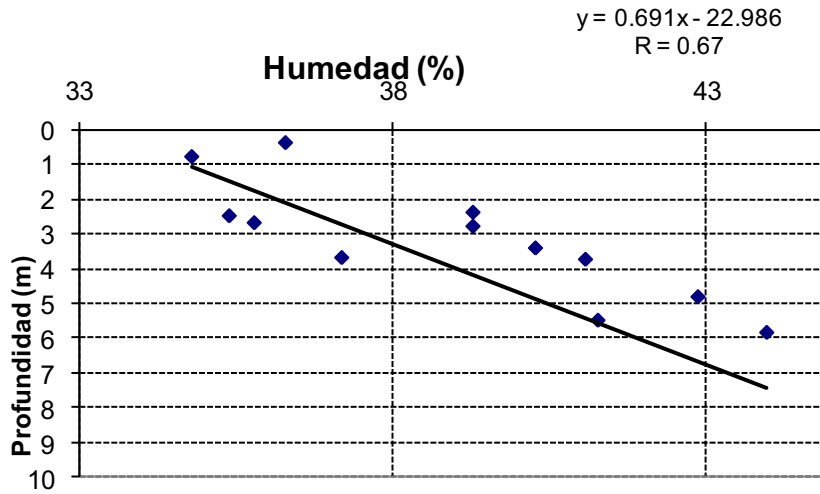


Gráfico 2.4 Correlación entre la humedad natural y la profundidad.

El análisis de la variación de cada parámetro con la profundidad muestra que la humedad presenta cierta correlación ($R = 0.67$), incrementándose en más de 10 %. Aunque se observa correlación ($R = 0.89$) del Límite Líquido, la cantidad de valores involucrados (6) le resta confiabilidad. Con menor correlación ($R = 0.65$) se encuentra el Límite Plástico.

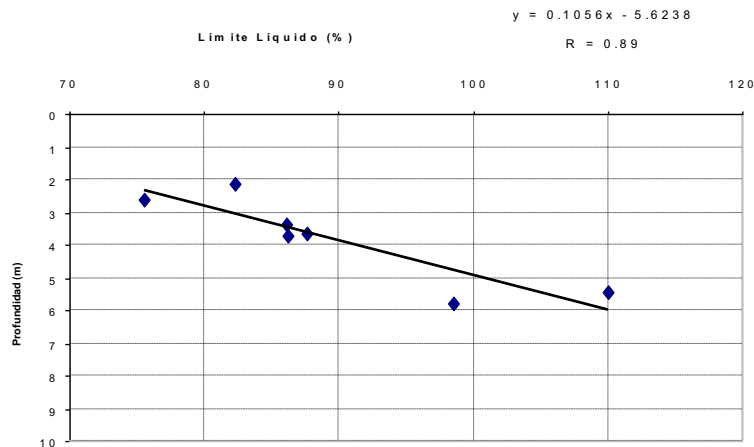


Gráfico 2.5 Correlación entre el límite líquido y la profundidad.

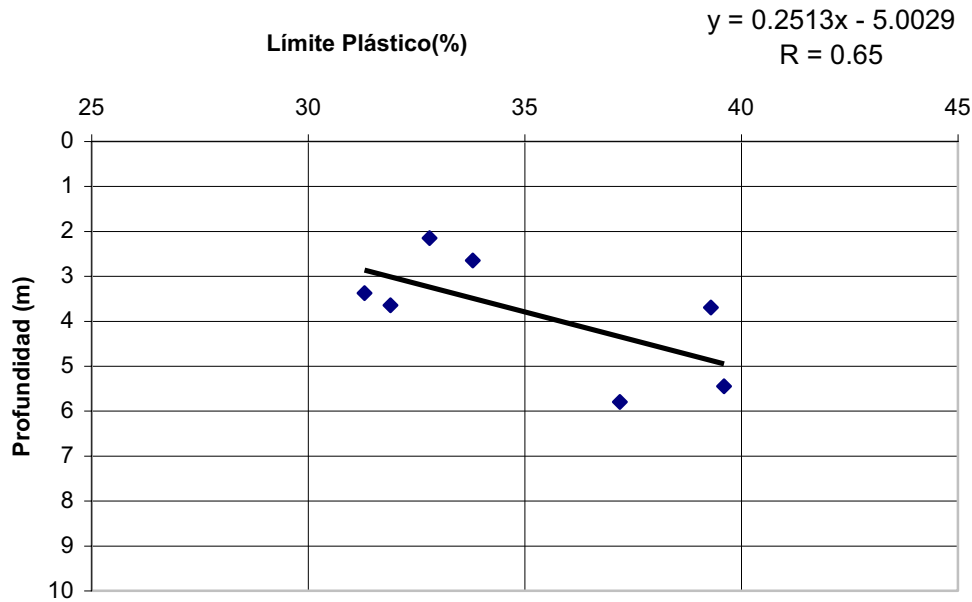


Gráfico 2.6 Correlación entre el límite plástico y la profundidad.

Todos los parámetros presentan una distribución normal determinado mediante la utilización de los coeficientes de asimetría y curtosis estandarizados.

El coeficiente de variación de los parámetros del suelo es inferior al valor límite (León González, Miguel; 1977)⁹ en todos los casos.

2.3.5 Área de la Obra Antenas Bauta.

La investigación para el diseño de la cimentación de un campo de antenas (Hernández, E. 2003)⁷ ubicado en el municipio Bauta de la provincia de La Habana, se realizó mediante la perforación de calas. Se ensayaron 21 muestras de suelo de 38 calas. A continuación el tratamiento estadísticos de los parámetros físicos que caracterizan los suelos.

Tabla 2.5 Valores estadísticos de las características físicas de las arcillas en el área de Antenas Bauta.

Antenas Bauta	Peso específico Relativo de la masa de suelo	% de arcilla (< 0.002 mm)	Humedad (%)	Peso específico natural (γ_f en kN/m^3)	Límite Líquido (%)	Límite Plástico (%)
n	6	10	18	18	10	10
Media	2.75	78	30.4	18.70	82.95	32.83
Desviación estándar	0.102	9.214	3.605	0.636	19.849	2.742
Varianza de la muestra	0.010	84.889	13.002	0.404	393.974	7.518
Curtosis	-2.036	-2.093	-1.382	0.298	-0.632	0.400
Coeficiente de asimetría	0.345	-0.144	0.131	0.717	0.269	0.429
Rango	0.25	22	11.6	2.38	59.8	9.6
Mínimo	2.64	67	25.0	17.82	54.2	28.6
Máximo	2.89	89	36.6	20.2	114	38.2
Coeficiente de variación	0.037	0.11	0.118	0.033	0.239	0.084

El análisis de la variación de cada parámetro con la profundidad indica que el peso específico natural de la masa de suelos presenta correlación ($R = 0.71$). También se observa correlación ($R = 0.72$) del Límite Líquido. El resto de los parámetros no presenta correlación con la profundidad.

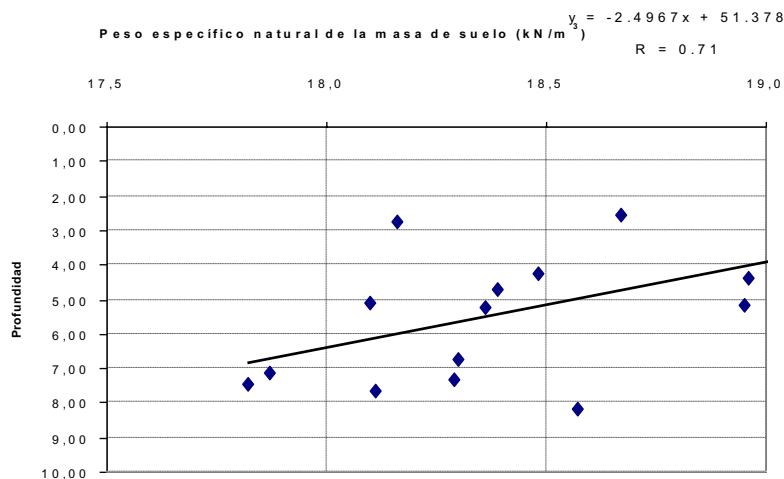


Gráfico 2.7 Correlación entre el peso específico natural de la masa de suelo y la profundidad.

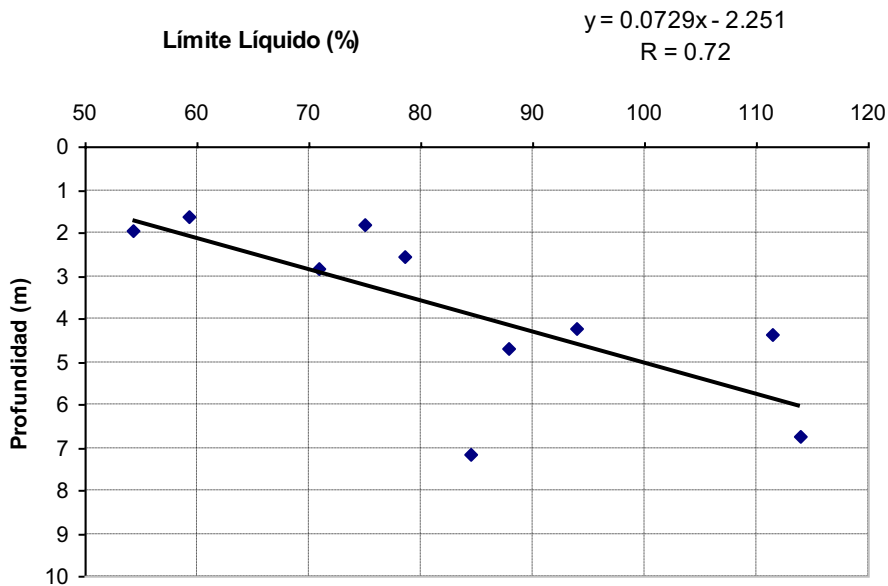


Gráfico 2.8 Correlación entre el límite líquido y la profundidad.

Todos los parámetros presentan una distribución normal determinado mediante la utilización de los coeficientes de asimetría y curtosis estandarizados.

El coeficiente de variación en todos los casos es inferior al valor límite (León González, Miguel; 1977)⁹ excepto en el límite líquido donde aparecen algunos valores elevados.

2.4 Análisis del Coeficiente de Variación de las obras estudiadas.

Como se aprecia en la Tabla 2.6 el coeficiente de variación de los parámetros físicos del suelo analizado por obra, no se comporta uniformemente. En este análisis sobresale el Límite Líquido con un valor del Coeficiente de Variación superior al recomendado (León González, Miguel; 1977)⁹, que en algunas muestras le proporciona valores altos y por tanto una distribución no simétrica. El peso específico presenta un Coeficiente de variación ligeramente superior debido al contenido de minerales ferrosos de algunas muestras. Valores inferiores al recomendado (León González, Miguel; 1977)⁹ se obtuvieron de la Humedad, Peso Específico de la masa de suelo y el Límite Plástico, en todas las obras.

Análisis y clasificación geotécnica de la formación Guevara.

Tabla 2.6 Características del Coeficiente de Variación por Obra.

Propiedad Obra	Peso específico Relativo de los sólidos	% de arcilla (< 0.002 mm)	Humedad (%)	Peso específico de la masa de suelo	Límite Líquido	Límite Plástico
CENSA	0.008	0.25	0.080	0.020	0.168	0.115
Instituto de Riego y Drenaje	0.018	0.36	0.156	0.029	0.170	0.091
Centro Nacional Biopreparados	0.017	0.30	0.125	0.048	0.237	0.144
Comunidad Desembarco del Granma	0.009	0.08	0.077	0.021	0.127	0.100
Antenas Bauta	0.037	0.11	0.114	0.032	0.239	0.084
Promedio	0.0178	0.22	0.11	0.03	0.188	0.107
Valores Recomendados (León González, Miguel; 1977).	0.01	-	0.15	0.05	0.15	0.15

2.5 Conclusiones parciales.

Del análisis de los datos consultados podemos considerar lo siguiente:

1. El análisis de la distribución de los datos de cada parámetro por obra, determinado mediante la utilización de los coeficientes de asimetría y curtosis estandarizados, permitió definir que todos los parámetros siguen una distribución normal.
2. Solo la humedad en tres obras y los límites de consistencia en dos obras presentan correlación con la profundidad, con una tendencia al incremento de los valores entre 5 y 10 %.
3. El límite líquido presenta un coeficiente de variación superior al valor límite (León González, Miguel; 1977)⁹. Consideramos que en este resultado influye su composición mineralógica, aunque demostrar esto no es objetivo de este trabajo.
4. El Peso Específico de los Sólidos presenta un Coeficiente de Variación ligeramente superior al valor límite (León González, Miguel; 1977)⁹.

Análisis y clasificación geotécnica de la formación Guevara.

5. El Coeficientes de Variación promedio de del Peso Específico Natural, Humedad y Límite Plástico de los suelos es inferior al valor límite (León González, Miguel; 1977)⁹.
6. La Precisión de la Estimación del Peso Específico Natural de los suelos es muy inferior al valor recomendado en casi todas las obras.

CAPÍTULO III. EVALUACIÓN GENERAL.

CAPITULO 3. EVALUACIÓN GENERAL.

3.1. Evaluación de las propiedades físicas generales.

En esta parte del capítulo se evalúan las características físicas de la formación, utilizando como muestra todos los resultados de los ensayos recopilados en la base de datos. Cada característica se evalúa estadísticamente utilizando el programa STATGRAPHICS Plus, identificaron valores atípicos utilizando los test de Gubbs y Dixon, que en este caso pueden estar relacionados con otro tipo de suelo, desecación del suelo por pérdida de humedad o incorporación de humedad durante la extracción de la muestra de suelo. Posteriormente se determinaron los valores de la media, desviación estándar, varianza de la muestra, curtosis, asimetría, rango, mínimo, máximo, coeficiente de variación y precisión de la estimación. En el programa se ofrecen criterios sobre la normalidad de la distribución de los datos mediante la evaluación de la curtosis y asimetría normalizadas. Valores de ambos estadísticos fuera del rango de -2 a +2 indican alejamiento importante de la distribución normal.

3.1.1 Humedad.

Los valores que aparecen en la Tabla 3.1 se obtuvieron de los ensayos de humedad después eliminar 8 valores atípicos. Los valores eliminados corresponden con muestras de suelo muy húmedas o muy secas lo que sugiere alteración en el muestreo o en su manipulación posterior. Por el valor de la curtosis estandarizada los datos presentan una distribución normal. El valor del coeficiente de asimetría estandarizado no está dentro del rango esperado para los datos de una distribución normal. Se obtuvo un coeficiente de variación de 0.154 el cual es similar al valor límite recomendado (León González, Miguel; 1977)⁹.

Tabla 3.1 Características estadísticas de la humedad (%).

No	Característica	Valor
1	Cantidad de valores	453
2	Media	35.17
2	Desviación estándar	5.437
3	Varianza	29.565
4	Curtosis estandarizada	1.547
5	Asimetría estandarizada	5.666
6	Rango	29.6
7	Valor mínimo	22.0
8	Valor Máximo	51.6
9	Coeficiente de variación	0.154

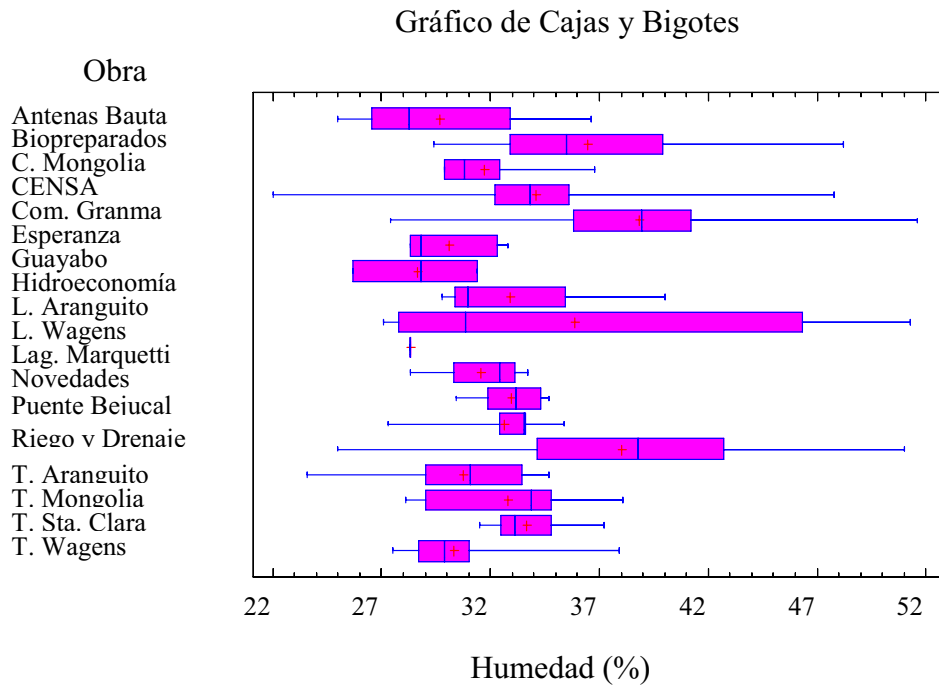


Gráfico 3.1 Gráfico de caja y bigote de la humedad.

Análisis y clasificación geotécnica de la formación Guevara.

En el Gráfico 3.1 se aprecia la distribución de los valores de todas las obras analizadas. La humedad de estos suelos varía en un amplio rango. Según se obtuvo en el capítulo anterior, los valores mayores de humedad se obtienen a profundidades mayores y los valores menores cerca de la superficie, donde influye la desecación por elevadas temperaturas. Los resultados de este trabajo no explican aún, las variaciones y tendencias de la humedad por obra.

3.1.2 Contenido de arcilla.

La variación del contenido de arcilla de estos suelos aparecen en la Tabla 3.2. Aquí aparecen todos los valores de la muestra estadística. El análisis de los datos no mostró valores atípicos. Por el valor de la curtosis estandarizada (-0.74) los datos presentan una distribución normal. El valor del coeficiente de asimetría estandarizado no está dentro del rango esperado para los datos de una distribución normal. Se obtuvo un coeficiente de variación de 0.27.

Tabla 3.2 Características estadísticas del contenido de arcilla (%).

No	Característica	Valor
1	Cantidad de valores	174
2	Media	69
2	Desviación estándar	19.186
3	Varianza	368.12
4	Curtosis estandarizada	-0.745
5	Asimetría estandarizada	-4.297
6	Rango	73
7	Valor mínimo	25
8	Valor Máximo	98
9	Coeficiente de variación	0.27

Obra

Gráfico de Cajas y Bigotes

Antenas Bauta
 Biopreparados
 C. Mongolia
 CENSA
 Com. Granma
 Esperanza
 Guayabo
 Hidroeconomía
 L. Aranguito
 L. Wagens
 Lag. Marquetti
 Novedades
 Puente Bejucal
 Riego y Drenaje
 T. Aranguito
 T. Mongolia
 T. Sta. Clara
 T. Wagens

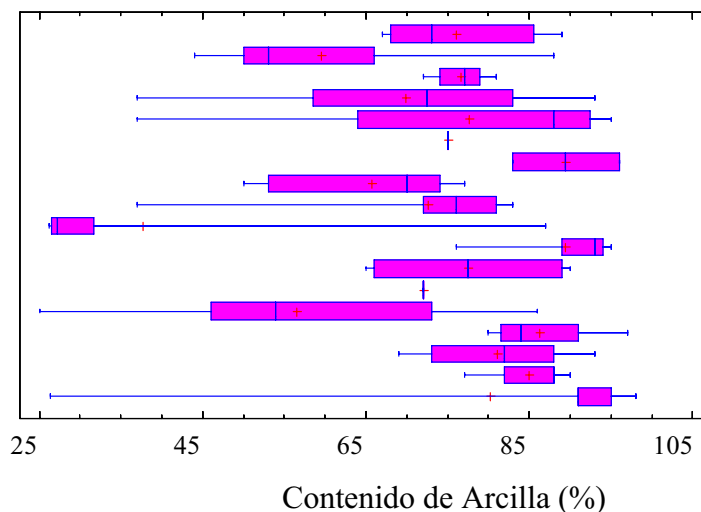


Gráfico 3.2 Gráfico de caja y bigote del contenido de arcilla.

En el Gráfico 3.2 se aprecia la distribución de los valores de todas las obras analizadas. El contenido de arcilla de los suelos es mayor del 50 por ciento en la mayoría de las muestras analizadas; sin embargo, en algunas muestras disminuye considerablemente. Se observa un comportamiento atípico en la obra Laguna Wagens, sin embargo las variaciones granulométricas de los suelos pueden estar influenciadas por los procesos de sedimentación locales, durante la formación de los suelos, propiciando tales variaciones.

3.1.3 Peso específico natural de la masa de suelo.

Los valores que aparecen en la Tabla 3.3 se obtuvieron de los ensayos de peso específico natural de la masa de suelo después de eliminar 6 valores atípicos. Los valores eliminados corresponden con muestras de suelo de muy bajo peso específico, fundamentalmente. Por el valor de la curtosis y asimetría estandarizadas los datos presentan una distribución normal. Se obtuvo un coeficiente de variación de 0.043 el cual es inferior al valor límite recomendado (León González, Miguel; 1977)⁹.

Tabla 3.3 Características estadísticas del peso específico natural de la masa de suelo (kN/m^3).

No	Característica	Valor
1	Cantidad de valores	439
2	Media	18.27
2	Desviación estándar	0.789
3	Varianza	0.623
4	Curtosis estandarizada	0.265
5	Asimetría estandarizada	-1.974
6	Rango	4.7
7	Valor mínimo	15.9
8	Valor Máximo	20.6
9	Coeficiente de variación	0.043

Gráfico de Cajas y Bigotes

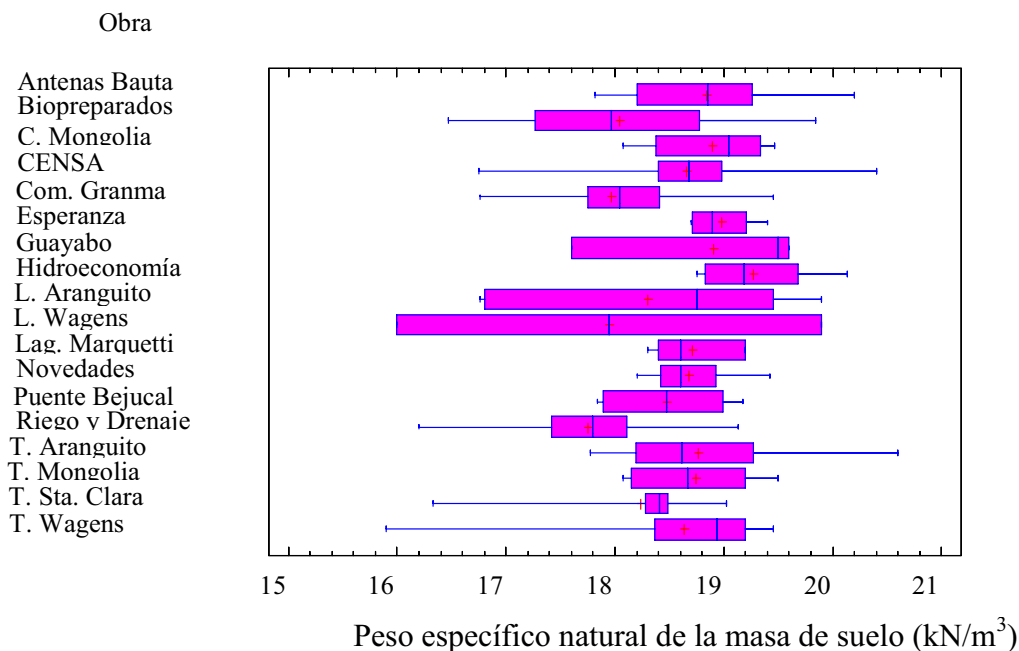


Gráfico 3.3 Gráfico de caja y bigote del peso específico natural de la masa de suelo.

Análisis y clasificación geotécnica de la formación Guevara.

En el Gráfico 3.3 se aprecia la distribución de los valores de todas las obras analizadas. La variación de los valores de medida de tendencia central del peso específico natural de la masa de suelo, se concentran entre 18 kN/m^3 y 20 kN/m^3 . Como caso atípico pudiera considerarse los suelos en la Laguna Wagens por la escasa concentración de los valores.

3.1.4 Límite Líquido.

Los valores que aparecen en la Tabla 3.4 se obtuvieron de los ensayos de límite líquido después de eliminar un valor atípico. El valor eliminado corresponde con una muestra de suelo de muy alto límite líquido. Por el valor de la curtosis estandarizada los datos presentan una distribución normal. El valor del coeficiente de asimetría estandarizado no está dentro del rango esperado para los datos de una distribución normal (-2 a + 2). Se obtuvo un coeficiente de variación de 0.22 el cual es superior al valor límite recomendado (León González, Miguel; 1977)⁹.

Tabla 3.4 Características estadísticas del Límite Líquido de los suelos (%).

No	Característica	Valor
1	Cantidad de valores	201
2	Media	78.53
2	Desviación estándar	17.344
3	Varianza	300.841
4	Curtosis estandarizada	-0.586
5	Asimetría estandarizada	3.432
6	Rango	88.1
7	Valor mínimo	38.1
8	Valor Máximo	126.2
9	Coeficiente de variación	0.221

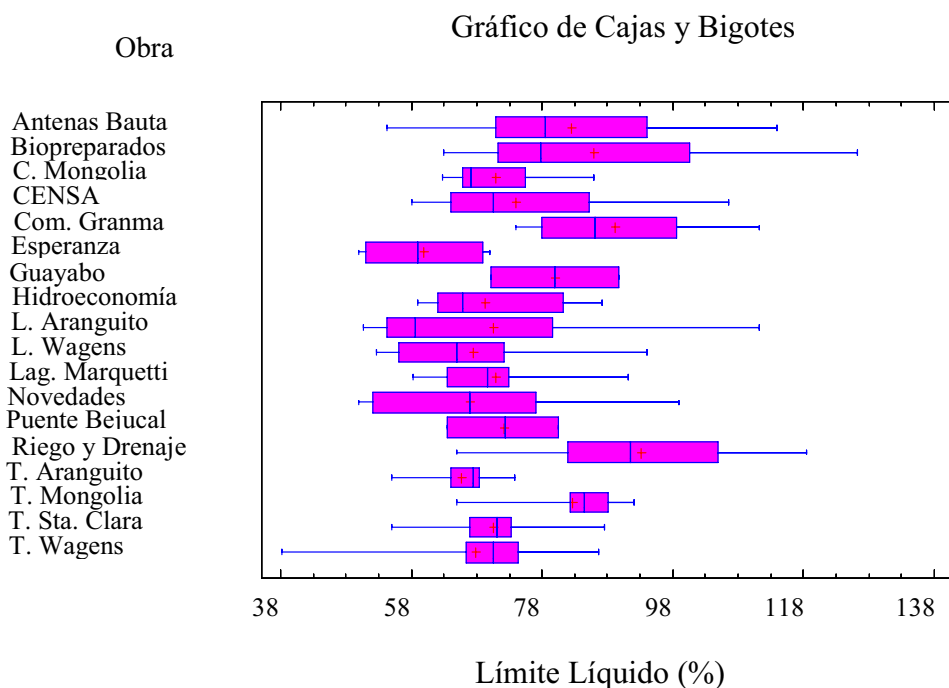


Gráfico 3.4 Gráfico de caja y bigote del Límite Líquido de los suelos.

En el Gráfico 3.4 se aprecia la distribución de los valores de todas las obras analizadas. Los valores de medida de la tendencia central de la muestra están dentro del rango esperado para este tipo de suelo. Los valores altos, obtenidos en algunas muestras, pudieran asociarse a un alto contenido de minerales arcillosos del grupo de las esmectitas.

3.1.5 Límite Plástico.

Los valores que aparecen en la Tabla 3.5 se obtuvieron de los ensayos de límite plástico después sin eliminar valores atípicos. Por el valor de la curtosis estandarizada los datos presentan una distribución normal. El valor del coeficiente de asimetría estandarizado no está dentro del rango esperado para los datos de una distribución normal. Se obtuvo un coeficiente de variación de 0.135 el cual es inferior al valor límite recomendado (León González, Miguel; 1977)⁹.

Análisis y clasificación geotécnica de la formación Guevara.

Tabla 3.5 Características estadísticas del Límite Plástico de los suelos (%).

No	Característica	Valor
1	Cantidad de valores	203
2	Media	33.86
2	Desviación estándar	4.603
3	Varianza	21.187
4	Curtosis estandarizada	-0.226
5	Asimetría estandarizada	2.777
6	Rango	25.5
7	Valor mínimo	21.9
8	Valor Máximo	47.4
9	Coefficiente de variación	0.135

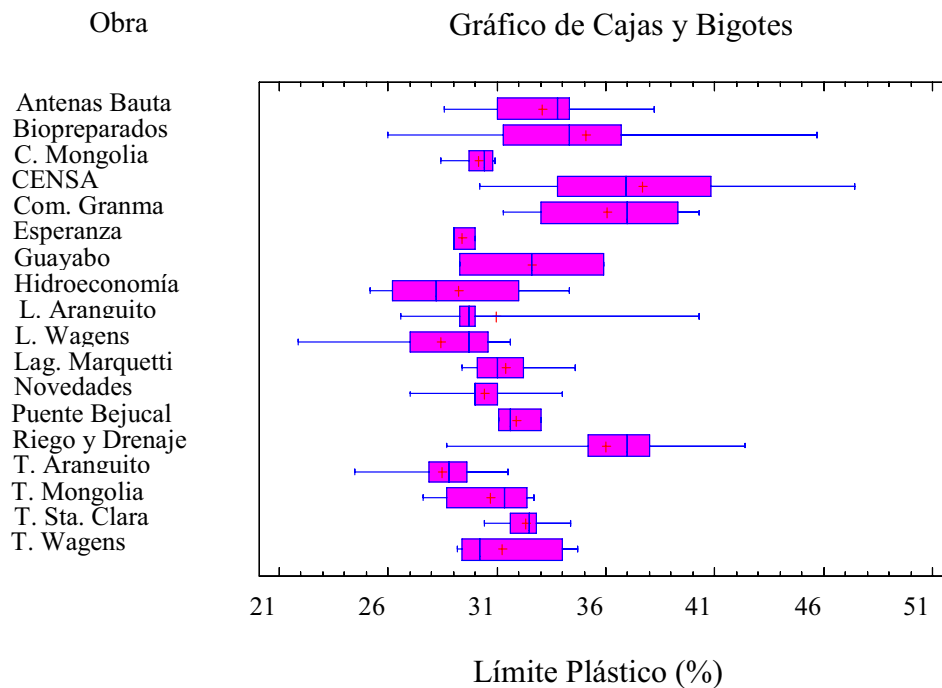


Gráfico 3.5 Gráfico de caja y bigote del Límite Plástico de los suelos.

Análisis y clasificación geotécnica de la formación Guevara.

En el Gráfico 3.5 se aprecia la distribución de los valores de todas las obras analizadas. Los valores de medida de la tendencia central de la muestra están dentro del rango esperado para este tipo de suelo.

3.1.6 Peso específico relativo de los sólidos.

Los valores que aparecen en la Tabla 3.6 se obtuvieron de los ensayos de peso específico de las partículas sólidas del suelo sin eliminar valores atípicos.

Por el valor de la curtosis y asimetría estandarizadas los datos presentan una distribución normal. Se obtuvo un coeficiente de variación de 0.018 el cual es similar al valor límite recomendado (León González, Miguel; 1977)⁹.

Tabla 3.6 Características estadísticas del peso específico de los sólidos.

No	Característica	Valor
1	Cantidad de valores	187
2	Media	2.77
2	Desviación estándar	0.051
3	Varianza	0.0026
4	Curtosis estandarizada	-0.510
5	Asimetría estandarizada	-1.327
6	Rango	0.27
7	Valor mínimo	2.62
8	Valor Máximo	2.89
9	Coeficiente de variación	0.0184

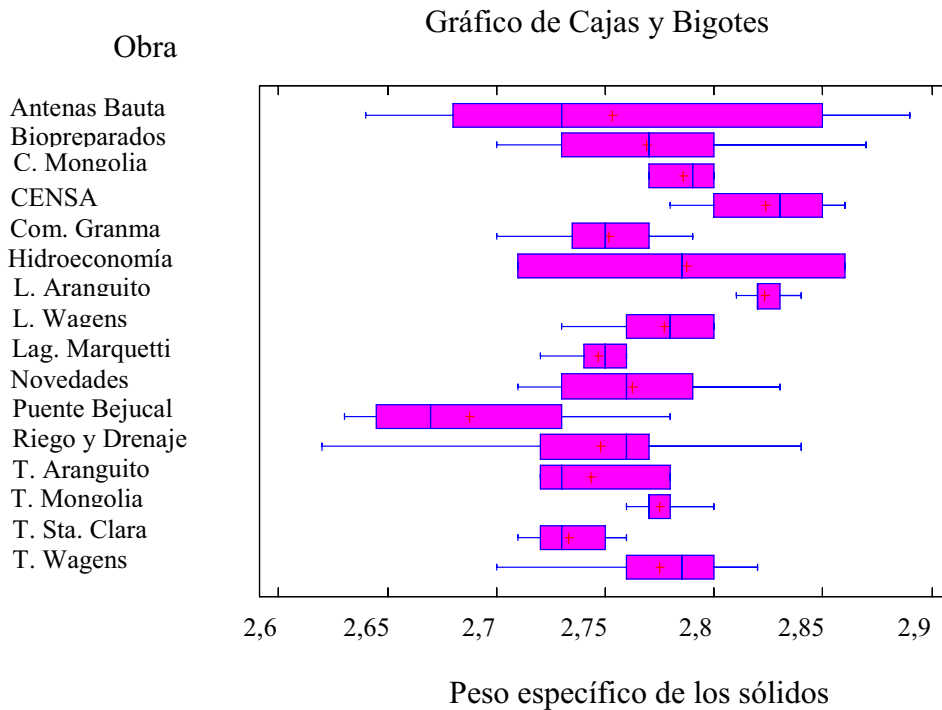


Gráfico 3.6 Gráfico de caja y bigote del peso específico de los sólidos.

En el Gráfico 3.6 se aprecia la distribución de los valores de todas las obras analizadas. En el valor del peso específico de los sólidos influye el contenido de nódulos ferríticos en el suelo. En una obra pueden obtenerse muestras con diferente contenido de nódulos ferríticos, propiciando rangos amplios de variación del peso específico de los sólidos.

3.2 Variación en profundidad de los parámetros físicos del suelo.

Como parte del trabajo se evaluó la variación en profundidad de los parámetros analizados, mediante las herramientas del programa Excel, utilizando todos los resultados de los ensayos recopilados en la base de datos.

En el análisis de todos los datos no se observó correlación entre la los parámetros del suelo con la profundidad. Sin embargo se aprecian algunas tendencias que se comentan a continuación.

En las correlaciones, los valores de humedad menores de 30 % solo aparecen por encima de 8 m, lo que pudiera ser una influencia de la desecación de los suelos en la zona de alteración.

Se puede observar que los valores altos de peso específico natural de la masa de suelo (mayores de $19,3 \text{ kN/m}^3$) aparecen por encima de 6.0 m de profundidad, lo que pudiera estar relacionado con el mayor contenido de concreciones ferrosas que se forma en la parte superior de la zona de alteración de los suelos.

3.3 Clasificación de los suelos

En base a los resultados del procesamiento estadístico de los resultados de todos los ensayos de humedad, límite plástico y límite líquido de la formación Guevara; se ha valorado la consistencia y actividad coloidal de estos suelos, y su ubicación en la carta de plasticidad, para completar su clasificación.

3.3.1 Índice de Consistencia (IC).

Este parámetro (variable) queda definido por:

$$\text{Índice de Consistencia (Ic)} = (\text{Límite Líquido} - \text{humedad natural}) / \text{Índice de plasticidad}$$

De los valores promedios de humedad natural, límite plástico y límite líquido de los suelos de la formación Guevara, el Índice de Consistencia se evalúa como sigue:

$$Ic = (78.5 - 35.2) / 44.6 = 0.97 \text{ (Consistencia dura)}$$

El tratamiento estadístico de los valores del Índice de Consistencia obtenidos al evaluar cada muestra se refleja a continuación.

Tabla 3.7 Características estadísticas del Índice de Consistencia de los suelos.

No	Característica	Valor
1	Cantidad de valores	186
2	Media	1.04
2	Desviación estándar	0.202
3	Varianza	0.041
4	Curtosis	1.656
5	Asimetría	1.282
6	Rango	1.49
7	Valor mínimo	0.6
8	Valor Máximo	2.09
9	Coefficiente de variación	0.15

Como se aprecia en la Tabla 3.7, según el análisis de la curtosis y asimetría estandarizadas, la consistencia de los suelos sigue una distribución normal.

Los suelos clasifican de consistencia dura como promedio, según Anexo 5. Por su rango de variación clasifican de consistencia dura a muy dura.

3.3.2 Actividad coloidal (A).

Este parámetro (variable) queda definido por:

$$\text{Actividad coloidal} = \text{Índice plástico} / \% \text{ de partículas} < 0.002 \text{ mm.}$$

De los valores promedios del contenido de arcilla y el Índice de Plasticidad de los suelos de la formación Guevara se obtiene:

$$A = 44.6/69 = 0.64$$

El tratamiento estadístico de los valores de actividad coloidal evaluados por muestra se refleja a continuación.

Análisis y clasificación geotécnica de la formación Guevara.

Tabla 3.8 Características estadísticas de la actividad coloidal de los suelos.

No	Característica	Valor
1	Cantidad de valores	100
2	Media	0.729
2	Desviación estándar	0.494
3	Varianza	0.244
4	Curtosis	3.653
5	Asimetría	2.082
6	Rango	2.09
7	Valor mínimo	0.28
8	Valor Máximo	2.37
9	Coeficiente de variación	0.67

Como se aprecia en la Tabla 3.8 la actividad coloidal de los suelos no sigue una distribución normal. En estos valores de actividad coloidal influye decisivamente la composición mineralógica de los suelos y los procesos de caolinización debido al intemperismo. Aunque en la literatura se reconoce el valor de la actividad coloidal de la Ilita entre 0.5 y 1.0 (Bowles, J. E. 1984)¹¹, las determinaciones de los minerales arcillosos realizadas en los estudios geológicos no encontraron vestigios de este mineral en los suelos, por lo que pudiera ser un reflejo de la montmorillonita-caolinita surgida en el proceso de caolinización.

3.3.3 Clasificación de los suelos según la carta de plasticidad.

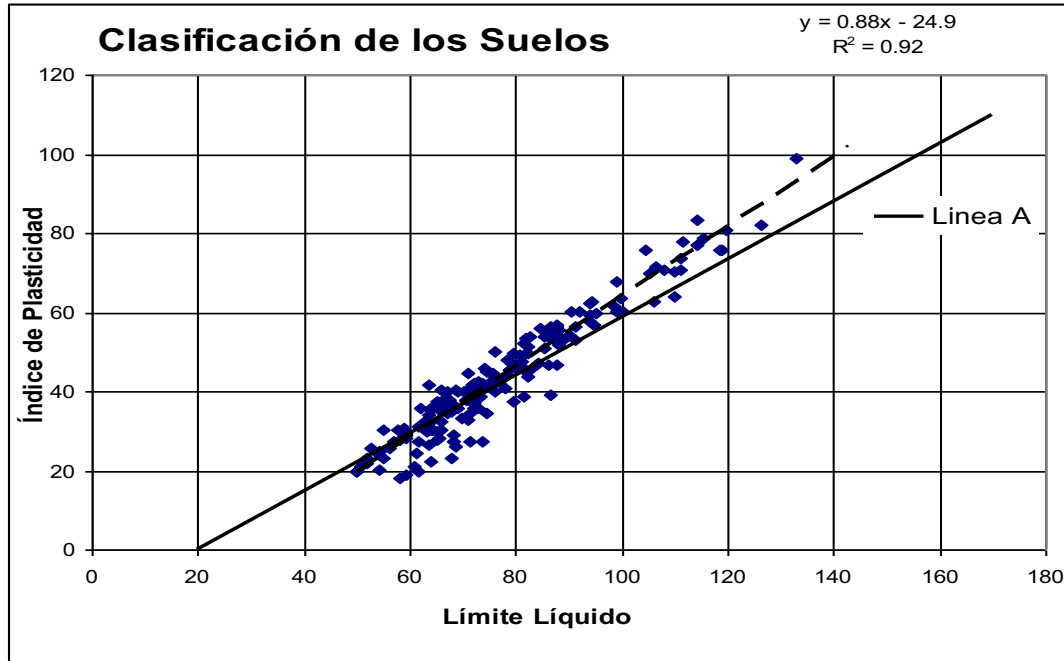


Gráfico 3.7 Clasificación de los suelos según carta de plasticidad.

Los suelos se ubican muy próximos a la línea A y clasifican como MH y CH cuando el límite líquido es inferior a 90 y CH cuando es superior.

3.4 Características mecánicas de las arcillas de la formación Guevara.

En este acápite se evalúan los resultados de los ensayos edométrico, triaxial rápido (UU) y cortante directo realizados a los suelos en las obras incluidas en la base de datos. Los resultados se evaluaron por muestra o de forma general, según se explica en cada caso.

3.4.1 Ensayo edométrico.

Se analizaron un total de 32 consolidaciones, de las cuales 28 llegaron a una presión de 800 kPa, 22 llegaron a 1 600 kPa y 12 se realizaron hasta 3 200 kPa. En la Tabla 3.9 se ofrece la variación de la relación de vacíos promedio, máxima y mínima.

Análisis y clasificación geotécnica de la formación Guevara.

Tabla 3.9 Variación promedio de la relación de vacíos.

Relación de vacíos Presión (kPa)	e_0	e_{50}	e_{100}	e_{200}	e_{400}	e_{800}	e_{1600}	e_{3200}
Media	0.985	0.959	0.969	0.955	0.931	0.888	0.858	0.825
Mínimo	0.805	0.805	0.804	0.803	0.794	0.698	0.692	0.675
Máximo	1.200	1.189	1.184	1.175	1.158	1.128	1.083	0.969

Como se aprecia, la disminución de la relación de vacíos en los ensayos edométricos solo alcanza un 20 %. Este valor resulta muy bajo para alcanzar la parte virgen de la curva de consolidación del suelo.

Tabla 3.10 Valoración de la Presión de Preconsolidación.

Presión de Preconsolidación (kPa)	Consolidaciones a 1 600 kPa (n = 15)	Consolidaciones a 3 200 kPa (n = 10)
Media	330	550
Mínimo	180	300
Máximo	580	720

Resulta significativo en la Tabla 3.10, el aumento de la supuesta presión de preconsolidación con el aumento de la presión del ensayo. Ello sugiere que a presiones mayores de 32000 kPa seguirá aumentando hasta alcanzar la zona virgen de la curva de consolidación donde se pudiera calcular la verdadera presión de preconsolidación.

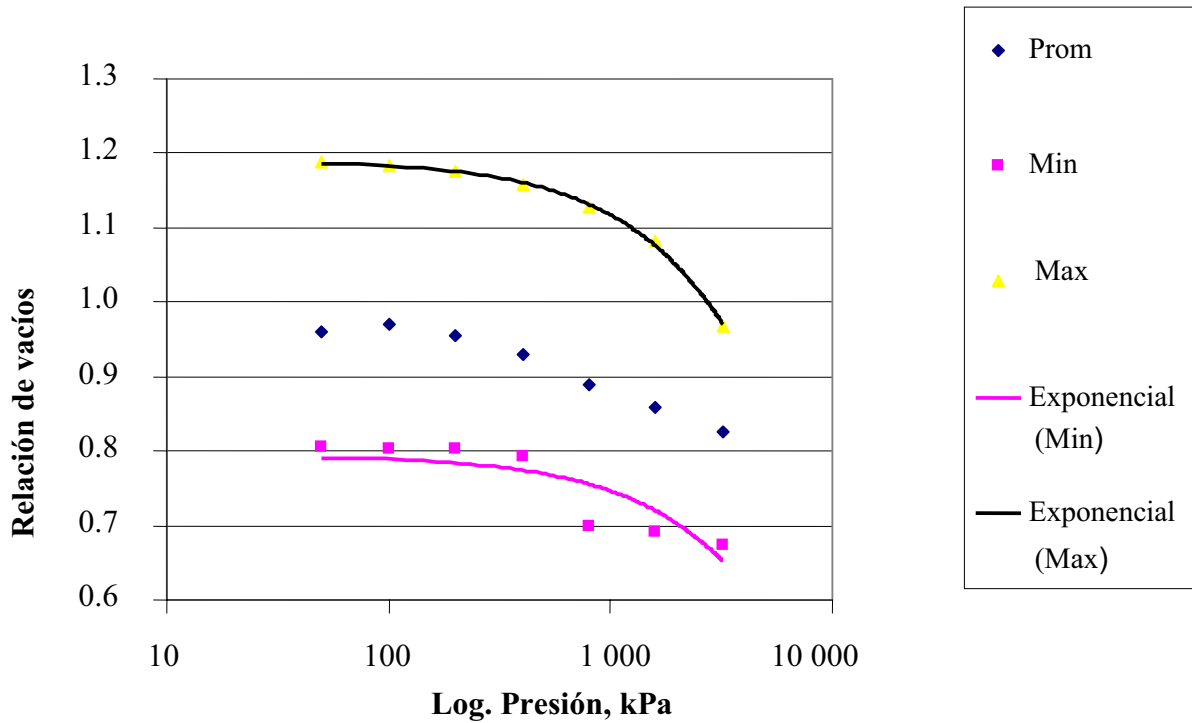


Gráfico 3.8 Gráfico resumen de las consolidación analizadas.

Tabla 3.11 Valoración del índice de compresión (C_c).

Índice de Compresión <small>Presión (kPa)</small>	C_{c800}	$C_{c1\,600}$	$C_{c3\,200}$
Media	0.11	0.14	0.17
Mínimo	0.03	0.04	0.06
Máximo	0.29	0.23	0.24

Tabla 3.12 Valores del índice de compresión que se espera de las arcillas de la formación Guevara, utilizando varias correlaciones:

Correlación (Bowles, J. E. 1984) ¹¹	Con valores Medios	Con valores Mínimos	Con valores Máximos
$C_c = 0.4(e_0 - 0.25)$	0.29	0.22	0.38
$C_c = 0.37(e_0 + 0.003WL - 0.34)$	0.32	0.23	0.44
$C_c = 0.4(e_0 + 0.001W_n - 0.25)$	0.31	0.23	0.40
$C_c = 1.21 + 1.055(e_0 - 1.87)$ Arcillas abigarradas de Sao Paulo	0.28	0.09	0.50
$C_c = 0.0046(WL - 9)$ Arcillas Brasileñas	0.29	0.21	0.46

Donde: WL es el límite líquido, W_n es la humedad natural y e_0 es la relación de vacíos inicial.

De la valoración de los datos resumidos en la Tabla 3.10, se aprecia que estas arcillas presentan una presión de preconsolidación muy elevada (mayor de 550 kPa) y que aún no se ha podido determinar su valor real debido a que aún con la presión de 3 200 kPa no se ha alcanzado la parte virgen de la curva de consolidación. Esto puede quedar evidenciado en las Tablas 3.11 y Tabla 3.12, al comparar los índices de compresión de las arcillas de la formación Guevara (0.17) con los pronosticados, utilizando correlaciones obtenidas en otros suelos (0.28 a 0.32).

En el análisis realizado hasta el presente se utilizó la teoría clásica de la Mecánica de Suelos que supone el suelo en un estado de saturación total, sin embargo estos suelos no están saturados y en su comportamiento bajo carga influye considerablemente las tensiones generadas por la succión (presión negativa). Evaluando en el laboratorio la variación de la succión con la humedad y otros parámetros necesarios; y aplicando las teorías del comportamiento de los suelos no saturados, desarrolladas recientemente, pudiera darse una explicación apropiada a la elevada preconsolidación de estos suelos y a su comportamiento bajo carga.

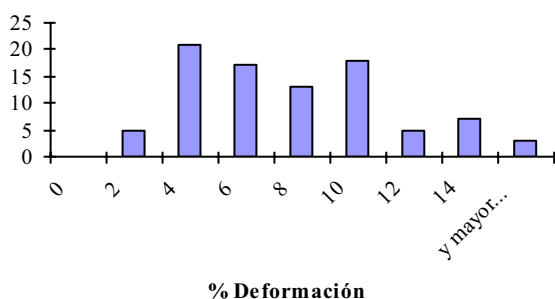
3.4.2 Ensayo Triaxial Rápido (UU).

Se analizaron un total de 81 especímenes ensayados con presiones de cámara entre 50 kPa y 400 kPa y saturaciones promedio de 94 %.

Tabla 3.13 Características estadísticas del resultado de los ensayos triaxial.

Característica estadística	Valores de las características estadísticas del esfuerzo desviador para cada presión de cámara. (kg/cm ²)						
	50 kPa	100kPa	150 kPa	200 kPa	250 kPa	300kPa	400kPa
Cantidad	14	15	16	13	6	7	3
Media	3.24	3.87	3.86	4.44	4.30	4.71	4.94
Varianza	1.621	2.593	2.044	1.357	0.833	1.010	2.366
Desviación típica	1.273	1.610	1.429	1.165	0.913	1.004	1.538
Mínimo	1.25	1.40	1.97	2.37	3.22	3.32	3.20
Máximo	5.00	6.92	7.96	5.97	5.45	6.39	6.12
Rango	3.75	5.52	5.99	3.6	2.23	3.07	2.92
Asimetría típica	0.100	0.121	2.411	-0.376	0.124	0.491	-1.420
Curtosis típica	-1.037	-0.575	2.957	-0.575	-0.852	0.107	---
Coefficiente de Variación	0.39	0.41	0.36	0.26	0.21	0.21	0.31

Histograma de la Deformación Unitaria



Análisis y clasificación geotécnica de la formación Guevara.

Gráfico 3.9 Histograma de la Deformación Unitaria.

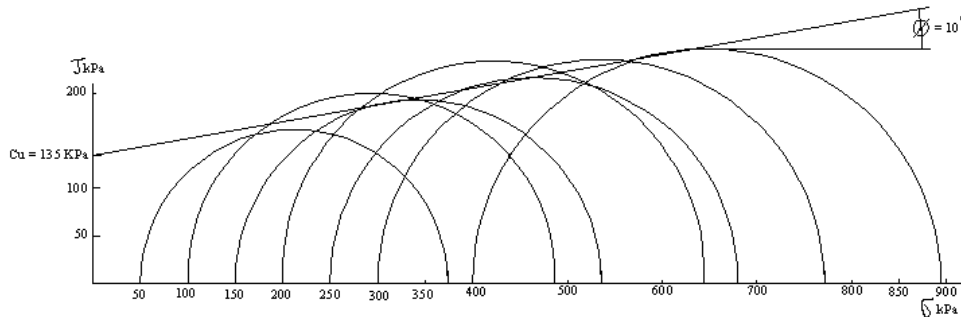


Gráfico 3.10 Envolvente de falla de los promedios de los ensayos de Triaxial Rápido (UU).

El comportamiento de los suelos en el ensayo triaxial rápido se corresponde con un suelo de consistencia dura y altamente preconsolidado. En la mayoría de los ensayos realizados, la deformación unitaria en la rotura varía entre 4% y 10%. Presenta una cohesión promedio de 135 kPa y un ángulo de fricción interna de 10.7 grados.

3.4.3 Ensayo Cortante Directo.

Se analizaron 39 ensayos de cortante directo (145 especímenes) realizados con presiones normales entre 50 kPa y 400 kPa. Los suelos presentan una saturación promedio de 91 %. Se realizó el análisis de dos maneras, evaluando los resultados individuales de cada espécimen y mediante el tratamiento de los resultados de la interpretación de cada ensayo (tres o cuatro especímenes).

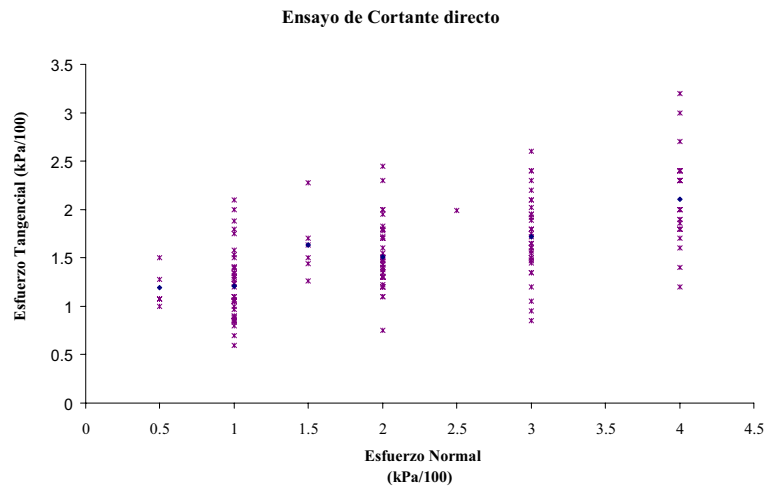


Gráfico 3.11 Resultados de los ensayos de Cortante Directo.

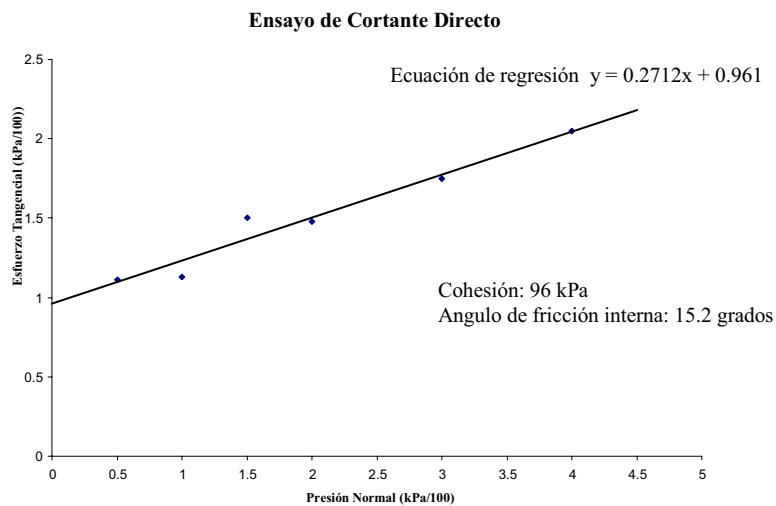


Gráfico 3.12 Envoltente de falla de los promedios de los ensayos de Cortante Directo.

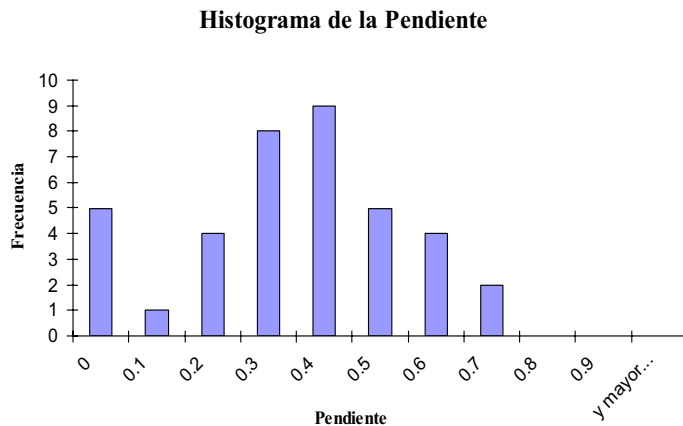


Gráfico 3.13 Histograma de la pendiente de la envolvente de falla de los ensayos de Cortante Directo.

Existe un pequeño grupo de muestras con valores de pendiente de la envolvente de falla muy bajas, que se apartan del comportamiento típico del suelo. Estos valores, aunque no se eliminaron del análisis deben ser tomados con cautela debido a que pudieran estar afectados por la alteración de la muestra.

3.4.4 Conclusiones parciales.

De los resultados obtenidos en el análisis se puede llegar a las siguientes conclusiones:

1. Los datos del peso específico natural y el peso específico de los sólidos del suelo presentan una distribución normal de acuerdo con el análisis de la Curtosis y la Asimetría.
2. Los datos de la humedad natural, el límite líquido, el límite plástico y el contenido de arcilla del suelo presentan una distribución normal de acuerdo con el análisis de la Curtosis y no normal de acuerdo con el análisis de la Asimetría. Las tendencias asimétricas de la distribución de estos últimos parámetros, fundamentalmente de los

límites de consistencia y el contenido de arcilla están determinadas, al parecer, por las variaciones en la composición mineralógica y granulométrica de los suelos.

3. Los valores promedios de los parámetros obtenidos del procesamiento estadístico se resumen en la siguiente tabla.

Tabla 3.15 Valores promedios de los parámetros del suelo.

Parámetro	Valor medio
Humedad (%)	35.17
Contenido de arcilla (%)	69
Peso específico natural (kN/m^3)	18.27
Límite líquido (%)	78.53
Límite plástico (%)	33.86
Peso específico de los sólidos	2.77
Índice de consistencia	1.04
Actividad coloidal	0.73

4. No se observó correlación de ningún parámetro con la profundidad.
5. Según la Carta de Plasticidad, el suelo clasifica como CH y MH para valores del límite líquido menores de 90 y CH para valores del límite líquido mayores de 90. Por su Índice de Consistencia son arcillas duras a muy duras.
6. La Actividad Coloidal (A) está condicionada por la composición mineralógica de las arcillas, fundamentalmente la montmorillonita-caolinita.
7. La humedad natural de los suelos presenta un Coeficiente de Variación de 0.154, similar al valor límite recomendado (León González, Miguel; 1977)⁹.
8. El peso específico natural de los suelos presenta un Coeficiente de Variación de 0.043, por debajo del valor límite recomendado (León González, Miguel; 1977)⁹.
9. El Límite Líquido de los suelos presenta un Coeficiente de Variación (0.22) superior al valor límite recomendado (León González, Miguel; 1977)⁹. La rama superior de la distribución de frecuencia se expande hasta valores de 126.2 % debido a la influencia de la fracción montmorillonítica presente en estas arcillas.
10. El Coeficiente de Variación del Límite Plástico de los suelos (0.135) es inferior al valor límite recomendado (León González, Miguel; 1977)⁹.

11. El Coeficiente de Variación del Peso Específico de los Sólidos (0.0184) es ligeramente superior al valor límite recomendado (León González, Miguel; 1977)⁹. Esto se relaciona, al parecer, con la presencia de minerales ferrosos en algunas muestras.
12. Estas arcillas presentan una presión de preconsolidación muy elevada (mayor de 550 kPa). En los ensayos edométricos con una presión de 3 200 kPa no se ha alcanzado aún la presión máxima que han soportado en su historia geológica.
13. Su comportamiento deformacional bajo carga se corresponde con un suelo de consistencia dura: altos valores de esfuerzo desviador, relación tensión deformación lineal y bajas deformaciones en la rotura (4 a 10 %) en el ensayo triaxial. Presenta una envolvente de rotura promedio con cohesión de 135 kPa y un ángulo de fricción interna de 10.7 grados.
14. Su comportamiento en el ensayo cortante directo se corresponde también, con un suelo altamente preconsolidado. Presenta una envolvente de rotura promedio con cohesión de 96 kPa y un ángulo de fricción interna de 15.2 grados.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones.

Primer Objetivo: Estimar mediante técnicas estadísticas los parámetros físicos y mecánicos de los suelos de la formación Guevara, mediante el uso de los ensayos de humedad, peso específico de la masa de suelo, peso específico de los sólidos, límite líquido, límite plástico, contenido de arcilla, cortante directo, triaxial rápido y edométrico.

Se estimaron los parámetros físicos que caracterizan los suelos de la formación Guevara, evaluando su comportamiento local (por obra) y de forma general (regional). Se utilizó como estadígrafo de comparación el Coeficiente de Variación, sobre el que existen criterios de análisis recogidos en la literatura consultada.

Los parámetros físicos promedios de los suelos de la formación Guevara y su coeficiente de variación se resumen en la siguiente tabla:

Parámetro	Valor promedio	Coeficiente de variación
Humedad (%)	35.17	0.154
Contenido de arcilla (%)	69.7	0.275
Peso específico natural (kN/m^3)	18.27	0.043
Límite líquido (%)	78.53	0.220
Límite plástico (%)	33.86	0.135
Peso específico de los sólidos	2.77	0.018
Índice de consistencia	1.04	0.150
Actividad coloidal	0.73	0.670

Los coeficientes de variación de los parámetros humedad natural, peso específico de la masa del suelo, peso específico de los sólidos y límite plástico son bajos; Los coeficientes de variación del límite líquido, contenido de arcilla y actividad coloidal son superiores a los límites recomendados en la literatura. La variación de la composición mineralógica de las arcillas determina este comportamiento.

Los suelos son preconsolidados, con una presión de preconsolidación promedio mayor de 550 kPa, por lo que bajo carga, las deformaciones siguen un comportamiento lineal.

Los valores promedios del ángulo de fricción interna y la cohesión, en tensiones totales, varían según el ensayo realizado para su determinación.

Ensayo Cortante Directo: cohesión de 96 kPa y ángulo de fricción interna de 15.2 grados.

Análisis y clasificación geotécnica de la formación Guevara.

Ensayo Triaxial Rápido: cohesión de 135 kPa y ángulo de fricción interna de 10.7 grados.

Segundo Objetivo: Clasificar y caracterizar geotécnicamente los suelos de esta formación geológica mediante la carta de plasticidad, el índice de consistencia y la actividad coloidal.

Para valores de límite líquido menores de 90 los suelos clasifican como CH o MH. Para valores de límite líquido mayores de 90 los suelos clasifican como CH.

Por su límite líquido los suelos clasifican de alta plasticidad. Por su consistencia son arcillas firmes a duras.

Recomendaciones.

1. Continuar la evaluación de la preconsolidación de los suelos realizando ensayos edométricos a presiones mayores de 3200 kPa para definir adecuadamente la parte virgen de la curva de consolidación.
2. Realizar ensayos según las normas ASTM D2325 y D5298 para determinar la succión de estos suelos y su variación con la humedad (curva característica) y generalizar su estudio como suelo no saturado.

BIBLIOGRAFÍA

Referencias Bibliográficas

1. I.P.Kartashov, N.A.Mayo, A.G.Cherniajovski, L.L.Peñalver, Descripción de algunas formaciones geológicas del Sistema Cuaternario de Cuba, reconocidas recientemente. Instituto de Geología y Paleontología. Academia de Ciencias de Cuba. La Habana, Ser. Geol, 26: 1-6. 1976.
2. Peñalver, Leandro Luís; Delgado, Rianza; Rodríguez, Luisa; Guillermo Pantaleón. Etapa I del proyecto: Mapa digital de los depósitos cuaternarios del archipiélago cubano a escala 1: 250 000. 2008.
3. Franco Alvarez G. L. Instituto de Geología y Paleontología. Léxico Estratigráfico de Cuba.1994.
4. de la Torre, Tomás. Informe Ingeniero Geológico CENSA. ENIA, 1971.
5. Ganchev, Vladimir. Informe Ingeniero Geológico, Instituto de Riego y Drenaje. ENIA, 1981.
6. de las Cuevas, Carlos. Informe Ingeniero Geológico C.N. de Biopreparado. ENIA, 1986.
7. Hernández, Eddy; Informe Ingeniero Geológico Antenas Bauta. ENIA, 2003.
8. Apolonia, Gasparre. Department of Civil and Environmental Engineering Imperial College London Thesis submitted to University of London in partial fulfilment for the degree of Doctor of Philosophy and for the Diploma of Imperial College London, Julio de 2005.

9. León González, Miguel. Tratamiento estadístico de las propiedades físico-mecánicas de los suelos. Revista Ciencias Técnicas, serie Ingeniería Estructural, Instituto Superior Politécnico “José Antonio Echeverría”, La Habana, 1978.
10. Martínez, Elena Informe Ingeniero Geológico Comunidad Desembarco del Granma. ENIA, 1993.
11. Bowles, J. E., Physical and Geotechnical Properties of Soils. McGraw-Hill Book Company. 1984.

Bibliografía.

1. Abalo Macias, Miguel; et al. Aplicación de la Mecánica teórica del suelo. Universidad de la Habana, La Habana 1968.
2. Acosta, Josefina. Informe Ingeniero Geológico Hotel Artemisa. ENIA, 1976.
3. Álcera, Alberto. Geotecnia para Ingenieros Civiles y Arquitectos. <http://hdl.handle.net/2099.1/3337> (15/09/07).
4. Álvarez Ávila, Eduardo G., Estudio de agrietamiento y retracción de las arcillas, aplicación a las arcillas de Bogotá, Tesis doctoral (Noviembre 2004).
5. Álvaro, Orlando. Patología de la arcilla. Enfoque geotécnico. www.garavito.colciencias.gov.co/pls/curriculola/gn_imprime.visualiza. (14/09/07)
6. Armas Novoa, R. y Horta Mestas, E. Presas de Tierra. Editorial ISPJAE. Cuba, 1987.
7. ARONOFF, S. *Geographic Information Systems: A management perspective*. Ottawa: WDL Publications. 1989.
8. ASTINI, R. Facies rojas con influencia de mareas y exposición subaérea en... www.sedimentologia.org.ar/ras/VII%20RAS. (14/09/07)

9. Barrera Bucio, Mauricio. Estudio experimental del comportamiento hidromecánico de suelos colapsables. Publicación Técnica N° 266 Sanfandía, Querétaro, México, 2004.
10. Berencie Rojas, Claudia (Colombia); Sausen, Tania (Brasil)...Detección de Arcillas Bentoníticas con la utilización de datos Aster.....(2006)
www.selper.org.co/PROGRAMA-FINAL-PONENCIAS-SEP16-2006/(14/09/07)
11. Bermúdez, H. A.; Allison, R. V. Los suelos de Cuba. La Habana Instituto Cubano del Libro, 375 pp. 1928, reedición 1972.
12. Bermúdez, Pedro J. Las Formaciones Geológicas de Cuba. La Habana Instituto Cubano de Recursos Minerales, 177 pp, 1 mapa. 1963.
13. BLIGHT, G.E. "Flow of Air Through Soils" en *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Divisions*, Proceedings of the American Society of Civil Engineers, Vol. 97, SM4. pp. 607-624. 1967.
14. Bochs Montoro, M.A. Camacho, E. García-Navarro y F.M. Alonso-Chaves Departamento de Geodinámico y Paleontología. *Geogaceta*, 39, "Características geotécnicas de los suelos en la ciudad de Huelva: Parámetros de identificación y ensayos de consolidación". 2006.
15. Bolaños, Elsa. Informe Ingeniero Geológico Puente Bejucal. ENIA, 1983.
16. BOLZON, G.; SCHREFLER, A. y ZIENCKIEWICZ, C. "Elastoplastic soil constitutive laws generalized to partially saturated states" en *Geotechnique*, Vol. 46. pp. 279-289. 1996.
17. Braja, M. Das. Principios de Ingeniería de Cimentaciones. Internacional Thomson Editores, Mexico. 2001.
18. Briel, Juana R. Informe Ingeniero Geológico Laguna de oxidación Wagenes. ENIA, 1992.
19. Cuaternario y Geomorfología (Rev. C&G) es una revista científica periódica, de carácter semestral, co-editada por la Asociación Española para el Estudio del...
www.revicien.net/revista.php?ID=11-22k. (20/09/07)
20. de la Torre, Tomás. Plan de clases de Mecánica de suelos 1, Capitulo 2,3 y 5. Facultad de construcciones, ISPJAE, 1967.

21. Delgado Martínez, Domingo. Arcillas expansivas. Tesis de Doctorado, Universidad Central de Villaclara. 2005.
22. DELGADO VARGAS, M. *Ingeniería de cimentaciones. Fundamentos e introducción al análisis geotécnico*. Colombia: Editorial Es. Colombiana. 2da edición. 541 p. 1999.
23. Díaz, Jesús. Informe Ingeniero Geológico Plan de Viviendas Guira de Melena. ENIA, 1978.
24. Edwin Rojas, T. Estudio de la Colapsibilidad de la Arcilla Porosa de Brasilia [www.xiiicpmsig.org/dynamicPage.asp?id=170 - 85k](http://www.xiiicpmsig.org/dynamicPage.asp?id=170-85k) (14/9/07).
25. Feitosa da Luz, Katharina, 2000, U.F.do Rio Grande, **Brasil**, SI, bivalvos ... **Arcillas rojas**, fangos calcáreos y fangos silíceos.
...[www.ege.fcen.uba.ar/programas/posgrado/Plancton bentos marino.doc](http://www.ege.fcen.uba.ar/programas/posgrado/Plancton_bentos_marino.doc) (15/9/07).
26. González Fonseca, Wilfredo; González López, Ramiro; Padrón Julio Cesar, Caracterización Geotécnica de las Formaciones Guevara y Villarroja. ENIA, 1999.
27. García, Maritza. Informe Ingeniero Geológico Planta de Bioplaguicidas Labiofam. ENIA, 2002.
28. Geotecnia. Clasificación geotécnica de los suelos NC 59. 2000.
29. GOLDCHEIN, M.N. *Propiedades mecánicas de los suelos*. Moscú: Stroizdat. 375 p. 1973.
30. González de Vallejo, L.I.; Ferrer, M., Ortuño; L., Oteo, C. *Ingeniería Geológica*. Pearson Education, Madrid, 715 p. 2002.
31. González López, Ramiro. Informe Ingeniero Geológico Tanque Comunidad Santa Clara. ENIA, 1991.
32. González López, Ramiro. Informe Ingeniero Geológico Comunidad La Coubre. ENIA, 1991.

33. González López, Ramiro. Informe Ingeniero Geológico Laguna de Oxidación Marqueti. ENIA, 1993.
34. González López, Ramiro. Informe Ingeniero Geológico Tanque elevado Wagenes. ENIA, 1993.
35. González López, Ramiro; Medina, Ninoska. Informe Ingeniero Geológico Laguna de Oxidación Aranguito. ENIA, 1993.
36. González Ramos, Encarnación. “Caracterización Geotécnica del subsuelo en la zona del nuevo Hospital de la Santa Creu i sant pau “Tesina Final de Carrera - Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos (2005).
www.tdx.cesca.es/TESIS_UPC/AVAILABLE/TDX-1222103-092523 (16/09/07).
37. Gorshkov, G. ; A. Yukushova. Geología General, Editorial Mir, Moscú, 1970.
38. GRIM, R.E. “Physico-Chemical Properties of Soils: Clay Minerals” en *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, A.S.C.E., Vol. 85, N° SM2. pp. 1- 17. 1959.
39. Hernández, Bianca; Formación Villarroja, Análisis y Clasificación geotécnica de la formación Villa Roja. Tesis de Maestría en preparación. ISPJAE, 2010.
40. Hernández, Hector. Informe Ingeniero Geológico Policlínico 3000 habitantes. ENIA, 1989.
41. Iñiguez, Adrián M. La influencia de la composición mineralógica de las arcillas en las propiedades físicas de los suelos. Instituto Cubano de Recursos Minerales, La Habana 1975.
42. Iturralde-Vinent, M. A. y otros. Contribución a la Geología de la provincia de La Habana y Ciudad de la Habana. Editorial Científico Técnica. Cuba. 1982.
43. Jiménez Salas, J.A y J.L de Justo Aplanes. Geotecnia y Cimientos Mecánica de Suelos y Roca. España, 1976.
44. JIMÉNEZ SALAS, J.A.; JUSTO ALPAÑÉS, J.L. y SERRANO, A.A. *Geotecnia y cimientos II. Mecánica del suelo y de las rocas*. Madrid: Editorial Rueda. 1188 p. 1980.

45. Juárez Badillo, E.; Rico Rodríguez, A. *Mecánica de suelos* Tomo I, II, III, Editorial Limusa. México. 1975.
46. Kezdi, A. *Handbook of Soil Mechanics. Soil Physics.* Akadémiai Kiadó. Budapest. 1974.
47. KUMBEIN – GRAYBILL. *Introduction to Statistical Model in Geology* Editorial McGraw – Hill. 1965.
48. LAMBE, T.W. y WHITMAN, R. V. *Mecánica de suelos*. México: Editorial Limusa. 2da edición. 582 p. 1999.
49. López Jimeno, Carlos. *Ingeniería del Terreno*. Edición Enero/2000
<http://www.geotecnia2000.com/public/publicfrm.htm>.(16/09/07)
50. Medina, Ninoska. *Informe Ingeniero Geológico Comunidad Cantón*. ENIA, 1992.
51. MITCHELL, J.K. *Fundamentals of Soil Behaviour*. University of California, Berkeley. 2da edición. 436 p. 1993.
52. Morales, Domingo. *Informe Ingeniero Geológico Taller Hidroeconomía*. ENIA, 1983.
53. Morráz, H.J. *Mineralogía de arcillas de los suelos de islas del Paraná medio*.
www.sedimentologia.org.ar/ras/VII%20RAS. (14/09/07)
54. Mustelier, Marta. *Informe Ingeniero Geológico Laguna La Esperanza*. ENIA, 1992.
55. Mustelier, Marta. *Informe Ingeniero Geológico Laguna Majagual*. ENIA, 1992.
56. Mustelier, Marta. *Informe Ingeniero Geológico Laguna Naranjal*. ENIA, 1992.
57. Nociones sobre el **Cuaternario**. **Cuaternario**, registro **cuaternario** y Geología del **Cuaternario**. Cambios climáticos cuaternarios. ...
www.ugr.es/~decacien/Planes/Geologia/Plan%202000/Temario/16811b1.htm
58. Padrón, Julio Cesar. *Informe Ingeniero Geológico Comunidad Agrícola Barnet*. ENIA, 1991.
59. Padrón, Julio Cesar. *Informe Ingeniero Geológico Comunidad Fructuoso Rodríguez*. ENIA, 1991.

60. Padrón, Julio Cesar. Informe Ingeniero Geológico Comunidad La Julia. ENIA, 1991.
61. Padrón, Julio Cesar. Informe Ingeniero Geológico Laguna Plaza. ENIA, 1991.
62. Padrón, Julio Cesar. Informe Ingeniero Geológico Tanque elevado Santa Rita. ENIA, 1991.
63. Padrón, Julio Cesar. Informe Ingeniero Geológico Comunidad Calderón. ENIA, 1992.
64. Padrón, Julio Cesar. Informe Ingeniero Geológico Comunidad La Esperanza. ENIA, 1992.
65. Padrón, Julio Cesar. Informe Ingeniero Geológico Comunidad Novedades. ENIA, 1992.
66. Padrón, Julio Cesar. Informe Ingeniero Geológico Tanque Fructuoso Rodríguez. ENIA, 1992.
67. Palau A. J, Y Roca, A.: en “El Contexto Geotécnico de la Ciudad de Barcelona”. Ingeniería del Terreno. IngeoTer 1. U.D. Proyectos. E.T.S.I. Minas. U.P.M. Madrid. 2002.
68. Pedraza Rojas, Álvaro Orlando; Vargas Jiménez, Carlos Alberto. Modelación numérica de las fundaciones de un edificio en la arcilla de Londres.
www.icc.ucv.cl/geotecnia/vi_congreso_geotecnia/documentos/(14/09/07)
69. Peñalver et al. Informe final del Proyecto Cambios Climáticos en Cuba durante el Cuaternario. 2001.
70. Pintado, Llurba, Xavier, Caracterización del comportamiento termo-hidro-Mecánico de arcillas expansivas...Organización: UPC TDX-0228103-101013,
www.tesisenxarxa.net/TDX-0228103-101013/
71. QUEVEDO, G.; LIMA, R. y MAURY, C. “Métodos para el cálculo de la tensión de preconsolidación en los suelos” en *Ingeniería Estructural* (septiembre-diciembre). pp 302-308. 1982.
72. Ralph, E. Clay Mineralogy. Editorial Mc Hill.

73. Rojas Fonquinos, Juan J. Arcillas y Lutitas expansivas del norte y nororiente Peruano. www.cismid.uni.edu.pe/descargas/a_labgeo/a_4s (14/9/07).
74. Román Valdez, Mario. Informe Ingeniero Geológico Comunidad las Flores. ENIA, 1992.
75. SÁEZ AUÑÓN, J. “Factores físico químicos mineralógicos que intervienen en el hinchamiento de las arcillas” en *Ingeniería Civil*, Madrid, Vol. 78 (enero-febrero-marzo). pp. 73-83. 1991.
76. Sánchez Barberý, Ramón; et al. Mecánica de suelos. Editorial Pueblo y Educación, Ciudad de la Habana 1982.
77. Sánchez, Leonardo. Informe Ingeniero Geológico Comunidad el Guayabo. ENIA, 1992.
78. Serie Geológica No 26 Descripción de Algunas Formaciones Geológicas del sistema Cuaternario de Cuba, reconocido recientemente, La Habana 1976.
79. SOETERS, R. “Clays Properties and Behaviour” en *Principles of Engineering Geology* (conferencias sobre Ingeniería Geológica), Holland. pp. 22-31 y 146-153. 1995.
80. SOWER, B. G., and SOWER, B. F. Introductory Soil Mechanics and Foundations, Macmillan, Nueva Cork. 1951.
81. SWAN, C. C. 2002. “Foundations on Difficult Soils” en Internet <http://css.engineering.uiowa.edu/~swan/courses/53139/difficult.pdf> (12/08/07).
82. Terzaghi y Peck. Mecánica de suelos en la ingeniería práctica. Editorial el Ateneo, 1968.
83. Tornero Trigueros, Emilio. Las arcillas rojas de Morella, estudio de las características geotécnicas e hidrogeológicas. www.upct.es/dimgc/documentos/ (15/9/07).
84. Varela 1999, Título del artículo: Arcillas caoliniticas en el departamento de Cauca www.ifeanet.org/biblioteca/fiche.php?codigo=REV00009590 (14/09/07)
85. Ventayol, A.; Palau, J. Y Roca, A. (2002): en “El Contexto Geotécnico de la Ciudad de Barcelona”. Ingeniería del Terreno. IngeoTer 1. U.D. Proyectos. E.T.S.I. Minas. U.P.M. Madrid. www.boschiventayol.com/pdf (14/09/07).

86. Vitier, Víctor. Informe Ingeniero Geológico Paso Superior Est. 722 + 80. ENIA, 1981.
87. Wilson, Edilberto. Informe Ingeniero Geológico Esbur 600. ENIA, 1977.
88. ZEPEDA GARRIDO, J. A. “Expansión y compresibilidad de arcillas parcialmente saturadas” en *Alternativas Tecnológicas 29*, Academia Mexicana de Ingeniería, Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, México, pp. 39-84. 1989.

ANEXOS

Anexo 1 Obras incluidas en la base de datos.

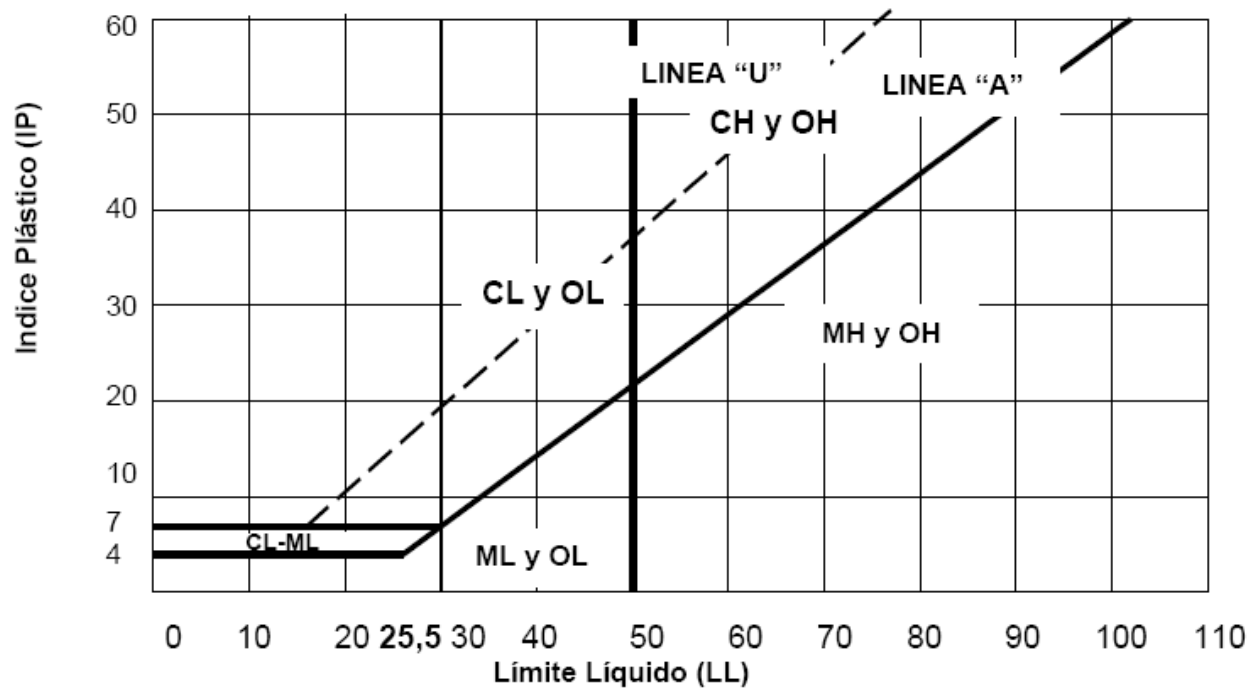
Obra	Formaciones	Municipio	Formación geológica subyacente	Espesor máximo, (m)	Profundidad del nivel freático (m)	Fecha de Investigación
CENSA	Villaroja Guevara	San José	Husillo	7	15	Junio/71
Comunidad El Guayabo	Villaroja Guevara	Guira de Melena	Guines	7	6	Mayo/92
Laguna Marqueti	Villaroja Guevara	Alquizar	Guines	7.5	4	Diciembre/91
Comunidad Novedades	Villaroja Guevara	Alquizar	Guines	10	30	Enero/92
Comunidad La Esperanza	Villaroja Guevara	Villaroja	Guines	6	13	Julio/92
Centro Nacional de Biopreparados	Villaroja Guevara	Bejucal	Cojimar	6	10	Diciembre/83
Puente Bejucal	Villaroja Guevara	Bejucal	Cojimar	8.3	10	Junio/83
Taller de Hidroeconomía	Villaroja Guevara	Bejucal	Cojimar	7.5	11	Agosto/84
Comunidad Mongolia	Guevara	Batabanó	Guines	1.5	17	Diciembre/92
Tanque Elevado Mongolia	Guevara	Batabanó	Guines	1.4	17	Diciembre/92
Tanque Elevado Aranguito	Guevara	Melena del sur	Guines	10	15	Mayo/92
Tanque Elevado Wagenes	Villaroja Guevara	Melena del sur	Guines		25	Mayo/92
Laguna de Oxidación Wagenes	Villaroja Guevara	Melena del sur	Guines	2	17	Junio/93
Laguna de Oxidación Aranguito	Villaroja Guevara	Melena del sur	Guines	2.7	10	Junio/93
Instituto de Riego y Drenaje	Villaroja Guevara	San José	Husillo	4	12	Marzo/81
Tanque Comunidad Santa Clara	Villaroja Guevara	Nueva Paz	Guines	5	15	Enero/92
Comunidad Desembarco del Granma	Villaroja Guevara	Nueva Paz	Guines	2	12	Enero/92
Planta de Bioplaguicidas, Labiofam	Villaroja Guevara	Boyeros	Boyeros	>10	15	Diciembre/02
Antenas Bauta	Guevara	Bauta	Bauta	>10	17	Marzo/03

Análisis y clasificación geotécnica de la formación Guevara.

Anexo 2. Valores recomendados del coeficiente de variación (CV) y el coeficiente de precisión de la estimación (δ) (Tabla IV. León González, Miguel; 1977¹⁰).

Nombre de la propiedad del suelo	Coeficiente de variación (CV)
Peso específico	0.01
Peso específico natural	0.05
Límite líquido y Límite Plástico	0.15
Humedad natural.	0.15
Resistencia al cortante.	0.20
Resistencia a la compresión axial	0.40
Módulo de deformación.	0.3

Anexo 3. Carta de plasticidad para clasificar suelos de grano fino (Norma Cubana. NC 59. 2000. Geotecnia. Clasificación geotécnica de los suelos)



Anexo 4. Criterios de Clasificación. (Norma Cubana. NC 59. 2000. Geotecnia. Clasificación geotécnica de los suelos)

División principal		Requisitos suplementarios		Símbolo del Grupo	Nombre del suelo
Suelos de grano fino	Arcilla y limo	LL	IP		
		< 50 %	IP > 7 y sobre o arriba de la línea "A"	CL	Arcilla poco plástica
			IP < 4 o debajo de la línea "A"	ML	Limo
			$4 \leq IP \leq 7$	CL-ML	Arcilla limosa
			IP ≥ 4 y sobre o arriba de la línea "A"	OL	Arcilla orgánica
	IP < 4 o debajo de la línea "A"	Limo orgánico			
	Arcilla y limo	≥ 50 %	IP sobre o arriba de la línea "A"	CH	Arcilla muy plástica
			IP debajo de la línea "A"	MH	Limo plástico
			IP sobre o arriba de la línea "A"	OH	Arcilla orgánica
			IP debajo de la línea "A"		Limo orgánico
Suelos altamente orgánicos		Estos suelos están compuestos principalmente por materia orgánica, de color carmelita oscuro a negro y olor orgánico		Pt	Turba

Anexo 5. Criterios para describir la consistencia de los suelos arcillosos. (Norma Cubana. NC 59. 2000. Geotecnia. Clasificación geotécnica de los suelos)

Consistencia	Índice de Consistencia
Muy blanda	$I_c < 0,25$
Blanda	$0,25 \leq I_c < 0,50$
Firme	$0,50 \leq I_c < 0,75$
Dura	$0,75 \leq I_c < 1$
Muy dura	$I_c \geq 1$

Anexo 6. Criterio para describir la plasticidad de los suelos. (Norma Cubana. NC 59. 2000. Geotecnia. Clasificación geotécnica de los suelos)

Plasticidad.	Rango del Límite Líquido (%)
Plasticidad baja	$LL < 35$
Plasticidad intermedia	$35 \leq LL < 50$
Plasticidad alta	$50 \leq LL < 70$
Plasticidad muy alta.	$70 \leq LL < 90$

Anexo 7. Base de datos.

NOTA: La base de datos se ofrece digital en el CD adjunto.



Instituto Superior Politécnico
José Antonio Echeverría
cujae

Facultad de Ingeniería Civil
Departamento de Ingeniería Civil

Maestría en Ingeniería Civil. Mención Geotecnia

Título: Análisis y Clasificación Geotécnica de la
Formación Guevara.

Autor: Ing. Wilfredo David González Fonseca.

Tutor: MSc. Ing. Eddy Hernández Hernández
MSc. Lic. Carlos A. García Fernández



Empresa Nacional de Investigaciones Aplicadas
Unidad de investigaciones para la Construcción
Ciudad Habana

Ciudad Habana 2010.