



Ministerio de Educación Superior

Universidad de Moa

Dr. Antonio Núñez Jiménez

Facultad Geología – Minas

Departamento de Geología

*Trabajo de Diploma en opción al título de
Ingeniera Geóloga*

*Regularidades de los suelos con evidencias de licuefacción.
Casos de estudio: Río Cauto, San Cristóbal y Santiago de
Cuba.*

Autor: Leysa Madian Peña Fernández.

Tutor(a): MsC: Liuska Fernández Diéguez.

Moa, 2019

“Año 61 del triunfo de la Revolución”



Dedicatoria

Dedico este trabajo a mi hermana Liz Marian, para que sepa que todo se puede lograr con esfuerzo y sacrificio y a toda mi familia principalmente a mis padres Yumi y Luisi.

Pensamiento

“Deberíamos ampliar nuestra definición de riqueza para incluir en ella el conocimiento, los recursos naturales y la capacidad humana y, al mismo tiempo, aprender a compartir cada uno de ellos más justamente. Si lo hacemos, no hay límite para lo que los seres humanos pueden lograr juntos”

Stephen Hawking

Declaración de autoridad

Yo, Leysa Madian Peña Fernández, declaro que soy el único autor de este trabajo y autorizo a la Universidad de Moa “Dr. Antonio Núñez Jiménez”, y al Departamento de Ingeniería Geológica para que hagan el uso por la parte docente que estimen pertinente con el mismo.

Firma del Diplomante

Leysa Madian Peña Fernández

Firma del Tutor

MsC. Liuska Fernández Dieguéz

Agradecimientos

- 1- Dar gracias a Dios por estar conmigo en cada paso del trayecto.
- 2- Agradecer a mi familia, a mis padres y a mi hermana, a mi papá Luis por sus infinitas horas bajo el sol para darme todo lo que he necesitado, a mi mamá Yusmaris, por sus horas de amor, de dedicación y por su perfume que es el más dulce, a mi hermana por ser ese pequeño motor que me inspiró a ser su ejemplo a seguir.
- 3- A Leito por ser mi compañero y amigo, mi apoyo en la realización de la tesis y por haberme alentado a ser mejor durante mi estancia en la universidad y a sus padres, que son como propios.
- 4- Al claustro de profesores maravillosos y magníficos de los cuales disfruté no solo los momentos buenos, también los malos, en especial a mi tutora Liuska Fernández y al profesor Arián Jiménez por su ayuda, tiempo y dedicación.
- 5- Dar gracias por tener un grupo tan bueno del cual me siento muy orgullosa, por tener magníficos compañeros, en especial alguien que más que compañera es familia, Dayana Leyva.
- 6- A mis compañeras de cuarto Yaris, Adita, Annié, Milagros, Grecher.
- 7- A mis amigos los de aquí los de allá, los que hice y que nunca olvidaré.
- 8- En fin, a todos muchas gracias por los mejores años que nunca olvidaré, y cuando se hayan ido, querré que regresen y nunca se vayan.

Resumen

En el presente trabajo encaminado a la caracterización de las condiciones ingeniero geológicas de los suelos con evidencias de licuefacción. Casos de estudio: Río Cauto, San Cristóbal y Santiago de Cuba, surge por la necesidad de caracterizar y evaluar las condiciones ingeniero geológico de los suelos existentes en estos municipios, para confirmar su susceptibilidad a la licuefacción ante sismos de gran magnitud para un futuro ordenamiento urbano y territorial, así como la reducción del riesgo de desastres. El estudio se llevó a cabo mediante un sistema de indicadores que resumen las características más influyentes en la respuesta del suelo; como: geología, sismicidad, profundidad del nivel freático y condiciones ingeniero geológicas, las cuales fueron evaluadas. Se obtuvieron como resultado tres tablas para el análisis de las condiciones del suelo las cuales arrojan los siguientes resultados. Las principales litologías identificadas susceptibles a licuar son: gravas arcillosas (GC) y arenas arcillosas (SC), además, sedimentos cuaternarios, fundamentalmente de génesis fluvial. Los mismos se caracterizan por tener bajo por ciento de finos, límite líquido menor de 35 por ciento, de baja a moderada compactación y alta saturación. Los valores del nivel freático se encuentran en los primeros 5 metros. Las condiciones ingeniero geológicas entre los tres sectores analizados no coinciden en su totalidad, pero si existen similitudes con respecto a los indicadores para que un suelo sea susceptible a licuar. Lo que demuestra que en estas áreas pudo haber ocurrido el fenómeno de licuefacción bajo estas condiciones ingeniero geológicas.

Abstract

The present work aimed at the characterization of the geological engineer conditions of soils with evidence of liquefaction. Case studies: Rio Cauto, San Cristóbal and Santiago de Cuba, arises from the need to characterize and evaluate the geological engineer conditions of the existing soils in these municipalities, to confirm their susceptibility to liquefaction before large earthquakes for a future order urban and territorial, as well as disaster risk reduction. The study was carried out through a system of indicators that summarize the most influential characteristics in soil response; such as: geology, seismicity, depth of the phreatic level and geological engineer conditions, which were evaluated. Three tables were obtained for the analysis of soil conditions which yield the following results. The main lithologies identified as susceptible to liquefying are: clayey gravels (GC) and clay sands (SC), in addition, quaternary sediments, mainly of fluvial genesis. They are characterized by having low percent fines, liquid limit less than 35 percent, low to moderate compaction and high saturation. The water table values are in the first 5 meters. Geological engineer conditions among the three sectors analyzed do not coincide in their entirety, but there are similarities with respect to the indicators so that a soil is susceptible to liquefying. This shows that in these areas the phenomenon of liquefaction could have occurred under these geological engineer conditions.

Índice

INTRODUCCION	1
CAPITULO I: MARCO TEÓRICO CONCEPTUAL Y CONTEXTUAL	4
1.1 Introducción	4
1.2 Estado del arte y marco teórico conceptual	4
1.2.1 Factores que influyen en la licuefacción (Seed & Lee, 1966)	6
1.2.2 Factores que condicionan la ocurrencia de licuefacción (Shadenet, 1990)	7
Efectos de la licuefacción	11
1.2.3 Evidencias históricas del fenómeno de licuefacción de suelos en el mundo y en Cuba	15
1.2.4 Sismicidad de Cuba como factor catalizador de la licuefacción de los suelos	26
1.2.5 Investigaciones realizadas en Cuba sobre licuefacción de suelos	20
1.3 Características geográficas y geológicas de las áreas de estudio	29
1.3.1 Situación geográfica:	29
• Río Cauto	29
• San Cristóbal	30
• Santiago de Cuba	30
1.3.2 Características geológicas del área de estudio	31
• Río Cauto	31
• San Cristóbal	32
• Santiago de Cuba	33
1.3.3 Características geomorfológicas	35
• Río Cauto	35
• San Cristóbal	36
• Santiago de Cuba	37

1.3.4 Características hidrográficas	37
• Río Cauto.....	37
• San Cristóbal.....	38
• Santiago de Cuba.....	39
1.3.5 Sismicidad regional y del área de estudio	39
• Río Cauto.....	40
• San Cristóbal.....	41
• Santiago de Cuba.....	42
CAPITULO II: METODOLOGIA DE LA INVESTIGACION Y VOLÚMEN DE LOS TRABAJOS REALIZADOS	44
2.1 Introducción.....	44
2.2 Primera etapa: Búsqueda y análisis bibliográfico.....	44
2.3 Segunda etapa: Análisis de la información.....	45
Sistema de indicadores aplicados para el estudio de la susceptibilidad a la licuefacción de los suelos	45
2.4 Metodología aplicada para evaluar la susceptibilidad a la licuefacción ante sismos de gran magnitud en las áreas de estudio.	48
2.4.1 Análisis de las condiciones geológicas del área de estudio.	48
2.4.2 Análisis del comportamiento de la sismicidad en el área de estudio....	48
2.4.3 Análisis del comportamiento del nivel freático en el área de estudio. ...	49
2.4.4 Análisis de las condiciones ingeniero geológicas.....	49
2.5 Tercera etapa: Interpretación de los resultados.....	50
CAPITULO III: CARACTERIZACIÓN DE LAS CONDICIONES INGENIERO GEOLÓGICAS DE LOS SUELOS CON EVIDENCIAS DE LICUEFACCIÓN	51
3.1 Análisis de las condiciones geológicas.....	52
Representación esquemática de las formaciones geológicas por región de estudio.	54
3.2 Análisis del comportamiento de la sismicidad.....	57

Tesis de Diploma en opción al título de Ingeniera Geóloga

Ubicación sismotectónica de las áreas de estudio:	59
Cantidad de sismos registrados de $M \geq 6$	59
3.3 Análisis de las condiciones Ingeniero geológicas y nivel freático	60
Columnas litoestratigráficas esquemáticas de las áreas en estudio	61
Análisis general de los resultados:	63
CONCLUSIONES	64
BIBLIOGRAFIA	66
ANEXOS	70

INTRODUCCION

Son innumerables la cantidad de fenómenos naturales que ocurren a diario, algunos son prevenidos, otros inevitables, pero muchos pueden ser predecibles, entre ellos está la licuefacción de los suelos, asociados principalmente a eventos sísmicos que en conjunto con características particulares de los suelos dan lugar a la ocurrencia de este fenómeno.

La licuefacción es un fenómeno natural mediante el cual determinados tipos de suelo pierden bruscamente su resistencia mecánica ante una carga dinámica rápida como puede ser un sismo. La pérdida de resistencia mecánica del suelo implica que este se comporta momentáneamente de modo similar a un fluido, siendo capaz de migrar generando importantes deformaciones en el terreno.

La licuefacción se genera principalmente en suelos arenosos y areno limosos saturados en agua, usualmente ubicados cerca de ríos, borde costero u otros cuerpos de agua, o bien, en aquellos suelos donde existe un nivel freático muy superficial. Además, sucede en los suelos que poseen baja compactación, por ejemplo, aquellos terrenos ubicados donde antes existieron lagos o lagunas y zonas de humedales. Cuando ocurre un sismo, la vibración eleva la presión de agua en los poros del suelo y si esta llega a ser igualar o superar la fuerza de contacto entre los granos, la resistencia del suelo se reduce a cero, experimentando licuefacción. En este caso, la capacidad de carga del suelo es nula y, efectivamente, el suelo se comporta durante la sacudida como un líquido y cualquier estructura cimentada en él se hunde o sufre asentamientos diferenciales (INGEOMINAS, 2003).

Cuba no está exenta de sufrir este fenómeno asociado a eventos sísmicos, como evidencia de licuefacción tenemos las experiencias derivadas de:

El terremoto del 18 de octubre de 1551 en Bayamo: este terremoto se conoce como el terremoto de Bayamo ya que fue la villa más importante donde se reportaron las afectaciones. Se reportó que ocurrió licuación del suelo debido a las condiciones del sitio, localizada en las llanuras fluviales del río Cauto, específicamente en el actual poblado de Cauto Embarcadero.

Tesis de Diploma en opción al título de Ingeniera Geóloga

El terremoto del 23 de enero de 1880 en Pinar del Río: El daño más significativo se concentró en las zonas llanas de Pinar del Río. Todas las casas de mampostería sufrieron colapso de techos y paredes y una iglesia fue destruida. *Se observaron efectos de sitio consistentes con la licuación del terreno.*

El terremoto del 3 de febrero de 1932 en Santiago de Cuba: es bien conocido como el terremoto más fuerte en el siglo 20 en Cuba. El 80% de los edificios de la ciudad sufrió algún tipo de daños. *Se reportó el fenómeno de licuefacción en la zona del puerto, en la Alameda específicamente.* (Álvarez, Villalón & Lindhon, 2015).

Hasta el presente, no es posible realizar un pronóstico certero del momento en el que sucederá un evento sísmico, pero sí se puede identificar y caracterizar los escenarios expuestos a este fenómeno y las pérdidas potenciales ante su ocurrencia, dado que se conocen las condiciones físicas de su formación y la probable fuerza con que puede ocurrir, además de conocer las condiciones de los suelos que permitan definir el comportamiento de ellos ante estos eventos y su caracterización, para así poder diseñar un mejor reordenamiento territorial en Cuba.

Es por esto que el presente trabajo va encaminado a realizar una caracterización y comparación entre las condiciones ingeniero geológica de los suelos, de los municipios de Río Cauto, provincia Granma, San Cristóbal, provincia Artemisa y Santiago de Cuba, provincia del mismo nombre y su comportamiento ante eventos sísmicos, que condicionan la ocurrencia de licuefacción.

Problema científico: Necesidad de caracterizar las condiciones ingeniero geológicas de los suelos existentes en los municipios: Río Cauto, San Cristóbal y Santiago de Cuba para confirmar su susceptibilidad a la licuefacción ante sismos de gran magnitud para un futuro ordenamiento urbano y territorial, así como la reducción del riesgo de desastres.

Objeto de estudio: Los suelos de los municipios Río Cauto, San Cristóbal y Santiago de Cuba.

Campo de acción: Condiciones ingeniero geológicas de los suelos que favorecen la ocurrencia de licuefacción.

Objetivo general: Caracterizar las condiciones ingeniero geológicas de los suelos donde existen reportes de licuefacción: Río Cauto, San Cristóbal y Santiago de Cuba, que permita un futuro ordenamiento urbano y territorial, así como la reducción del riesgo de desastres.

Objetivos específicos:

- Aplicar un procedimiento metodológico que permita identificar las características de los suelos de los municipios Río Cauto, San Cristóbal y Santiago de Cuba que propicia que sean susceptibles a la licuefacción.
- Caracterizar las condiciones ingeniero geológicas de los suelos del área de estudio mediante un sistema de indicadores.
- Comparar las condiciones ingeniero geológicas de los suelos de los lugares donde existen reportes de licuefacción.

Hipótesis: Si se caracterizan las condiciones ingeniero geológicas de los suelos donde hay reportes de licuefacción en Cuba, entonces se podrán determinar las particularidades de los suelos susceptibles a la licuefacción para el futuro ordenamiento territorial y gestión del riesgo.

CAPITULO I: MARCO TEÓRICO CONCEPTUAL Y CONTEXTUAL.

1.1 Introducción

En este capítulo se describe el fenómeno de licuefacción de suelos y los principales factores que influyen en su ocurrencia. De igual forma se expone el nivel de conocimiento actual en Cuba y el mundo sobre el tema y se realiza un análisis de las características físico-geográficas y geológicas de las áreas de estudio.

1.2 Estado del arte y marco teórico conceptual

A través de la historia de los eventos sísmicos, el comportamiento de los suelos ante los efectos de sismos ha sido objeto de estudio. Debido a ello, las condiciones en que los suelos granulares pierden una parte significativa de su resistencia, bajo la acción de un sismo, no han sido completamente comprendidas y en consecuencia, representan un magnífico campo de investigación (Mussio, 2012).

Los primeros estudios cuantitativos de estos fenómenos pertenecieron, originalmente, al análisis estático de los taludes naturales de las márgenes del río Mississippi. Estos habían presentado un comportamiento inestable, provocados por la subida gradual del nivel freático y en algunos casos fluctuaciones en el nivel de marea, lo que provoco la modificación de las redes de filtración del terreno. A causa de estas variaciones se producían deslizamientos, y al mismo tiempo se detenían cuando el ángulo del talud había alcanzado unos escasos grados. Para explicar este fenómeno (Casagrande, 1916) propuso el concepto de "Relación de vacío crítica".

Existen autores que reconocen que el término de licuación fue utilizado por primera vez por (Hazen, 1920) para explicar la falla que se originó en la Presa Calaveras en California. Sin embargo, este fenómeno adquirió mayor importancia a partir de los estudios pioneros de (Casagrande, 1936), quien reconoció que bajo ciertas condiciones de densidad, las arenas saturadas con comportamientos contractivos sujetas a esfuerzos cortantes, pueden desarrollar una presión de poro elevada y una pérdida súbita de resistencia, sin importar la magnitud del movimiento.

Posteriormente, se realizó un estudio extensivo de numerosos deslizamientos a lo largo de la ribera del río Mississippi. Precisamente (Casagrande, 1936), llamó “movilidad cíclica” al fenómeno de licuefacción muy limitada, provocada por cargas cíclicas. Ocurre en suelos con compacidad relativa alta, con una resistencia residual mayor que la tensión tangencial estática actuante. Las deformaciones debido a la movilidad cíclica se desarrollan de manera incremental debido a que atacan simultáneamente las tensiones estática y dinámicas.

El fenómeno de licuefacción (Alfaro, 2013) se manifiesta en la superficie del terreno por la formación de grietas, hundimientos de terreno, asentamientos diferenciales de estructuras, “golpes de agua” (surgimiento de agua) y volcanes de arena. Los dos últimos son producto del súbito aumento de la presión de agua de poros ocasionada por la vibración, a que este fluido se vio forzado a fluir rápidamente a la superficie. Si el flujo asciende lo suficientemente rápido se generan “golpes de agua”. Al mismo tiempo, el agua ascendente puede transportar partículas de arena hasta la superficie donde son depositadas formando montículos de arena, a los que por analogía se les denomina “volcanes de arena” (Alfaro, 2013).

Conceptos de licuefacción.

- Rico, A. y Del Castillo, H. (1988), manifiesta que el fenómeno de licuación de suelo consiste en la pérdida rápida de resistencia al esfuerzo cortante, temporal o definitivo, citado en (Parellada, 2016).
- Sauter (1989), opina que el estado de licuefacción, se presenta únicamente en suelos saturados y pocos densos como arenas y las arenas limosas sin consolidar. Citado en (Parellada, 2016).
- Según (Rodríguez Pascua, 1997), el suelo completamente saturado, con arenas sin cohesión, generalmente limpias, que pueden incluir algo de gravas puede ser licuefactado durante la sacudida sísmica.
- (González de Vallejo, 2002), define como suelos licuables, aquellos suelos con contenido areno- limoso, en estado saturado, al experimentar esfuerzos cortantes anómalos y rápidos, permiten un aumento de las presiones

intersticiales (por falta de drenaje), en que la resistencia al corte desaparece y el material se comporta como líquido, dando lugar a movimientos verticales y horizontales de su masa, que se traducen en deslizamientos, o en grandes asientos.

□ La licuefacción de los suelos es un fenómeno en el cual los terrenos saturados de agua, particularmente sedimentos recientes como arena o grava pueden perder mucha de su fuerza o firmeza y fluyen ante la acción de esfuerzos provocados por temblores. Esto aumenta significativamente el daño a estructuras como casas y edificios, las cuales pueden ser desplazadas, hundidas o volcadas, aun cuando permanezcan intactas estructuralmente. (Colectivo de Autores de la Sección de Sismología, Vulcanología y Exploración Geofísica, Geología. 2003. San Pedro, Costa Rica) en (Parellada, 2016).

□ La licuefacción de sedimentos es la “disminución de la resistencia al corte en un suelo no cohesivo saturado, debido al aumento de la presión intersticial durante un terremoto, puede llegar a producirse la anulación de la presión efectiva entre sus partículas” lo que hace que el terreno fluya como si fuera un líquido. (Colectivo de Autores, 2012) en (Parellada, 2016).

□ (Rodríguez; Audemard y Rodríguez) comentan que la licuefacción de sedimentos es la transformación a estado líquido de materiales granulares.

Uno de los conceptos más completos es el dado por (González de Vallejo, 2002).

1.2.1 Factores que influyen en la licuefacción (Seed & Lee, 1966).

Sobre la licuación de los suelos se ha escrito mucho en el mundo dado que es uno de los fenómenos más dramáticos y destructivos y además, más polémicos y peor explicados que pueden ser inducidos en depósitos por acciones sísmicas. Los estudios de la licuefacción sísmica llevaron a postular las siguientes condiciones:

- ▽ Si la presión de poros inducida por la acción dinámica o cíclica del terremoto alcanza el valor de la presión de confinamiento, el suelo alcanzará el estado de licuefacción inicial.
- ▽ Si la arena sometida a acción cíclica alcanza el 20% de deformación se alcanzará la licuefacción total (Seed, 1966).

1.2.2 Factores que condicionan la ocurrencia de licuefacción (Shadenet, 1990).

1- Distribución del tamaño de los granos. La arena uniformemente graduada, con granos muy gruesos tiene mayor probabilidad de licuarse, mientras que las arenas limosas y gravas lo hacen bajo cargas cíclicas muy severas.

2- Profundidad de las aguas subterráneas. Mientras menor sea el nivel de las aguas subterráneas, mayor será la probabilidad de que ocurra licuefacción.

3- Densidad. El suelo puede densificarse cuando está sujeto a una carga cíclica, por lo que reduce su volumen de suelo- agua e incremento de la presión intersticial si los poros intergranulares se llenan de agua. Cuando esto ocurre habrá menor posibilidad de que se produzca su licuefacción.

4- Peso del recubrimiento y profundidad del suelo. Las tensiones entre partículas aumentan a medida que aumenta la presión del recubrimiento y mientras mayor sea dicha tensión menor será la probabilidad que ocurra licuefacción. Por lo general, ocurre a profundidades menores de 9 metros; rara vez a mayores de 15 metros.

5- Amplitud y duración de la vibración del terreno. La licuefacción de suelos bajo condiciones de tensión provocadas por un terremoto puede ocurrir ya sea: cerca del epicentro si son pequeños o moderados, o a cierta distancia si son moderados a severos.

6- Edad del depósito. Los suelos jóvenes (menos de 3.000 años) son débiles y no cohesivos, de modo que tienen mayor probabilidad de licuarse que aquellos más antiguos donde actuaron procesos como compactación y cementación que incrementaron su resistencia.

7- Origen del suelo. El suelo depositado por procesos fluviales se sedimenta fácilmente y sus granos tienen poca probabilidad de compactarse, de modo que se licuarán con facilidad. Los depositados glaciales, generalmente ya son bastante densos y tienen menor probabilidad de licuarse (Ishihara, 1990).

1.2.2.1 Criterios de susceptibilidad de los suelos licuables.

No todos los suelos son susceptibles de presentar licuefacción, así que el primer paso en el desarrollo de una evaluación de riesgo de licuefacción es la determinación de la susceptibilidad de licuefacción. La susceptibilidad de licuefacción de un suelo puede ser evaluada mediante el uso de criterios históricos, geológicos, basados en su composición o según su estado, estos criterios, propuestos por (Kramer & Stewart, 2004), serán descritos a continuación:

- ◇ **Criterios históricos:** se ha observado que la licuefacción ocurre frecuentemente en los mismos lugares cuando las condiciones del sitio se mantienen constantes, es por esto que la evidencia de la ocurrencia histórica de licuefacción, observada en forma de paleolicuefacción, puede ser utilizada como prueba de susceptibilidad de licuefacción, en un determinado lugar.
- ◇ **Criterios geológicos:** las condiciones geológicas también pueden indicar susceptibilidad de licuefacción, por ejemplo los suelos de depósitos fluviales y eólicos, cuando se encuentran saturados, tienen una alta probabilidad de ser susceptibles de presentar licuefacción. También se ha observado licuefacción en depósitos de abanicos aluviales, playas y estuarios, pero no de manera tan evidente como en los casos anteriores. Otro criterio geológico es la edad del depósito, en general los depósitos de suelo jóvenes son más susceptibles de licuefacción que los depósitos más antiguos.
- ◇ **Criterios basados en la composición del suelo:** la composición física de un suelo juega un importante papel en la determinación de su susceptibilidad de licuefacción. Las arenas uniformemente gradadas y limpias, compuestas principalmente de partículas redondeadas son intrínsecamente más susceptibles, mientras que los suelos bien gradados y los suelos con partículas angulares son menos susceptibles. La presencia de finos, particularmente finos plásticos ($IP > 10$), tiende a disminuir la susceptibilidad de licuefacción.
- ◇ **Criterios basados en el estado del suelo:** el potencial de licuefacción de un suelo también depende de su estado, como las tensiones efectivas

a las que está sometido y su densidad in situ, ya que la tendencia de un terreno a densificarse, bajo condiciones de carga cíclicas, depende de su densidad y de las tensiones efectivas. Los suelos sueltos son bastante más susceptible de licuefacción que los suelos densos y, para una densidad dada, los suelos bajo tensiones de confinamiento efectivas altas son más susceptible que los suelos bajo tensiones de confinamiento efectivas bajas.

Siendo corroborado por (Iwasaki et. al., 1982), donde hace un análisis de las Unidades geomorfológicas que se tienen en cuenta en la susceptibilidad de licuefacción, (tabla 1). También hace un análisis de susceptibilidad a la licuefacción de los sedimentos de acuerdo a su edad y profundidad de las aguas subterráneas (tabla 2). Realiza descripción geomorfológica detallada de las unidades con susceptibilidad de licuefacción sujeta a un grupo de movimientos de intensidad VIII según la escala de M.M., (tabla 3).

Tabla 1: Unidades geomorfológicas que se tienen en cuenta en la susceptibilidad de licuefacción (Iwasaki et. al., 1982). Tomado de (Fernández, 2000).

Categorías	Topografía	Potencial de licuación
A	Cama actual del río, cama vieja del río, pantanos, tierras reclamadas, tierras bajas.	Licuable
B	Abanico, dunas de arenas, deluvio, playas y otras llanuras.	Probablemente licuable
C	Terrazas, colinas, montañas.	No licuable

Tabla 2: Susceptibilidad de licuefacción de los sedimentos de acuerdo a su edad y profundidad de las aguas subterráneas. (Iwasaki et. al., 1982.) Tomado de (Fernández, 2000).

Unidad de sedimentos	Profundidad a que se encuentran las aguas subterráneas en metros			
	0 - 3 m	3 - 10 m	10 - 15 m	> 5 m
Holoceno: Ultimo Primero	Muy alto - alto Alto	Moderado Moderado	Bajo Bajo	Muy bajo Muy bajo
Pleistoceno: Tardío Medio-temprano	Bajo Muy bajo	Bajo Muy bajo	Muy bajo Muy bajo	Muy bajo Muy bajo
Terciario y preterciario	Muy bajo	Muy bajo	Muy bajo	Muy bajo

Tabla 3: Unidad geomorfológica detallada de susceptibilidad de licuefacción sujeta a un grupo de movimientos de intensidad VIII según la escala de M.M. (Iwasaki et. al., 1982). Tomado de (Fernández, 2000).

Condiciones geomorfológicas		Potencial de licuación.
Clasificación	Condiciones específicas	
Valle plano	Valle plano compuesto por gravas o cantos rodados	No licuable
	Valle plano compuesto por suelo de arenisca	Probable
Aluvial	Gradiente vertical de más de 0.5 %	No licuable
	Gradiente vertical menor que 0.5 %	Probable
Canal de río abandonado		Licuable
Cauce del río seco	Cauce seco del río compuesto por gravas	No licuable
	Cauce seco del río compuesto por arenas	Licuable
Playa	Playa natural	No licuable
	Playa artificial	Licuable
Interestratificación de tierra bajas		Licuable
Tierra recuperada por drenaje		Probable
Tierra recuperada		Licuable
Muelle		Licuable
Relleno	Relleno limite entre las arenas y las tierras bajas	Licuable
	Relleno colindante al arrecife, pendiente escarpada	Licuable
	Relleno sobre pantano o ciénaga	Licuable
	Relleno de tierra recuperado por drenaje	Licuable

1.2.2.2 Condición de un suelo para que sea licuable.

Para la ocurrencia de la licuefacción de los suelos, particularmente, en aquellos suelos de grano fino para que licuen deben cumplir con ciertas condiciones granulométrica propuesta por (Wang, 1979). Estas son:

- Porcentaje de finos de 0,005 mm <15%
- Límite líquido, LL <35%
- Natural contenido de agua > 0,9 LL
- Índice de liquidez <0,75
- Forma de las partículas redondeadas.

* (Seed & Idriss, 1982) consideran que un suelo puede licuar si:

- El porcentaje en peso de partículas <0,005 mm es menor del 15%
- LL<35%
- $w/LL > 0,9$

A este criterio se le conoció como criterio chino.

De igual manera, se señalan otros factores influyen que la susceptibilidad del suelo a la licuefacción aumente, entre estos la presión de confinamiento, la densidad relativa, y el esfuerzo cortante inicial, planteamiento corroborados por (Castro, 1969) y (Kramer & Semillas, 1988).

De acuerdo con el Sistema Unificado de Clasificación de los Suelos (SUCS), arenas clasificadas como CL-ML, SM-SC, o GM-GC (ver tabla anexo 1) son potencialmente licuables, (Youd & Idriss, 1998). Por otro lado, (Wang, 1979) considera que si un material granular tiene menos del 15 % de finos (arcillosos) y el límite líquido (LL) es mayor que 35 % y el contenido natural de agua es menor de 90 %, estos materiales se consideran no licuables.

1.2.2.3 Efectos de la licuefacción.

La pérdida de cohesión del suelo permite que este se pueda movilizar, diferenciándose varios tipos de desplazamientos asociados a la licuefacción:

- △ **Flujos de tierra:** los materiales del suelo se desplazan rápidamente cuesta abajo en un estado licuado, a veces causa coladas de barro o avalanchas.
- △ **Propagación lateral:** tipo de remoción en masa en que se produce desplazamiento limitado de las capas superficiales del suelo a favor de pendientes suaves o hacia superficies libres, como por ejemplo, en márgenes de ríos y taludes de terrazas fluviales. En este tipo de desplazamientos, a menudo ocurre que las capas superficiales están revestidas de cubiertas antrópicas, como por ejemplo asfaltos. Cuando las capas más profundas se licuan, las capas superficiales antrópicas, generalmente, se mueven lateralmente en bloques, tanto durante como después del sismo, provoca una deformación permanente del suelo y ruptura de las cubiertas.
- △ **Flotación:** objetos enterrados en el suelo bajo licuación son desplazados. Es común que tanques, buzones o tuberías de alcantarillado ascienden a través del suelo y floten en la superficie.
- △ **Pérdida de resistencia de soporte:** reducción de la capacidad de soporte de los cimientos debido al debilitamiento del material del suelo subyacente o colindante. A menudo provocan que las estructuras se hundan o dañen. Según (Perucca et al., 2006) autores como (Obermeier, 1994) y (Moretti et al., 1995) coincidieron en señalar que sismos de magnitud 6 pueden generar estructuras de licuefacción en un radio de 40 km. (Audemard y De Santis, 1991) estudiaron estructuras de licuefacción a 25 km del epicentro para sismos de magnitud 5 a 5,7. Para terremotos de magnitud 7 según (Seed, 1968) el radio en el que se pueden dar licuefacciones es de 70 km y para sismos de magnitud 8 o superior, el radio pasaría a ser de 100 km (Moretti et al., 1995). Sin embargo, durante el sismo de 1977 ocurrido en la provincia de San Juan, con magnitud 7,4, se registró licuefacción a distancias de hasta 260 km en línea recta al epicentro. En México tras el sismo de 2019 ocurrió destrucción a más de 400km. Este fenómeno es un punto de análisis donde se involucran varias condiciones, desde la forma de transmisión de ondas sísmicas, los tipos

de suelos, hasta la variación de los niveles freáticos en las subcuencas que forman el valle.

En muchos de los terremotos ocurridos, por ejemplo en países como Argentina, se registraron fenómenos de licuefacción, principalmente en planicies fluviales de los valles en los que se ubica la mayor parte de la población y donde las condiciones son ideales para sufrir tales fenómenos. Otras de las condiciones necesarias para que tenga lugar este modo de comportamiento del suelo son que el nivel freático esté alto, cerca de la superficie, que el grado de compactación sea bajo, equivalentes a valores N de SPT inferior a 20 golpes. De acuerdo con la observación de zonas afectadas por licuefacción, ésta tiene lugar en las siguientes circunstancias:

- Sismos con magnitud igual o superior a 5.5 con aceleraciones superiores o iguales a 0.2g.
- Por debajo de 15 metros de profundidad no se han dado licuefacciones.
- En la mayoría de los casos donde se han observado licuefacciones el nivel freático estaba a poca profundidad, inferior a 3 metros; por debajo de 5 metros la susceptibilidad de licuefacción es muy baja. Algunos expertos consideran que una de las propiedades más importante que caracterizan los suelos licuefactibles es el bajo grado de compactación, es decir $N < 10$ para profundidades < 10 m y $N < 20$ para profundidades > 10 metros (González de Vallejo, 2002).

Charles Darwin en su libro “Viaje de un Naturalista Alrededor del Mundo”, relata su experiencia del terremoto de Concepción en 1835, que lo sorprendió en Chile. Su compañero de viaje, el capitán Fitz-Roy, le indicó que fue testigo de dos erupciones marinas: una semejante a una columna de humo y otra parecida al chorro de agua lanzado por una inmensa ballena. Según el capitán, por todas partes el agua parecía en ebullición, se puso negra y dejó escapar vapores sulfurosos muy desagradables. De acuerdo al naturalista, estos fenómenos también se observaron en el terremoto de 1822 en la bahía de Valparaíso y los asocia a la “agitación del lodo que forma el fondo del mar, lodo que contiene materias orgánicas en descomposición” (González & Verdugo, 2014).

Tesis de Diploma en opción al título de Ingeniera Geóloga

Es interesante recordar también que el fenómeno de licuefacción fue identificado y conceptualizado por la ingeniería -geotécnica a partir del año 1964, a raíz de los catastróficos efectos de éste en los terremotos de Niigata, Japón y de Alaska, (imagen 1).



Imagen 1: Izquierda: Efecto de la licuefacción en edificios post terremoto de Niigata 1964. Derecha: Cráteres de arena en el área de Milpitas luego del terremoto de San Francisco en 1906.

No hay duda que el terremoto de Valdivia de 1960, como otros eventos sísmicos anteriores, produjeron licuefacción de muchos sitios, (imagen 2), pero la ingeniería nacional no logró entenderlos como tal.



Imagen 2: Costanera de Valdivia después del terremoto de 1960. (Tomado Peña, 2018).

1.2.3 Evidencias históricas del fenómeno de licuefacción de suelos en el mundo y en Cuba.

La licuefacción ha ocurrido en numerosos terremotos como ha quedado en evidencia en los registros históricos y geológicos. En diciembre de 1692 se produjo en la población de Talavera del Esteco (provincia de Salta), un violento sismo de Ms 7,0, que por dos días posteriores se repitió con mayor o menor intensidad, desaparece Talavera y produce derrumbes y agrietamientos en el Valle de Lerma donde estaba la ciudad de Salta (Lozano, 1873). Según antiguos relatos, "la tierra se abrió en varias partes y lanzó una manga de agua, que inundó todo, no dejando tras sí, sino un montón de ruinas". Otros relatos mencionan que "Esteco se arruinó enteramente con un terremoto que abriendo la tierra por varias partes arrojó borbotones de agua que inundaron todo el terreno" (Alcedo, 1789).

El 27 de octubre de 1894 se produjo un sismo con epicentro en el noroeste de la provincia de San Juan, considerado por sus efectos a grandes distancias del foco, como el de mayor magnitud ocurrido en territorio argentino. (Bodenbender, 1894) denomina este sismo "Terremoto Argentino" y le asigna una magnitud 8.2, ubicando su epicentro al noroeste de San Juan y La Rioja. Una de sus particularidades fue la gran alteración del terreno aún en áreas muy alejadas al epicentro, a más de 200 km de distancia. Se produjeron deslizamientos y fenómenos de licuefacción, agrietamiento del terreno, volcanes de arena y salida de agua en forma de chorros en los terrenos saturados de agua y sin cohesión. Bodenbender le asigna una importancia fundamental a la presencia de agua subterránea en la formación de estas estructuras y establece que estos efectos se producirían en los suelos de los valles y llanuras formados por depósitos blandos de arenas, arcillas y rodados con el agua subterránea a poca profundidad. La licuefacción fue uno de los efectos principales de todos los terremotos ocurridos en la región. Las grietas, volcanes de arena, derrames, han sido muy abundantes en áreas distantes hasta 260 km del epicentro, y afectaron áreas de hasta 4000 km².

El terremoto de Valparaíso de 1906 tuvo varios hechos que llamaron la atención de la población y que se pueden atribuir directamente licuación de suelos

(Rodríguez & Gajardo, 1960) señalan los siguientes acontecimientos en las ciudades de Viña del Mar y Talca, respectivamente: "...en los momentos mismos en que se sucedían los temblores más fuertes, en la calle de Limache, frente a la Refinería de Azúcar, se abrió una profunda grieta por donde salía el agua a borbotones e igual cosa sucedió en varias partes de la población Vergara, donde se formaron verdaderas lagunas, sobre el nivel de las calles...". "En distintos puntos se formaron hoyos circulares por donde salía agua y arena, formándose montículos de la última. Por uno de esos agujeros el agua saltó con fuerza, elevándose hasta 10 metros". Tomado de (Perucca, Pérez, & Navarro, 2006) Tambo de Mora, Perú, 15 de agosto de 2007 un terremoto de magnitud 8 y aceleración de 0,5 g durante 100 segundos provocó la licuefacción de arenas sueltas en múltiples lugares. Hubo desplazamiento lateral en dirección al mar, hundimiento y falla en cimentaciones debido a que no se tomaron en cuenta el comportamiento mecánico del suelo en el diseño de la cimentación de las estructuras. De la evaluación efectuada en las construcciones antiguas de adobón, adobe y quincha se observa que el 80% han colapsado o han sufrido daños severos, en la zona de desastre (Carrillo & Alcayhuaman, 2008).

El 12 de enero de 2010 en Haití, un terremoto de magnitud 7,0 en la escala de Richter, con epicentro a unos 15 kilómetros al suroeste del centro de Puerto Príncipe y con hipocentro a unos 10 kilómetros de profundidad, sacudió la capital de Haití, destruyendo una parte importante de las zonas sur y suroeste de la capital haitiana, incluyendo a Leogane y Jacmel, y provocando cerca de 250,000 muertos, unos 300,000 heridos, 250,000 viviendas destruidas, 30,000 comercios colapsados y más de un millón de damnificados, siendo esta la mayor sacudida sísmica desde el año 1770. El terremoto de Puerto Príncipe, localizado en el extremo suroeste fue devastador. La razón fundamental es que la ciudad de Puerto Príncipe ha sido levantada sobre los suelos arcillosos flexibles, de muy mala calidad y bajas velocidades de ondas de corte, depositados en la llanura occidental remanente del antiguo canal marino de Enriquillo, y sobre sedimentos margosos y gravas gruesas y sueltas del pie de monte existente en la franja sur de la ciudad capital, lo que provocó un incremento extraordinario de la aceleración del suelo, haciendo que casi todas las columnas fallaran por esfuerzos cortantes y que las edificaciones se desplomaran verticalmente donde

murieron cientos de miles de haitianos que no tuvieron tiempo para salir, ni para protegerse (Fernández, 2015).

El 27 de febrero del 2010, un sismo de magnitud 8,8 grados en la escala de momento sísmico sacudió la zona centro sur de Chile. En la ciudad de San Pedro de la Paz, localizada 80 km al suroeste del epicentro, la intensidad estimada para el sismo alcanzó de VIII a X grados en la escala de Mercalli modificada. El mismo dejó en evidencia un gran número de sitios donde ocurrió el fenómeno de licuefacción de suelos. La diversidad en la intensidad y distribución de daños es una manifestación de los efectos de sitio, esto se debe a las características físicas del terreno (González & Verdugo, 2014).

El 11 de marzo 2011 en Japón, denominado oficialmente por la Agencia Meteorológica de Japón como el terremoto de la costa del Pacífico en la región de Tohoku de 2011. Fue un terremoto de magnitud 9,0 en la escala Richter. El terremoto ocurrió a las 2:46:23 p. m. hora local (05:46:23 UTC) del viernes 11 de marzo de 2011. El epicentro del terremoto se ubicó en el mar, frente a la costa de Honshu, 130 km al este de Sendai, en la prefectura de Miyagi, Japón, a una profundidad de 32 kilómetros. El terremoto duró aproximadamente seis minutos según los sismólogos El terrible terremoto que se desencadenó en Japón causó un significativo nivel de "licuefacción" del suelo que sorprendió a los investigadores por su severidad generalizada (imagen 3). La extensión geográfica de la licuefacción del suelo japonés fue muy amplia, se extendió cientos de kilómetros. Estructuras enteras se inclinaron y se hundieron en los sedimentos, aun cuando se mantuvieron estructuralmente intactas. Los cambios en el suelo destruyeron tuberías de agua, de gas y hasta del alcantarillado, paralizaron los servicios públicos e inutilizaron infraestructuras vitales para la población de las zonas dañadas. Algunos lugares que se hundieron hasta un metro. (Ecured, 2019).



Imagen 3: Evidencias del terremoto en Japón.

México, 19 de septiembre de 2017, el epicentro fue localizado en los límites de los estados de Puebla y Morelos, a 120 kilómetros de Ciudad de México y a una profundidad de 57 kilómetros y con una magnitud de 7,1 R. a nivel nacional dejó un total de 369 víctimas, cientos de obras dañadas, edificios derrumbados, escuelas, etc. Nieves Sánchez Guitián, secretaria del Colegio Oficial de Geólogos, explicó que el conocido “efecto local”, que se produce porque el terreno se comporta como un fluido, es lo que ha producido la mayor devastación en Ciudad de México. Según la experta, el terreno sobre el que se asienta la capital “está formado por cenizas volcánicas poco consolidadas, con líquido intersticial entre los poros que le confiere un comportamiento fluido y reduce su resistencia, un fenómeno conocido como licuefacción”. De esta manera, ha añadido, “el terreno actúa como si fuera una esponja, con el nivel de agua entre los poros, y al producirse las vibraciones por la onda sísmica, el líquido se mueve y se genera un riesgo mayor”, ya que los edificios cimentados de manera superficial “se hunden en cuanto reciben el impacto”. (Autores, 2017).

Indonesia 29 de septiembre 2018, la licuefacción del suelo provocó el derrumbe de numerosos edificios en la ciudad indonesia de Palu tras el terremoto de 7,5 grados de magnitud y el posterior tsunami que devastaron la zona central de la isla de Célebes. (Ecured, 2019).

1.2.3.1 Evidencias de licuefacción de los suelos en Cuba.

Terremoto de 18 de octubre de 1551, este se conoce como el terremoto de Bayamo, pues fue la villa más importante donde se reportaron las afectaciones. Varias personas fueron heridas, hubo daños en barracas de soldados españoles,

en un hospital y en la iglesia parroquial, así como 16 casas colapsadas. De acuerdo con la información encontrada en los documentos, el daño causado por este terremoto se puede resumir de la siguiente manera (localidad =Intensidad, escala MSK): Cabo Cruz = 9, Sierra Maestra (Las Mercedes) = 9-8, Bayamo = 8, Cauto Embarcadero = 8, Niquero = 8, Yara = 8-7, Manzanillo = 8-7, Jobabo Mines = 7, Jiguaní = 6, Puerto Príncipe = 5 y Sancti Spíritus = 3. El terremoto alcanzó una magnitud de 6.6 y el epicentro se situó en 19.6 N-77.8 W (Cotilla-Rodríguez y Córdoba-Barba, 2010). También ocurrió la licuación del suelo debido a las condiciones de sitio, localizada en las llanuras fluviales de Río Cauto, específicamente en Cauto Embarcadero. La intensidad máxima en la Escala MSK fue de 9 grados en Cabo Cruz, zona epicentral, donde se reportó el volcamiento de pesados cañones. Según (Actas Capitulares y Archivo de Indias), (Chuy, 1999), (Cotilla y Córdoba, 2010) y (Álvarez, Villalón, & Lindholm ,2015).

El terremoto del 23 de enero de 1880, en Pinar del Río, actual provincia de Artemisa, en el poblado de San Cristóbal causó 3 muertes y tuvo una intensidad máxima de VIII grados en la Escala MSK. Se sintió en las provincias de Pinar del Río, La Habana, Matanzas y parte de Cienfuegos, y tan lejanos como los Cayos de la Florida. Aunque el área perceptible fue bastante grande, el daño más significativo se concentró en las zonas llanas de Pinar del Río. La infraestructura de la industria azucarera fue severamente dañada, causando la ruina económica a los habitantes locales. Todas las casas de mampostería sufrieron colapso de techos y paredes y una iglesia fue destruida. Se observaron efectos de sitio consistentes con la licuación del terreno. Este evento es el terremoto más fuerte en la región noroccidental de Cuba (Álvarez, Villalón, & Lindholm ,2015).

Asociados a los eventos sísmicos del 20 de agosto de 1852 se describieron deslizamientos y derrumbes en zonas aledañas a Santiago de Cuba, en las estribaciones de El Caney (Chuy, Álvarez, & Zapata, 1992).

El sismo del 3 de febrero de 1932, durante este evento se reportaron grietas moderadas en el pavimento y la pérdida de sustentación de algunas viviendas en la zona del puerto de Santiago de Cuba, (imagen 4) lo cual podría ser un reflejo del fenómeno de licuefacción por ser los suelos potencialmente licuables

y existen referencias de pequeños deslizamientos en la zona de la Loma del Cake durante el terremoto de 1947 (Chuy, Álvarez, & Zapata, 1992).



Imagen 4: Licuefacción de los suelos en calle La Alameda, en Santiago de Cuba. Terremoto del 3 de febrero de 1932. Tomado de (Chuy, 1999).

1.2.4 Investigaciones realizadas en Cuba sobre licuefacción de suelos.

La licuefacción ha ocurrido a lo largo de la historia sísmica del país, no está exento de volver a ocurrir, ya que existen ambientes sedimentarios propicios para que se manifieste por sollicitación sísmica en cercanía de los grandes sistemas de fallas activas que cruzan la región oriental de Cuba, donde se ubican ciudades de gran importancia. En la región Oriental, existen dos reportes históricos, asociados a la ocurrencia de terremotos Bayamo 1551, en Santiago de Cuba 1932 y 1947. En la región de Cuba Occidental también existe un reporte del fenómeno de licuefacción asociado a terremotos, este es el de San Cristóbal 1880.

En el informe para proyecto titulado “Mapa de riesgo sísmico de la ciudad de Santiago de Cuba” realizado por investigadores del Centro Nacional de Investigaciones Sismológicas (CENAIIS) utilizan para esta evaluación aspectos importantes como:

- Tipología y propiedades de los suelos
- Profundidad del nivel freático
- Topografía del terreno

- Magnitud y distancia de los terremotos. La cuenca de Santiago de Cuba es considerada como licuable en el sector que corresponde a los sedimentos cuaternarios los que poseen un espesor promedio de 10 m. (García et. all, 2000).

En la tesis de maestría de (Fernández, 2000) titulada “Posibilidad de ocurrencia del fenómeno de licuefacción en la cuenca de Santiago de Cuba por terremotos fuertes” la autora hace un mapa esquemático pronóstico de ocurrencia del fenómeno de licuefacción en Santiago de Cuba por terremotos fuertes sobre la base cualitativa se utilizó los métodos tradicionales en Cuba en la que da tres categorías de (Alta, Media y Baja) susceptibilidad a la licuefacción. En la investigación utiliza por primera vez la combinación de factores importantes como la geología, geomorfología, sísmica y la información ingeniero geológica de forma automatizada. Aunque trabajó con toda esta información para la interpretación del fenómeno da una propuesta totalmente cualitativa basándose solo en la magnitud e intensidad del sismo. No da valores a partir de calcular el factor de seguridad ni tiene en cuenta dentro de las condiciones ingeniero geológicas aspectos importantes como el límite líquido, porcentaje de finos o la densidad del suelo en el área de estudio. En esta investigación se hace una suposición conjugando factores como la geología, geomorfología y el nivel freático.

En el trabajo “Zonación preliminar de la licuefacción de los suelos en la región de Cuba Oriental” (Rosabal, 2011) se expone una zonación de la licuefacción de los suelos, basada en el estudio de diferentes factores que inciden en la ocurrencia de la licuefacción: suelos susceptibles, intensidad sísmica, aceleración horizontal efectiva, topografía, reportes históricos de licuefacción, entre otros, se identifican las zonas que se caracterizan a licuar y zonas donde es baja o no existe la licuefacción de los suelos. Estos estudios constituyen una primera representación de la licuefacción a escala regional en Cuba, principal aporte de la investigación. La investigación se ubica en el Nivel o Grado I de Zonación (TC-4, 1999). Estos estudios regionales identifican zonas susceptibles a licuar, (imagen 5). Es necesario evaluar la potencialidad de la licuefacción con el empleo de la información ingeniero geológica ya que la misma no se hizo en

esta investigación y no se puede hablar de licuefacción teniendo en cuenta solo la información geológica, desembocaduras de ríos, antiguos cauces o actual llanura fluvial, principal deficiencia encontrada en el trabajo.

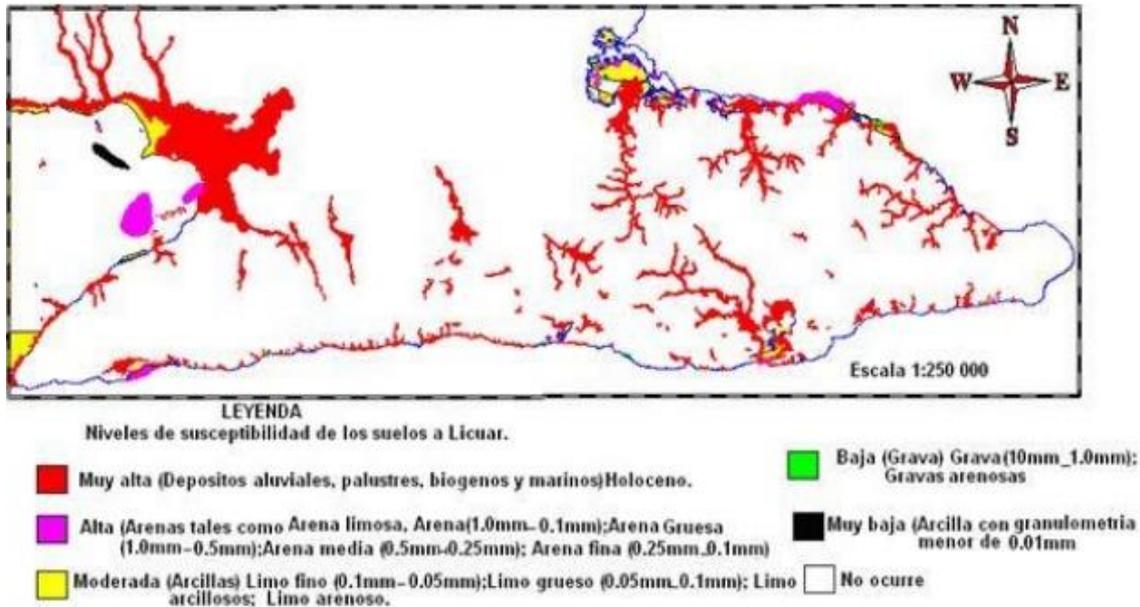


Imagen 5: Suelos que se caracterizan a licuar en la región de Cuba Oriental. Coordenadas geográficas (Long W:-77,738°-74,134° Lat. N: 19.841°-20.730°). (Rosabal, 2011).

Las investigaciones realizadas por (Ordaz, 2010, 2013, 2015) están enfocada en la evaluación de la susceptibilidad a la licuefacción de los sedimentos cuaternarios del emplazamiento de la ciudad de San Cristóbal, provincia de Artemisa, Cuba. Los resultados fueron de acuerdo con la aplicación del criterio de (Brandes, 2003), la ciudad de San Cristóbal se emplaza mayormente sobre sedimentos no susceptibles a licuar (93 % de la superficie), los sedimentos medianamente susceptibles cubren el 6 % del área y los susceptibles apenas el 1 %. De forma general, solo en pequeños sectores coincidieron las dos condiciones (límite líquido y fracción de arcilla) para catalogarlos como suelos susceptibles. En estos sectores la columna de suelos está conformada, predominante, por arenas, formando estratos de hasta dos metros de espesor intercalados con lentes de arcilla de 1,5 m. Ligeramente más propagados espacialmente se encuentran los suelos medianamente susceptibles. Estos coinciden aproximadamente con las terrazas de inundación del río San Cristóbal,

en el extremo noreste del área, aunque también se identificaron en algunos sectores dentro de la Fm. Guane. Los estudios realizados hasta el momento hacían una evaluación de grandes áreas y la evaluación era totalmente cualitativa.

En el trabajo de diploma titulado “Delimitación de escenarios susceptibles a la licuefacción inducido por terremotos de gran magnitud en el Consejo popular Guillermón Moncada del municipio Santiago de Cuba” por (Herrera, 2015) da como resultado un mapa de susceptibilidad a la licuefacción a partir de interpretar factores como geología, nivel freático y las propiedades físicas y mecánicas lo que le permitió calcular el Factor de seguridad para la licuefacción (FSL) dando sectores entre alto, medio y bajo lo cual dependen del tipo de suelo. Los resultados con FSL menores de 1 se caracterizan por ser suelos blandos representados por un material tipo cieno con un comportamiento común en cuanto al contenido de humedad $>$ al 30 %, densidades secas $<$ 13,50 kN/m³, con pesos específicos que oscilan en el rango de (26,60 a 27,00) kN/m³ y resistencia a la penetración dinámica de 4 a 6 golpes por cada 30 cm de penetración (SPT), desde el punto de vista de clasificación de suelos varían entre una arcilla muy plástica con arena (CH) a una arena arcillosa con gravas (SC), con un predominio de suelos tipo (CH) en dirección norte, hacia el centro este los suelos tipo SC y hacia el sur los de tipo OL - OH. Esta investigación es de gran importancia ya que es actual y demuestra con datos la probabilidad de ocurrencia del fenómeno ante sismos de magnitud 7,5 y superiores. Se demostró que para magnitudes menores es muy poco probable la manifestación de la licuefacción de los suelos.

En la tesis de maestría de (Fernández, 2015), realiza un estudio del municipio de Caimanera, con el objetivo evaluar las condiciones ingeniero geológicas de los suelos para predecir de forma efectiva si son licuables ante un sismo de gran intensidad. Mediante la implementación de un sistema de indicadores que permiten caracterizar el área de estudio y calcular el factor de seguridad para la licuefacción. Se obtuvo como resultado un esquema pronóstico de susceptibilidad a la licuefacción de cada sector de estudio definiendo las zonas potencialmente licuables.

En el trabajo de diploma titulado “Delimitación de escenarios susceptibles a la licuefacción inducido por terremotos de gran magnitud en la zona sur de la Provincia Guantánamo” (Parellada, 2016) y “Determinación de escenarios susceptibles a la licuefacción inducido por terremotos de gran magnitud en los municipios Baracoa, Yateras, El Salvador y Niceto Pérez de la provincia de Guantánamo” (Reino, 2016), en estos se da a conocer las condiciones ingeniero geológicas de los suelos del territorio, por lo que se persigue determinar, delimitar y evaluar dichas condiciones. Se utilizaron un conjunto de métodos que resolvieran la necesidad de la investigación, como la validación de los resultados de acuerdo al análisis del sistema de indicadores propuestos por (Fernández, 2015), el cálculo del factor de seguridad corregido y la determinación de intensidades máximas que se pueden obtener a partir de magnitudes sísmicas que provoquen licuefacción en el área de estudio. Como resultado se delimitaron escenarios susceptibles a la licuefacción en los municipios Guantánamo, San Antonio del Sur, Imías y Yateras para magnitudes sísmicas iguales y mayores a 6 grado.

En el trabajo de diploma titulado “Estudio de la respuesta local del suelo en el sector urbano del municipio Caimanera, provincia Guantánamo ante la ocurrencia de sismos” (Contreras, 2018), el estudio se llevó a cabo mediante un sistema de indicadores que resumen las características más influyentes en la respuesta del suelo; como: geología, sismicidad, geomorfología, profundidad del nivel freático y condiciones ingeniero geológicas. El resultado obtenido es un esquema que ilustra tres zonas: Norte, Central y Sur; siendo la de mayor peligro la Zona Central, esta está compuesta por suelos blandos, poco compactos, de baja resistencia, saturados, compresibles, de abundante materia orgánica. Y “Escenarios susceptibles a la licuefacción inducida por terremotos de gran magnitud en la zona urbana del municipio Guantánamo” (Villalón, 2018), se evalúa las características ingeniero geológicas de los suelos en estudio, para dar respuesta se empleó un conjunto de métodos como la validación de los resultados de acuerdo al análisis del sistema de indicadores donde incluye el análisis de la geología, sismicidad y calcular el factor de seguridad para la licuefacción. Como resultado se obtuvo un pronóstico de las áreas susceptibles; definiendo que las zonas potencialmente licuables están constituidas por los

suelos tipo grava arcillosa con arena (GC), arcilla de baja plasticidad (CL), además, de las áreas cercanas al litoral compuesta por depósitos aluviales y palustres. Este resultado es de gran utilidad para la ubicación y planificación de obras ingenieriles de futuros trabajos en el área.

Otro de los trabajos más recientes “Delimitación de escenarios susceptibles a la licuefacción inducidos por terremotos de gran magnitud en el asentamiento poblacional del municipio Pílon de la provincia Granma” (Vázquez, 2018) y “Identificación de los escenarios susceptibles a la licuefacción en la ciudad de Manzanillo provincia Granma” (Turcás, 2018), para la realización de estos trabajos se empleó el sistema de indicadores propuestos por Fernández Diéguez en el año 2015 y la obtención de variables correspondientes a las propiedades físico-mecánicas de los suelos, como resultado se identificaron los estratos con un suelo de tipo CL (arcilla de baja plasticidad), GC (grava o arena mal graduada) las cuales predominan en la formación Pílon y en los depósitos innominados del Cuaternario. Se concluye que los suelos donde se ubica la zona urbana del municipio no resultaron susceptibles a la licuefacción.

“Susceptibilidad a la ocurrencia de licuefacción de los suelos en la ciudad de Bayamo inducido por fuertes terremotos” (Peña, 2018), en su tesis de diploma se lleva a cabo los métodos histórico lógico y de análisis y síntesis. Se realizó un resumen de las principales características de los terremotos donde ha ocurrido la licuefacción y de las condiciones de los suelos. Se concluye que las condiciones ingeniero geológicas de los suelos de la zona urbana del municipio Bayamo en sentido general no son favorables para que ocurra la licuefacción dado que está compuesto por materiales de compactación media a dura, el nivel freático a más de 3 metros, baja saturación y alta concentración de partículas finas, solo en algunos sectores específicos, principalmente en las zonas cercanas al río Bayamo, donde se encuentran los sedimentos aluviales indiferenciados del Pleistoceno Superior al Holoceno podrá ocurrir el fenómeno.

1.2.5 Sismicidad de Cuba como factor catalizador de la licuefacción de los suelos.

La licuefacción es un proceso que está estrechamente relacionado a terremotos. La licuefacción inducida por terremoto es uno de los principales contribuyentes al riesgo sísmico urbano. Las sacudidas hacen que aumente la presión de agua en los poros lo que reduce la tensión efectiva, y por lo tanto disminuye la resistencia al corte de la arena.

Los terremotos como fenómenos geológicos constituyen la principal amenaza de origen endógeno en nuestro archipiélago, por tal motivo en Cuba se llevan a cabo un gran número de investigaciones sobre este tema.

En Cuba se definen dos tipos de sismicidad, explicado a través de su posición geográfica respecto a las placas tectónicas del Caribe y la placa Norteamericana. El primer tipo se relaciona con el contacto entre placas en la porción suroriental, donde la fuente fundamental de los sismos en esta zona es la falla Oriente, principal zona sismogénica de Cuba. La actividad sísmica tiene una mayor frecuencia y magnitud en relación con el resto de la isla ($M > 7.0$). (Peña, 2018).

La falla activa Oriente y la falla Norte de la Española constituyen las principales fallas donde pueden ocurrir sismos fuertes que afecten el territorio oriental de Cuba. La zona sismogénica Oriente está asociada a la falla transcurrente Batlle – Caimán que se encuentra al Sur de Cuba oriental, con una dirección predominante de este a oeste. La misma constituye el límite entre las placas de Norteamérica a la que pertenece Cuba y del Caribe a la que pertenecen las islas de Jamaica, La Española y Puerto Rico, entre otras. Se considera una falla transcortical con una extensión de más de 1000 Km y un ancho de 100 -150 Km aproximadamente, con una profundidad de más de 50 km. (Arango, 1966).

El segundo tipo de sismicidad se denomina de interior de placas que incluye al resto del archipiélago con una sismicidad relativamente baja, que se caracteriza por la manifestación de períodos de mayor actividad que alternan con otros de relativa calma. Los terremotos reportados en la zona de interior de placas no han sobrepasado la magnitud $M=6.2$. Los mismos están relacionados con la actividad de fallas regionales, principalmente en las zonas occidental y central de Cuba. (González, 2006).

La falla Pinar constituye el rasgo morfoestructural y geodinámico más relevante de la parte occidental del país, con una extensión de 160 km, una dirección suroeste-noreste, bordeando la parte sur de la Cordillera de Guaniguanico, con 3 km aproximadamente de desplazamiento vertical (Pszczolkowski et al., 1987) y un buzamiento subvertical hacia el sur (70° a 80°), llegando a cortar la corteza continental. (Fernández de Lara y Fajardo, 2002).

El territorio de Cuba se encuentra caracterizado por provincias de acuerdo a la amenaza sísmica, según el grado de intensidad en la escala MSK, de eventos sísmicos (Imagen 6).



Imagen 6: Caracterización de la amenaza sísmica en la República de Cuba (Chuy, 2002).

En la (Tabla 4) se puede observar un registro de terremotos ocurridos en el país desde 1551 hasta 1992 de magnitudes e intensidades significativas.

En la misma se aprecia que desde los años 1932 y 1947 no ocurre en Santiago de Cuba un sismo de magnitud superior a 6. Para los sismos que ocurren en esta parte oriental del país se ha establecido un ciclo sísmico de terremotos fuertes de entre 80 y 100 años aproximadamente. Esto significa que un sismo fuerte que afecte a esta parte del país puede ocurrir en cualquier momento, debido a la energía acumulada desde los últimos sismos ocurridos en la primera mitad del siglo pasado.

Tabla 4: Terremotos históricos de gran magnitud e intensidad ocurridos en Cuba. (Fuente Reporte CENAI, NORSAR, 2015). Tomado de (Álvarez, Villalón, & Lindholm, 2015)

Localidades	Fecha	Magnitud	Profundidad (km)	Intensidad (MSK)
Bavamo	18/10/1551	6.6	15	IX
Santiago de Cuba	-/08/1578	6.8	30	VIII
Santiago de Cuba	11/02/1675	5.8	30	VII
Santiago de Cuba	11/02/1678	6.8	30	VIII
Santiago de Cuba	11/07/1760	6.8	30	VIII
Santiago de Cuba	-/1682	5.8	30	VII
Santiago de Cuba	12/06/1766	7.6	35	IX
Santiago de Cuba	18/09/1826	6.4	30	VIII
Santiago de Cuba	07/07/1842	6.8	30	VIII
Santiago de Cuba	20/08/1852	7.3	30	IX
Santiago de Cuba	26/11/1852	7.0	35	VIII
Santiago de Cuba	28/01/1858	6.5	30	VII
San Cristóbal	23/01/1880	6.2	32	VIII
Santiago de Cuba	22/09/1903	5.7	30	VII
Santiago de Cuba	22/06/1906	6.2	30	VII
Gibara	28/02/1914	6.2	32	VII
Santiago de Cuba	25/12/1914	6.7	30	VII
Santiago de Cuba	03/02/1932	6.7	35	VIII
Santiago de Cuba	07/08/1947	6.6	35	VII
Santiago de Cuba	19/02/1976	6.8	20	VIII
Cabo Cruz	25/05/1992	6.9	23	VII

1.3 Características geográficas y geológicas de las áreas de estudio

1.3.1 Situación geográfica.

1.3.1.1 Río Cauto

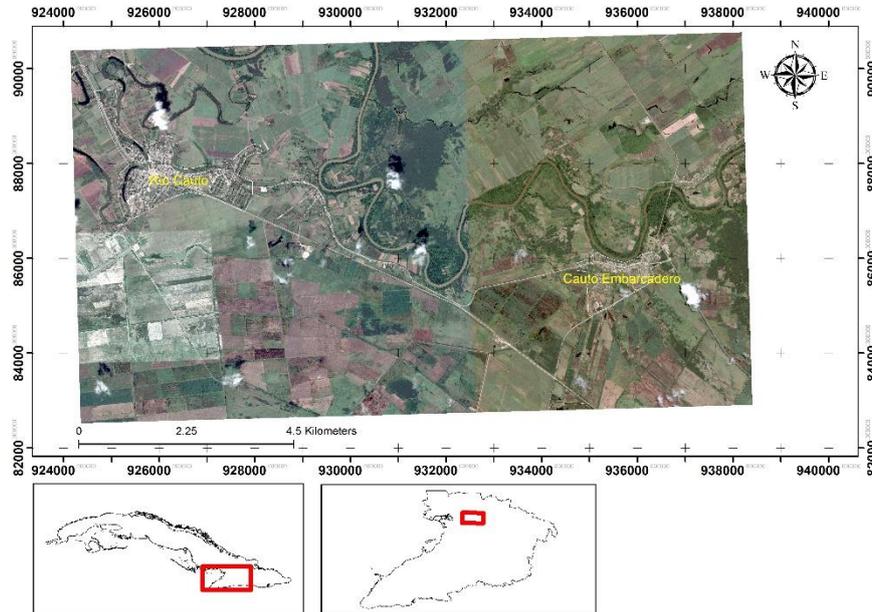


Imagen 7: Mapa de ubicación de la ciudad de Río Cauto.

La ciudad de Río Cauto se ubica en la porción noroeste de la provincia Granma (imagen 8), en el Valle del Cauto, ocupa una extensión territorial del 1505.5 km² que representa el 17.93% del territorio granmense, siendo el municipio de mayor extensión en la provincia. Limita al norte con la provincia Las Tunas (Jobabo y Majibacoa); al sur con los territorios de los municipios Yara y Bayamo; al este con Bayamo, Cauto Cristo y Calixto García, en Holguín y al oeste con el golfo de Guacanayabo, en Manzanillo (Ecured, 2019).

1.3.1.2 San Cristóbal

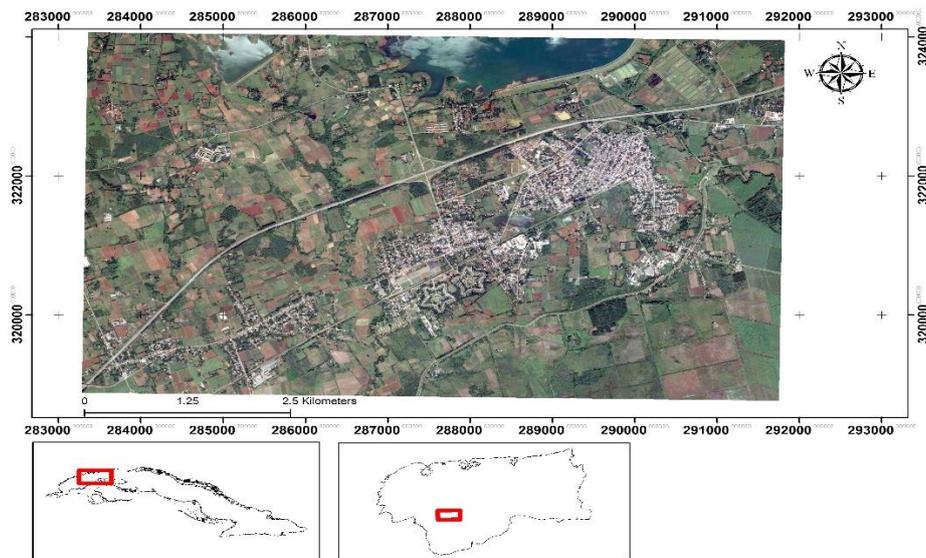


Imagen 8: Mapa de ubicación de la ciudad de San Cristóbal.

La ciudad de San Cristóbal se encuentra ubicada en la parte sur este de la provincia Artemisa (imagen 9), limita geográficamente al norte con los municipios La Palma y Bahía Honda, al sur con el Mar Caribe y al este con el municipio de Candelaria. Posee una extensión territorial de 936 Km² y 71 186 habitantes en el 2010. (Ecured, 2019).

1.3.1.3 Santiago de Cuba

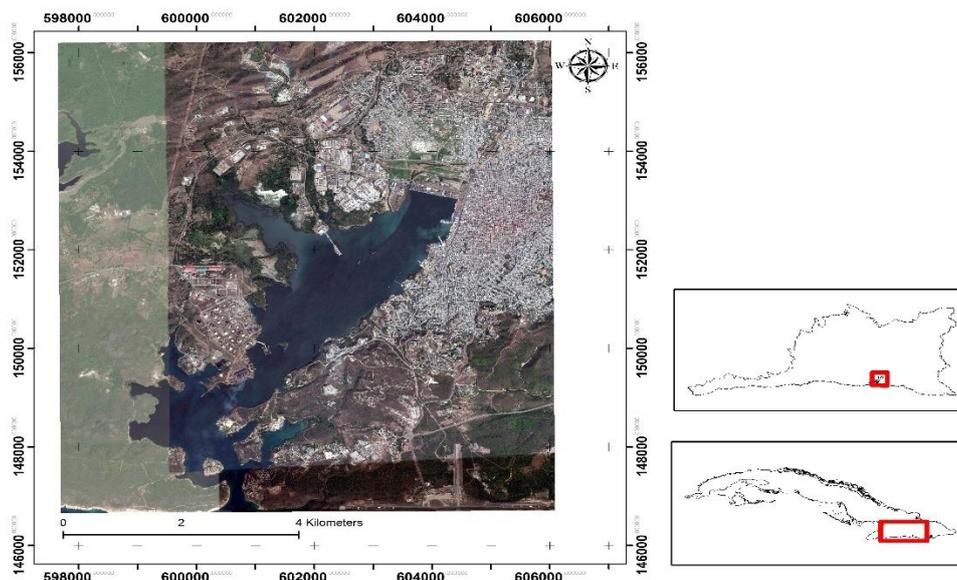


Imagen 9: Mapa de ubicación de la ciudad de Santiago de Cuba.

La ciudad de Santiago de Cuba, ubicada en la provincia con el mismo nombre se encuentra al sur (imagen 10). Limita por el norte con los municipios San Luis y Songo La Maya; por el sur con el Mar Caribe, flanqueadas por las montañas de la Sierra Maestra; por el este con la provincia Guantánamo y por el oeste con los municipios Guamá y Palma Soriano, siendo sus Coordenadas Lambert (Xmin:579319,500m; Ymin:137356,000m y Xmax:651778,500m; Ymax:164642,000m). (Ecured, 2018).

1.3.2 Características geológicas del área de estudio

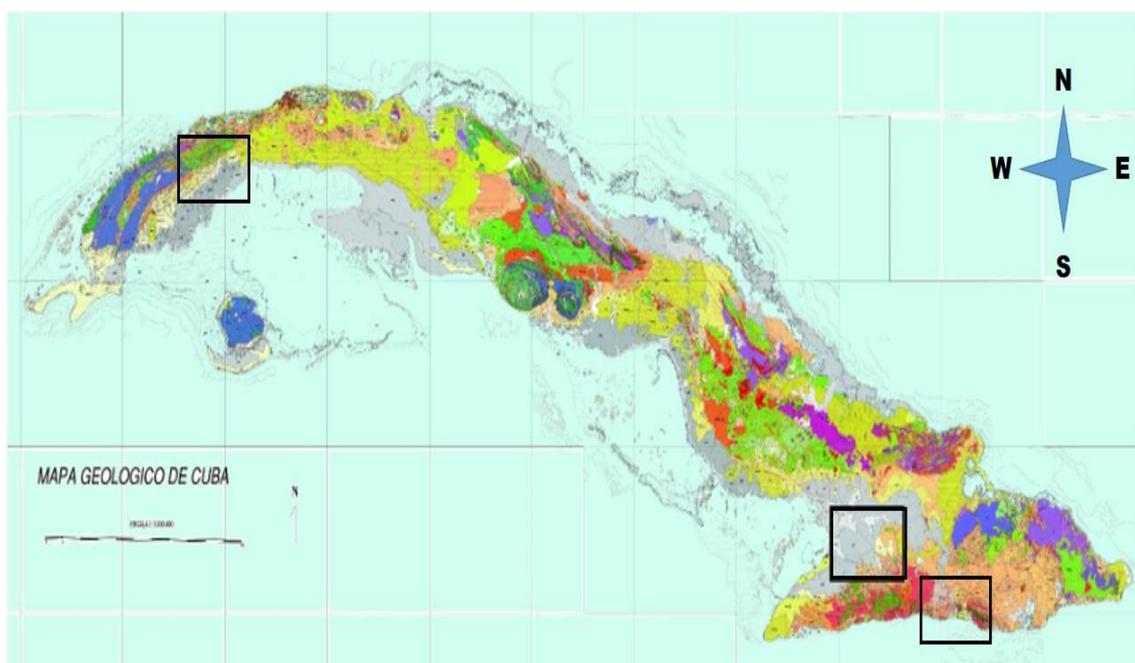


Imagen 10: Mapa geológico de Cuba, escala 1:100000.

1.3.2.1 Río Cauto

La ciudad de Río Cauto, desde el punto de vista geológico se encuentra enmarcada en la cuenca Cauto. La cuenca presenta la forma de un polígono irregular limitado por fallas transcurrentes, característicos de un desarrollo tectónico.

La cuenca Cauto, está cubierta casi totalmente por depósitos del Mioceno – Cuaternario. Al norte afloran secuencias sedimentarias del Paleógeno y Cretácico con un alto aporte de material volcánico. Estas ocupan una posición intermedia entre la Cuenca y los afloramientos de rocas magmáticas correspondiente al arco volcánico Turquino del Paleógeno (Miró, 1993; Álvarez, 1994; Millán, 1997; Álvarez, 2001a, b). El conjunto sedimentario está acomodado en dos grandes hundimientos de tipo pull – apart, con espesores totales de rocas

sedimentarias (6 – 7 Km) de acuerdo con los datos sísmicos (Millán, 1997) citado en (Tutaleni- Kambwa, 2013).

Destacándose las formaciones:

- Formación Río Macío Pleistoceno. Está compuesta por depósitos de valles aluviales de composición y granulometría heterogénea (ENIA Holguín, 2014).
- Formación Cauto del Pleistoceno Superior, parte baja. Se formó en depósitos aluviales y deluviales, con alguna influencia marina cerca de la desembocadura del río Cauto, que debe haber sido mayor durante las transgresiones del Plioceno y el Cuaternario. (Colaboradores, 2013), se extiende por todo el Valle del río Cauto. Las litologías principales son Arcillas, limos, arenas, gravas polimícticas y conglomerados polimícticos, con estratificación horizontal y cruzada, predominando la horizontal. Coloración gris, gris pardusco y amarillo grisáceo. Las arenas son de grano fino hasta grano grueso. Generalmente están mal seleccionadas y casi siempre contienen arcillas. El porcentaje de arcillas es variable y puede alcanzar hasta un 80%-90%. Estas arenas forman capas que casi siempre contienen gránulos, cuyo diámetro puede variar entre 0.5 cm hasta 23 cm. Su material es vulcanógeno y, menos frecuentemente, de calizas y jaspeoides (Peña-Leyva, 2018).
- Sedimentos aluviales del Holoceno. Se extiende en el cauce de los ríos, orilla y en la desembocadura de los mismos. Se observa una potente secuencia de los sedimentos aluviales, capa vegetal, bloques, gravas, cantos rodados, arenas no consolidadas y aleurolitas subordinadamente arcillas. (Rivera, 2001).

1.3.2.2 San Cristóbal.

En Cuba occidental, el substrato plegado presenta componentes de origen continental y oceánico, en lo que Iturralde (1994) ha denominado terreno sudoccidental Guaniguanico, el cual se divide en cinco secciones litoestatigráficas: Cangre, Los Órganos, Rosario Sur, Rosario Norte y Quiñones-Guajaibón.

El área de estudio se encuentra emplazada en la sección litoestatigráfica Rosario Sur, estas rocas equivalen espacial y temporalmente a los Nappes Peñas Blancas y Caridad, descritos por (Cobiella et al. 2000). Los Nappes de Peñas Blancas están constituidos por las formaciones San Cayetano (Jurásico Inferior - Jurásico Superior) y Artemisa de edad Jurásico Superior - Cretácico Inferior.

En la parte superior del corte estratigráfico (rocas más jóvenes) se encuentran las secuencias de neautóctono o cubierta del Eoceno Medio-Cuaternario, formada por sedimentos derivados de la erosión de los terrenos elevados

conformando la cuenca de los Palacios, donde se enclava la ciudad de San Cristóbal. A continuación se describirán las formaciones geológicas más jóvenes, en orden de sobreyacencia, se encuentran:

(a) Formación Loma Candela, representada por arcillas y areniscas calcáreas del Eoceno Medio-Superior;

(b) Formación Paso Real, compuesta por depósitos carbonatados y terrígenos del Mioceno Inferior-Medio, que yacen discordantemente sobre la Formación Loma Candela, formada por calizas organógeno-detríticas con intercalaciones de areniscas, arcillas, arenas, calizas dolomitizadas y dolomías, con un espesor de 750 m.

(c) Por último, la parte superior de la columna estratigráfica está ocupada por conglomerados, gravas, arenas y arcillas arenosas débilmente cementadas de la Formación Guane del Plioceno-Pleistoceno inferior (Cabrera y Peñalver, 2001) y por acumulaciones cuaternarias, tanto de génesis fluvial como lacustre.

- Formación Guane del Plioceno Superior-Pleistoceno inferior. Litología diagnóstica: Arenas silíceas, arcillas arenosas, gravas (angulosas y subangulosas) débilmente cementadas por arcillas. Presentan sus depósitos estratificación indefinida lenticular y más raramente cruzada. En su parte alta contiene concreciones ferruginosas y hardpan. Colores abigarrados. Yace transgresivamente sobre las formaciones Capdevila y Paso Real. Está cubierta discordantemente por la Formación Guevara. Espesor: Según datos de perforaciones puede alcanzar hasta 50 m. (Kartashov et al., 1976)
- Formación Guevara del Pleistoceno inferior- medio, presenta litología, arcillas y arenas arcillosas abigarradas, con gravas, a veces guijarros (Kartashov et al., 1976).
- Acumulaciones cuaternarias, tanto de génesis fluvial como lacustre. Están representados por depósitos aluviales recientes y deluvios. Los primeros están constituidos por limos, limos arenosos y arcillas arenosas, mientras que los segundos son suelos de composición arcillosa con gravas. (Ordaz, 2013)

1.3.2.3 Santiago de Cuba.

Las rocas del tipo sedimentarias predominan sobre todo en la Cuenca Santiago (centro sur) y en su parte meridional, observándose una alternancia de calizas biodetríticas, calizas limosas y limoso- arcillosas, calcarenitas de matriz margosa, margas, aleurolitas y más subordinadamente arcillas, conglomerados y areniscas polimícticas con cemento calcáreo, formadas principalmente por vulcanitas; aunque también es posible encontrarlas metamorfozadas hacia el sureste principalmente. (Carrillo, 2009).

Estratigráficamente, las formaciones más antiguas provienen del período Cretácico Superior, donde predominan las rocas sedimentarias, vulcanógenas y vulcanógeno sedimentarias, aunque se revelan algunas del tipo metamórficas en los contactos con los macizos de origen vulcanógeno y vulcanógeno sedimentarios hacia la parte sureste. (Carrillo, 2009).

En el Paleógeno se desarrollan formaciones sedimentarias de origen terrígeno y de ambientes marinos, entre las que se destacan la Formación Jaimanitas en la faja costera, Formación Cauto, terrígena ubicada hacia la parte centro oeste, y otras formaciones tales como Punta Imías, Bitirí, etc. (Carrillo, 2009).

Dentro de la evolución geológica del Neógeno se encuentran un grupo de formaciones sedimentarias fundamentalmente carbonatadas representadas por Formación La Cruz (periferia de la bahía de Santiago de Cuba), Formación San Luis, Formación Camarones y además, otras predominantemente terrígenas como la Formación Puerto Boniato.

Las formaciones más recientes, predominantemente sedimentarias, pertenecen al Cuaternario y se desarrollan en forma discontinua en pequeñas áreas de la cuenca de Santiago de Cuba; representadas en las formaciones Camaroncito y Maya, desarrollándose depósitos arrecifales que alternan con episodios de intenso aporte de materiales clásticos terrígenos (Carrillo, 2009).

Es preciso destacar que en el territorio se encuentran muy expandidas las rocas vulcanógeno-sedimentarias con textura arcillosa en potencias que en algunos casos sobrepasan los 30 metros de espesor.

Principales formaciones geológicas:

- Formación Jaimanitas del Pleistoceno Superior. Constituida por calizas biodetríticas, masivas, cársicas y fosilíferas, calcarenitas y a veces margas. El espesor medio de esta formación parece ser de 8 a 10 m. Presenta marcadas formas de carso superficial de tipo lapiés.
- Formación Camaroncito del Pleistoceno Superior. Compuesta por calcarenitas laminares de grano medio a grueso, bien cementadas, con diseminaciones de gravas polimícticas predominantemente finas. La coloración es abigarrada.
- Por último aparecen en las formaciones más recientes los depósitos marinos, arenas, guijarros de playas y bancos de tormenta y otros

depósitos de tipo aluvial compuestos por lino gris y pardusco, linos arenosos y arcillas arenosas.

- *Miembro Tejar.* Se desarrolla en los alrededores de la bahía de Santiago de Cuba, prolongándose en forma discontinua hacia ella. Se observa una alternancia de calizas biodetríticas, calizas limosas y limoso- arcillosas, calcarenitas de matriz margosa, margas, aleurolitas y más subordinadamente arcillas conglomerados y areniscas polimícticas con cemento calcáreo, formadas principalmente por vulcanitas. Colores crema en los carbonatos, y gris verdoso y parduzco abigarrado en los sedimentos terrígenos.

1.3.3 Características geomorfológicas

1.3.3.1 Río Cauto

Desde el punto de vista geomorfológico dentro de la zona de la cuenca Cauto son destacables varias unidades como:

- ▽ *Unidad de inundación de la llanura fluvial y marina deltaica plana, parcialmente cenagosa.*

Coincide con el área de la desembocadura y el delta del río Cauto con dos niveles de terrazas marinas y fluviales en los intervalos de altura entre los 2-3 m, y los 5-7m.

- ▽ *Unidad del cauce actual y meandros abandonados.*

Esta unidad está formada por meandros enanos ubicados en diferentes paleocauces del río Cauto. Las dimensiones (largo y ancho) de cada sistema de nodos morfoestructural, controlan las dimensiones que tiene cada meandro y la longitud total de estos sistemas de nodos, define la cantidad de meandros sobre el cauce del río. El gasto del río que permitió la formación de estos meandros determina el escurrimiento máximo permisible que puede drenar por cada meandro.

- ▽ *Unidades de los planos de inundación entre los 10 a 30 m y de 30 a 60 m de altitud.*

La morfología de estas unidades, su pendiente y altura del relieve están fuertemente controladas por la estructura en forma de gráben Nipe Guacanayabo y las oscilaciones del nivel del mar del pleistoceno, lo que determinó el perfil de equilibrio del río y la formación y existencia de al menos los

tres paleocauces reconocidos en el río. La alimentación del escurrimiento fluvial de estas unidades proviene principalmente de las subcuencas fluviales que ocupan las alturas y submontañas de las vertientes norte y sur de la cuenca.

▽ *Unidades fluviales de la vertiente norte.*

Se reconocen las unidades de los ríos que drenan la llanura de articulación abrasiva – acumulativa ligeramente ondulada y plana con altura entre los 10 – 30m. Estos ríos son Naranjo, Majibacoa, La Rioja, Cacocum. En estas unidades se presentan siete segmentos de cauces que alimentan directamente a la llanura del río.

▽ *Unidades fluviales en la vertiente Sur.*

En la vertiente Sur se conocen las unidades fluviales de los ríos Bayamo, Cautillo y Contramaestre, que drenan cinco segmentos de cauces directamente a la llanura del río. (Guerra, 2011).

1.3.3.2 San Cristóbal

Las fallas activas que cumplieron con todos los requisitos de actividad evidente, según la guía de (Haller *et al.* 1993) fueron Pinar, Cochino-Cárdenas, Las Villas, La Trocha, Cubitas, Boniato, Manatí-San Germán-Baconao y Dos Hermanas. Los estudios morfoestructónicos realizado con fines de peligro sísmico, a escalas medias o de detalle, son limitados en cuanto a cantidad, para la zona sismogénica Pinar. No obstante, existen trabajos que abordan aspectos de la geología estructural y la geomorfología de esta zona, los cuales se realizaron para otros fines (Pszczolkowski, 1994; Martínez *et al.*, 1994; Iturralde, 1998; entre otros). A partir del año 2000, se han realizado algunos trabajos específicos en la zona (Cáceres *et al.*, 2005; Hernández *et al.*, 2007; Sánchez y Mondelo, 2013; entre otros). Fundamentalmente estos estudios de falla Pinar (Cofiño, 2002; Millán, 2003), han coincidido en el uso del análisis microtectónico y la observación de indicadores cinemáticos, para reconstruir la dirección de los esfuerzos máximos horizontales, principales responsables de la evolución de las morfoestructuras modernas.

Los estudios morfotectónicos realizados en la zona sismogénica Pinar generalmente han sido a pequeña escala, lo que dificulta considerablemente la identificación de estructuras menores indicadoras de la actividad tectónica local.

1.3.3.3 Santiago de Cuba

En el municipio de Santiago de Cuba el relieve es accidentado y variado siendo hacia el norte semimontañoso, constituido por elevaciones jóvenes y alargadas, las cuales forman un arco bordeando la cuenca de pendientes medianamente abruptas y cimas en forma de crestas separadas por pequeños valles. Este sistema montañoso forma parte de la Sierra Maestra aunque con menores alturas (la Sierra del Cobre, la Sierra de Boniato y la Sierra de la Gran Piedra), con pendientes que en varios casos sobrepasan el 45%, un factor favorable para la ocurrencia de deslizamientos. Al sur el relieve es llano a ondulado constituido por escasas elevaciones de pendientes suaves predominan las costeras en forma de mesetas alargadas, origina hacia la cercanía de las costas varias terrazas escalonadas. En la bahía la costa es escarpada y se desarrollan elevaciones de aspecto terraciforme (Herrera-Delfin, 2015).

1.3.4 Características hidrográficas

1.3.4.1 Río Cauto

Los Recursos Hídricos Potenciales en Granma alcanzan los 4499 hm³, de los cuales 3895 corresponden a las aguas superficiales y 604 a las aguas subterráneas. Está constituida por tres sub-regiones hidrológicas dentro de la Región Hidrológica Oriental.

Subregión Cuenca del Cauto

Su corriente superficial principal es el Río Cauto que atraviesa las provincias de Santiago de Cuba, Holguín, Granma y Las Tunas. Los afluentes de mayor importancia de este río en el territorio son precisamente: Contramaestre, Cautillo, Bayamo y Salado, con longitudes que alcanzan hasta 120 km. Excepto el Cauto y el Salado los demás corren en dirección norte.

Subregión Vertiente Meridional de la Sierra Maestra

Abarca las laderas meridionales de la cordillera, desde Cabo Cruz hasta el parte de agua con el río Macío; esta subregión se caracteriza por la existencia de ríos

pequeños con grandes pendientes longitudinales, motivo por el cual en épocas de avenidas arrastran gran cantidad de azolves. Su recorrido hasta la desembocadura en el Mar Caribe, lo hace con un rumbo sur.

Subregión Sur Oeste

Está comprendida desde la zona de Manzanillo en la parte suroeste de las provincias orientales, limita al norte y al este con la Cuenca del Cauto y al sur con la vertiente meridional de la Sierra Maestra. Estos ríos en su mayoría tienen un recorrido en dirección noroeste hasta la desembocadura en el Golfo de Guacanayabo (Ecured, 2019). (Tomado Peña, 2018).

Río Cauto se encuentra dentro de la sub-región hidrológica *Subregión Cuenca del Cauto*. Sus recursos hidráulicos lo conforman el río Cauto, el Salado, las lagunas de Viramas, Leonero y La Puente, la toma del Cauto, la presa de Cauto del Paso, con una capacidad de más de 300 millones de m³ de agua.

1.3.4.2 San Cristóbal

La red hidrológica de la provincia de Artemisa, antiguo Pinar del Río es, fundamentalmente, dendrítica, tanto hacia el litoral norte como al sur, existiendo dos cuencas hidrológicas principales, la norte y la sur, limitadas por un parteaguas natural, representado por la Cordillera de Guaniguanico. En el sector de estudio la principal corriente fluvial corresponde al río San Cristóbal, formado por la unión de los ríos Caja de Agua y Pedrales, el cual fue represado desde la década de los 70 del pasado siglo a 1 500 m al norte del pueblo de San Cristóbal, formando el embalse La Paila, utilizado en la agricultura de la zona sur del municipio mediante una amplia red de canales de distribución. Este río está Curvas de nivel entre 30 y 80 m sobre el NMM (llanuras medias) Embalses Curvas de nivel entre 80 y 120 m sobre el NMM (llanuras altas) caracterizado por sucesiones de perfiles longitudinales aplanados y abruptos, con cauces generalmente profundos y orillas semibarrancosas. En el territorio, además de las corrientes fluviales, existen algunas lagunas y embalses, que influyen en las condiciones ingeniero geológicas del área. Al sureste de San Cristóbal se encuentra la laguna del Maní, la cual está dividida por la carretera Central (Ordaz, 2010).

1.3.4.3 Santiago de Cuba

En el municipio se pueden observar escasas corrientes fluviales con carácter intermitente que atraviesan el municipio y que desaparecen en períodos secos. Los ríos por lo general corren con dirección norte – sur, entre los más importantes del municipio se encuentran: el Cobre (que alimenta la Presa Paradas), San Juan, Juraguá, Daiquirí y Baconao. A nivel regional sus ríos de mayor importancia son el Contramaestre y el Baconao.

La sobresaturación de suelos es un fenómeno común en algunas zonas. En esta situación influyen las corrientes de agua subterránea que existen, por ejemplo, en los alrededores de la bahía de Santiago de Cuba, en las cercanías de los valles aluviales de los ríos del municipio Santiago de Cuba. Este es un factor que junto al tipo de litología que presentan estas áreas (depósitos aluviales, palustres y rocas sedimentarias de baja cohesión) incrementa los efectos de los deslizamientos sobre las infraestructuras ubicadas en estas locaciones. Por otro lado, muchas construcciones se elevan sobre suelos susceptibles al incremento de la velocidad de las ondas sísmicas, situación exacerbada por la necesidad de vivienda que presenta la población del territorio, la cual realiza una serie de acciones constructivas (autoconstrucción), sin dominio previo de las medidas de reducción ante el peligro (Galbán, 2009).

1.3.5 Sismicidad regional y del área de estudio

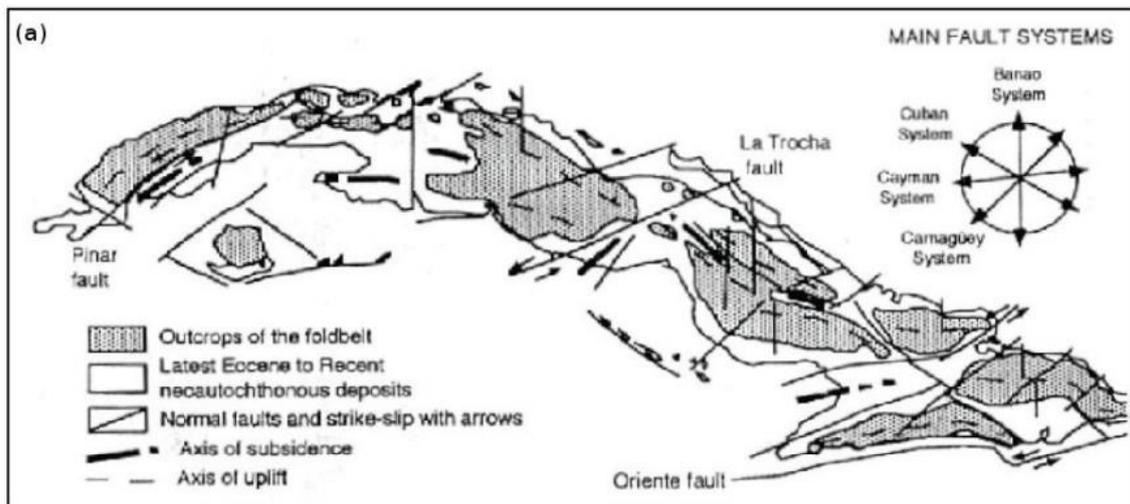


Imagen 11: Sistemas de fallas principales según Iturralde-Vinent (1994).

1.3.5.1 Río Cauto

El territorio está caracterizado por una compleja constitución geólogo-tectónica, debido a diferentes etapas evolutivas, pudiéndose diferenciar en la actualidad distintas regiones con características propias, litología, edad y tectonismo.

Las Fallas Cauto-Nipe y Bartlett-Caimán son estructuras tectónicas de gran importancia debido a que son estructuras activas y las de máxima responsabilidad de la actividad sísmica en esta región, junto a otras como Bayamo, Santiago y Baconao.

- La Falla Cauto-Nipe atraviesa la región Oriental con una dirección noroeste-suroeste, desde la Bahía Nipe hasta las inmediaciones de Niquero-Cabo Cruz con una longitud de más de 260 Km, con un movimiento lateral vertical.
- El Sistema de Fallas transformantes Bartlett-Caimán se extiende en dirección sublatitudinal al Sur de la región Oriental con una longitud de más de 1800 Km, con una profundidad aproximada de 50 Km y un ancho entre 10 y 15 Km. Se caracteriza por una actividad sísmica significativa, concentrada en tres sectores fundamentalmente, de los cuales el sector central (75-77 grados) y el Occidental son los que representan el mayor peligro para el área de estudio.

La frontera entre la Placa Norteamericana y la del Caribe, se localiza en las acuatorias de la parte Sur Oriental de Cuba y a su vez de la provincia Granma, este contacto entre ambas placas tectónicas constituye la principal zona sismogeneradora del área del Caribe, en la cual se han producido sismos de gran magnitud que han provocado a su vez los mayores daños en esta región. En el Archipiélago cubano se presentan dos génesis de sismos dadas por la ubicación espacial y origen de los terremotos: de entre placas y de interior de placas. Esto significa que en nuestro territorio no existe el mismo nivel de potencialidad sísmica en todas sus partes (imagen anexo 2), destacándose el primer tipo de sismicidad, entre placas, la Región Sur Oriental por la frecuencia con que históricamente ocurren en ella terremotos de alta magnitud e intensidad, lo que implica que sea considerada como la de mayor peligrosidad sísmica del país y se corresponde con la Zona Sismogénica de Bartlett-Caimán, donde se

han reportado 22 terremotos fuertes, de ellos 20 en la provincia de Santiago de Cuba y 2, los más recientes en la provincia de Granma. (Chuy, 1999).

Durante los años 1968-1995 se han registrado por la Red de Estaciones Sismológicas de la región 72 terremotos con epicentro en la ciudad de Bayamo y 2 que fueron sacados de los datos de sismicidad histórica. Esta actividad sísmica se ha mantenido durante todos estos años. El 17 de enero de 2017, se produjo un sismo de magnitud 5.8 grados, el cual fue sentido en toda la región oriental con afectaciones a viviendas en varias localidades de la provincia Granma. El mismo alcanzó una intensidad máxima de VI grados en la escala EMS – 98 (Vicedirección Técnica, 2018).

1.3.5.2 San Cristóbal

La falla Pinar es la fuente sísmica generadora más relevante del área, con una extensión de 160 km, una dirección suroeste-noreste, bordeando la parte sur de la Cordillera de Guaniguanico, con 3 km aproximadamente de desplazamiento vertical (Pszczolkowski *et al.*, 1987) y un buzamiento subvertical hacia el sur (70° a 80°), llega a cortar la corteza continental (Fernández de Lara y Fajardo, 2002). Algunos autores asocian a esta estructura, el terremoto del 23 de Enero de 1880 (magnitud estimada 6,0 grados Richter) (Díaz y Lilienberg, 1989; Orbera *et al.*, 1990; Chuy, 1999, entre otros), así como numerosos eventos sísmicos de magnitudes inferiores reportados en el macrobloque occidental. La actividad sísmica es del tipo de interior de placas y se caracteriza por una baja ocurrencia de eventos sísmicos, que se asocian a estructuras geológicas disyuntivas activas (Ordaz, 2010).

La presencia de sistemas de vetillas de extensión sigmoidales, con dirección SW-NE y las estructuras de esquistosidad - cizallamiento estudiadas, por Cofiño y Cáceres (2003), confirman el funcionamiento de la falla Pinar como una gran zona de shear, con desplazamiento transcurrente siniestro.

La peligrosidad sísmica expresa el valor del movimiento de suelo que se puede esperar en una región, debido a su sismicidad. De acuerdo con el mapa de zonificación sísmica con fines de ingeniería (Chuy y Álvarez, 1995; Oficina Nacional de Normalización, 1999), el área de estudio pertenece a la Zona 1A, la cual se caracteriza por un riesgo sísmico bajo, sin efectos dañinos para las

construcciones. Por supuesto, esto se considera válido solo para perfiles de suelo del tipo rocoso-cristalino, definidos en este código como S1, ya que, desde el punto de vista de la historia sísmológica del occidente cubano, no puede plantearse la inexistencia de eventos sísmicos. Actualmente, según Chuy (2004), el municipio de San Cristóbal se incluye en la zona con intensidad MSK comprendida entre 6,0 – 7,0 grados y una aceleración horizontal de 40-90cm/s² (0,04 g-0,09 g, donde g = 980 cm/s² - aceleración de la gravedad) con una probabilidad de ocurrencia del 15 % y un tiempo de vida útil de las construcciones de 50 años (Imagen anexo 2).

1.3.5.3 Santiago de Cuba

Se considera que la región oriental es la de mayor peligro sísmico del territorio cubano, se presenta en detalle la sismicidad registrada en esta porción del país. La falla Oriente y la falla Norte de la Española constituyen las principales fallas activas de primer orden donde pueden ocurrir sismos fuertes que afecten el territorio oriental de Cuba. A estas estructuras se relaciona la principal actividad sísmica registrada en esta región, tanto en magnitud como en frecuencia. En particular, para la provincia de Santiago de Cuba se destaca el tipo de Sismicidad conocida como de Entre Placas, vinculada a la estructura de Bartlett - Caimán (Zona Sismogénica Oriente), por la frecuencia de los terremotos que ocurren y los valores altos de magnitud e intensidad alcanzados históricamente. Más del 60 % de los sismos perceptibles y fuertes reportados en el territorio nacional han tenido su epicentro en esta provincia.

Por estas razones, este territorio es considerado el de mayor Peligrosidad Sísmica del país; señalándose en él 20 reportes de terremotos fuertes (Intensidad $I \geq 7.0$ MSK) en el sector comprendido entre las localidades de Chivirico a Baconao. Es de especial interés significar que, de estos sismos fuertes ocurridos en Santiago de Cuba, 2 de ellos produjeron intensidad $I = 9.0$ MSK en 1766 y 1852, reportándose de ambos considerables daños en toda la región oriental. Así también, que los más recientes que han afectado a esta ciudad se reportan en 1932 ($M_s = 6.75$; $I = 8.0$) y 1947 ($M_s = 6.75$; $I = 7.0$). El primero de estos últimos produjo grandes afectaciones en esta ciudad (Herrera-Delfín, 2015).

Con independencia del equipamiento que se ha utilizado en diferentes períodos por la Red de Estaciones Sismológicas del Centro Nacional de Investigaciones Sismológicas, es en la región de Santiago de Cuba, por la potencialidad sismotectónica de la estructura de Bartlett - Caimán, donde se han registrado con mayor frecuencia terremotos con mayores rangos energéticos.

En la Imagen 9 se presenta Mapa de Epicentros de terremotos registrados en la Isla de Cuba desde 1502 hasta el 2012, con magnitud $M \geq 3$ en la escala de Richter. Se evidencia en esta imagen que las mayores concentraciones de sismos, incluyendo los de mayor magnitud, se localizan siempre en la región Suroriental y tiene una connotación particular, el sector vinculado con la provincia y ciudad de Santiago de Cuba. No obstante, por razón del terremoto de Cabo Cruz de 1992 hay un pico de actividad en esa región también, como consecuencia del registro de las réplicas de ese sismo de magnitud 7.0 Richter.

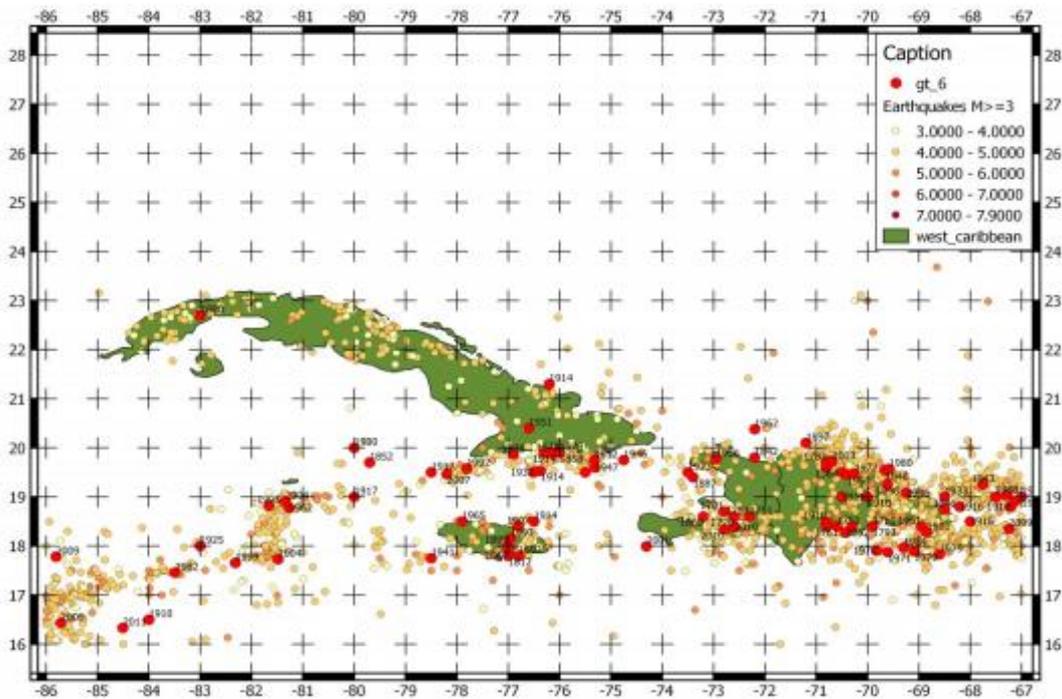


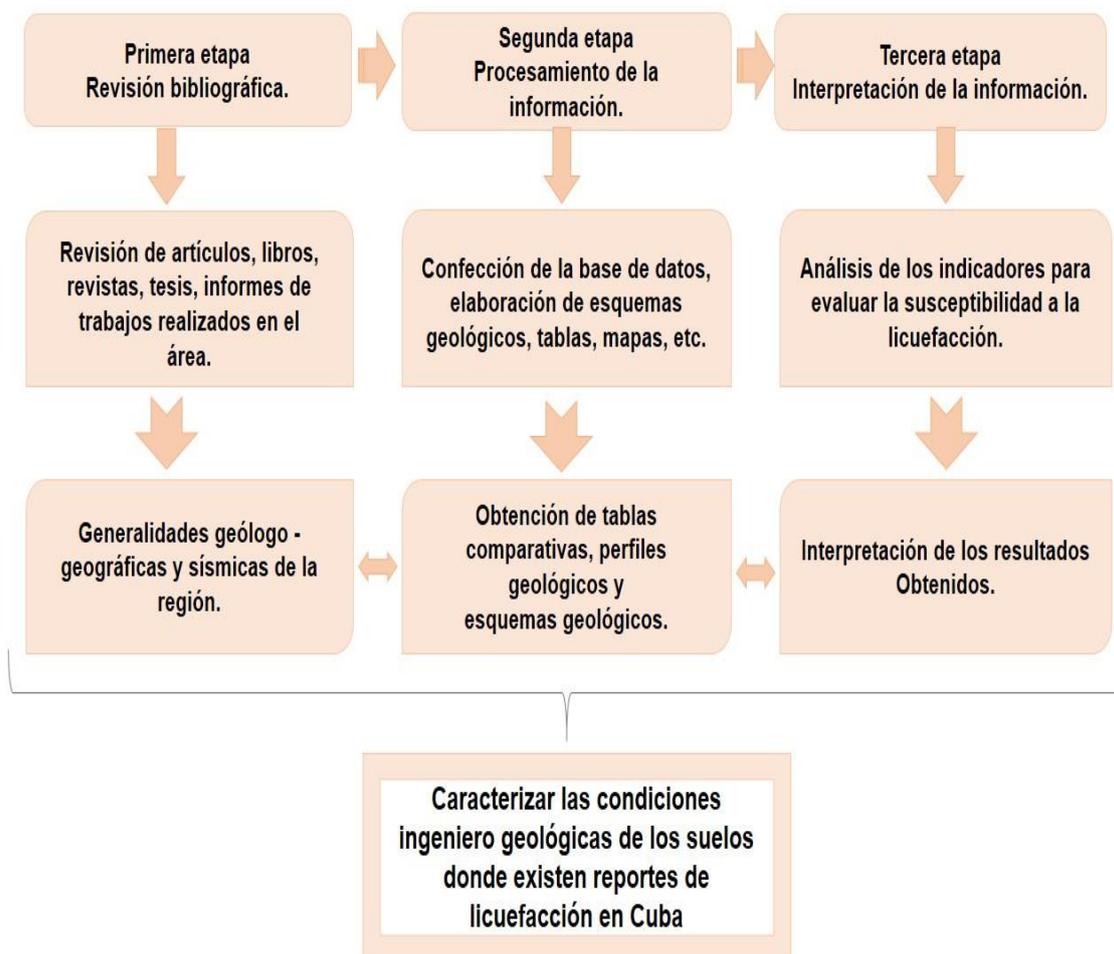
Imagen 12: Terremotos con $M \geq 3.0$ desde 1502 hasta 2012. (Álvarez, Villalón, & Lindholm, 2015).

CAPITULO II: METODOLOGIA DE LA INVESTIGACION Y VOLÚMEN DE LOS TRABAJOS REALIZADOS

2.1 Introducción

El presente capítulo tiene como fin exponer la metodología utilizada para evaluar el comportamiento de los suelos susceptibles a la licuefacción inducida por terremotos de gran magnitud a partir de las etapas de investigación, las cuales se detallan a continuación.

Metodología de la investigación



Esquema 1: Organigrama de la metodología de la investigación.

2.2 Primera etapa: Búsqueda y análisis bibliográfico.

La primera etapa del trabajo consistió en la búsqueda de fuentes de documentación antigua y reciente (artículos, publicados en Internet u otros sitios Web de interés, en revistas, tesis y libros) que mencionen rasgos sobre los

efectos producidos en la naturaleza o en edificaciones cuyo origen ha sido la licuefacción como fenómeno inducido por fuertes terremotos, en el mundo y en Cuba. Se analizaron informes ingeniero geológicos de obras ingenieriles ubicados en los archivos de la Empresa Nacional de Investigaciones Aplicadas (ENIA) de Santiago de Cuba y Holguín, GEOCUBA, CENAIS, etc. También se realizó una búsqueda en INTERNET, ECURED y se utilizó el google académico. Los informes analizados corroboran la homogeneidad del terreno. Esta etapa nos permitió sustentar la investigación, así como validarla. El método a utilizar es el histórico-lógico y análisis y síntesis.

2.3 Segunda etapa: Análisis de la información.

En esta etapa se procesó toda la información recopilada en documentos, artículos e informes técnicos de las empresas antes mencionada. Para ello se utilizaron los programas y software necesarios tales como Microsoft Word, Excel y Power Point, para la redacción y presentación de la información, así como para el trabajo con bases de datos. Es necesario destacar que algunos informes analizados presentan dificultades entre las que se destacan:

- En algunas obras no se realizaron ensayos de importancia tales como: ensayo de humedad, peso específico, límite líquido, límite plástico etc.
- Poco estudio sobre la sismicidad del área; solo se menciona de forma regional.

Se puede decir que algunas zonas carecen de informes ingeniero geológicos lo que dificulta la evaluación de los suelos de estas áreas.

Sistema de indicadores aplicados para el estudio de la susceptibilidad a la licuefacción de los suelos (propuesto por, Fernández - Diéguez, 2015).

Para evaluar el potencial de licuefacción se utilizará un sistema de indicadores en el cual se unifican los parámetros propuestos por diversos autores (Seed y Idriss, 1982); (Wang, 1979) (Youd, 1996); (Shadanet, 1999); (González de Vallejo, 2002); (Kramer & Stewart, 2004) y requisitos obtenidos de la revisión de análisis de casos, donde se propuso con un orden lógico los parámetros que deben cumplirse para que un suelo sea potencialmente licuable. Se hizo difícil determinar los parámetros debido a los diferentes criterios y factores que se

proponían. Después de una revisión de las metodologías propuestas por los autores antes mencionados, se elaboró una propuesta que brindó un orden y permite cuantificar el fenómeno, a partir de todo lo antes expuesto se propone analizar las condiciones siguientes:

➤ **Condiciones geológicas:**

-La primera condición que debe cumplir un suelo para que sea licuable es que corresponda a depósitos jóvenes (menos de 10.000 años) a las que pertenecen las formaciones del Cuaternario (Pleistoceno-Holoceno).

-Debe cumplir además que la relación entre el estrato licuable y el no licuable sea menor que 1.

-Coincidiendo también que el estrato de suelo no licuable encima del licuable debe ser menor de 8.0 m.

-Para la selección de los sectores se hace una búsqueda en el mapa geológico y se seleccionan las formaciones pertenecientes al cuaternario que están representadas por el color amarillo en sus diferentes variantes.

➤ **Sismicidad:**

-Se analiza la cercanía con una zona sísmica generadora capaz de generar sismos fuertes o magnitud mayor de 5,5 en la escala de Richter.

-Las aceleraciones de las partículas lleguen a ser iguales o superior $0,2g/cm^2$.

Para la selección se tiene en cuenta la norma:

Construcciones Sismorresistentes. Requisitos básicos para el diseño y construcción de Cuba de 2017 (NC 46: 2017) en la que aparece un mapa con la zonación de las aceleraciones esperadas para cada municipio de Cuba, además de la tabla de peligro sísmico en las diferentes zonas del territorio nacional donde se muestra el periodo de recurrencia esperado, la aceleración sísmica y la zona sísmica a la que pertenece cada región. Esta información puede ser obtenida, además, de los informes de especialistas del CENAIIS.

➤ **Profundidad del Nivel Freático:**

-Este debe estar cerca de la superficie, se considera potencialmente licuable cuando está a menos de 3 metros, por lo general, ocurre a profundidades menores de 9 metros; a profundidades mayores de 15 metros no se ha reportado la licuefacción de los suelos.

-Los valores del nivel freático se obtienen a partir de las calas perforadas en el área de estudio. Finalmente se confecciona el mapa de profundidad del nivel freático para el área de estudio.

➤ **Condiciones ingeniero geológicas:**

-Lo primero que se cumple es que sean depósitos recientes poco consolidados o material de relleno. De los informes ingeniero geológicos efectuados por la Empresa Nacional de Investigaciones Aplicadas (ENIA) se seleccionarán las propiedades físicas y mecánicas. Se confecciona una base de datos con los principales parámetros que influyen para que un suelo sea licuable, entre los que se encuentran (Límite Líquido, Índice de Plasticidad, humedad natural, densidad húmeda y densidad seca, por ciento de partículas finas, cortante, saturación, compactación del suelo a partir del N de SPT, entre otras).

Se tiene en cuenta:

- Por ciento de partículas finas $\leq 15\%$.
- Límite Líquido $\leq 35\%$.
- Contenido Natural de agua $> 0,9$ LL.
- Índice de liquidez $< 0,75$.
- Forma de las partículas. Principalmente redondas.
- N de SPT < 20 golpes.
- Compacidad relativa (Cr) $< 75\%$.
- Uniformidad de la arena. Cu $< 5\%$.

Según las características propias de los suelos potencialmente licuables se pueden agrupar como:

- Arena fina.
- Arena Media.
- Arena Limosa.

- Arena con bajo por ciento de arcilla.
- Arena con bajo por ciento de materia orgánica.
- Arena con partículas.
- Sedimentos eluviales, llanuras aluviales y zonas de manglar.

2.4 Metodología aplicada para evaluar la susceptibilidad a la licuefacción ante sismos de gran magnitud en las áreas de estudio.

Para evaluar el comportamiento del suelo en los sectores de estudio se plantea una metodología enfocada en la caracterización ingeniero geológica, que permita demostrar que en estas áreas donde hay reportes históricos de licuefacción, las características de los suelos realmente propiciaron la ocurrencia de este fenómeno. Se evalúa a partir de los criterios establecidos por diferentes autores. (Seed & Idriss, 1982) y (Youd & Idriss, 1998), (Fernández - Diéguez, 2015).

2.4.1 Análisis de las condiciones geológicas del área de estudio.

Con la revisión de los mapas y esquemas geológicos de las áreas de estudio realizados en trabajos precedentes, se pudo realizar la evaluación de las condiciones geológicas, se determinan así las formaciones presentes en las áreas y de acuerdo a las edades y sedimentos de cada una de ellas se delimitaron las zonas susceptibles a la ocurrencia del fenómeno de licuefacción, las mismas deben coincidir con las zonas donde se reportó el fenómeno de licuefacción del suelo. Se realizó un análisis según los criterios de (*Iwasaki et. al., 1982.*).(Tablas 1, 2 y 3).

2.4.2 Análisis del comportamiento de la sismicidad en el área de estudio.

Para realizar el análisis del comportamiento de la sismicidad en las áreas de estudio se revisó la norma para Construcciones Sismorresistentes. Requisitos básicos para el diseño y construcción de Cuba de 2017 (NC 46: 2017). Dentro de esta se revisó el capítulo 4 donde se describen las zonas sísmicas del territorio nacional y se tomó la descripción de las áreas en estudio, también se tuvo en cuenta los registros de terremotos de magnitud mayor e igual a 6 en todo el país a partir de 1502 a 2012.

2.4.3 Análisis del comportamiento del nivel freático en el área de estudio.

Para realizar el análisis del comportamiento del nivel freático en el área se tomó en cuenta los resultados expuestos en los informes ingenieros geológicos de la ENIA Holguín, ENIA Santiago de Cuba, ENIA Pinar del Río e informes precedentes como parte del trabajo de perforación realizados por las empresas con el fin de realizar informes ingenieros geológicos.

2.4.4 Análisis de las condiciones ingeniero geológicas.

Se revisaron los informes ingeniero geológicos efectuados por la Empresa Nacional de Investigaciones Aplicadas (ENIA) Holguín, ENIA Santiago de Cuba, ENIA Pinar del Río y trabajos anteriores se seleccionaron las propiedades físicas y mecánicas de los suelos. Se confeccionó una base de datos con los principales parámetros que influyen para que un suelo sea licuable, entre los que se encuentran (Límite Líquido, Índice de Plasticidad, humedad natural, densidad húmeda y densidad seca, por ciento de partículas finas, cortante, saturación, entre otras). Se empleará el Sistema Unificado de Clasificación de los Suelos (SUCS), para clasificar el suelo.

2.4.4.1 Sistema de indicadores propuesto para caracterizar las condiciones ingeniero geológicas de los suelos del área de estudio.

- **Análisis de límite de Atterberg, granulometría y contenido natural de agua.**
 - Por ciento de partículas finas ($<0,005 \text{ mm}$) $\leq 15\%$.
 - Límite Líquido (LL) $\leq 35 \%$.
 - Contenido Natural de agua (w) $> 0.9 \text{ LL}$
- **Análisis de los suelos potencialmente licuables en Cuba.**

De acuerdo con las características propias de los suelos potencialmente licuables se pueden agrupar como:

- Arena fina.
- Arena Media.
- Arena Limosa.

- Arena con bajo por ciento de arcilla.
- Arena con bajo por ciento de materia orgánica.
- Arena con partículas.
- Sedimentos eluviales, llanuras aluviales y zonas de manglar

2.5 Tercera etapa: Interpretación de los resultados.

El procesamiento de toda la información recopilada fue de suma importancia pues permite una mejor interpretación y con ello alcanzar los objetivos propuestos. Esta última etapa en la investigación permitió analizar e interpretar todos los datos primarios obtenidos en los trabajos de campo (perforaciones, reconocimiento geológico del área, descripción y muestreo, pruebas hidrogeológicas y observaciones sistemáticas) y de laboratorios (ensayos de granulometría, etc.), el análisis del nivel freático, durante esta etapa se realizaron las tablas comparativas para una mejor interpretación de las condiciones ingeniero geológicas.

CAPITULO III: CARACTERIZACIÓN DE LAS CONDICIONES INGENIERO GEOLÓGICAS DE LOS SUELOS CON EVIDENCIAS DE LICUEFACCIÓN.

En este capítulo se realizará la caracterización de las condiciones ingeniero geológicas a partir de un sistema de indicadores propuestos para la evaluación del comportamiento de los suelos donde existes reportes de licuefacción y comparar las condiciones ingeniero geológicas de estos suelos.

3.1 Análisis de las condiciones geológicas.

Tabla 5: Condiciones geológicas de las áreas de estudio.

Ciudades Aspectos	Río Cauto	San Cristóbal	Santiago de Cuba
Cuenca Sedimentaria	<u>Cuenca Cauto</u> : El basamento de la cuenca del Cauto, lo ocupan las rocas del Arco Volcánico Cretácico con su cobertura Campaniano-Maastrichtiano de composición siliciclásticos-carbonatada. Estas rocas están constituidas por micritas de color gris oscuro, fértidas, masivas, carsificadas en forma de lapiez. Hacia el centro este de la Cuenca también afloran rocas cretácicas en la región de Babiney., (García, et.al) en (Tutaleni-Kambwa, 2013).	<u>Cuenca Los Palacios</u> : La columna estratigráfica está constituida por rocas sedimentarias y vulcano-sedimentarias, que sobreyacen discordantemente sobre un basamento ofiolítico. Este yace a unos 3 km de profundidad y está conformado por restos de corteza oceánica, representados por un complejo ultramáfico de gabros, serpentinitas, basaltos y otras rocas.(Ordaz, 3013)	<u>Cuenca Santiago</u> : (centro sur) y en su parte meridional, observándose una alternancia de calizas biodetríticas, calizas limosas y limoso-arcillosas, calcarenitas de matriz margosa, margas, aleulolitas y más subordinadamente arcillas, conglomerados y areniscas polimícticas con cemento calcáreo, formadas principalmente por vulcanitas aunque también es posible encontrarlas metamorizadas hacia el sureste principalmente. (Carrillo, 2009)
Formaciones Cuaternarias (Con propiedades a licuar)	<p>*Formación Río Macío Pleistoceno. Está compuesta por depósitos de valles aluviales de composición y granulometría heterogénea (ENIA Holguín, 2014).</p> <p>*Formación Cauto del Pleistoceno Superior, parte baja. Se formó en depósitos aluviales y deluviales, con alguna influencia marina cerca de la desembocadura del río Cauto, que debe haber sido mayor durante las transgresiones del Plioceno y el Cuaternario. (Colaboradores, 2013), se extiende</p>	<p>*Formación Guane del Plioceno Superior-Pleistoceno inferior. Litología diagnóstica: Arenas silíceas, arcillas arenosas, gravas (angulosas y subangulosas) débilmente cementadas por arcillas. Presentan sus depósitos estratificación indefinida lenticular y más raramente cruzada. En su parte alta contiene concreciones ferruginosas y hardpan. Colores abigarrados. Yace transgresivamente sobre las formaciones Capdevila y Paso Real. Está cubierta discordantemente por la</p>	<p>*Formación Jaimanitas del Pleistoceno Superior. Constituida por calizas biodetríticas, masivas, cársicas y fosilíferas, calcarenitas y a veces margas. El espesor medio de esta formación parece ser de 8 a 10 m. Presenta marcadas formas de carso superficial de tipo lapiés.</p> <p>*Formación Camaroncito del Pleistoceno Superior. Compuesta por calcarenitas laminares de grano medio a grueso, bien</p>

Tesis de Diploma en opción al título de Ingeniera Geóloga

	<p>por todo el Valle del río Cauto. Las litologías principales son Arcillas, limos, arenas, gravas polimícticas y conglomerados polimícticos, con estratificación horizontal y cruzada, predominando la horizontal. Coloración gris, gris pardusco y amarillo grisáceo. Las arenas son de grano fino hasta grano grueso. Generalmente están mal seleccionadas y casi siempre contienen arcillas. El porcentaje de arcillas es variable y puede alcanzar hasta un 80%-90%. Estas arenas forman capas que casi siempre contienen gránulos, cuyo diámetro puede variar entre 0.5 cm hasta 23 cm. Su material es vulcanógeno y, menos frecuentemente, de calizas y jaspeoides (Peña-Leyva, 2018).</p> <p>*Sedimentos aluviales del Holoceno. Se extiende en el cauce de los ríos, orilla y en la desembocadura de los mismos. Se observa una potente secuencia de los sedimentos aluviales, capa vegetal, bloques, gravas, cantos rodados, arenas no consolidadas y aleurolitas subordinadamente arcillas. (Rivera, 2001).</p>	<p>Formación Guevara. Espesor: Según datos de perforaciones puede alcanzar hasta 50 m. (Kartashov et al., 1976)</p> <p>*Formación Guevara del Pleistoceno inferior-medio, presenta litología, arcillas y arenas arcillosas abigarradas, con gravas, a veces guijarros (Kartashov et al., 1976).</p> <p>*Acumulaciones cuaternarias, tanto de génesis fluvial como lacustre. Están representados por depósitos aluviales recientes y deluvios. Los primeros están constituidos por limos, limos arenosos y arcillas arenosas, mientras que los segundos son suelos de composición arcillosa con gravas.(Ordaz, 2013)</p>	<p>cementadas, con diseminaciones de gravas polimícticas predominantemente finas. La coloración es abigarrada.</p> <p>* Por último aparecen en las formaciones más recientes los depósitos marinos, arenas, guijarros de playas y bancos de tormenta (m Q1v) y otros depósitos de tipo aluvial (al Q1v) compuestos por lino gris y pardusco, linos arenosos y arcillas arenosas.</p> <p>*- Miembro Tejar. Se desarrolla en los alrededores de la bahía de Santiago de Cuba, prolongándose en forma discontinua hacia ella. Se observa una alternancia de calizas biodetríticas, calizas limosas y limoso-arcillosas, calcarenitas de matriz margosa, margas, aleurolitas y más subordinadamente arcillas conglomerados y areniscas polimícticas con cemento calcáreo, formadas principalmente por vulcanitas. Colores crema en los carbonatos, y gris verdoso y pardusco abigarrado en los sedimentos terrígenos.</p>
Litologías Predominantes	Arcillas, limos, arenas, gravas polimícticas y conglomerados polimícticos.	Arcillas arenosas débilmente cementadas, conglomerados, gravas, arenas y limos.	Arcillas arenosas, gravas, arenas, areniscas polimícticas, calizas y calizas limoso-arcillosas.
Origen de los depósitos	Aluviales recientes, deluvial y aluvial marina, relacionados fundamentalmente con los planos de inundación del río Cauto.	Aluviales recientes, aluvial marino, relacionados fundamentalmente con los planos de inundación y las terrazas bajas del río San Cristóbal.	Aluviales recientes, aluvial marino y fluvial.

Representación esquemática de las formaciones geológicas por región de estudio.

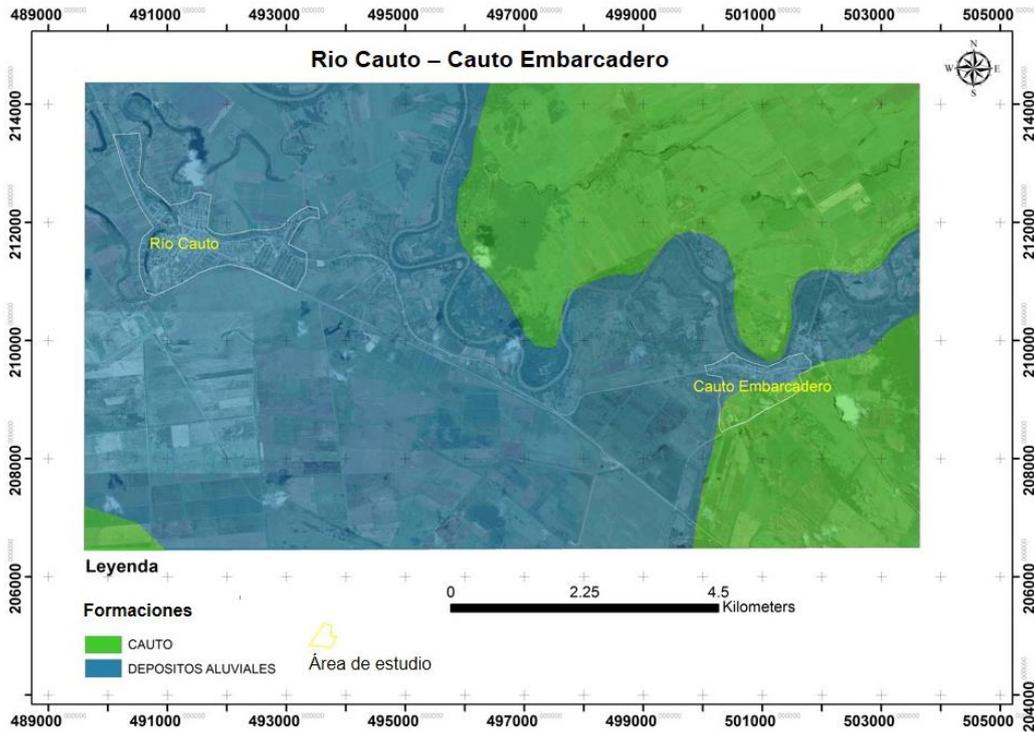


Imagen 13: Representación esquemática de las formaciones en Rio Cauto – Cauto Embarcadero.

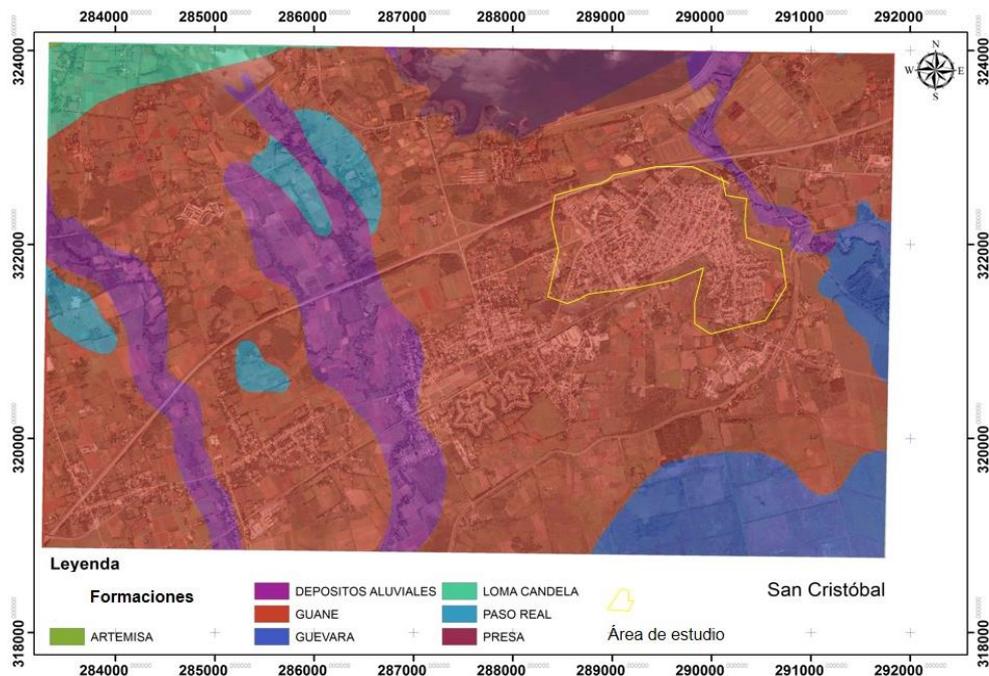


Imagen 14: Representación esquemática de las formaciones en San Cristóbal.

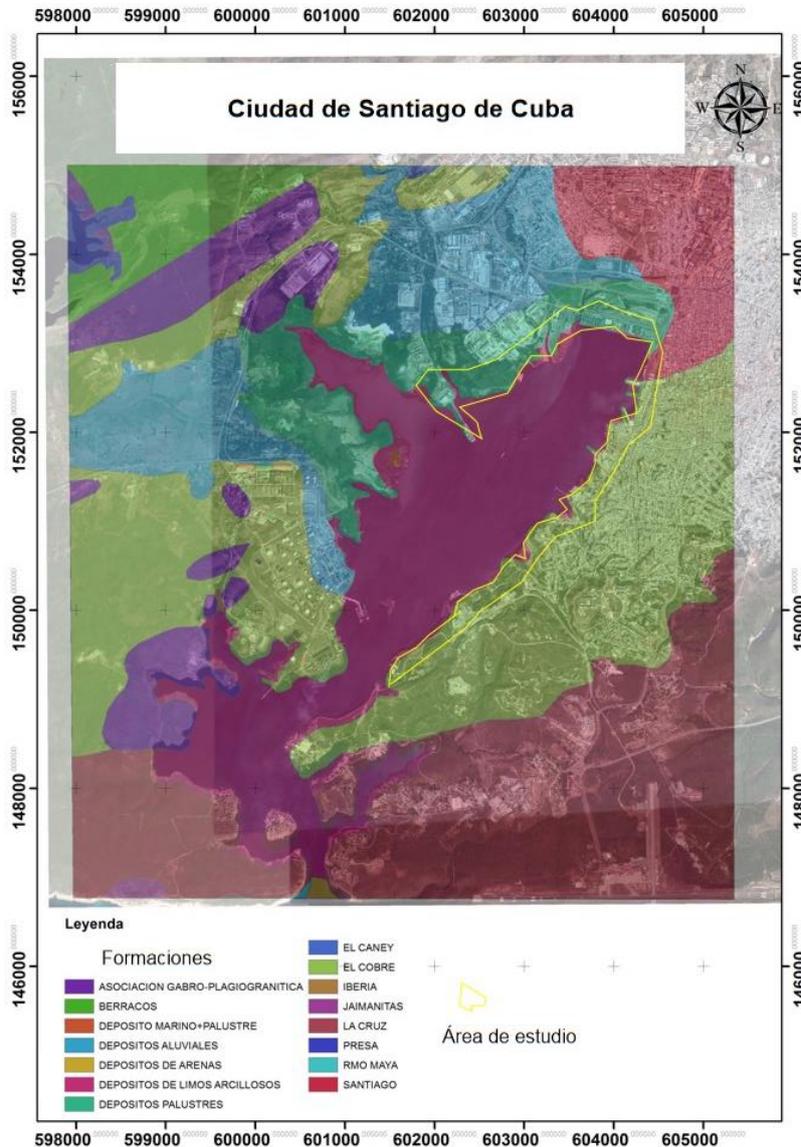


Imagen 15: Representación esquemática de las formaciones en Santiago de Cuba.

Son depósitos jóvenes (menos de 10.000 años) de origen principalmente aluvial reciente, deluvial y aluvial marina, relacionados fundamentalmente con los planos de inundación de ríos, a las que pertenecen las formaciones del Cuaternario (Pleistoceno-Holoceno). Donde predominan los suelos de litologías arcillas, limos, arenas, gravas, arcillas arenosas.

De acuerdo con la metodología planteada las características geológicas cumplen con los criterios para que los suelos licuen. Destacar que estas áreas se

encuentran estrechamente relacionadas a planos de inundación de ríos y a zonas costeras como es el caso de Santiago de Cuba.

Entre las áreas de estudio no se han encontrado diferencias significativas entre ellas en cuanto a las características geológicas, se pueden destacar:

- Las formaciones no son correlacionables (léxico estratigráfico, 2013)
- Las formaciones no son de la misma edad.
- La litología de las formaciones es diferente.

Las condiciones geológicas no son similares. Sin embargo en cuanto al origen de los depósitos en el suelo, es muy similar, puesto que son depósitos aluviales recientes.

3.2 Análisis del comportamiento de la sismicidad.

Tabla 6: Características sísmicas de las áreas de estudio.

Ciudades Aspectos	Río Cauto	San Cristóbal	Santiago de Cuba
Principal Zona Sismogeneradora	<p>* <u>Falla Cauto-Nipe</u>: atraviesa la región Oriental con una dirección noroeste-suroeste, desde la Bahía Nipe hasta las inmediaciones de Niquero-Cabo Cruz con una longitud de más de 260 Km, con un movimiento lateral vertical.</p> <p>*El Sistema de Fallas transformantes <u>Bartlett-Caimán</u>: se extiende en dirección sublatitudinal al Sur de la región. Se caracteriza por una actividad sísmica significativa, representa un peligro para el área de estudio, pero en menor grado. La actividad sísmica es del tipo de entre placas (Chuy, 1999).</p>	<p>*La <u>Falla Pinar</u> es la fuente sísmica generadora más relevante del área, con una extensión de 160 km, una dirección suroeste-noreste, bordeando la parte sur de la Cordillera de Guaniguanico, con 3 km aproximadamente de desplazamiento vertical (Pszczolkowski <i>et al.</i>, 1987). La actividad sísmica es del tipo de interior de placas y se caracteriza por una baja ocurrencia de eventos sísmicos, que se asocian a estructuras geológicas disyuntivas activas (Chuy, 1999).</p>	<p>*<u>Falla Bartlett - Caimán</u>, por la frecuencia de los terremotos que ocurren y los valores altos de magnitud e intensidad alcanzados históricamente. Más del 60 % de los sismos perceptibles y fuertes reportados en el territorio nacional han tenido su epicentro en esta provincia. Por estas razones, este territorio es considerado el de mayor Peligrosidad Sísmica del país; señalándose en él 20 reportes de terremotos fuertes ($I \geq 7.0$ MSK). (Chuy, 1999).</p>
Zonificación sísmica según NC 46:2017	Zona 2: De peligro sísmico bajo que puede ocasionar daños a las construcciones.	Zona 2: De peligro sísmico bajo que puede ocasionar daños a las construcciones.	Zona 5: De peligro sísmico muy alto en el territorio nacional que puede ocasionar daños graves a las construcciones.
Valores de la aceleración espectral horizontal máx. del terreno para períodos cortos (Ss)g y para períodos largos (S1)g	<p>períodos cortos (Ss): 0,30g-0,40g (0,365g)</p> <p>períodos largos (S1): 0,06g-0,15g (0,131g)</p>	<p>períodos cortos (Ss): 0,30g-0,40g (0,362g)</p> <p>períodos largos (S1): 0,06g-0,15g (0,082g)</p>	<p>períodos cortos (Ss): 0,80g-1.10g</p> <p>períodos largos (S1): 0,30g-0,50g</p>

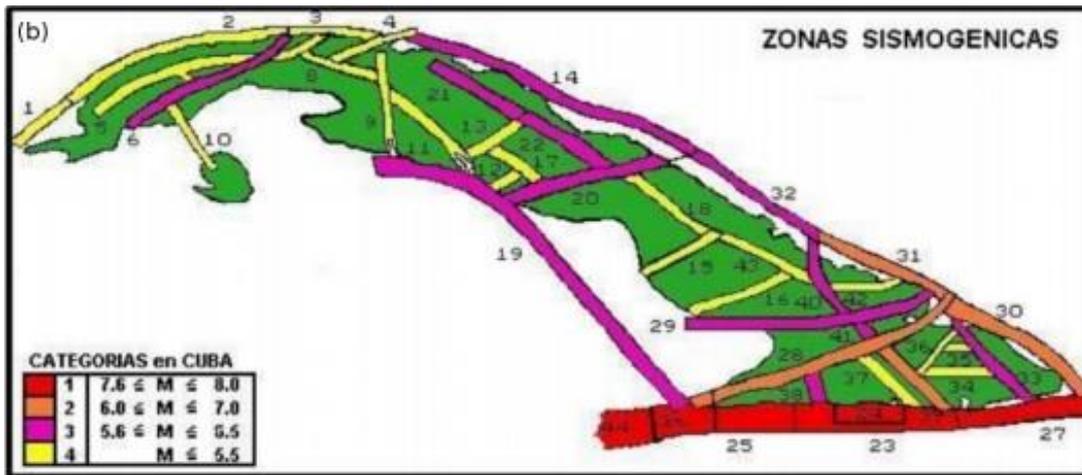


Imagen 16: Sismotectónica del territorio de Cuba (Chuy y Álvarez, 1995).

Durante el periodo de 1502 a 2012 se cuantificaron un total de 117 terremotos de magnitud mayor o igual a 6 ($M \geq 6$) los cuales se representan a continuación:

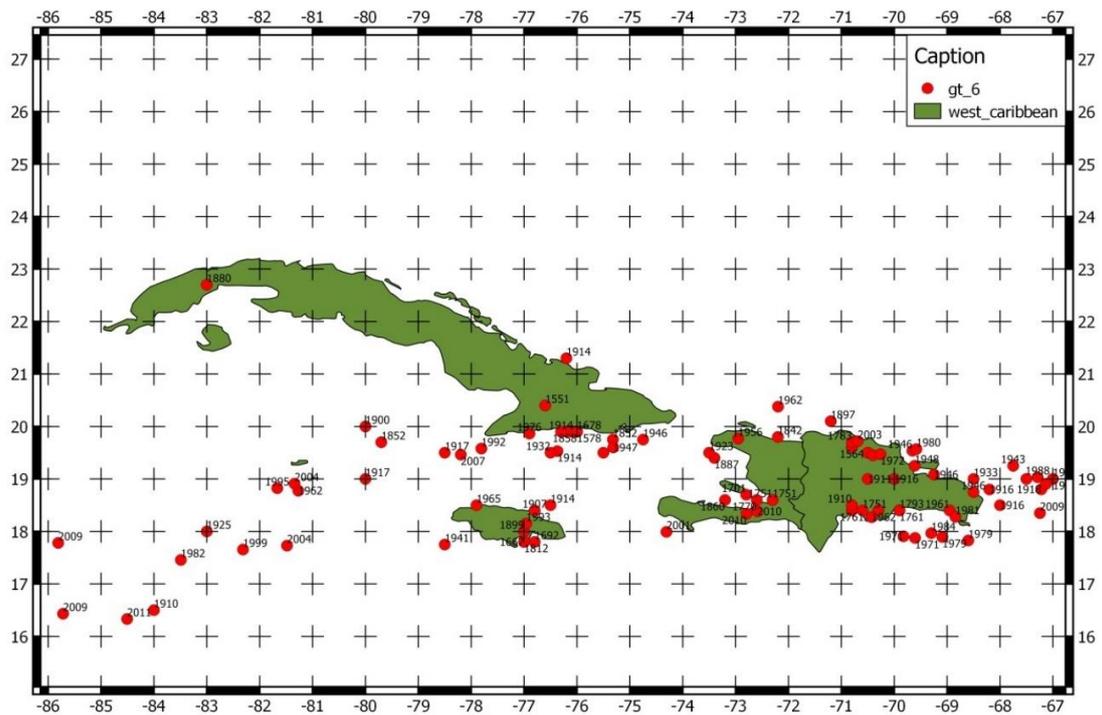


Imagen 17: Terremotos con $M \geq 6.0$ desde 1502 hasta 2012. (Álvarez, Villalón, & Lindholm, 2015).

Como se puede apreciar en la tabla 8 y las imágenes 15 y 16, las zonas de estudio presentan diferencias en cuanto a las características sísmicas.

Ubicación sismotectónica de las áreas de estudio:

- San Cristóbal, se encuentra en la zona occidental del país donde se desarrolla una actividad sísmica de tipo interior de placas y se caracteriza por una baja ocurrencia de eventos sísmicos, que se asocian a estructuras geológicas disyuntivas activas. La falla Pinar de categoría 3, según la clasificación de (Chuy & Álvarez, 1995), puede generar sismos de magnitud 5,6 a 6,5.
- Santiago de Cuba, están ubicadas en la región oriental de la isla de Cuba, en la que hay un predominio de la actividad sísmica como se puede ver en la (imagen 15). La actividad sísmica es de tipo entre placas, asociada a la falla Bartlett–Caimán de categoría 1, es la de mayor peligro, generando sismos de magnitud 7,6 a 8,0.
- Rio Cauto está ubicado en la región oriental de la isla de Cuba, en la hay un predominio de la actividad sísmica. La actividad sísmica es de interior de placas, donde se destaca la falla Cauto-Nipe de categoría 2 capaz de generar sismos de 6,0 a 7,0 de magnitud.

Cantidad de sismos registrados de $M \geq 6$

- Entre los años 1502 a 2012 en la región occidental específicamente en la ciudad de San Cristóbal, solo se ha reportado un evento que cumple con estas características, el sismo de 1880 (6.2M).
- Esto mismo sucede en Rio Cauto, específicamente en el poblado de Cauto Embarcadero, donde se reportó un sismo bajo estas características, el sismo de 1551(6.6M).
- En la ciudad de Santiago de Cuba se ha reportado un amplio registro sísmico de $M \geq 6$, entre ellos se encuentran los sismos de 1760(6.8M), 1766(7.6M) 1852(7.3M), 1914(6.7M), 1932(6.7M), entre otros. Lo que indica que esta es la zona más susceptible a la ocurrencia de eventos sísmicos y fenómenos inducidos.

Las investigaciones sismológicas de Cuba sitúan a la provincia Santiago de Cuba como la de mayor peligro sísmico del territorio nacional, es sacudida por más de 1000 sismos perceptibles desde el año 1528 hasta la fecha (Chuy, 2010).

3.3 Análisis de las condiciones Ingeniero geológicas y nivel freático.

Tabla 7: Condiciones Ingeniero geológicas de los suelos en los sectores de estudio

Ciudades		Río Cauto			San Cristóbal				Santiago de Cuba		
Aspectos		Río Cauto			San Cristóbal				Santiago de Cuba		
Obras analizadas en estudios anteriores		17 Obras			45 Obras				14 Obras		
Comportamiento del nivel freático		Alcanza niveles de 0.40 a 4m y en la mayoría de los casos se encuentra entre 4.5 y 10 m de profundidad.			Varía de 1,5m hasta 12,6m predominando entre 1,5m y 7,55m.				Entre 1m y 1,90 m sin tomar en cuenta las fluctuaciones de las mareas		
Capas de perfil litológico		Relleno 1	Relleno 2	Capa 1	Capa 1	Capa 2	Capa 3	Capa 4	Relleno	Capa 1	Capa 2
Potencia de las capas (m)		0-0,8	0,8-1,7	1,7-5	0-1,2	1,2-4,5	4,5-5,7	5,7-10	0-2	2-8,8	8,8-10
Granulometría %	Ar	27	16	11	34	36	78	46	44	16	15
	Fi	14	83	87	4	13	6	28	34	83	85
Límite de Atterberg %	LL	30	59	62	43	33	33	42	37	68	55
	LP	19	24	23	29	16	20	22	24	24	21
	IP	11	35	39	14	17	18	20	13	44	34
Contenido natural de agua (w)		9,2	26,4	21,6	17,0	19,0	21,0	17,0	33,1	37,0	45,0
Descripción		Grava arcillosa	Arcilla muy plástica arenosa con grava	Arcilla muy plástica en parte arenosa con grava	Mezcla mal graduada de grava, arena, limo y arcilla	Arcillas arenosas Inorgánicas de plasticidad elevada	Arenas arcillosas	Arcillas arenosas	Arena limosa con grava	Cieno arcilla muy plástica con arena, limos orgánicos y arenas arcillosas	Arcillas muy plásticas con arena
Clasificación SUCS		GC	CH	CH-GC	GC	CH	SC	CH	SM-GM	OL-OH	CH

Columnas litoestratigráficas esquemáticas de las áreas en estudio.

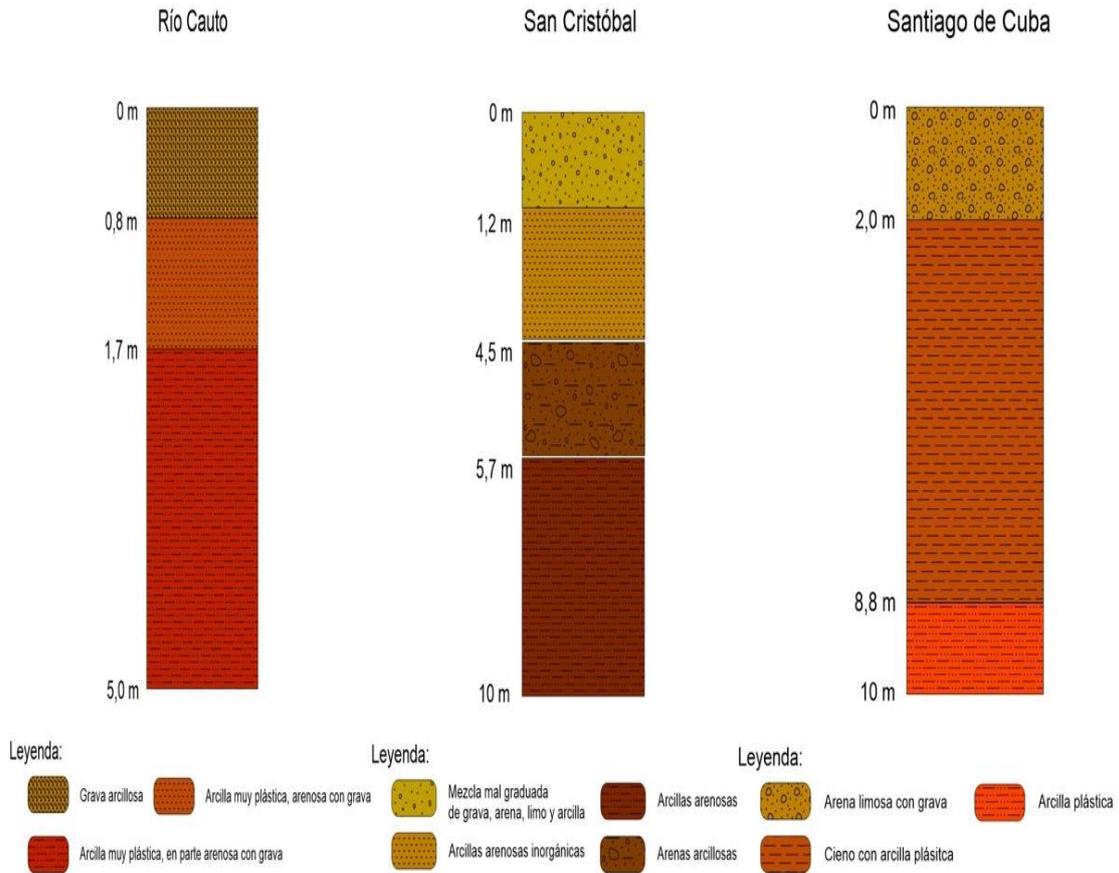


Imagen 18: Esquemas representativos de los suelos de las áreas de estudio.

El contenido de fino es uno de los parámetros que define la clasificación de los suelos, permite discriminar, entre un suelo de grano grueso o de grano fino. En general, suelos enriquecidos en fracción fina son menos susceptibles a licuar.

Los suelos de Río Cauto, se pueden clasificar por el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS), como: **(GC)** grava arcillosa, **(CH)** arcilla muy plástica, **(CH-GC)** arcilla muy plástica en parte arenosa con grava, estos suelos presentan un significativo grado de saturación, humedad natural elevada, bajo por ciento de finos, y Límites de Atterberg bastante acordes para que ocurra licuefacción, los niveles freáticos oscilan entre 4.5 y 10 m, alcanzando niveles de 0.40m.

Los suelos de San Cristóbal, se pueden clasificar por el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS), como: **(GC)** mezcla mal graduada de grava, arena, limo y arcilla, **(CH)** arcillas inorgánicas de alta compresibilidad y **(SC)**

arena arcillosa, estos suelos presentan un significativo grado de saturación, humedad natural elevada, bajo por ciento de finos, y Límites de Atterberg bastante acordes para que ocurra licuefacción, los niveles freáticos oscilan entre 1,5m y 7,55m.

Los suelos existentes en Santiago de Cuba, clasificados por el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS), como: (**SM-GM**) que son arena limosa con gravas, (**CH**) Arcilla muy plástica, (**OH**) Limo orgánico, (**OL**) Arcilla orgánica, estos suelos presentan un alto grado de saturación, humedad natural elevada, alto por ciento de finos, y Límites de Atterberg bastante acordes para que ocurra licuefacción, los niveles freáticos oscilan entre 1m y 1,90 m sin tomar en cuenta las fluctuaciones de las mareas del mar.

Como se puede apreciar en la tabla según la clasificación SUCS el tipo de suelo que coincide en los 3 sectores son: Arcilla muy plástica (**CH**).

Indistintamente que las características ingeniero geológica de los sectores de estudio no se puedan correlacionar, no significa que estos suelos no presenten características que les hayan permitido licuar ante un evento sísmico mayor de 5.5 de magnitud en la escala de Richter.

Al aplicarse el método de (Seed & Idriss, 1982) se determinan que en las áreas de estudio las capas con mayor probabilidad a licuar son:

- En el caso de Rio Cauto: Relleno 1.
- En el caso de San Cristóbal: Capas 2 y 3.
- En el caso de Santiago de Cuba: Relleno.

Según (Youd & Idriss, 1998), el cual expone que las arenas clasificadas como CL-ML, SM-SC, o GM-GC son potencialmente licuables, por medio de este criterio se puede decir que los suelos de estas ciudades pueden licuar.

- En el caso de Rio Cauto: Relleno 1 y Capa 1.
- En el caso de San Cristóbal: Capas 1 y 3.
- En el caso de Santiago de Cuba: Relleno

Análisis general de los resultados:

Según el sistema de indicadores propuestos se puede decir que de la investigación se obtuvieron los siguientes resultados

- ✓ Las condiciones geológicas no son las mismas, sin embargo la composición litológica es similar entre los 3 sectores, las formaciones más susceptibles a licuar pertenecen a depósitos de origen aluvial reciente, son formaciones jóvenes del Plioceno – Pleistoceno, según el criterio de (Iwasaki, 1982) e (Ishihara, 1990).
- ✓ Las condiciones sísmicas que se analizaron indican que en estas áreas debido a la cercanía a zonas sismogeneradoras activas están propensas a la ocurrencia de desastres. Estas fallas son capaces de generar sismos mayores de 5.5 que es la norma en Cuba para que un suelo licue. Los eventos sísmicos registrados, la intensidad de estos y la influencia de estos sobre las estructuras, indican que un evento mayor de esta magnitud puede ocurrir en cualquier momento que bajo las condiciones ingeniero geológicas adecuadas provoquen sobre ellos fenómenos inducidos como la licuefacción.
- ✓ Al analizar las condiciones ingeniero geológicas de los suelos de Rio Cauto, San Cristóbal y Santiago de Cuba, se puede observar que la única litología que concuerda en los 3 sectores es las arcillas muy plásticas, sin embargo no son las más propensas a licuar.
- ✓ Los suelos identificados con mayores características a licuar fueron según la clasificación SUCS son: los **GC** (grava arcillosa) y **SC** (arena arcillosa).
- ✓ Se puede decir que las características ingeniero geológicas de los suelos en si no son similares entre los 3 sectores, pero cada uno por separado presentan características independientes que les permiten licuar.
- ✓ las condiciones del nivel freático propicia que ocurra ya que estas fluctúan por debajo de los 5 m de profundidad, el porcentaje de fino en algunos suelos se encuentran por debajo de 15% y el límite líquido es menor o igual al 35%, el contenido natural de agua está por encima del 0,9%LL.

CONCLUSIONES

- ✓ Los municipios Río Cauto, San Cristóbal y Santiago de Cuba están representados por las formaciones: Cauto, Guane, y el Miembro Tejar respectivamente, estas son formaciones jóvenes de edad Pleistoceno-Holoceno, relacionados con ambientes sedimentario de tipo aluvial reciente, vinculados a planos de inundación de ríos: Cauto, San Cristóbal y en caso de Santiago a la costa. La sismicidad es de tipo interior de placas y de entre placas, asociado a las fallas Cauto-Nipe, Pinar y Bartlett-Caimán capaces de generar sismos mayores de 5.5 de magnitud en la escala de Richter. Cumpliendo con los indicadores para que un suelo pueda licuar.
- ✓ Las principales litologías identificadas susceptibles a licuar son: gravas arcillosas (GC), arenas arcillosas (SC) y arena limosa con grava (SM-GM). Los mismos se caracterizan por tener bajo por ciento de finos menor de 15%, límite líquido menor de 35%, de baja a moderada compactación y alta saturación. Los valores del nivel freático se encuentran predominantemente en los primeros 3 metros.
- ✓ Las condiciones ingeniero geológicas entre los tres sectores analizados no coinciden en su totalidad: los niveles freáticos se encuentran a diferente profundidad, el por ciento de finos es menor en los suelos de San Cristóbal, el contenido natural de agua en los suelos es mayor en Santiago de Cuba.

RECOMENDACIONES

- Realizar correlaciones con suelos de toda Cuba, que coincidan con estas características de los suelos, y así se podrá determinar posibles zonas de ocurrencia de este fenómeno, mitigando la pérdida económica y de vidas.
- Las empresas encargadas de realizar los informes ingeniero geológico (ENIA), se les recomienda plasmar en los informes cuando los suelos presentan características con potencial a licuar.
- Se recomienda prestar especial atención a los suelos cerca de costas, ya que estas áreas son muy propensas a licuar, como parte del plan de la Tarea Vida, para reducir el peligro de riesgo de desastres.

BIBLIOGRAFIA

- Alfaro, F. (2013). Comparación entre la metodología para evaluar el potencial de riesgo de licuefacción y los catastros realizados luego del terremoto de 2010 en Concepción.
- Alva, J. (2000). Evaluación del Potencial de Licuación de suelos.
- Álvarez, L., Villalón, M., Lindholm, C. (2015). Peligrosidad sísmica para Cuba.
- Américo L. Fernández, A. R. C. (2000). Estudio del riesgo de licuación para la represa de río blanco. Comparación entre metodologías existentes.
- Arango, E. (2015). Nueva valoración sismotectónica de la región oriental de Cuba en el contexto geodinámico del norte del Caribe.
- Autores, C. d. (2000a). NC 59:2000 Clasificación geotécnica de los suelos.
- Autores, C. d. (2000b). NC 61:2000 Identificación y descripción de suelos simples.
- Autores, C. d. (2000c). NC 63-2000 Clasificación de suelos para obras del transporte.
- Autores, C. d. (2013). Léxico estratigráfico de Cuba.
- Autores, C. d. (2017). NC 46:2017 Construcciones sismorresistentes: requisitos básicos para el diseño y construcción.
- Bauta, W. (2017). Identificación de escenarios susceptibles a la licuefacción inducidos por sismos de gran magnitud en los municipios de San Luis, Julio Antonio Mella y Palma Soriano de la provincia Santiago de Cuba.
- Brandes, H. G. (2003). Geotechnical and Foundation Aspects. University of Hawaii, Honolulu [Handbook], 61 p.
- Christian, J. T. (2012). Bayesian Methods and Liquefaction.
- Chuy, T. (2001). Peligrosidad Sísmica de la Región de Santiago de Cuba.
- Chuy, T. (2003). Macroseismic of Cuba, application in seismic hazard assessment.
- Chuy, T. J. (1980). Investigaciones sismológicas en Cuba.
- Chuy, T. J. (2002). Precisión por zonas de la peligrosidad sísmica de Cuba con fines de su desarrollo sostenible. Memorias II Congreso Cubano de Geofísica, La Habana. .
- Chuy, T. J. (1999). Macrosísmica de Cuba y su utilización en los estimados de Peligrosidad y Microzonación Sísmica. Fondos del Instituto de Geofísica y Astronomía y del Centro Nacional de Investigaciones Sismológicas. .
- Chuy, T. J., González, B. E., Álvarez, L. (1983). Sobre la peligrosidad sísmica de Cuba. Investigaciones Sismológicas en Cuba.
- Chuy, T. J., Zapata, J. A. (2005). Consideraciones sobre el comportamiento reciente de la sismicidad de Cuba. Memorias del Taller Provincial de Geociencias y Química aplicadas a la Construcción. Santiago de Cuba.
- Cobiella, J. L. (2007). Apuntes de Geología de Cuba. Texto del Curso de Geología de Cuba. Universidad de Pinar del Río. .
- Cofiño, C., Fernández de Lara, R., Ordáz, A., Cáceres, D. (2011). Origen y funcionamiento de la estructura tectónica pinar a partir de datos geológico-geofísicos.
- Contreras, O. (2018). Estudio de la respuesta local del suelo en el sector urbano del municipio Caimanera, provincia Guantánamo ante la ocurrencia de sismos.
- Cotilla, M. (1997). Sismicidad de Tipo Intermedio en Cuba.

- Cotilla, M. C., D. (2011). Study of earthquake of the January 23, 1880, in San Cristobal, Cuba and the Guane Fault. J. Izvestiya, Physics of the Solid Earth 6: 496-518.
- Department of Civil Engineering, T. U. o. T. (2000). Time effect on liquefaction potential of silt containing various amounts of clay particles.
- Dora García , R. T., Roberto Otero , Silvia Blanco (2007). Estratigrafía de la cuenca cauto y su correlación con el subsuelo.
- Fernández, L. (2000). Posibilidad de ocurrencia del fenómeno de licuefacción en la cuenca de Santiago de Cuba por terremotos fuertes.
- Fernández, L. (2015). Licuefacción de los suelos generada por sismos de gran magnitud. caso de estudio Caimanera y Santiago de Cuba.
- García, J., Slejko, D., Álvarez, L., Peruzza, L. y Rebez, A. (2003). Seismic Hazard Maps for Cuba and Surrounding Areas. .
- Garzon, L. (2012). Factores que condicionan la generación de procesos de licuación durante eventos sísmicos.
- González de Vallejo, L. I. (2002). Ingeniería Geológica.
- Guerra, D. (2015). Ubicación de estructuras favorables para la acumulación de hidrocarburos en la parte central de la Cuenca Cauto, a partir de la interpretación sísmica y datos de pozos.
- Gutierrez, A. (2017). Evaluación de riesgo por licuefacción en los municipios de Guamá, III Frente y Contramaestre de la provincia de Santiago de Cuba.
- Herrera, I. (2015). Delimitación de escenarios susceptibles a la licuefacción inducido por terremotos de gran magnitud en el consejo popular Guillermon Moncada del municipio de Santiago de Cuba.
- ICOTEC. (2008). Evaluación del Potencial de Licuefacción en Suelos.
- Idriss. (2000). Factores de Escala Por Magnitud del sismo . .
- III Congreso del PCC: Resoluciones sobre el perfeccionamiento de la división político administrativa. (1986).
- Ishihara. (1990). Calculo del Factor de Seguridad ante la Licuacion de Suelos.
- Leonardo Álvarez, M. V., Conrad Lindholm. (2015). Peligrosidad sismica para Cuba.
- Liyanage, U. (2014). Evaluacion ingeniero geologica del peligro por deslizamiento en el municipio Santiago de Cuba empleando un SIG.
- Millán, G. (2003). Algunas consideraciones sobre la tectónica de Cuba occidental (Provincia Pinar del Rio)". En memorias del V Congreso de Geología y Minería. La Habana.
- Mussio, V. (2012). Potencial de licuefacción mediante el método de microtemores en la colonia solidaridad social, Mexicali. Tesis de maestría. Universidad Nacional Autónoma de México.111p.
- Núñez, K. (2015). Nuevo mapa geológico de Cuba a escala 1:1 000 000.
- Obando, T. (2009). Metodología y técnicas para la Cuantificación del potencial de licuación en suelos sujetos a sollicitaciones dinámicas. Ejemplos de casos.
- Ordaz, A. (2010). Incidencia de las condiciones ingeniero geológicas en la zonación sísmica local. Caso de estudio: Pueblo de San Cristóbal y áreas aledañas.
- Ordaz, A. (2011). Analisis estructural y morfotectonico de San Cristobal, Cuba Occidental: contribucion al estudio de la peligrosidad sismica de la falla Pinar.

- Ordaz, A. (2013). La susceptibilidad a la licuefacción en el emplazamiento de la ciudad de San Cristóbal, Cuba Occidental.
- Ordaz, A., Chuy, T. (2015). Evaluación de las condiciones ingenierogeológicas para el pronóstico de la respuesta dinámica de los suelos. Caso de estudio: Ciudad de San Cristóbal, Cuba occidental.
- Ordaz, A., García, J. A. y Hernández, L. (2009). Esquema ingeniero geológico del pueblo de San Cristóbal a escala 1:25 000". Resultados parciales del proyecto Evaluación del macizo geológico con fines constructivos en la Provincia de Pinar del Río. .
- Parellada, O. (2016). Delimitación de escenarios susceptibles a la licuefacción inducido por terremotos de gran magnitud en la zona sur de la Provincia Guantánamo.
- Peña, R. (2018). Susceptibilidad a la ocurrencia de licuefacción de los suelos en la ciudad de Bayamo inducido por fuertes terremotos.
- Perruca, L., Pérez, A., & Navarro, C. ((oct./dic de 2006)). Fenómenos de licuefacción asociados a terremotos históricos. Su análisis en la evaluación del peligro sísmico en la Argentina. Rev.Asoc. Geol. Argent. v.61 n.4 . Buenos Aires.
- Popov, V. V. (1959). Criterios Ingeniero Geológicos de la Zonación Sísmica Detallada. .
- Rinoso, D. (2016). Determinación de escenarios susceptibles a la licuefacción inducido por terremotos de gran magnitud en los municipios Baracoa, Yateras, El Salvador y Niceto Pérez de la provincia de Guantánamo.
- Roberto Valle, L. P., Arelis Núñez , Miguel Cabrera , Jesús Triff , Guillermo Pantaleón , Rolando Batista , Luisa Rodríguez, Félix González (2013). Caracterización geólogo – geomorfológica del delta del río Cauto en Cuba Oriental.
- Rodriguez, M. O. C. (1998). Sismicidad y sismotectónica de Cuba.
- Rodriguez, M. O. C. (1999). La ciencia sismológica en Cuba (II). Algunos terremotos históricos.
- Rosabal, L. (2011). Zonación preliminar de la licuefacción de los suelos en la región de Cuba Oriental.
- Seed. (1983). Potencial de licuefacción en suelos granulares. .
- Seed, B., & Idriss, M. . (1971). A Simplified procedure for evaluating soil liquefaction potential. Journal of soil Mechanics and Foundation Engineering Division, ASCE, 97, SM9, 1249- 1273 p .
- Seed, B., & Lee, L. (1966). Liquefaction on saturated sands during cyclic loading . Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, 92 (SM6), 105-134.
- Seed, C., Moss, Kammerer (2003). Recent advances in soil liquefaction engineering: a unified and consistent framework. .
- Seed, H. B. i., I. M. . (1971). Simplified procedure for evaluating soil liquefaction potential. JI. Soil Mech. F. Div. ASCE vol. 97, SM 7.
- Seed, I. (1971). Determinación del potencial de licuación. .
- Tellez, V. (2015). Evaluación de la vulnerabilidad por deslizamientos de taludes y laderas del municipio Sagua de Tánamo.
- Turcás, Y. (2018). Identificación de los escenarios susceptibles a la licuefacción en la ciudad de Manzanillo provincia Granada.

- Vázquez, L. (2018). Delimitación de escenarios susceptibles a la licuefacción inducidos por terremotos de gran magnitud en el asentamiento poblacional del municipio Pílon de la provincia Granma.
- Villalón, L. (2018). Escenarios susceptibles a la licuefacción inducida por terremotos de gran magnitud en la zona urbana del municipio Guantánamo.
- Youd, I. (2001). Metodologías para la determinación del potencial de licuación.
- Youd, T., & Idriss, I. (1998). Liquefaction resistance of soils: Summary Report from the 1996 and 1998 NCEER/NSF Workshops on evaluation of liquefaction resistance of soils. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE*, Vol. 127, N° A1.
- Zapata, J. A. (1996). Utilización de variantes metodológicas de microzonación sísmica en la ciudad de Santiago de Cuba. Tesis doctoral. CENAI, Santiago de Cuba, 111 p.

ANEXOS

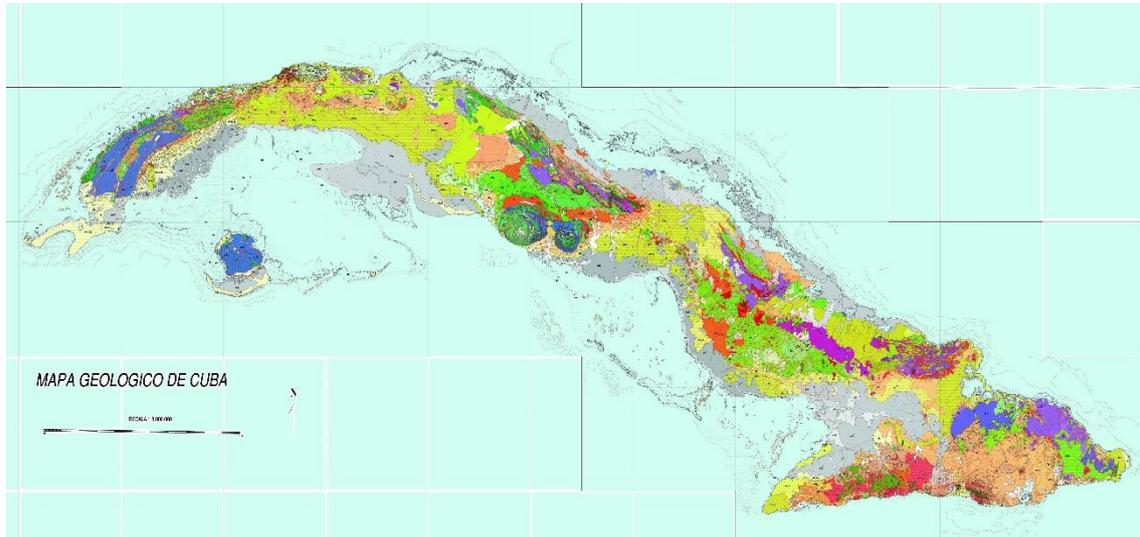


Imagen anexo 1: Mapa geológico de Cuba, escala 1:100000.

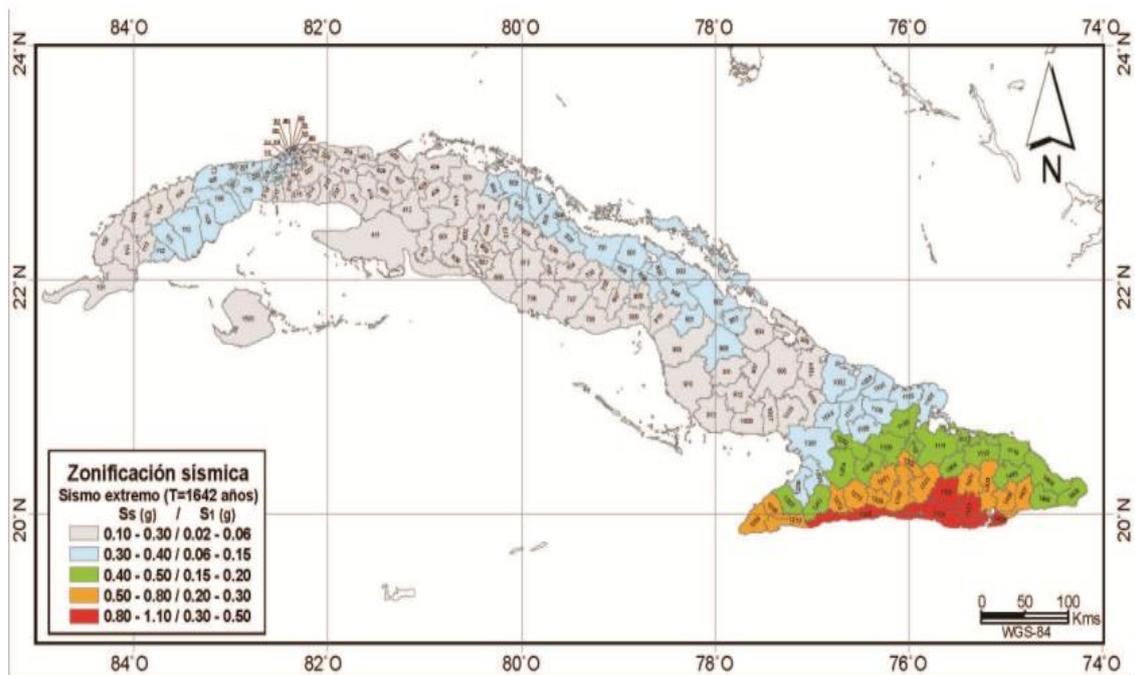


Imagen anexo 2: Zonificación sísmica de Cuba. (NC 46:2017)

Tesis de Diploma en opción al título de Ingeniera Geóloga

Divisiones mayores			Simbolo del grupo	Nombre del grupo
Suelos granulares gruesos más del 50% retenido en el tamiz nº200 (0.075 mm)	Grava > 50% de la fracción gruesa retenida en el tamiz nº4 (4.75 mm)	grava limpia menos del 5% pasa el tamiz nº200	GW	grava bien graduada, grava fina a gruesa
			GP	grava pobremente graduada
		grava con más de 12% de finos pasantes del tamiz nº 200	GM	grava limosa
			GC	grava arcillosa
	Arena ≥ 50% de fracción gruesa que pasa el tamiz nº4	Arena limpia	SW	Arena bien graduada, arena fina a gruesa.
			SP	Arena pobremente graduada
		Arena con más de 12% de finos pasantes del tamiz nº 200	SM	Arena limosa
			SC	Arena arcillosa
Suelos de grano fino más del 50% pasa el tamiz No.200	limos y arcillas límite líquido < 50	Inorgánico	ML	limo
			CL	arcilla
		orgánico	OL	Limo orgánico, arcilla orgánica
	limo y arcilla límite líquido ≥ 50	Inorgánico	MH	limo de alta plasticidad, limo elástico
			CH	Arcilla de alta plasticidad
		orgánico	OH	Arcilla orgánica, Limo orgánico
Suelos altamente orgánicos		Pt	turba	

Tabla anexo 1: Sistema unificado de clasificación de suelos (SUCS), empleado internacionalmente .

Sistema unificado de clasificación de suelos

División principal	Requisitos suplementarios			Símbolo del Grupo	Nombre del suelo	
	Fracción fina	Cu y Cc	Plasticidad			
Suelos de grano grueso	Grava	< 5 %	$Cu \geq 4$ y $1 \leq Cc \leq 3$	-	GW	Grava bien graduada
			$Cu < 4$ y $1 > Cc > 3$	-	GP	Grava mal graduada
		5%-12 %	$Cu \geq 4$ y $1 \leq Cc \leq 3$	No plástico	GW-GM	Grava bien graduada con limo
			$Cu \geq 4$ y $1 \leq Cc \leq 3$	Plástico	GW-GC	Grava bien graduada con arcilla
			$Cu < 4$ y $1 > Cc > 3$	No plástico	GP-GM	Grava mal graduada con limo
		> 12 %	$Cu < 4$ y $1 > Cc > 3$	Plástico	GP-GC	Grava mal graduada con arcilla
			-	No plástico	GM	Grava limosa
	Arena	< 5 %	$Cu \geq 6$ y $1 \leq Cc \leq 3$	-	SW	Arena bien graduada
			$Cu < 6$ y $1 > Cc > 3$	-	SP	Arena mal graduada
		5%-12 %	$Cu \geq 6$ y $1 \leq Cc \leq 3$	No plástico	SW-SM	Arena bien graduada con limo
			$Cu \geq 6$ y $1 \leq Cc \leq 3$	Plástico	SW-SC	Arena bien graduada con arcilla
			$Cu < 6$ y $1 > Cc > 3$	No plástico	SP-SM	Arena mal graduada con limo
		> 12 %	$Cu < 6$ y $1 > Cc > 3$	Plástico	SP-SC	Arena mal graduada con arcilla
			-	No plástico	SM	Arena limosa
-	Plástico	SC	Arena arcillosa			

Tabla anexo 2: Sistema unificado de clasificación de suelos empleado en Cuba.

(NC 52:2000)

Tesis de Diploma en opción al título de Ingeniera Geóloga

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 ≤ IP ≤ 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		
	≥ 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	
				Limo orgánico	
Suelos altamente orgánicos		Estos suelos están compuestos principalmente por materia orgánica, de color carmelita oscuro a negro y olor orgánico		Pt	Turba

Tabla anexo 3 Sistema unificado de clasificación de suelos empleado en Cuba, para suelos de grano fino. (NC 52:2000)

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

Tabla anexo 4: Criterios para describir la plasticidad de los suelos según el límite líquido (%), en Cuba. (NC 52:2000).