



Ministerio de Educación Superior

Universidad de Moa

Dr. Antonio Núñez Jiménez

Facultad de Geología-Minas

Departamento de Geología

*Trabajo de Diploma en opción al título de
Ingeniero Geólogo*

*Título: Evaluación de la susceptibilidad a la licuefacción a
partir de las condiciones ingeniero-geológicas en los
municipios granmenses de Río Cauto y Cauto Cristo.*

Autora: Milena Isabel Guilarte Santiesteban





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
Ingeniero Geólogo*

*Título: Evaluación de la susceptibilidad a la licuefacción
a partir de las condiciones ingeniero-geológicas en los
municipios granmenses de Río Cauto y Cauto Cristo.*

Autora: Milena Isabel Guilarte Santiesteban

Tutores: MsC: Liuska Fernández Diéguez

MsC: Dioelis Guerra Santiesteban

Trabajo de Diploma

Yo: Milena Isabel Guilarte Santiesteban, autora de este trabajo de diploma con título: "Evaluación de la susceptibilidad a la licuefacción a partir de las condiciones ingeniero-geológicas en los municipios granmenses de Río Cauto y Cauto Cristo y los tutores MsC. Liuska Fernández Diéguez y MsC. Dioelis Guerra Santiesteban. Certificamos su propiedad intelectual a favor de la Universidad de Moa, Dr. Antonio Núñez Jiménez, el cual podrá hacer uso del mismo con fines educativos.

Autor: Milena Isabel Guilarte Santiesteban

Tutor: MSc. Dioelis Guerra Santiesteban

Pensamiento

Todos nuestros sueños pueden hacerse realidad si sólo tenemos el coraje de perseguirlos.

Walt Disney

Hay que soñar cosas, pero a la vez hay que hacer aquellas cosas que soñamos.

Fidel Castro Ruz

| *Trabajo de Diploma*

Dedicatoria

A toda mi Familia...

Agradecimientos

A Dios

A la Revolución Cubana.

A mis Padres por apoyarme en todo momento.

A mi hermanito por esa alegría contagiosa que me levantó el ánimo en los momentos de tristeza.

A mi abuela Ruth por estar orgullosa de lo que he podido lograr.

A mis Abuelos Felipe, Blasinda y Dorita.

A mi esposo por su amor, comprensión y aliento en los momentos más difíciles.

A la familia de mi esposo por ese cariño infinito.

A mis tías María y Ana, mi tío Carlos, mis primos Yaima, Tico Keila y Pao.

A mis amigos Luisma, Maibet y Aime por los buenos momentos que hemos disfrutado juntos.

A mis vecinos.

A mis compañeros de aula por estos 5 años que hemos compartido.

A mis tutores Liuska Fernández Diéguez y Dioelís Guerra Santiesteban.

Al claustro de profesores del departamento de geología.

Y a todos aquellos que hicieron posible la realización de este sueño

Gracias

RESUMEN

El fenómeno de licuefacción del suelo, inducida por terremotos, es una de las principales causas del riesgo sísmico urbano provocado por las características del suelo donde se construyen las obras y su respuesta ante un sismo. La investigación se llevó a cabo dada la necesidad de evaluar las condiciones ingeniero-geológicas de los suelos del sector urbano de los municipios Río Cauto y Cauto Cristo en la provincia Granma para determinar si son susceptibles a la licuefacción ante un sismo de gran magnitud. Para dar cumplimiento al objetivo propuesto se tomó como metodología el análisis de los indicadores propuestos por Fernández Diéguez en el año 2015 y la obtención de variables correspondientes a las propiedades físico-mecánicas de los suelos. Se determinó que el área está representada por suelos de tipo CL (arcilla de baja plasticidad), CH (arcilla de alta plasticidad), SM (arena limosa) y SC (arena arcillosa). Se concluyó que en el área de estudio no existen condiciones favorables para que ocurra licuefacción.

Palabras claves: licuefacción, riesgo, suelo, terremoto.

ABSTRACT

The phenomenon of liquefaction of the soil, induced by earthquakes, is one of the main causes of the urban seismic risk caused mainly by the characteristics of the ground where the works are built and their response to an earthquake. The research was carried out given the need to evaluate the engineer-geological conditions of the soils of the urban sector of the municipalities of Río Cauto and Cauto Cristo in Granma province to determine if they are susceptible to liquefaction in the face of a large-scale earthquake. In order to comply with the proposed objective, the validation of the system of indicators proposed by Fernández Diéguez in 2015 and the obtaining of variables corresponding to the physico-mechanical properties of the soils were taken as a methodology. It was determined that the area is represented by soils of type CL (clay of low plasticity), CH (clay of high plasticity), SM (sand silty) and SC (clay sand). It was concluded that in the study area there are no conditions favorable for liquefaction to occur.

Keywords: liquefaction, risk, soils, earthquakes.

ÍNDICE

RESUMEN	V
ABSTRACT	VI
INTRODUCCIÓN	1
MARCO TEÓRICO CONCEPTUAL Y ESTADO DEL ARTE DE LA INVESTIGACIÓN.	3
Introducción:.....	3
Conceptos de licuefacción.	3
Factores que influyen en la licuefacción:	4
Condiciones de un suelo para que ocurra la licuefacción	4
Factores que condicionan la ocurrencia de licuefacción (Shadenet, 1990).	5
Métodos utilizados para evaluar la susceptibilidad a la licuefacción.....	8
Evidencias históricas del fenómeno de licuefacción de suelos	9
Reportes históricos de licuefacción de los suelos en Cuba.	13
Sismicidad en Cuba.	15
Investigaciones realizadas en Cuba y en la región de estudio.....	17
Trabajos realizados en la provincia de Granma:	23
CAPÍTULO 1: CARACTERÍSTICAS GEOGRÁFICAS Y GEOLÓGICAS DE LA REGIÓN DE ESTUDIO.	27
1.1 Introducción:.....	27
1.2 Características Generales del municipio Río Cauto.....	27
1.2.1 Ubicación Geográfica del Municipio Río Cauto.....	27
1.2.2 Características hidrográficas.	28
1.2.3 Geomorfología.	28
1.3 Características Generales del municipio Cauto Cristo.	29
1.3.1 Ubicación geográfica del municipio Cauto Cristo.....	29
1.3.2 Relieve.....	30
1.3.3 Características hidrográficas.	30
1.3.4 Geología regional.....	31
1.4 Sismicidad regional y del área de estudio.	34
CAPÍTULO 2: METODOLOGÍA PARA ESTUDIAR EL POTENCIAL DE LICUEFACCIÓN.....	37
2.1 Introducción	37

2.2 Sistema de indicadores aplicados para el estudio de la susceptibilidad a la licuefacción de los suelos en la región oriental de Cuba propuesto por (Fernández-Diéguez, 2015).	38
2.3 Metodología aplicada para el análisis de los indicadores para el estudio de la susceptibilidad a la licuefacción en el área de estudio.....	41
2.3.1 Análisis de las condiciones geológicas del área de estudio.....	41
2.3.2 Análisis del comportamiento de la sismicidad en el área de estudio.	41
2.3.3 Análisis del comportamiento del nivel freático en el área de estudio.	41
2.3.4 Análisis de las condiciones ingeniero-geológicas	41
CAPÍTULO 3: EVALUACIÓN DEL POTENCIAL DE LICUEFACCIÓN EN EL ÁREA DE ESTUDIO.	42
3.1 Introducción:.....	42
3.2 Criterios para la selección de escenarios susceptibles a la licuefacción.....	42
3.3 Análisis del sistema de indicadores propuestos para el municipio Río Cauto.	43
3.3.1 Condiciones geológicas:	43
3.3.2 Sismicidad	44
3.3.3 Características hidrográficas:	44
3.3.4 Condiciones ingeniero-geológicas:	46
3.3.5 Conclusiones parciales para el municipio Río Cauto.	51
3.4 Análisis del sistema de indicadores propuestos para el municipio Cauto Cristo.....	52
3.4.1 Condiciones geológicas:	52
3.4.2 Sismicidad	52
3.4.3 Características hidrográficas:	53
3.4.4 Condiciones ingeniero-geológicas:	54
3.4.5 Conclusiones parciales para el municipio Cauto Cristo.	56
Conclusiones.....	58
Recomendaciones.....	59
Bibliografía	60
Anexos	

INTRODUCCIÓN

Los eventos sísmicos generalmente se producen de forma violenta, son de corta duración y constituyen uno de los procesos naturales que causan mayor afectación a los elementos físicos, naturales, económicos y sociales.

Cuba no está exenta de sufrir este fenómeno, ya que las experiencias derivadas de las catástrofes de Granma 1551 conocido como el “Sismo de Bayamo” dado que fue la villa más importante donde se reportaron afectaciones, San Cristóbal, 1880 y Santiago de Cuba en 1932 y 1947 convocan a no dejar pasar por alto la sismicidad como premisa de desastres.

Hasta el presente, no es posible realizar un pronóstico certero del momento en el que sucederá un evento sísmico, pero sí es factible identificar y caracterizar los escenarios expuestos a este peligro 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.

La mayoría de los estudios encaminados a la ocurrencia de este fenómeno en Cuba se han realizado en la Provincia de Santiago de Cuba debido al gran riesgo sísmico que presenta, pero en la provincia de Granma solo se han realizado estudios en los municipios de Bayamo, Manzanillo y Pílon por lo que la provincia carece de investigaciones sobre la posible ocurrencia de este fenómeno. Es por lo antes expuesto que la presente investigación está enfocada al estudio del fenómeno de licuefacción en los municipios Río Cauto y Cauto Cristo.

Problema: Necesidad de evaluar las condiciones ingeniero-geológicas de los suelos del sector urbano de los municipios Río Cauto y Cauto Cristo para determinar si son susceptibles a la licuefacción ante un sismo de gran magnitud.

Campo de acción: La licuefacción de los suelos como fenómeno geológico inducido por sismos de gran magnitud.

Objeto de estudio: Los suelos del sector urbano de los municipios Río Cauto y Cauto Cristo.

Objetivo general: Evaluar las condiciones ingeniero-geológicas de los suelos para determinar cuáles son susceptibles al fenómeno de licuefacción en el sector urbano de los municipios Río Cauto y Cauto Cristo.

Objetivos específicos:

- ✓ Caracterizar las condiciones ingeniero-geológicas de los suelos del área de estudio.
- ✓ Aplicar un procedimiento metodológico que permita determinar escenarios susceptibles a la licuefacción.
- ✓ Delimitar los escenarios susceptibles a la licuefacción en el sector urbano de los municipios Río Cauto y Cauto Cristo ante un sismo de gran magnitud.

Hipótesis: Si se caracterizan los suelos del área de estudio a partir de las condiciones ingeniero-geológicas entonces se podrá evaluar el potencial de licuefacción y delimitar las áreas de mayor susceptibilidad.

Novedad de la investigación:

Se hace una caracterización ingeniero-geológica de los suelos del sector urbano de los municipios Río Cauto y Cauto Cristo que permita la evaluación preliminar del potencial de licuefacción y delimitar los escenarios susceptibles.

MARCO TEÓRICO CONCEPTUAL Y ESTADO DEL ARTE DE LA INVESTIGACIÓN.

Introducción:

A continuación se describe el fenómeno de licuefacción de los suelos y los principales factores que influyen en su ocurrencia. Se expone el nivel de conocimiento actual en Cuba y en el mundo sobre el tema.

Conceptos de licuefacción.

- ✓ Rico y Del Castillo (1988), manifiestan que el fenómeno de licuación de suelo consiste en la pérdida rápida de resistencia al esfuerzo cortante, temporal o definitivo (Parellada-Reyes, 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 (Parellada-Reyes, 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, que 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, 2002).

- ✓ Rodríguez, Audemard y Rodríguez (2006) comentan que la licuefacción de sedimentos es la transformación a estado líquido de materiales granulares, saturados como consecuencia del incremento de la presión de poros.
- ✓ 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, pudiendo 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).

Factores que influyen en la licuefacción:

Los estudios de la licuefacción sísmica llevaron a postular las condiciones siguientes:

- 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).

Condiciones de un suelo para que ocurra la licuefacción:

Para la ocurrencia de la licuefacción de los suelos, particularmente, en aquellos suelos de grano fino, deben cumplir con ciertas condiciones, propuestas por Wang en el año 1979. Estas son:

- ✓ Porcentaje de finos de 0,005 mm <15%.
- ✓ Límite líquido LL <35%.
- ✓ Natural contenido de agua > 0,9.
- ✓ 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 que influyen en 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).

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, reduciendo su volumen de suelo-agua e incrementa 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 depósitos glaciales, generalmente ya son bastante densos y tienen menor probabilidad de licuarse (Ishihara, 1990).

González de Vallejo (2002) planteo: Otras de las condiciones necesarias para que tenga lugar este modo de comportamiento del suelo es que el nivel freático esté alto, cerca de 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, esta tiene lugar en las siguientes circunstancias:

- ✓ Sismos con magnitud igual o superior a 5,5 con aceleraciones superiores o iguales a 0,2 g.
- ✓ Por debajo de 15 metros de profundidad no se ha dado licuefacción.
- ✓ En la mayoría de los casos donde se han observado licuefacción 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.

Metodologías para el estudio de la licuefacción de los suelos.

Muchos investigadores han desarrollado metodologías para evaluar el riesgo de licuefacción de suelos basado en distintos ensayos, siendo las más utilizadas inicialmente el criterio chino modificado de Wang (1979) y el método de Seed & Idriss (1982), en Estados Unidos, Seed (1983) y Seed y De Alba (1986) presentaron el método simplificado, en base a ensayos de penetración estándar y el cono holandés. En Japón, Iwasaki (1978), Tokimatsu y Yoshimi (1983), e Iwasaki (1986) presentaron también el método simplificado en base a la experiencia japonesa. Estas metodologías simplificadas fueron programadas en Lenguaje Básico para realizar un análisis sistemático de los datos. La conversión del ensayo de penetración estándar al de cono holandés se realizó según

Robertson y Campanella (1985), la corrección de sobrecarga se realizó de acuerdo a Liao y Whitman (1986).

Alarcón (1989) opina que la aproximación práctica de Seed consiste en comparar las curvas de tensión cíclica provocadas por N ciclos del terremoto de cálculo con la curva, determinada en laboratorio, de la tensión cíclica capaz de producir la licuefacción en N ciclos en el terreno en cuestión. De esta comparación es posible extraer la zona peligrosa, aunque para ello ha sido preciso desarrollar criterios que permiten pasar de un movimiento sísmico real a otro equivalente y uniforme (Obando, 2009).

Luego de los terremotos de Kocaeli (Turquía) y Chi-Chi (Taiwán) en 1999, donde ocurrieron severos daños debidos a licuefacción en lugares donde los métodos disponibles no la predecían, se percibió la necesidad de desarrollar nuevos criterios con especial énfasis en la influencia del contenido de finos en el suelo.

En 2003 Raymond B. Seed y un grupo de investigadores de la Universidad de California en Berkeley publicaron un documento que unificaba los resultados de investigaciones recientes acerca del fenómeno de licuefacción de suelos. A pesar de que existen nuevas investigaciones, algunas de ellas controversiales, se utiliza la metodología propuesta por Seed (2003), complementada con los estudios de Cetin et. al (2004). Esta metodología utiliza un valor N del ensayo SPT normalizado por profundidad y ajustado por la cantidad de finos para cuantificar la susceptibilidad del suelo a la licuefacción.

En la actualidad los métodos han llegado a ser rutinarios para la investigación del potencial de licuefacción en campo, podemos mencionar las pruebas de penetración estándar (SPT), la de penetración de cono (CPT), el penetrómetro Becker (BPT), el dilatómetro de Marchetti (DMT) y métodos en los que el potencial de licuefacción se relaciona con la velocidad de onda de corte (V_s) (Obando, 2009).

Métodos utilizados para evaluar la susceptibilidad a la licuefacción.

Son diversos los métodos existentes para evaluar el potencial de licuefacción de los suelos, los mismos pueden dividirse en tres grupos fundamentales:

- Métodos basados en el comportamiento observado en terremotos anteriores: Se apoyan en correlaciones empíricas de algunas características de los suelos, obtenidas mediante pruebas de campo, y/o ensayos simples de laboratorio, con el comportamiento de los mismos observado en sismos previos.

Estos métodos se basan en el hecho de que la resistencia a la licuefacción y ciertas propiedades determinadas mediante ensayos “in situ” (resistencia a la penetración, velocidad de propagación de ondas de corte, etc.), varían de la misma forma en función de las características principales de los suelos. Sin embargo, hasta la fecha sólo se cuenta con una gran cantidad de datos provenientes de pruebas de resistencia a la penetración, especialmente de SPT, mientras que la cantidad de datos que se tiene de las otras propiedades resulta, en algunos casos, insuficiente como para obtener buenas correlaciones a partir de ellos.

- Métodos simplificados: se basan en la comparación de la resistencia obtenida en ensayos cíclicos de laboratorio con los esfuerzos que provocará el sismo, calculados en forma simplificada.
- Métodos basados en modelos matemáticos: comprenden a un número creciente de modelos acoplados o desacoplados, para el análisis de la respuesta dinámica y la generación de presión de poro, de suelos granulares sujetos a fuerzas sísmicas.

Estos dos últimos métodos, a su vez, requieren para su aplicación, la realización de ensayos de laboratorio sobre muestras inalteradas. Los procedimientos usados normalmente para extraer este tipo de muestras, producen invariablemente, cambios en su compacidad relativa, en su estructura y en su grado de saturación. Además, los equipos de laboratorio, por lo general, no permiten reproducir

adecuadamente las condiciones de esfuerzo y de frontera que tiene el suelo "in-situ". Todos estos factores influyen de manera fundamental sobre la ocurrencia o no del fenómeno de licuefacción. A causa de lo anterior, parece aconsejable, al menos desde el punto de vista de una aplicación práctica usual, la utilización de los métodos basados en el comportamiento observado en terremotos anteriores: se debe prestar especial atención a aquellos basados en resultados de ensayos de penetración (SPT y CPT). Dentro de estos métodos, los que son aplicables a obras nuevas están bastante estudiados y con ellos se han obtenido resultados satisfactorios. No existiendo el mismo nivel de conocimiento en el caso de las aplicaciones a obras ya ejecutadas (Obando, 2009).

Evidencias históricas del fenómeno de licuefacción de suelos.

13 de diciembre 1692 Salta, Argentina: se produjo en la población de Talavera del Esteco (provincia de Salta), un violento sismo de Ms 7,0. La profundidad hipocentral fue de 30 km y la intensidad máxima IX en la escala Mercalli Modificada (EMM). Entre las 10 y 11 de la mañana, se produjo un violento terremoto, que por dos días posteriores se repitió con mayor o menor intensidad, desapareciendo Talavera y produciendo derrumbes y agrietamientos en el Valle de Lerma donde estaba la ciudad de Salta. El derrumbe de los edificios y los ruidos subterráneos mantuvieron a la población en crisis.

Según antiguos relatos, "la tierra se abrió en varias partes y lanzó una manga de agua, que inundó todo, no dejó 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" (Perucca, 2006).

22 de marzo de 1861 Mendoza, Argentina: a las 23 hs. se produjo un terremoto de Ms 7,2, profundidad de 30 km e intensidad máxima IX-X (EMM) (INPRÉS 2006), con epicentro en la ciudad de Mendoza produjo más de 12 000 muertos, alrededor a 1 000 heridos y numerosas casas destruidas. La ciudad de Mendoza fue completamente destruida y se registraron fenómenos de licuefacción (INPRES 1995, 2006). Buena Nueva y Las Ciénagas fueron las zonas más afectadas por la

licuefacción, con grandes fisuras y grietas, con eyección de agua y formación de volcanes de arena (Perucca, 2006).

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, provocó 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, 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 protegerse. (Fernández-Diéguez, 2015)

27 de febrero de 2010 Chile: un terremoto de magnitud 8,8 afecta el centro y sur del país con un total de 486 víctimas fatales oficialmente reconocidas, 79 personas desaparecidas y un importante daño en la infraestructura. El Servicio Nacional de Geología y Minería de Chile, realizó un catastro de los fenómenos de peligros geológicos desencadenados por el sismo del Maule del 27 de febrero de 2010. Como resultado, se pudo comprobar que luego de los daños provocados por el tsunami, el fenómeno geológico más extendido fue la licuefacción de suelos. Este fenómeno fue el responsable de parte importante de los daños, principalmente en la red vial, puentes, puertos y carreteras, así como, en la infraestructura pública,

viviendas, parte del servicio de agua potable, luz, gas y alcantarillado (González-Fuentealba, 2015).

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. La extensión geográfica de la licuefacción del suelo japonés fue muy amplia, abarcó 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 se hundieron hasta un metro (Figura 1).



Figura 1: Evidencias del terremoto en Japón (Shibayama et. al 2012).

19 de septiembre de 2017 México: 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, 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” (Cubadebate, 2017).

29 de septiembre 2018 Indonesia: 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 (Figura 2).



Figura 2: Licuefacción del suelo en Indonesia (Redacción EC, 2018).

Reportes históricos de licuefacción de los suelos en Cuba.

A lo largo de la historia, la ciudad de Bayamo ha sido afectada por sismos de diferente magnitud e intensidad provenientes de distintas fuentes sísmicas, que han provocado daños considerables en toda su estructura social, económica y natural, entre ellos han sido significativos los ocurridos en 1551 (Magnitud=5,8 Intensidad =VIII) en el ocurrió licuefacción del suelo, en octubre de 1624 (M=5,2 I=VII), en junio de 1766 (M=7,6 I=IX), febrero de 1932 (M=6,75 I=VIII), agosto de 1947 (M=6,75 I=VII), con epicentro en Santiago de Cuba y los más recientes con epicentro en la provincia de Granma, sucedidos en febrero de 1976 (M=5,7 I=VIII) y mayo de 1992 (M=7,2 I=VII), conocidos como el terremoto de Pilón y Cabo Cruz (Hernández-Suros y Sam-Pascual, 2016).

El terremoto del 18 de octubre de 1551 en Bayamo, sureste de Cuba: este terremoto se conoce como el terremoto de Bayamo ya que fue la villa más importante donde se reportaron las afectaciones. Luego de revisar documentos históricos, Actas Capitulares y Archivo de Indias, Chuy (1999) y Cotilla-Rodríguez y Córdoba (2010) encontraron evidencias de extensos daños en Bayamo y sus alrededores. Varias personas fueron heridas, hubo daños en barracas de soldados españoles, en un hospital y en la iglesia parroquial, así como 16 casas colapsadas. El daño se extendió hacia asentamientos costeros como Niquero, Manzanillo y Cabo Cruz, como también hacia las zonas montañosas como Las Mercedes donde ocurrieron grandes caídas de rocas. También ocurrió la licuación del suelo debido a las condiciones del sitio en Bayamo, localizada en las llanuras fluviales del río Cauto. La intensidad máxima en la Escala MSK fue de IX grados en Cabo Cruz, zona epicentral, donde se reportó el volcamiento de pesados cañones (Álvarez et. al 2015).

El terremoto del 23 de enero de 1880 en Pinar del Río, occidente de Cuba: Este terremoto 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, causó 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 et. al 2015).

Las investigaciones sismológicas de Cuba sitúan a la provincia Santiago de Cuba como la de mayor peligro sísmico del territorio nacional. Más del 60% de los sismos perceptibles y fuertes reportados en el país han tenido su epicentro en Santiago de Cuba (Chuy et. al 2002), siendo sacudida por más de 1000 sismos perceptibles desde el año 1528 hasta la fecha (Chuy 2010). A tales efectos se recuerdan en el municipio Santiago de Cuba y más específicamente en su ciudad cabecera, los grandes terremotos ocurridos el 3 de febrero de 1932, magnitud 6,75 en la escala Richter, intensidad sísmica de VIII MSK provocó la licuefacción de la calle La Alameda (Chuy, 1999) y el 8 de agosto de 1947, donde se reportaron serios daños en la ciudad de Santiago de Cuba, fundamentalmente en los alrededores de la bahía. (Figura 3).



Figura 3: Foto. Licuefacción de los suelos en calle La Alameda, en Santiago de Cuba. Terremoto del 3 de febrero de 1932. Tomado de Chuy, 1999.

Sismicidad en Cuba.

Los terremotos como fenómenos geológicos constituyen la principal amenaza de origen endógeno en nuestro archipiélago, por tal motivo en nuestro país se llevan a cabo un gran número de investigaciones sobre este tema. La región oriental es la de mayor riesgo sísmico, así lo evidencian los registros. La génesis u origen de la sismicidad de Cuba es tectónica y está determinada por estructuras y fallas activas, donde se reconocen la existencia de:

- Terremotos de entre placas.
- Terremotos de interface.
- Terremotos de interior de placas.

La zona Sismogénica Oriente está asociada a la falla transcurrente Bartlett-Caimán que se encuentra al Sur de Cuba oriental, presenta una dirección predominante de este a oeste. La misma constituye el límite entre las placas de Norteamérica a la que pertenece Cuba y la 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, 1996).

La posición del territorio de Cuba con respecto a las placas de Norteamérica y el Caribe, determina la presencia de dos provincias sismotectónicas bien definidas, la que comprende a la zona de entre placas, en Cuba sur oriental, caracterizada por una mayor frecuencia de ocurrencia de sismos de magnitudes grandes ($M > 7,5$) y la que comprende a la zona de interior de placas en el territorio insular (Villalón-Poulut, 2018). (Ver Figura 4).

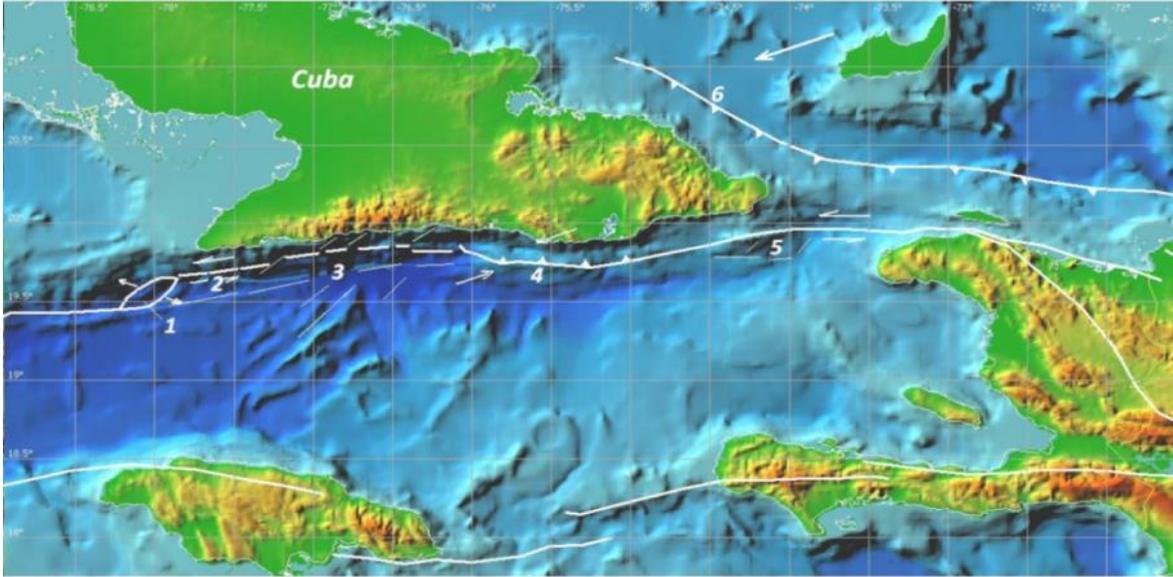


Figura 4: Contexto sismotectónico de Cuba suroriental, La Española y Jamaica: 1 cuenca de pull- appart de Cabo Cruz, 2 corrimiento por el rumbo puro, fosa de Oriente, Cinturón Deformado de Santiago (transpresión), 5 Cuenca de San Nicolás (transtensión). Según Arango (1996). Fuente CENAIS.

De acuerdo a las características geodinámicas de la región norte del Caribe, la falla transcurrente Oriente y la falla norte de la Española constituyen las principales fallas activas de primer orden donde pueden ocurrir sismos fuertes de magnitudes superiores a 6 que afecten a las poblaciones situadas en el territorio oriental de Cuba (Arango et. al 2009). A estas estructuras se relaciona la principal actividad sísmica registrada en esta región, tanto en magnitud como en frecuencia.

Ninguna región del país, ha estado exenta de la ocurrencia de estos fenómenos telúricos. Sin embargo, en el territorio de la provincia de Santiago de Cuba es donde se ha reportado el mayor número de sismos (22), con intensidades iguales o mayores que VII grados en la escala MSK y aceleraciones iguales o mayores que 0,3 g de ellos 20 en el sector Chivirico-Baconao de la provincia de Santiago de Cuba y 2 en el sector Pílon-Cabo Cruz, provincia Granma (Chuy, 1999) (Figura 5).

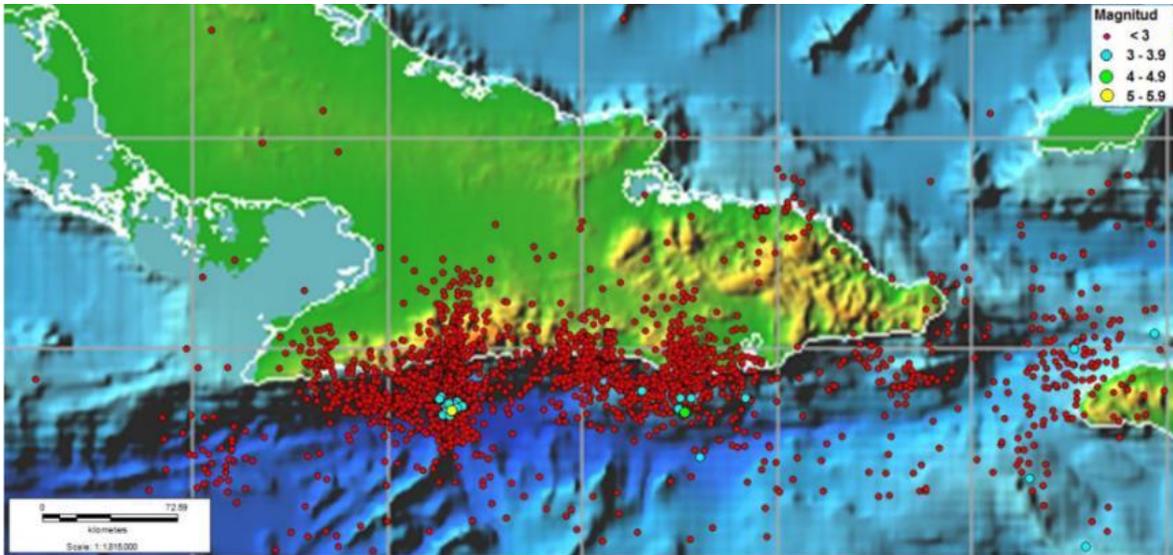


Figura 5: Mapa de la sismicidad registrada durante el 2017 en la región oriental hasta el 15 de mayo. La mayor sismicidad ha estado relacionada a la zona de Pílon-Chivirico, posterior al sismo de 5,8 de magnitud registrado el 17 de enero al sur de la localidad de Uvero, en el municipio de Guamá. Fuente CENAIS

Investigaciones realizadas en Cuba y en la región de estudio.

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 (CENAIS) 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. al 2002). Fernández (2000) en la tesis de maestría 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

fuerzas sobre la base cualitativa utilizó los métodos tradicionales en Cuba en la que da tres categorías 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 en la que se conjugan factores como la geología, geomorfología y el nivel freático.

Rosabal (2011) en el trabajo “Zonación preliminar de la licuefacción de los suelos en la región de Cuba Oriental” 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. Es necesario evaluar la potencialidad de la licuefacción con el empleo de 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.

La investigación presentada en la I CONFERENCIA INTERNACIONAL “Peligrosidad, Riesgo Geológico e Ingeniería Sísmica (MSc. Ing. Noel David Heredia Verane y DrC. Ing Francisco Calderín Mestre.) En este trabajo se calcularon los factores de seguridad contra la licuación en la zona más propensa a

experimentar este fenómeno en la ciudad de Santiago de Cuba siguiendo varios esquemas de cálculo. La estratigrafía de la zona que circunda la bahía de Santiago de Cuba, a diferencia de lo que se ha planteado hasta hoy por numerosos investigadores, está compuesta por depósitos predominantemente arcillosos, rocosos y semirrocados los cuales no son susceptibles de experimentar licuación incluso bajo sismos de magnitud 8 con aceleraciones de la gravedad de 0.25 g. Los resultados arrojados fueron analizados según los modelos de Seed & Idriss (Norteamérica), Iwasaki (Japón) y el usado por la escuela china. Ellos demuestran, después de revisar toda la información geotécnica disponible de la zona que se encuentra en los archivos de la ENIA-8, que el fenómeno solo se manifiesta en puntos aislados del área siendo necesaria una revisión de los esquemas de vulnerabilidad por licuación para la ciudad de Santiago de Cuba.

Ordaz-Hernández et. al (2013) en el artículo “Evaluación de la susceptibilidad a la licuefacción de los sedimentos cuaternarios del emplazamiento de la ciudad de San Cristóbal, provincia de Artemisa, Cuba “expone los resultados 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, forman estratos de hasta dos metros de espesor, intercalados con lentes de arcilla de 1,5 m. Ligeramente más propagados 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 del Fm. Guane.

Ordaz-Hernández et. al (2014): Modelación de parámetros geotécnicos como contribución a la zonación sísmica local: ciudad de San Cristóbal, Cuba. Esta investigación propone un procedimiento para la estimación y modelación de los

principales parámetros geotécnicos que inciden en la zonación sísmica local de la ciudad de San Cristóbal. El procedimiento consta de cuatro etapas: la elaboración de bases de datos, el análisis exploratorio de datos, la creación del modelo geológico 3D y finalmente, la generación del modelo cuantitativo. La aplicación de esta metodología en la ciudad de San Cristóbal reveló valores bajos de densidad natural, lo que sugiere condiciones desfavorables de respuestas de los suelos frente a sismos.

Galván (2014) en el artículo "Procedimiento para la gestión y reducción de riesgos geológicos en la provincia de Santiago de Cuba" el autor propone un procedimiento para la gestión de riesgos geológicos en la provincia Santiago de Cuba. Su aplicación logra resultados importantes, entre ellos: múltiples mapas de peligro, vulnerabilidad, riesgos geológicos y zonación ingeniero-geológica de multiamenazas; la proposición de distintas acciones estratégicas según la situación estudiada, así como, un conjunto de recomendaciones para la mejora continua de la gestión de riesgos geológicos en este territorio. Se confeccionó un mapa de susceptibilidad a la licuefacción para el municipio Santiago de Cuba a partir de la utilización de un Sistema de Información Geográfica (SIG). Finalmente, la validación del procedimiento propuesto a través de un grupo de expertos en la materia, confirma sus posibilidades de generalización a otros territorios del país.

Herrera-Delfin (2015) en el trabajo de diploma titulado "Delimitación de escenarios susceptibles a la licuefacción inducido por terremotos de gran magnitud en el Consejo popular Guiller món Moncada del municipio Santiago de Cuba". Este trabajo estuvo encaminado a la delimitación de escenarios susceptibles a la licuefacción inducido por terremotos de gran magnitud, surgió por la necesidad de conocer las condiciones ingeniero-geológicas de los suelos de dicho consejo. Se utilizaron un conjunto de métodos como el cálculo del factor de seguridad corregido y la determinación de intensidades máximas. Se obtuvo como resultado un mapa de susceptibilidad a la licuefacción dando sectores con probabilidades entre altas a media de susceptibilidad a la ocurrencia de licuefacción. Esta investigación es de gran importancia ya que es actual y demuestra la posibilidad

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.

Fernández-Diéguez (2015) realiza un estudio del municipio de Caimanera, con el objetivo de evaluar las condiciones ingeniero-geológicas de los suelos para predecir de forma efectiva si son licuables ante un sismo de gran intensidad. La investigación se llevó a cabo mediante un sistema de indicadores que permitió 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.

Parellada-Reyes (2016) en el trabajo de diploma “Delimitación de escenarios susceptibles a la licuefacción inducido por terremotos de gran magnitud en la zona sur de la Provincia Guantánamo”. Aplicó un sistema de indicadores a partir de conjugar factores como: geología, sismicidad, características hidrográficas, condiciones ingeniero-geológicas y el cálculo del factor de seguridad para la licuefacción que le permitió evaluar el potencial de licuefacción en los escenarios propuestos. Además, a partir de los valores del cálculo de factor de seguridad para suelos de tipo arcilla de baja plasticidad y limo (CL y ML) y arena arcillosa con grava (SC) identificados en el área de estudio dieron menores que 1 por lo que son favorables para que ocurra la licuefacción. Determinó que los municipios Guantánamo, Imías y San Antonio del Sur, presentan sectores susceptibles a la ocurrencia del fenómeno de licuefacción inducido por sismos de magnitudes mayores o iguales a 6.

Lavañino-Fleita (2017) en el trabajo de diploma “Identificación de escenarios susceptibles a la licuefacción inducido por terremotos de gran magnitud en el municipio Santiago de Cuba” la autora aplica un sistema de indicadores que permitió evaluar el potencial de licuefacción en los escenarios propuestos. Determinaron, en el municipio de Santiago de Cuba, los sectores más susceptibles a la ocurrencia del fenómeno de licuefacción, luego de realizar el cálculo del factor

de seguridad ante un sismo de magnitud 6 es del 18,3 %, en suelos ML, magnitud 7 del 27,3 %, en suelos ML-CL y magnitud 8 del 36,4 %, en suelos ML, CH y CL. Se identificaron las propiedades físico-mecánicas de los suelos existentes en el área de estudio, a partir de los informes de la ENIA. Así como los suelos más susceptibles dentro del municipio Santiago de Cuba son: los limos de baja plasticidad (ML) y las arcillas de baja plasticidad (CL), encontrándose sobre sedimentos pertenecientes al grupo El Cobre y la formación La Cruz, ubicados cerca de la Bahía.

Gutiérrez-Sánchez (2017) en el trabajo de diploma “Evaluación de riesgo por licuefacción en los municipios de Guamá, III Frente y Contramaestre de la provincia de Santiago de Cuba”, su autora realiza una evaluación de riesgo por licuefacción. En el mismo se determinó que en algunos sectores los suelos del municipio Guamá y Contramaestre son de origen fluvial. Además la cercanía del nivel freático y de una zona sismo generadora son los principales factores que propician la posible ocurrencia de la licuefacción. El mayor riesgo por licuefacción está dado en el municipio Guamá en los sectores cercanos a la costa, estos se caracterizan por una alta complejidad geológica y tectónica. En el municipio Contramaestre las obras ingenieriles construidas sobre sedimentos de origen fluvial y suelos de composición areno arcilloso con grava representan las áreas más vulnerables a la ocurrencia de la licuefacción, así como que los elementos más vulnerables son las áreas de asentamiento poblacional que sobreyacen a depósitos fluviales, siendo esto suelos muy flexibles e inestables en relación a procesos tectónicos y los suelos más vulnerables para la licuefacción son los clasificados como: arena arcillosa con grava (SC) y la arcilla de baja plasticidad (CL) representados principalmente en las formaciones Cauto y San Luis.

Bauta-Torres (2017) en el trabajo de diploma “Identificación de escenarios susceptibles a la licuefacción inducidos por sismos de gran magnitud en los municipios San Luis, Julio Antonio Mella y Palma Soriano de la provincia Santiago de Cuba” el autor realiza una delimitación de escenarios susceptibles a la licuefacción inducidos por sismos de gran magnitud. El mismo tenía como objetivo

evaluar las condiciones ingeniero-geológicas de los suelos para determinar el potencial de licuefacción ante un sismo de gran magnitud. Se aplicó un sistema de indicadores a partir de conjugar factores como: geología, sismicidad, características hidrogeológicas, condiciones ingeniero-geológicas y el cálculo del factor de seguridad para la licuefacción que permitió evaluar el potencial de licuefacción en los escenarios propuestos. Los resultados indicaron que el municipio Julio A. Mella es el más propenso a la ocurrencia de licuefacción, siendo los estratos de tipo GC (grava arcillosa) y SC (arena arcillosa) los más susceptibles al fenómeno.

Villalón-Poulut (2018) en el trabajo de diploma “Escenarios susceptibles a la licuefacción inducida por terremotos de gran magnitud en la zona urbana del municipio Guantánamo”. Se emplearon un conjunto de métodos como la validación de los resultados de acuerdo al análisis del sistema de indicadores donde incluyó 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.

Trabajos realizados en la provincia de Granma:

Rivera (2001) Tesis de maestría “Riesgo sísmico para el planeamiento urbano de la ciudad de Bayamo” en la cual su autora realizó un estudio del Riesgo Sísmico en el área correspondiente a la ciudad de Bayamo, dada la necesidad de un estudio detallado del suelo y su comportamiento ante la ocurrencia de sismos fuertes y moderados, el cual no era posible realizar a partir de trabajos anteriores por la escasez y dispersión de los datos existentes entre las diferentes Instituciones que realizaron estudios en el área, además de estar incompleta el área de la Ciudad y la no existencia de mediciones microsísmicas instrumentales.

Otros trabajos investigativos realizados en el área están encaminados a la búsqueda y prospección de yacimientos gasopetrolíferos, entre ellos encontramos: Guerra-Santiesteban (2011) en el trabajo de diploma: “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”; en el mismo, su autor, tenía como objetivo ubicar las zonas con mayores perspectivas para encontrar acumulaciones de hidrocarburos en la parte central de la Cuenca Cauto; sobre la base de la interpretación de los datos sísmicos y de pozos. Se ubicaron dos estructuras como perspectivas para la acumulación de petróleo. Se localizó además una nueva anomalía del tipo flat spot, se llevó a cabo un estudio sísmico estratigráfico de la parte central de la cuenca y se definieron algunos de los componentes del posible sistema petrolero.

Tutaleni-Kambwa (2013) en el trabajo de diploma, “Evolución tectono-estratigráfica de la Cuenca Cauto, según modelo de sistema de cuenca de antepaís”. La misma se realizó con el objetivo de evaluar las relaciones tectono-estratigráficas de la Cuenca Cauto, a través de un modelo evolutivo de sistema de cuenca de antepaís para localizar las zonas con mayores perspectivas en el desarrollo de su sistema petrolero. Fueron evaluadas las relaciones tectono-estratigráficas de la Cuenca Cauto, a través de dicho modelo. Se pudo afirmar que las estructuras en forma de anticlinal presentes en la cuenca Cauto, coinciden con el movimiento paralelo al transporte tectónico de las estructuras compresivas de colisión y pliegan las secuencias del Eoceno medio, justo antes de la discordancia del Eoceno Superior, que indica la sedimentación sobre un paleorelieve deformado por compresión y luego enterrado en el proceso de extensión tectónica de la cuenca Cauto.

Torres-Turcás (2018) en el trabajo de diploma "Identificación de los escenarios susceptibles a la licuefacción en la ciudad de Manzanillo provincia Granma su autora tomó como metodología la validación del sistema de indicadores propuestos por Fernández-Diéguez en el año 2015 y la obtención de variables correspondientes a las propiedades físico-mecánicas, para ello se revisaron informes de la Empresa Nacional de Investigaciones aplicadas (ENIA) sede

Holguín. Determinó que el área está representada por suelos de tipo GC (Gravas arcillosas), las arenas arcillosas (SC), calizas (C) arcillosas o calcáreas, arcillas areno limosas de baja plasticidad (CI). Se obtuvo como resultado un mapa donde muestra que la formación Manzanillo en correspondencia con sus propiedades físico-mecánicas no cumplen las condiciones necesarias para la ocurrencia de la licuefacción.

Peña-Leyva (2018) en el trabajo de diploma "Susceptibilidad a la ocurrencia de licuefacción de los suelos en la ciudad de Bayamo inducido por fuertes terremotos". La investigación se realizó con el objetivo de evaluar la susceptibilidad a la licuefacción de los suelos generada por sismos de gran magnitud en la zona correspondiente al área urbana del municipio Bayamo dentro de la cuenca del Cauto en la provincia Granma. Su autora realizó un resumen de las principales características de los terremotos donde ha ocurrido la licuefacción y de las condiciones de los suelos. 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.

Vázquez-Gómez (2018) en el trabajo de diploma "Delimitación de escenarios susceptibles a la licuefacción inducidos por terremotos de gran magnitud en el asentamiento poblacional del municipio Pílon de la provincia Granma". Su autora realiza una evaluación de las condiciones ingeniero-geológicas que favorecen la ocurrencia de la licuefacción de los suelos en el asentamiento poblacional del municipio Pílon de la provincia Granma para delimitar escenarios susceptibles inducidos por sismos de gran magnitud. Utilizó un conjunto de métodos que resolvieran el problema de la investigación, como la validación de los resultados de acuerdo al análisis del sistema de indicadores propuesto por Fernández-

Diéguez (2015) y el cálculo del factor de seguridad corregido a partir de la obtención de variables correspondientes a las propiedades físico-mecánicas. 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 Pilón y en los depósitos innominados del Cuaternario. Concluyó que los suelos donde se ubica la zona urbana del municipio no resultaron susceptibles a la licuefacción.

A pesar de que se han realizado varias investigaciones en la provincia Granma, los municipios Río Cauto y Cauto Cristo no han sido estudiados para determinar si existen escenarios licuables en la región aunque en el terremoto de 1551 conocido como el sismo de Bayamo, se reportaron afectaciones en el poblado de Cauto Embarcadero a orillas del río Cauto, actual municipio Río Cauto, por lo que se le debe prestar atención a esta zona que actualmente se encuentra mucho más habitada.

CAPÍTULO 1: CARACTERÍSTICAS GEOGRÁFICAS Y GEOLÓGICAS DE LA REGIÓN DE ESTUDIO.

1.1 Introducción:

El presente capítulo tiene como objetivo destacar las características físico geográficas y geológicas de la región de estudio.

1.2 Características Generales del municipio Río Cauto.

1.2.1 Ubicación Geográfica del Municipio Río Cauto.

El municipio Río Cauto se ubica en la porción noroeste de la provincia Granma, 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. (Ver Figura 6).

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 (Ecured, 2019b).

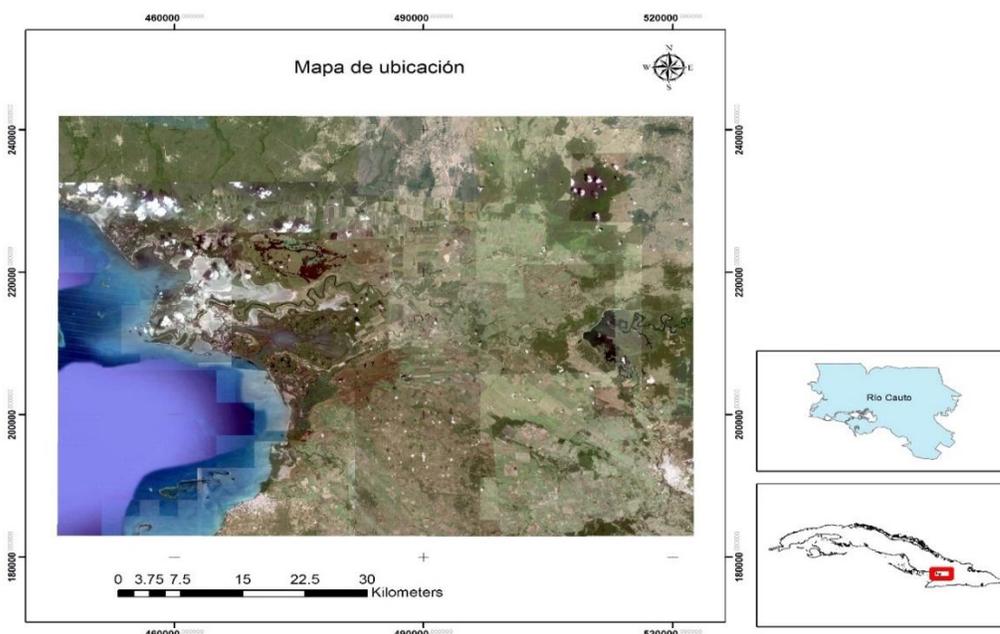


Figura 6: Esquema de ubicación municipio Río Cauto, provincia Granma.

1.2.2 Características hidrográficas.

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 para el riego de los cañaverales de la empresa azucarera Grito de Yara, las plantaciones de arroz, pastos, viandas, hortalizas y las cooperativas campesinas del municipio (Ecured, 2019b)

1.2.3 Geomorfología.

Desde el punto de vista geomorfológico dentro de la zona de la cuenca del 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 5-7 m.

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 10-30 m. 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-Santiesteban, 2011).

1.3 Características Generales del municipio Cauto Cristo.

1.3.1 Ubicación geográfica del municipio Cauto Cristo.

El municipio Cauto Cristo tiene una extensión territorial de 574,5 km², limita al norte con el municipio Cacocum, al este con el municipio Urbano Noris, ambos en la provincia de Holguín, al sur con los municipios de Bayamo y Jiguaní y al oeste con el municipio Río Cauto, todos en la provincia Granma (Ecured, 2019a). (Figura 7).

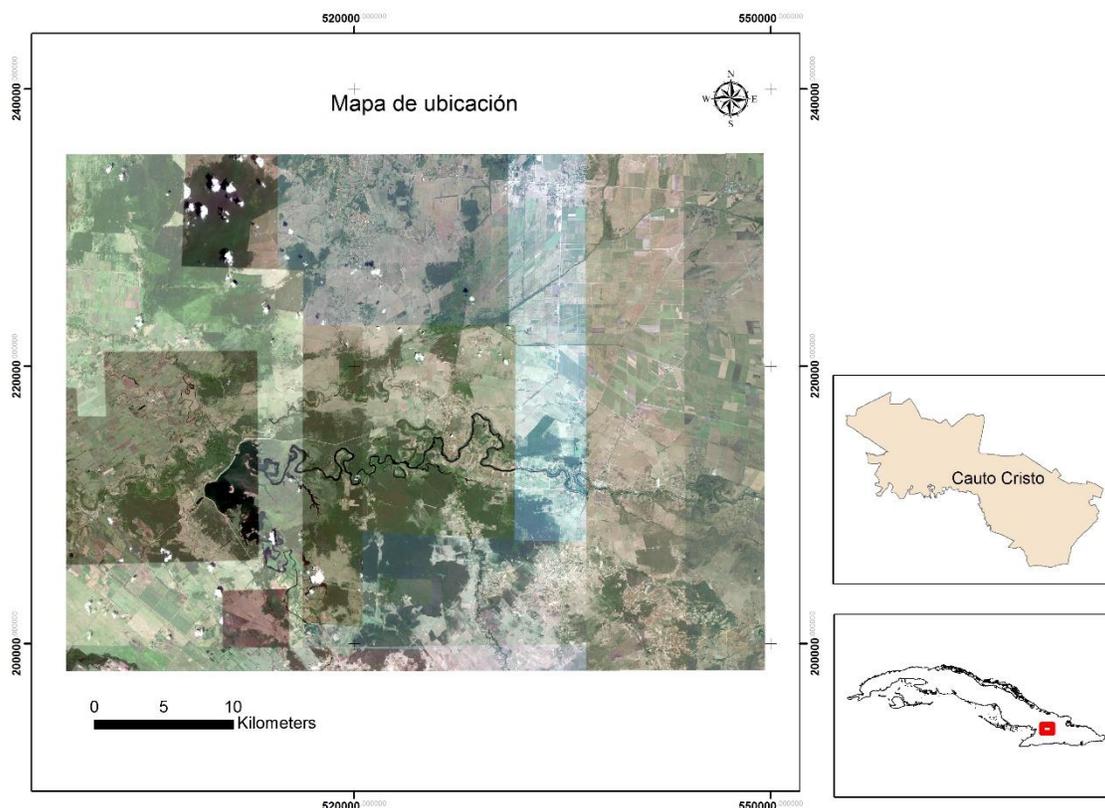


Figura 7: Mapa de Ubicación geográfica del municipio Cauto Cristo provincia Granma.

1.3.2 Relieve.

El relieve se encuentra representado por las llanuras aluviales del Cauto. Se presenta como un amplio valle, con pocas variaciones. Las mayores elevaciones no llegan a los 100 m por encima del nivel del mar. Las llanuras aluviales al centro así como las de los ríos provenientes del norte y el sur; al combinarse forman una extensa llanura a lo largo de toda el área de estudio (Ecured 2018a).

1.3.3 Características hidrográficas.

La red hidrográfica está compuesta por el río Cauto, el de mayor significación el cual corre en dirección sur-norte, con una longitud de 343 kilómetros, 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 el Salado y la Rioja (Ecured, 2019a).

1.3.4 Geología regional.

Los municipios Río Cauto y Cauto Cristo están enmarcados geológicamente dentro de la Cuenca Cauto

La geología de la región está representada por rocas de la formación Cauto pertenecientes al período Plioceno Superior-Pleistoceno Inferior, constituido por arcillas, areniscas polimícticas de variada granulometría de cemento calcítico y calcítico-arcilloso débil con intercalaciones lenticulares de arcillas, arenas arcillosas, capas de arcillas bentoníticas e inclusiones ocasionales de yeso; las areniscas tienen con frecuencia nódulos de calcita, goethita y fragmentos de hierro. Las arcillas tienen color carmelita y abigarrado, son plásticas y a veces arenosas, ocasionalmente tienen fractura concoidal irregular. Contienen concreciones de CaCO_3 con manchas ocre. Entre otros minerales arcillosos predomina la montmorillonita y está presente la clorita. Las arcillas bentoníticas son de color verde grisáceo y carmelita, con manchas blancas y negras, contienen intercalaciones de yeso. Las arenas arcillosas tienen color verde grisáceo o carmelita, son de grano fino a mediano, a veces de grano grueso, forman gravas de 2-15 mm de material vulcanógeno con pátina negra superficial de pigmentos de FeO y MnO . Las gravas son subangulares y redondeadas, también contienen pisolitas ferromangánicas de 1-2 m. Las areniscas son de color amarillo blancuzco y carmelita, de grano fino a medio. Por lo general son friables, compactas (cementadas con material carbonatado). El material de los clastos es de caliza, tufitas y cuarzo subredondeado. Las arcillas y las areniscas generalmente contienen gravas de material vulcanógeno y caliza con pátina de FeO y MnO , pisolitas ferro-mangánicas de 1-2 m. Y manchas o concreciones de CaCO_3 .

Otras rocas localizadas en el área de estudio son los sedimentos aluviales indiferenciados del Pleistoceno Superior-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 (Ecured, 2019a).

Estratigrafía de la Cuenca Cauto

La formación de la cuenca del Cauto, está ligada al desarrollo del Arco Volcánico Cretácico, ocupa una posición entrearco, modelada en la colisión con las Bahamas (Tutaleni-Kambwa, 2013).

El basamento de la cuenca del Cauto, lo ocupan las rocas del Arco Volcánico del Cretácico con su cobertura Campaniano-Maastrichtiano de composición siliciclástica-carbonatada, afloran al sur de la Sierra Maestra y en la región del río Silantro, aunque existen algunos afloramientos aislados al norte de la Sierra Maestra en la región de Palma del Perro, en el camino de Los Callejones a la Pimienta, al sur de Guisa, donde afloran por debajo del Fm. Charco Redondo. Estas rocas están constituidas por micritas de color gris oscuro, fétidas, masivas, carsificadas en forma de lapiez. Hacia el centro este de la Cuenca también afloran rocas cretácicas en la región de Babiney (Tutaleni-Kambwa, 2013).

Formaciones presentes en el área de estudio:

Formación Bayamo: Se extiende a lo largo de la llanura del río Cauto, provincias Granma y Las Tunas. Como holoestratotipo se designó un corte de unos 20 m de altura en la margen occidental del río Cauto, en la localidad El Sombrero, a unos 9 km al W del poblado de Cauto Cristo, provincia de Granma. Coordenadas Lambert X= 529 150, Y= 212 950, en la hoja topográfica Tranquera, 4877 I. Las litologías principales son arenas de tonos grises y amarillo grisáceos, de granos finos, con lentes de areniscas y conglomerados de guijarros finos, así como con intercalaciones de arcillas arenosas de color verde-grisáceo, y arenas arcillosas manchadas de gris. La estratificación se puede observar frecuentemente en las arenas. Las fracciones gravoso-arenoso-limosas son de composición polimícticas. Predominan los granos de volcanitas alteradas, granos de epidota, rocas silíceas, cuarzo, feldespatos, cloritas, zeolitas y granos y peletas bien redondeados, de composición carbonática. Los granos de arenas gruesas están bien redondeados, los más finos son subangulares. Los sedimentos se encuentran débilmente cementados por cemento carbonático. La componente carbonática del cemento está representada por calcita y en la arcillosa predominan las esmectitas;

subordinadamente aparecen clorita y, probablemente, clorita-esmectita interestratificada. Esta cubre discordantemente las formaciones Camazán, Charco Redondo y el Gr. Guacanayabo (Manzanillo y Paso Real). La sobreyace discordantemente la Formación Cauto. La edad es Plioceno Superior-Pleistoceno Inferior. Se formó en un ambiente aluvial con influencia marina y, en parte, estuarina (Colectivo de Autores, 2013).

Formación Cauto: Se extiende por todo el Valle del río Cauto, provincias Granma, Holguín y Santiago de Cuba. El holoestratotipo no fue precisado por el autor. Se designó un lectoestratotipo representado por un corte de 20 m en el río Cauto, a unos 10 km al NW del poblado de Babiney, cerca de la localidad de Las Palmitas, provincia de Granma. Las coordenadas Lambert son X=529 700, Y=214 000, en la hoja topográfica Tranquera, 4877 I. Las litologías principales son arcillas, limos, arenas, gravas polimícticas y conglomerados polimícticos, con estratificación horizontal y cruzada, predomina 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 jasperoides. Yace discordantemente sobre las formaciones Bayamo, Barrancas, Bitirí, Camazán, Dátil, Río Jagüeyes, San Luis y los grupos El Cobre (parte indiferenciada) y Guacanayabo (formaciones Manzanillo y Paso Real). Está cubierta concordantemente por los sedimentos aluviales del Holoceno. La edad de la formación es 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 (Colectivo de Autores, 2013).

1.4 Sismicidad regional y del área de estudio.

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.

En Granma se pueden citar las siguientes estructuras regionales de Norte a Sur, que afectan en gran medida a la provincia:

- ✓ Cuenca del Cauto
- ✓ Falla Cauto-Nipe
- ✓ Sierra Maestra.
- ✓ Sistema de Fallas Bartlett-Caimán

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 Bayamo y Baconao. La Falla Cauto-Nipe atraviesa la región Oriental con una dirección noroeste-sureste desde la Bahía Nipe hasta las inmediaciones de Cabo Cruz en el municipio Niquero 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. El peligro sísmico en Cuba presenta una particularidad interesante y que al mismo tiempo hace que su estudio sea para algunas áreas de carácter complejo. Esta consiste en el hecho de que 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 (Figura 8), destacándose el primer tipo de sismicidad 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 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. Al cierre del año 2017 en toda el área de Cuba se habían reportado un total de 4567 terremotos. La zona donde se reportó la mayor cantidad de terremotos fue Pílon-Chivirico, con un total de 1824. Esta actividad sísmica inicio con un sismo el 17 de enero de dicho año, 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).

MINISTERIO DE CIENCIA, TECNOLOGIA Y MEDIO AMBIENTE
CENTRO NACIONAL DE INVESTIGACIONES SISMOLOGICAS
PELIGROSIDAD SISMICA DE CUBA CON FINES DE SEGURO

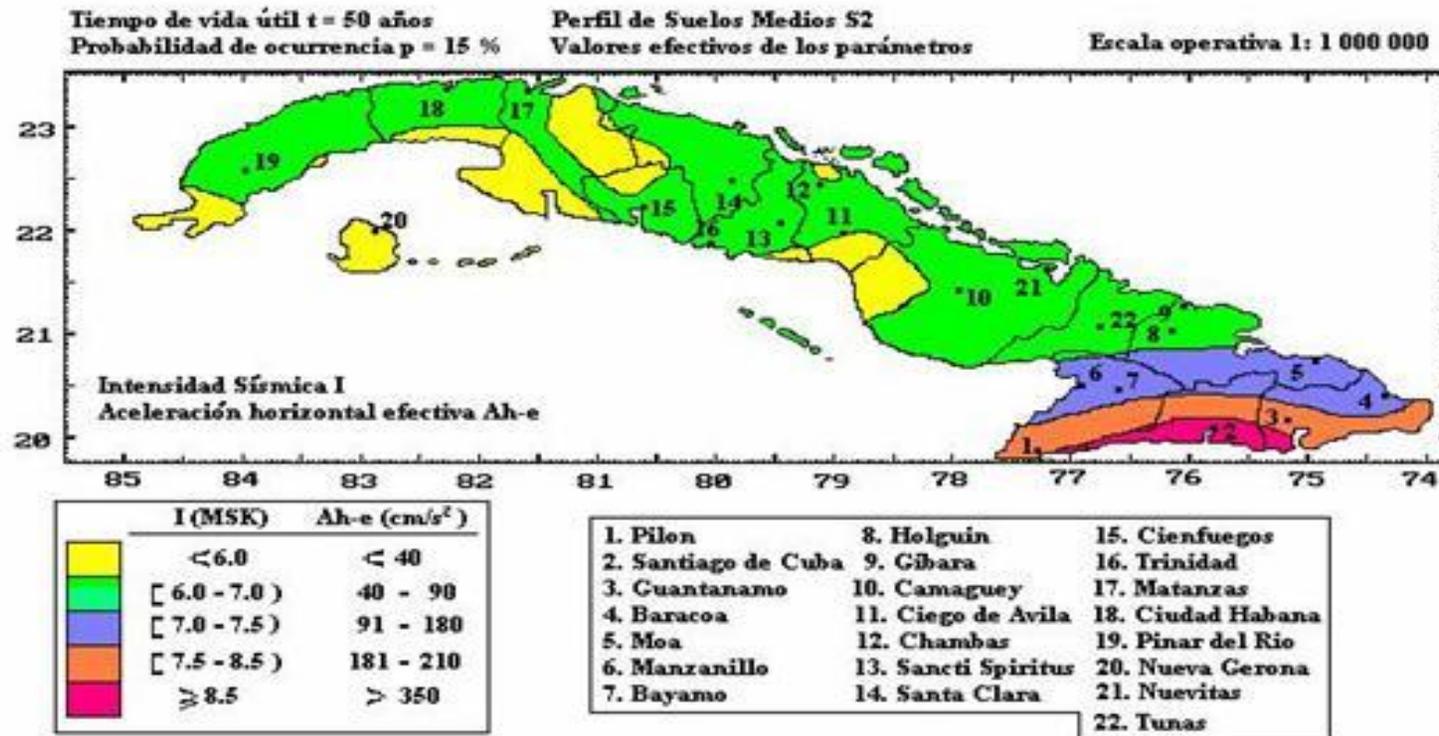


Figura 8: Mapa de peligrosidad sísmica de Cuba con fines de seguro. Nótese que la región de Cuba Oriental posee altos valores de intensidad sísmica y aceleración horizontal (Chuy y Álvarez 1995).

CAPÍTULO 2: METODOLOGÍA PARA ESTUDIAR EL POTENCIAL DE LICUEFACCIÓN.

2.1 Introducción:

En este capítulo se dará a conocer la metodología utilizada para la evaluación del potencial de licuefacción a partir de las etapas de investigación que se describen a continuación.

Primera Etapa: Revisión bibliográfica.

En esta etapa se realizó una recopilación de información de trabajos precedentes que abordan el tema, artículos publicados en Internet u otros sitios web de interés además de revistas, libros y trabajos de diplomas donde se estudió el fenómeno de licuefacción en las provincias Guantánamo, Santiago de Cuba y los municipios Bayamo, Pílon y Manzanillo en Granma. Se utilizaron informes pertenecientes a los archivos de la Empresa Nacional de Investigaciones Aplicadas (ENIA) de la provincia de Holguín para una mejor comprensión de las condiciones ingeniero-geológicas del área de estudio. Toda esta información permitió el desarrollo de la investigación.

Segunda etapa: Procesamiento de la información.

En esta etapa se procesó toda la información recopilada de los artículos e informes técnicos de la Empresa Nacional de Investigaciones Aplicadas (ENIA) de la provincia de Holguín. 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.

Tercera Etapa: Interpretación de la información.

Los datos previamente 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 y límites de Atterberg) fueron expresados mediante el análisis del

comportamiento del nivel freático, las propiedades físico-mecánicas del suelo y la identificación de los estratos susceptibles a licuar.

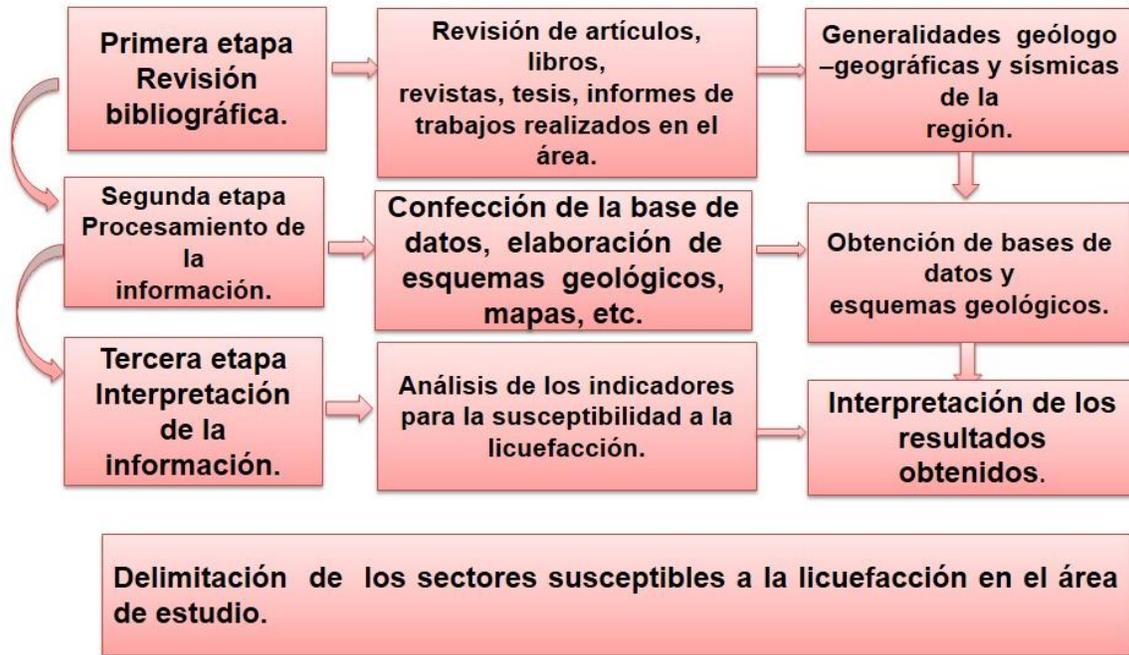


Figura 9: Flujograma de la investigación.

2.2 Sistema de indicadores aplicados para el estudio de la susceptibilidad a la licuefacción de los suelos en la región oriental de Cuba 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:

Wang, (1979); Seed y Idriss, (1982); 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 presentadas 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 plantea 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 (Holoceno-Pleistoceno). Debe cumplir además que la relación entre el estrato licuable y el no licuable sea menor que 1. 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.

Sismicidad:

Otro factor importante para que pueda licuar un suelo es la sismicidad, para ello se analiza la cercanía de una zona sísmica generadora capaz de generar sismos fuertes o magnitud mayor de 5,5 y las aceleraciones de las partículas lleguen a ser iguales o superior a $0,2 \text{ g/cm}^2$. Para la selección se tiene en cuenta la norma:

Construcciones Sismorresistentes-Requisitos básicos para el diseño y construcción de 2017 en la que aparece un mapa con la zonación de las aceleraciones esperadas para cada municipio de nuestro país, 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 CENAIS.

Profundidad del Nivel Freático:

Importante a tener en cuenta son los valores del nivel freático en el área. 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.

Condiciones ingeniero-geológicas:

Lo primero que debe cumplir 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, porcentaje de partículas finas, saturación, compactación del suelo a partir del N de SPT, entre otras).

Se tiene en cuenta:

- ✓ Porcentaje de partículas finas ≤ 15 .
- ✓ Límite Líquido ≤ 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 $C_u < 5$.

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

- ✓ Arena fina.
- ✓ Arena Media.
- ✓ Arena Limosa.
- ✓ Arena con bajo porcentaje de arcilla.
- ✓ Arena con bajo porcentaje de materia orgánica.
- ✓ Arena con partículas.
- ✓ Sedimentos eluviales, llanuras aluviales y zonas de manglar.

2.3 Metodología aplicada para el análisis de los indicadores para el estudio de la susceptibilidad a la licuefacción en el área de estudio.

2.3.1 Análisis de las condiciones geológicas del área de estudio.

Se evaluaron las condiciones geológicas, se determinaron las formaciones presentes en los municipios y de acuerdo a las edades y sedimentos de cada una de ellas se delimitó cuáles eran las más favorables a la ocurrencia del fenómeno de licuefacción. Se analizan también, los valores de propiedades como Límite Líquido, porcentaje de finos, cohesión entre otras.

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

Para llegar a las conclusiones de este indicador se revisó la norma para construcciones sismorresistentes, requisitos básicos para el diseño y construcción. Dentro de esta se revisó el capítulo 4 donde se describen las zonas sísmicas del territorio nacional y se tomó la descripción de los municipios en estudio.

2.3.3 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 ingeniero-geológicos de la ENIA Holguín como parte del trabajo de perforación realizado por partes de ellos.

2.3.4 Análisis de las condiciones ingeniero-geológicas.

Se revisaron los informes ingeniero-geológicos efectuados por la Empresa Nacional de Investigaciones Aplicadas (ENIA) y se seleccionaron las propiedades físicas y mecánicas por cada obra de los dos municipios estudiados. 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, porcentaje de partículas finas, saturación, compactación del suelo a partir del N de SPT entre otras).

CAPÍTULO 3: EVALUACIÓN DEL POTENCIAL DE LICUEFACCIÓN EN EL ÁREA DE ESTUDIO.

3.1 Introducción:

Los indicadores propuestos para determinar si los escenarios son licuables ante un sismo de gran magnitud serán analizados en este capítulo. A continuación, se describen los resultados obtenidos durante la investigación.

3.2 Criterios para la selección de escenarios susceptibles a la licuefacción.

El primero en ser analizado fue el criterio histórico. En el área se reportó la ocurrencia de este fenómeno en una zona muy próxima a la raíz del terremoto de 1551, en el poblado de Cauto Embarcadero a orillas del río Cauto, municipio Río Cauto. 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, puede ser utilizada como prueba de susceptibilidad en un determinado lugar.

Otro de los criterios que se tuvo en cuenta fue la cercanía a una zona sismo generadora, la probabilidad de ocurrencia y período de recurrencia de un sismo fuerte. La sismicidad del área y las posibles amplificaciones de las aceleraciones sísmicas.

Se analizaron además las condiciones geológicas como otro criterio de gran importancia, alguno de los escenarios propuestos están cerca de depósitos fluviales. Los suelos se encuentran semisaturados y saturados, el nivel freático se encuentra en algunas zonas de 1 a 3 m profundidad.

Se analizó, además, la edad del depósito. Los suelos estudiados pertenecen a formaciones del Cuaternario donde los estratos se encuentran poco consolidados. Se tuvo en cuenta que los depósitos fueran de arena arcillosa, arena limosa, con poco contenido de finos que estuvieran uniformemente graduadas y limpias, compuestas de partículas redondeadas preferiblemente.

3.3 Análisis del sistema de indicadores propuestos para el municipio Río Cauto.

3.3.1 Condiciones geológicas:

Desde el punto de vista geológico el municipio Río Cauto se encuentra dentro de la Cuenca Cauto predomina la formación Cauto compuesta por arcillas, limos, arenas, gravas polimícticas y conglomerados polimícticos, con estratificación horizontal y cruzada, predomina la horizontal. Coloración gris, gris pardusco y amarillo grisáceo (Colectivo de Autores, 2013). (Figura 10).

En el área de estudio están presentes también sedimentos aluviales indiferenciados del Pleistoceno Superior-Holoceno. Se extienden 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).

En estos sectores podría ocurrir licuefacción, dependiendo en gran medida del porcentaje de arena y arcilla, así como el grado de plasticidad de la misma.

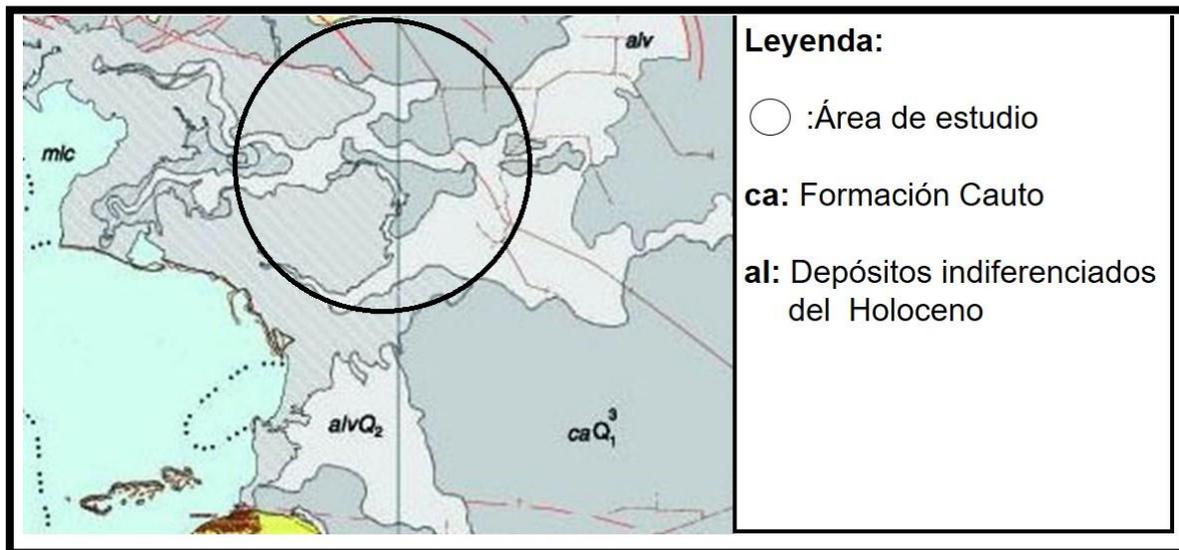


Figura 10: Recorte del mapa geológico de la República de Cuba, escala 1: 100 000. (I.G.P)

3.3.2 Sismicidad

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. El municipio Río Cauto pertenece a la zona número 2, de peligro sísmico bajo, puede ocasionar daños en las construcciones debiéndose tomar medidas sismorresistentes en las estructuras y obras en función de la categoría ocupacional de las mismas y el nivel de protección definido según la probabilidad de exceder el sismo de diseño. Los valores de la aceleración espectral horizontal máxima del terreno S_a estarán entre 0,30-0,40 g para períodos cortos (S_s) y entre 0,06-0,15 g para períodos largos (S_l) (NC 46:2017).

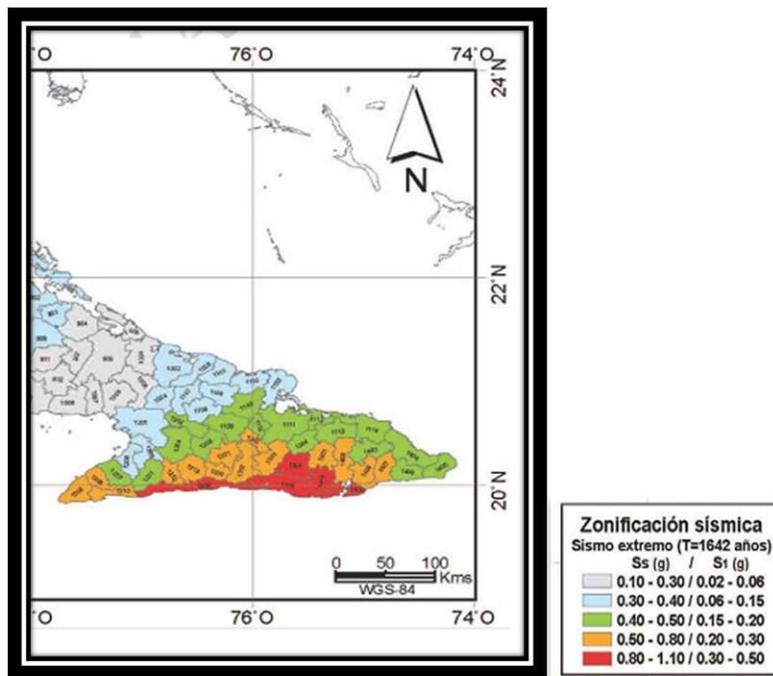


Figura11: Tomado del mapa de Peligro Sísmico de la República de Cuba NC: 46-2017.

3.3.3 Características hidrográficas:

La hidrografía se encuentra representada principalmente por el río Cauto, el Salado, las lagunas de Viramas, Leonero y La Puente, la toma del Cauto y la presa de Cauto del Paso. (Figura 12).

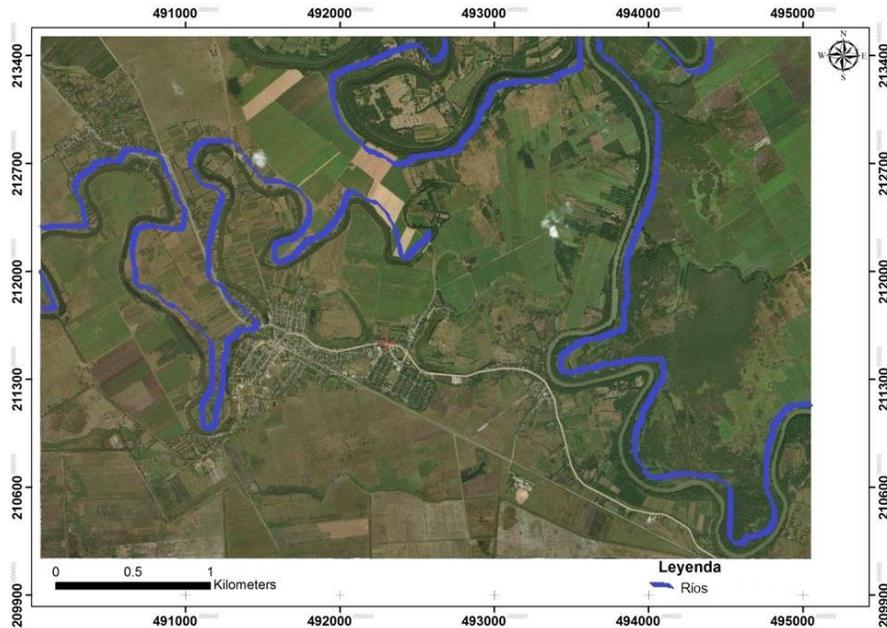


Figura 12: Mapa de red fluvial municipal Río Cauto provincia Granma.

El nivel freático es variable dependiendo de la época del año, siendo menor en los periodos de sequías y mayor en épocas de lluvias.

Según los informes ingeniero-geológicos revisados este en ocasiones alcanza niveles de 0,40 a 4 m y en la mayoría de los casos se encuentra entre 4,5 y 10 m de profundidad como se muestra en la tabla 1.

Tabla 1: Profundidad del nivel freático por obra.

Obra	Nivel Freático (m)
Urbanización Reparto Ovejuela	3-4,50
Remodelación del Palacio de Pioneros	0,40-1
Parque Solar Fotovoltaico Vado del Yeso	>20
Parque Solar Fotovoltaico Guamo Viejo	12,95
Escuela Primaria Adolfo Núñez	3,0
Escuela Primaria Guiller món Moncada	>5
Escuela Primaria Vicente Quesada Oconnor	1,65-1,70
Círculo Infantil Espiguitas de Arroz Vado del Yeso	>8
Carretera Cauto Embarcadero-Río Cauto	3-4,50
Torre Radio Guamo	2,75-2,85
Torre Radio Cuba Gavina	2,8-2,75
Viviendas en Río Cauto	1,14-2,60

Viviendas biplantas para Médicos Reparto Fernando Echenique	0,65-0,75
Policlínico en Vado del Yeso	4,5
Laguna de Oxidación ESBE Celia Sánchez Manduley	6,6-10
Torre de 42 m de la RBS. Vado del Yeso	4
Vial de acceso. Molino Cayama.	NC

3.3.4 Condiciones ingeniero-geológicas:

Para el estudio de las condiciones ingeniero-geológicas se confeccionó una tabla resumen teniendo en cuenta los resultados obtenidos en los ensayos de laboratorios y sus respectivos parámetros tales como: límite líquido (LL), Humedad natural (W), % de arena, Finos, Cohesión, Compactación (C) etc.

En el área fueron identificados diferentes tipos de suelos los cuales se describen a continuación:

Relleno: de color carmelita oscuro a grisáceo, constituido por arcilla, arena, gravas, limo, mezclado con capa vegetal. Su espesor es muy variado desde 0,20 hasta 0,60 m encontrándose en la mayoría de los casos en la superficie.

Capa vegetal: Se presenta debajo del relleno cuando este aparece desde la superficie del terreno. Es un material de color gris oscuro a negruzco presenta abundante materia orgánica en ocasiones se encuentra mezclada con arcilla. Su espesor varía desde 0,30 hasta 1,75 m aproximadamente.

Suelo de tipo arcilloso, por lo general plásticos de color carmelita amarillento que presenta tonalidades verdes, con manchas de óxido de hierro, presenta nódulos y bolsones de CaCO_3 , de consistencia de media a dura, origen aluvial, mezclado con algunas gravas de caliza y lentes de arena de grano fino. Su espesor es muy variable desde los primeros metros hasta 10 m de profundidad por su contenido pueden clasificarse en:

- Arcilla de alta plasticidad.

- Arcilla de baja plasticidad.

Suelo arenoso: por lo general de grano fino de color carmelita grisáceo en ocasiones mezclada con arcillas y limo, de compacidad baja a media, origen aluvial. Su espesor varía desde 1,90 hasta 2,0 m de profundidad. Por su contenido se clasifican en:

- Arena arcillosa.
- Arena limosa.

Propiedades ingeniero-geológicas de las obras estudiadas.

De un total de 48 informes ingeniero-geológicos revisados solo se pudieron utilizar 17 que contenían las coordenadas y la mayoría de las propiedades físico mecánicas. Los resultados obtenidos se muestran en la tabla 2.

Tabla 2: clasificación geotécnica del suelo para en municipio Río Cauto.

Obra	N de SPT	% Finos	% Arenas	LL (%)	LP (%)	IP (%)	Wn (%)	C (kPa)	S (%)	Clasificación
Urbanización Reparto Ovejuela	11-28	96	2	70,0	24	46	26,9	93	89	CH
Remodelación del Palacio de Pioneros	NP	92	7	66,0	28	38	31,3	35	94	CH
Parque Solar Fotovoltaico Vado del Yeso	5-21	95	5	73,0	26	47	37,2	36	99	CH
Parque Solar Fotovoltaico Guamo Viejo	7-38	93	6	62,0	25	37	28,4	80	89	CH
Escuela Primaria Adolfo Núñez	NP	89	6	73,0	28	45	30,8	30	92	CH
Escuela Primaria Guiller món Moncada Capa 1	10-12	95	5	60	25	35	19,3	35	75	CH
Capa 2	2-4	42	58	NP	NP	NP	20,5	20	69	SM
Escuela Primaria	10-12	85	15	72	24	48	36,5	35	93	CH

Vicente Quesada Oconnor Capa 1										
Capa 2	2-4	80	19	35	20	15	33,5	25	95	CL
Capa 3	2-4	78	20	64,0	16	48	52,4	20	100	CH
Círculo Infantil Espiguitas de Arroz Vado del Yeso	7-24	90	8	91	29	62	41,6	46	96	CH
Carretera Cauto Embarcadero-Río Cauto Relleno 1	8-23	14	27	30	19	11	9,2	15	59	CL
Relleno 2	NP	83	16	59	24	35	26,4	35	69	CH
Capa 1	6-28	87	11	62	23	39	21,6	36	83	CH
Torre Radio Guamo	NP	95	4	77	27	20	39	50	97	CH
Torre Radio Cuba Gavina	NP	86	14	47	21	23	24	45	91	CL
Viviendas en Río Cauto	7-12	85	4	53	25	28	26	35	88	CH
Viviendas biplantas para Médicos Reparto Fernando Echenique	6-16	77	21	44	22	22	26,7	36	88	CL
Policlínico en Vado del Yeso	NP	95	5	91	29	62	45	40	100	CH
Laguna de Oxidación ESBEC Celia Sánchez Manduley	7-54	89	9	67	25	42	25,4	30	87	CH
Capa 2	11-31	49	51	37	20	17	14,6	4	66	SC
Torre de 42m de la RBS.Vado del Yeso	NP	97	3	99	29	70	57,6	19	96	CH
Vial de acceso. Molino Cayama. Relleno 1	12-23	19	38	34	18	16	13,1	1	64	CL
Relleno 2	NP	78	19	65	23	42	42	63	82,1	CH
Capa 1	11-30	85	13	63	24	39	25,8	60	91,3	CH

Las áreas con condiciones para licuar se caracterizan por ser estratos de poca compactación, alta saturación, el nivel freático se encuentra entre 0 y 3,0 metros de profundidad, además de predominar las arenas. En el área de estudio fue identificado un solo punto con posibles condiciones para licuar, correspondiente al relleno de un tramo de la carretera Cauto Embarcadero-Río Cauto. Se debe tener en cuenta que a pesar de que los indicadores no cumplan con los valores establecidos puede licuar si varían otros factores como: la magnitud del sismo, profundidad y la distancia. Si aumentara la magnitud y la aceleración de las partículas estas pudieran perder la resistencia y manifestarse alguna de los efectos como desplazamientos laterales o asentamiento diferencial. Donde no se rompe la estructura debido a la alta concentración de partículas finas y a la cercanía del nivel freático puede ocurrir una amplificación de las ondas sísmicas y causar daño a las estructuras debido al propio movimiento de suelo.

En la figura 13 se muestra un esquemas representativo de la litología perteneciente a la zona urbana del municipio Río Cauto el cual se encuentra representado por un material de relleno compuesto por arcilla, arena, gravas, limo con espesor de 0,20 a 0,60 m seguido de una capa vegetal con un espesor de 0,30 hasta 1,75 m aproximadamente. Luego un suelo arcilloso seguido de arena de grano fino con espesor 1,90 hasta 2 m.

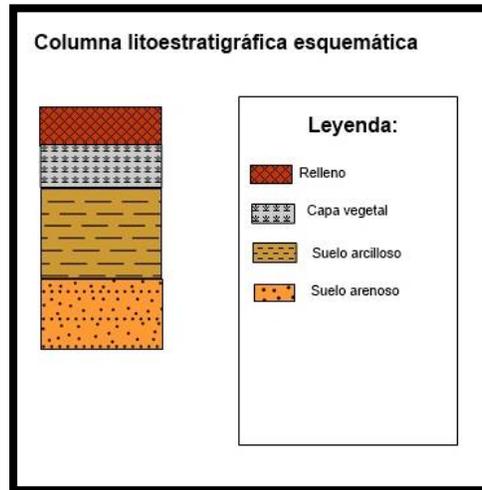


Figura 13: Columna litoestratigráfica esquemática municipio Río Cauto, Granma.
En la figura 14 se muestra la distribución de las obras estudiadas en el municipio Río Cauto.

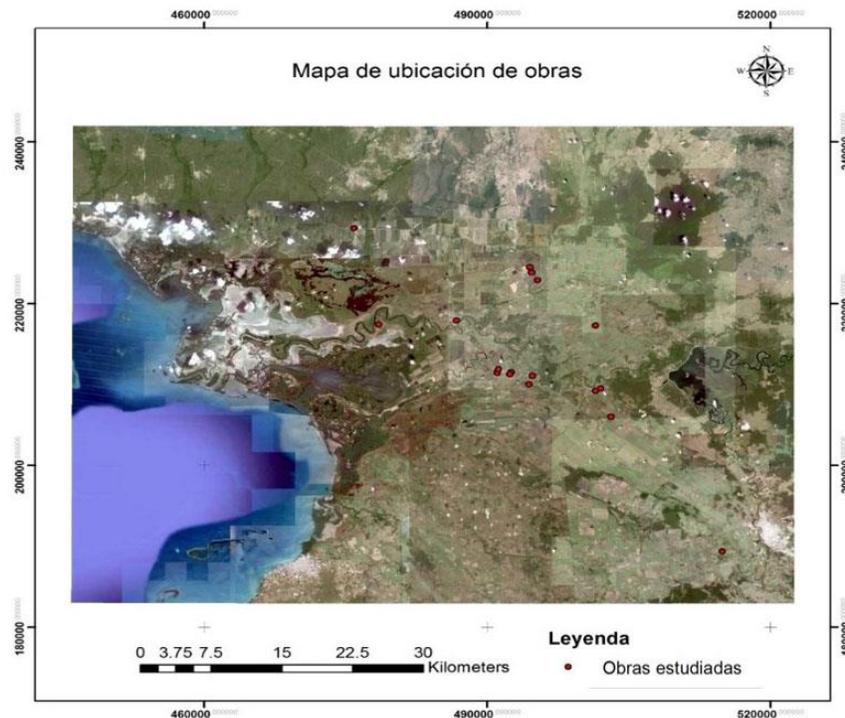


Figura 14: Mapa de ubicación de las obras estudiadas. Municipio Río Cauto, provincia Granma.

3.3.5 Conclusiones parciales para el municipio Río Cauto.

Los suelos del municipio Río Cauto desde el punto de vista geológico se encuentran ubicado dentro de la región de la Cuenca Cauto. La formación principal es la formación Cauto y los Sedimentos aluviales indiferenciados del Pleistoceno Superior-Holoceno. Las litologías que predominan en el área de estudio son: arcillas, por lo general plásticas, potencialmente expansiva con lentes de arena de grano fino arena con algunas gravas de caliza de poco espesor, a medida que toma profundidad el estrato disminuye el contenido de arena. Por su contenido y propiedades se puede clasificar como arcilla de alta plasticidad y arcilla de baja plasticidad. Arenas; de granulometría fina de color carmelita grisáceo compacidad baja a alta mezclada con arcilla, su espesor varía desde 1,90 y hasta 2,0 m. Se clasifican como arena arcillosa y arena limosa.

El nivel freático es variable dependiendo en gran medida de la época del año en que se encuentre, siendo menor en los periodos de lluvia y mayor en épocas de sequias. Según los informes ingenieros geológicos revisados este alcanza niveles de 0,40 a 5,0 m aunque en algunos casos se puede encontrar de 6 a 10 m y en ocasiones a más de 20 m de profundidad.

Este municipio se encuentra muy próximo a la principal zona sismogeneradora activa del país, donde han ocurrido innumerables sismos, que provoquen daños a las estructuras.

Las áreas más propensas a licuar son aquellas que se encuentran fundamentalmente en la llanura de inundación de los ríos o cercanas a estas, donde se encuentran los sedimentos más recientes, en suelos con alto grado de saturación y baja compactación, no se descarta que ante la ocurrencia de un terremoto que exceda los 5,5 grados ocurra el fenómeno en algunas áreas no identificadas en este estudio dada que los datos son escasos y puntuales.

3.4 Análisis del sistema de indicadores propuestos para el municipio Cauto Cristo.

3.4.1 Condiciones geológicas:

El municipio Cauto Cristo pertenece a la Cuenca Cauto destacándose como formación principal la formación Cauto. Representada por arcillas, limos, arenas, gravas polimícticas y conglomerados polimícticos, con estratificación horizontal y cruzada, predomina la horizontal. Coloración gris, gris pardusco y amarillo grisáceo (Colectivo de Autores, 2013). (Figura 15).

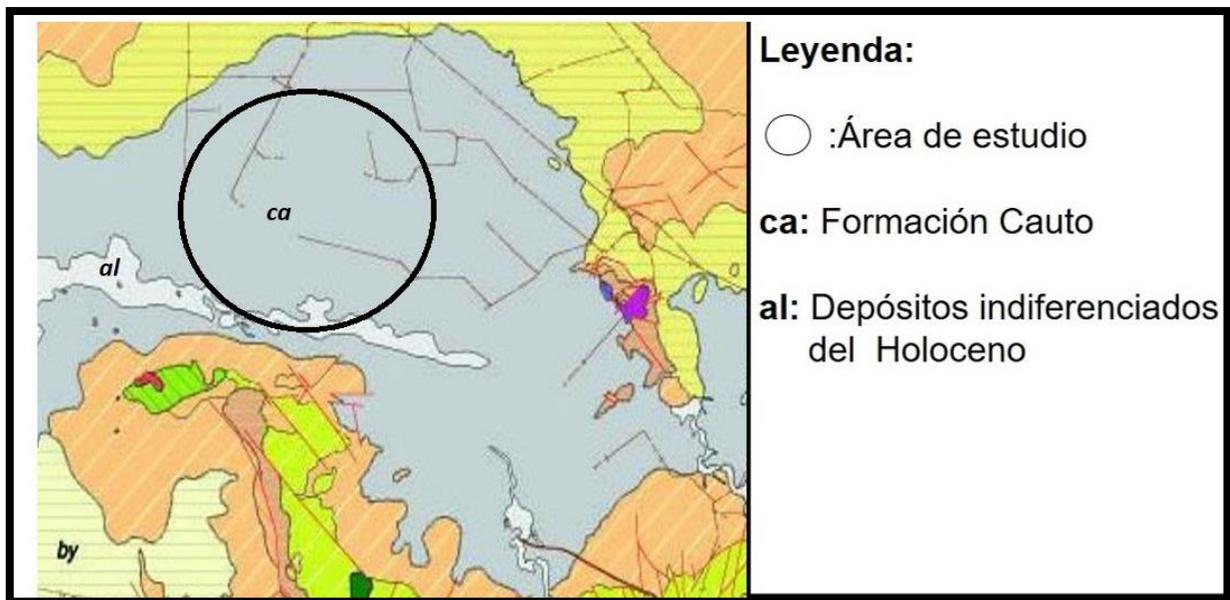


Figura 15: Recorte del mapa geológico de la República de Cuba, escala 1: 100 000. (I.G.P)

3.4.2 Sismicidad

El municipio Cauto Cristo pertenece a la zona sísmica 3 de riesgo sísmico moderado, que puede ocasionar daños a las construcciones debiéndose tomar medidas sismorresistentes en todas las estructuras y obras en función de la categoría ocupacional de las mismas y el nivel de protección definido según la probabilidad de exceder un sismo de diseño. Los valores de la aceleración espectral horizontal máxima del terreno S_a estarán entre 0,40-0,50 g para periodos

cortos (S_s) y entre 0,15-0,20 g para períodos largos (S_l). (NC 46:2017). (Figura 16).

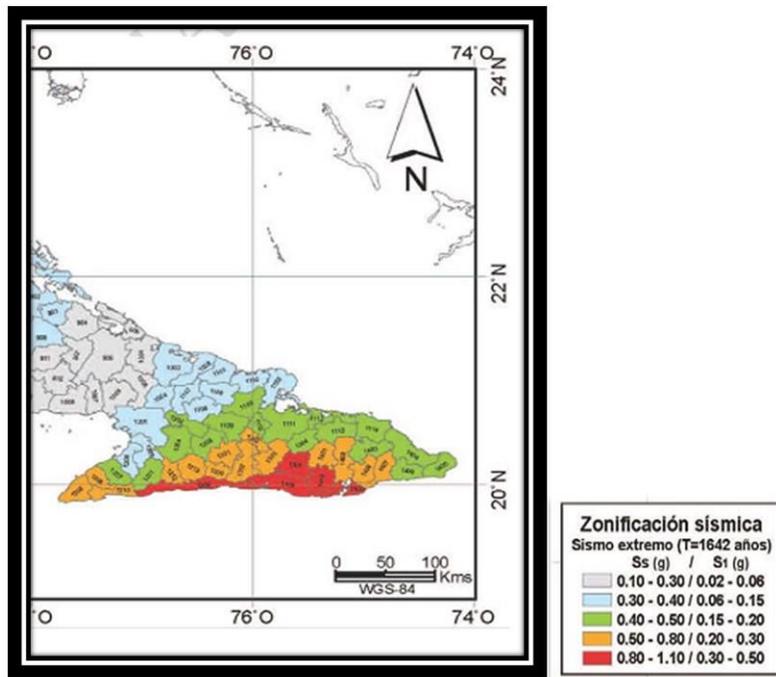


Figura 16: Tomado del mapa de Peligro Sísmico de la República de Cuba NC: 46-2017

3.4.3 Características hidrográficas:

Dentro del municipio se destacan importantes cuencas hidrográficas superficiales, como el río Cauto, el de mayor significación, El Salado y La Rioja. El nivel freático se encuentra a más de 5 m de profundidad. Este valor hace que la susceptibilidad a la licuefacción sea de moderada a baja. En la tabla 3 se muestra la profundidad del nivel freático de las obras estudiadas.

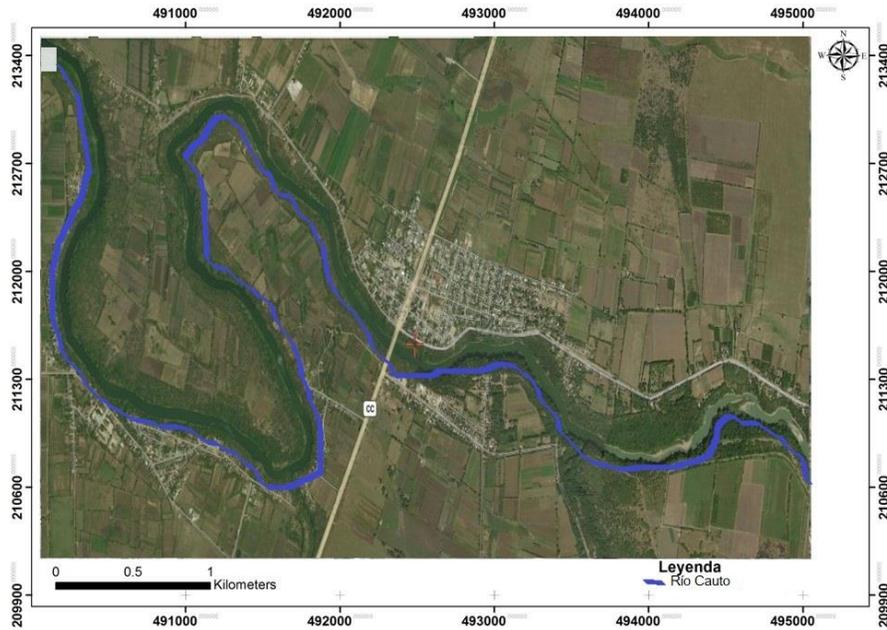


Figura 17: Mapa de red fluvial municipio Cauto Cristo provincia Granma.

Tabla: 3 Profundidad del nivel freático por obra.

Obra	Nivel Freático (m)
Policlínico tipo II en Cauto Cristo	NC
Parque Solar Fotovoltaico Mártires de Artemisa	12
Viviendas de 2 y 3 niveles Reparto Nuevo	6
Parque Solar Fotovoltaico en Cauto Cristo	5

3.4.4 Condiciones ingeniero-geológicas:

En el área de estudio se identificaron los siguientes tipos de suelo:

Capa vegetal encontrándose hasta 0,45 m de profundidad.

Suelo arcilloso por lo general plástico de consistencia dura a firme de color carmelita claro a oscuro que presenta tonalidades gris verdosas, con manchas ocre y de CaCO_3 , diseminadas cristales de yeso. Su espesor varía desde 0,45 hasta 6 m de profundidad. Estas arcillas pueden ser clasificadas como arcillas de alta plasticidad y arcillas de baja plasticidad. En la tabla 4 se muestran los principales resultados obtenidos en el municipio Cauto Cristo.

Tabla 4: clasificación geotécnica del suelo para el municipio Cauto Cristo.

Obra	N de SPT	% Finos	% Arenas	LL (%)	LP (%)	IP (%)	Wn (%)	C (kPa)	S (%)	Clasificación
Policlínico tipo II en Cauto Cristo	NP	67	37	39	19	20	10	75	36	CL
Capa 2	NP	93	7	76	25	51	21	105	85	CH
Parque Solar Fotovoltaico Mártires de Artemisa Capa 1	2-32	93	7	64	24	40	36	32	100	CH
Capa 2	NP	88	12	46	20	26	19,6	25	83	CL
Capa 3	NP	10	90	NP	NP	NP	15,6	0	72	CL
Viviendas de 2 y 3 niveles Reparto Nuevo	10-22	88	12	53	20	33	15	45	64	CH
Parque Solar Fotovoltaico en Cauto Cristo	12-23	83	17	59	18	40	14,7	71,6	64	CH

Solo 4 informes ingeniero-geológicos se pudieron utilizar que contenían las propiedades físico-mecánicas. Los demás pertenecían a controles de compactación y carecían de información necesaria para evaluar el fenómeno objeto de estudio.

De acuerdo al análisis de las condiciones ingeniero-geológicas del área de estudio se determinó que en la zona no existen suelos con condiciones favorables para que ocurra licuefacción ya que los valores de los indicadores se encuentran superiores a los establecidos para que ocurra este fenómeno.

En el área de estudio el suelo se encuentra representado de la siguiente forma (Figura 18):

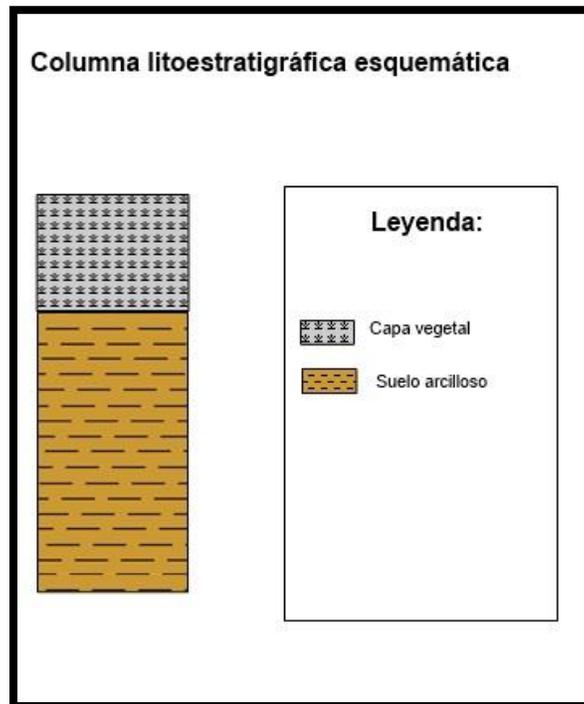


Figura 18: Columna litoestratigráfica esquemática municipio Cauto Cristo, Granma.

3.4.5 Conclusiones parciales para el municipio Cauto Cristo.

Cauto Cristo se caracteriza por presentar sedimentos del Cuaternario, estos suelos están representados por arcilla por lo general de alta plasticidad de color crema con diferentes tonalidades, poco húmeda, de consistencia dura, con manchas ocreas y de CaCO_3 , diseminadas cristales de yeso, potencialmente expansiva con intercalaciones de arena limosa de grano fino, color gris amarillento, de compacidad media. Estas litologías se encuentran enmarcadas en la formación Cauto. El nivel freático se encuentra entre 6 y 12 m de profundidad.

Según el mapa de zonificación sísmica propuesto para Cuba en la Norma Cubana para la construcción de obras sismorresistentes; este municipio se encuentra en la zona 3, de riesgo sísmico moderado.

Las áreas más propensas a licuar son aquellas que se encuentran fundamentalmente en la llanura de inundación de los ríos o cercanas a estas,

donde se encuentran los sedimentos más recientes, en suelos con alto grado de saturación y baja compactación, no se descarta que ante la ocurrencia de un terremoto que exceda los 5,5 grados ocurra el fenómeno en algunas áreas no identificadas en este estudio dada que los datos son escasos y puntuales.

Conclusiones

- ✓ Los suelos de los municipios Río Cauto y Cauto Cristo se encuentran enmarcados en la Cuenca Cauto en la formación: Cauto. La sismicidad del área es de baja a moderada y en la mayoría de los casos el nivel freático se cortó después de 3 metros, lo que hace que sea de moderada a baja la susceptibilidad para licuar.
- ✓ De acuerdo a la metodología aplicada los principales suelos identificados en el municipio Río Cauto son de composición arcillosa y arenosa, clasificados como arcilla de alta plasticidad (CH), arcilla de baja plasticidad (CL), arena arcillosa (SC) y arena limosa (SM) y en el municipio Cauto Cristo de composición arcillosa clasificados como arcilla de alta plasticidad (CH) y arcilla de baja plasticidad (CL). En ambos municipios el grado de compactación es alto, la concentración de partículas finas es alta y el límite líquido es superior a 35.
- ✓ Las áreas con condiciones para licuar son aquellas cercanas a la llanura de inundación del Río Cauto, donde se encuentran los sedimentos acumulados resultado de la erosión fluvial representada por la formación Cauto principalmente donde se encuentran las arenas.

Recomendaciones

- ✓ Realizar un estudio sobre licuefacción de suelo en el poblado Cauto Embarcadero ya que según los estudios realizados fue en esta zona donde se reportó licuefacción como resultado del sismo de Bayamo.
- ✓ Se recomienda realizar un estudio de Vulnerabilidad en las comunidades para tener conocimiento de las principales afectaciones que pudieran presentarse en caso de que ocurra el fenómeno, así como el nivel de percepción de la población.
- ✓ Aplicar normas constructivas en las zonas susceptibles a licuar como en los sectores donde no licuará, dado que puede verse afectada por la magnitud del sismo ante la calidad de las construcciones.

Bibliografía

ALVAREZ, L ; VILLALÓN, M ; LINDHOLM, C., 2015. Peligrosidad sísmica para Cuba.

ARANGO, E., 1996. Geodinámica de la región de Santiago de Cuba en el límite de las Placas de Norteamérica y el Caribe. *Tesis en opción al Grado de Master en Ciencias. Instituto Politécnico Nacional, Mexico, DF 111pp.*

BAUTA TORRES, 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.* Instituto Superior Minero Metalúrgico d Moa.

CETIN, K.O., SEED, R.B., DER KIUREGHIAN, A., TOKIMATSU, K., HARDER JR, L.F., KAYEN, R.E. y MOSS, R.E.S., 2004. Standard penetration test-based probabilistic and deterministic assessment of seismic soil liquefaction potential. *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, vol. 130, no. 12, pp. 1314-1340.

CHUY, R., 2010. Modelo del peligro sísmico de la provincia de Santiago de Cuba. *Archivos CENAIIS. Santiago de Cuba,*

CHUY, T.J., 1999. Macrosísmica de Cuba y su aplicación en los estimados de peligrosidad y microzonación sísmica. *Fondos de la Fundación «García Siñériz», España,*

CHUY, T.J. y ALVAREZ, J.L., 1995. Peligrosidad sísmica de Cuba con fines de la Norma Sismorresistente Cubana. *Reporte de Investigación. Fondos del CENAIIS y del X Forum Nacional de Ciencia y Técnica.*

COLECTIVO DE AUTORES, 2002. Sección de Sismología, Vulcanología y Exploración Geofísica, Geología. San Pedro, Costa Rica.

COLECTIVO DE AUTORES, 2012. Terremoto de Lorca. Lorca, Murcia, España. 2012.

COLECTIVO DE AUTORES, 2013. *Léxico Estratigráfico de Cuba.* La Habana.

- COTILLA-RODRÍGUEZ, M.O. y CÓRDOBA-BARBA, D., 2010. The Bayamo Earthquake (Cuba) of the 18 October 1551. *International journal of Geosciences*, vol. 1, no. 1, pp. 1.
- CUBADEBATE, 2017. Fuerte terremoto de magnitud 7.1 sacude la Ciudad de México, a 32 años del gran sismo de 1985. [en línea]. Disponible en: www.cubadebate.cu.
- ECURED, 2018a. *Cauto Cristo* [en línea]. Disponible en: www.ecured.cu.
- ECURED, 2018b. Municipio Río Cauto. [en línea]. Disponible en: <https://www.ecured.cu>.
- FERNÁNDEZ, B., 2000. *Posibilidad de ocurrencia del fenómeno de licuefacción en la cuenca de Santiago de Cuba catalizado por terremotos fuertes*. Tesis de maestría. Instituto Superior Minero Metalúrgico. Moa.
- FERNÁNDEZ DIÉGUEZ, L., 2015. *Licuefacción de los suelos generada por sismos de gran magnitud: Caso de estudio Caimanera y Santiago de Cuba*. Tesis presentada en opción al título académico de Máster en Geología.
- GALVÁN, L., 2014. *Procedimiento para la gestión y reducción de riesgos geológicos en la provincia Santiago de Cuba*. Tesis doctoral. Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa.
- GARCÍA, J., ARANGO, E., ZAPATA, J., OLIVA, R., GONZÁLEZ, B.E., FERNÁNDEZ, B., CHUY, T. y MONNAR, C.R.Y.O., 2002. Mapa de Riesgo Sísmico de la ciudad de Santiago de Cuba. *Fondos del Centro Nacional de Investigaciones Sismológicas*,
- GONZÁLEZ DE VALLEJO, L.I., 2002. Ingeniería geológica. ,
- GONZÁLEZ FUENTEALVA, J.P., 2015. *Estudio del fenómeno de licuefacción en Chile para el terremoto del Maule, 2010*. Universidad de Chile.
- GUERRA, SANTIESTEBAN, D, R., 2011. *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*. Departamento de

Geología.

GUTIÉRREZ SÁNCHEZ, A., 2017. *Evaluación de riesgo por licuefacción en los municipios de Guamá, III Frente y Contramaestre de la provincia de Santiago de Cuba*. Departamento de Geología.

HERNÁNDEZ SUROS, E Y SAM PASCUAL, J., 2016. Estudios de peligro ,vulnerabilidad y riesgo sísmico para elevar la resiliencia .Provincias Granma y Santiago de Cuba. ,

HERRERA DELFIN, I., 2015. *Delimitación de escenarios susceptibles a la licuefacción inducido por terremotos de gran magnitud en el consejo popular Guillermón Moncada del municipio Santiago de Cuba*. Departamento de Geología.

ISHIHARA, K., 1990. Evaluation of liquefaction potential and consequent deformations in sand fills proceedings of the workshop on seismic issues Port of Los Angeles, ca.

IWASAKI, T.A., 1978. Practical method for assessing soil liquefaction potential based on case studies at various sites in Japan.

IWASAKI, T.A., 1986. Soil liquefaction studies in Japan: state-of-the-art. Soil Dynamics and Earthquake Engineering.

LAVIÑO FLEITA, D., 2017. *Identificación de escenarios susceptibles a la licuefacción inducido por terremotos de gran magnitud en el municipio Santiago de Cuba*. Departamento de Geología.

LIAO, S.S.C. y WHITMAN, R. V, 1986. Overburden correction factors for SPT in sand. *Journal of geotechnical engineering*, vol. 112, no. 3, pp. 373-377.

NC 46, 2017. Construcciones sismorresistentes-requisitos básicos para el diseño y construcción. , no. 261, pp. 830-835.

OBANDO, T., 2009. *Modelación geomecánica y temporal de la licuefacción en suelos de minas no metálicas. Estudio Caso: Ciudad de Managua (Nicaragua)*. Tesis Doctoral. Editorial Universidad Internacional de Andalucía.

- ORDAZ-HERNÁNDEZ, A., ESTÉVEZ-CRUZ, E., HERNÁNDEZ-SANTANA, J.R. y CHUY-RODRIGUEZ, T.J., 2014. Modelación de parámetros geotécnicos como contribución a la zonación sísmica local: ciudad de San Cristóbal, Cuba. *Minería y Geología*, vol. 30, no. 1, pp. 1-16.
- ORDAZ-HERNÁNDEZ, A., HERNÁNDEZ-SANTANA, J.R., CHUY-RODRÍGUEZ, T.J. y GARCÍA-GUTIÉRREZ, J.A., 2013. La susceptibilidad a la licuefacción en el emplazamiento de la ciudad de San Cristóbal, Cuba Occidental. *Minería y Geología*, vol. 29, no. 2, pp. 1-15.
- PARELLADA REYES, O., 2016. *Delimitación de escenarios susceptibles a la licuefacción inducido por terremotos de gran magnitud en la zona sur de la Provincia Guantánamo*. Instituto Superior Minero Metalurgico de Moa.
- PEÑA LEYVA, R., 2018. *Susceptibilidad a la ocurrencia de licuefacción de los suelos en la ciudad de Bayamo inducido por fuertes terremotos*. Departamento de Geología.
- PERUCCA, L. A.P. y C.N., 2006. Fenómenos de licuefacción asociados a terremotos históricos. Su análisis en la evaluación del peligro sísmico en la Argentina. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*,
- REDACCIÓN EC, 2018. Así la licuefacción rompió la tierra en miles de pedazos en Indonesia. *El Comercio* [en línea]. Disponible en: <https://elcomercio.pe>.
- RIVERA, Z., 2001. *Riesgo sísmico para el planeamiento urbano en la ciudad de Bayamo*. Instituto Superior Minero Metalúrgico, Moa.
- ROBERTSON, P.K. y CAMPANELLA, R.G., 1985. Liquefaction potential of sands using the CPT. *Journal of Geotechnical Engineering*, vol. 111, no. 3, pp. 384-403.
- RODRÍGUEZ, L.M., AUDEMARD, F.A. y RODRÍGUEZ, J.A., 2006. Casos históricos de licuación de sedimentos inducidos por sismos en Venezuela desde 1530. *Revista de la Facultad de Ingeniería Universidad Central de Venezuela*, vol. 21, no. 3, pp. 5-33.

RODRÍGUEZ PASCUA, M., 1997. Paleosismicidad en emplazamientos nucleares. *Estudio en relación con el cálculo de peligrosidad sísmica. Colección Otros Documentos, Consejo de Seguridad Nuclear. Madrid.*

ROSABAL, S.Y., 2011. *Zonación preliminar de licuación de los suelos en la región Cuba Oriental.* 2011.

SEED, 1966. Estudios de licuación sísmica.

SEED, H.B., 1983. Evaluation of the dynamic characteristics of sands by in-situ testing techniques. *Revue française de géotechnique.* ,

SEED, H.B. y DE ALBA, P., 1986. Use of SPT and CPT tests for evaluating the liquefaction resistance of sands. *Use of in situ tests in geotechnical engineering.* S.l.: s.n., pp. 281-302.

SEED, R., 2003. Recent advances in soil liquefaction engineering: a unified and consistent framework. ,

SEED & IDRIS, I., 1982. Ground motions and soil liquefaction during earthquakes engineering monographs on earthquake criteria, structural design, and strong motion records. MNO-5. Earthquake Engineering Research Institute. *Earthquake engineering research insititue,*

SHIBAYAMA, T., ESTEBAN, M., NISTOR, I., TAKAGI, H., NGUYEN, T., MATSUMARU, R., MIKAMI, T., OHIRA, K. y OHTANI, A., 2012. Implicaciones del tsunami de Tohoku del año 2011 para la gestión de desastres naturales en Japón. *Obras y proyectos* [en línea], no. 11, pp. 4-17. Disponible en: <https://scielo.conicyt.cl>.

TOKIMATSU, K.;YOSHIMI, Y., 1983. Empirical correlation of soil liquefaction based on SPT N-value and fines content. ,

TORRES TURCÁS Y, 2018. *Identificación de los escenarios susceptibles a la licuefacción en la ciudad de Manzanillo provincia Granma.* S.l.: Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa.

TUTALENI KAMBWA, M.A., 2013. *Evolución tectono-estratigráfica de la Cuenca*

Cauto, según modelo de sistema de cuenca de antepaís.

VÁZQUEZ GÓMEZ, 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.* Departamento de Geología.

VICEDIRECCIÓN TÉCNICA, C., 2018. Sismicidad registrada en el territorio nacional en el año 2017y estado de la red de estaciones del servicio sismológico nacional.

VILLALÓN POULUT, L., 2018. *Escenarios susceptibles a la licuefacción inducida por terremotos de gran magnitud en la zona urbana del municipio Guantánamo.* S.I.: Departamento de Geología.

WANG, W., 1979. Some findings in soil liquefaction. Earthquake Engineering Department, Water Conservancy and Hydroelectric Power Scientific Research Institute.

Anexos

Anexo 1. Clasificación de los suelos según el Sistema Unificado de Clasificación de los Suelos (SUCS).

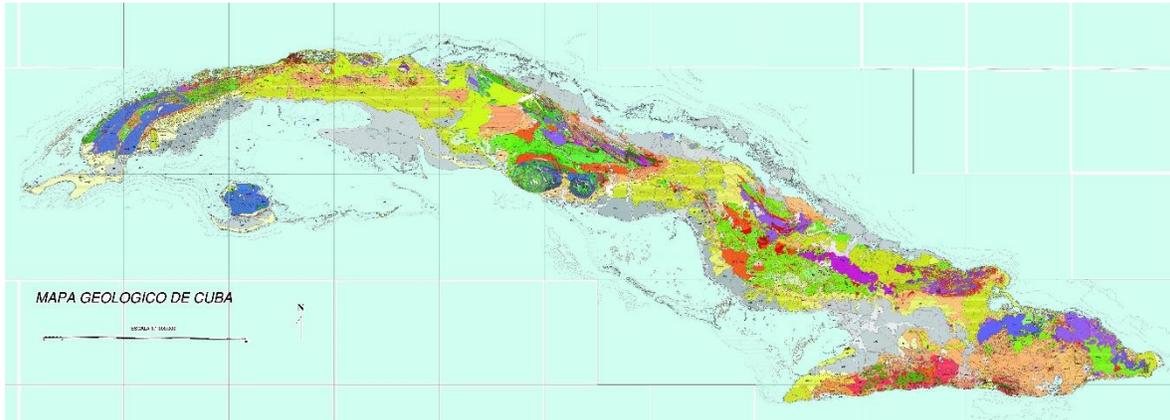
Divisiones mayores			Simbolo del grupo	Nombre del grupo
Suelos granulares gruesos más del 50% retenido en el tamiz nº200 (0.075 mm)	Grava > 50% de la fracción gruesa retenida en el tamiz nº4 (4.75 mm)	grava limpia menos del 5% pasa el tamiz nº200	GVV	grava bien graduada, grava fina a gruesa
			GP	grava 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	SVV	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
	limo y arcilla límite líquido ≥ 50	orgánico	OL	Limo orgánico, arcilla orgánica
		Inorgánico	MH	limo de alta plasticidad, limo elástico
			CH	Arcilla de alta plasticidad
		orgánico	OH	Arcilla orgánica, Limo orgánico
Suelos altamente orgánicos			Pt	turba

Anexo 2. Sistema unificado de clasificación de suelos empleado en Cuba. (NC 59:2000)

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
			$Cu < 4$ y $1 > Cc > 3$	Plástico	GP-GC	Grava mal graduada con arcilla
		> 12 %	-	No plástico	GM	Grava limosa
			-	Plástico	GC	Grava arcillosa
	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
			$Cu < 6$ y $1 > Cc > 3$	Plástico	SP-SC	Arena mal graduada con arcilla
> 12 %		-	No plástico	SM	Arena limosa	
		-	Plástico	SC	Arena arcillosa	

Anexo 3. Mapa geológico de la República de Cuba, escala 1:100 000 (I.G.P).



Anexo 4. Variación de los indicadores analizado en la capa 1, municipio Río Cauto.

Capa 1						
Suelo	N de SPT	% Finos	LL(%)	IP(%)	Wn(%)	S(%)
CH	18,95	91,2	73,5	43,87	36,67	91,29
CL	11,14	81,5	45,5	22,5	24	89,5

Anexo 5. Variación de los indicadores analizado en la capa 2, municipio Río Cauto.

Capa 2						
Suelo	N de SPT	% Finos	LL (%)	IP (%)	Wn (%)	S(%)
SM	2-4	42	NP	NP	20,5	69
CL	2-4	80	35	15	33,5	95
SC	11-31	49	37	17	14,6	66

Anexo 6. Variación de los indicadores analizado en la capa 1, municipio Cauto Cristo.

Capa 1						
Suelo	N de SPT	% Finos	LL(%)	IP(%)	Wn(%)	S(%)
CH	13,25	88	58,67	37,67	21,9	76
CL	NP	67	39	20	10	36