



Instituto Superior Minero

Metalúrgico de Moa

Dr. Antonio Núñez

Jiménez



Departamento de Ingeniería
Geológica

Trabajo de Diploma

En opción al título de Ingeniero Geólogo

Título: Delimitación de escenarios susceptibles a la licuefacción inducidos por terremotos de gran magnitud en el asentamiento poblacional del municipio Pílon de la provincia Granma.

TUTORA: MsC. Liuska Fernández Diéguez

MsC. Yexenia Viltres Milán

Moa, 2018



Trabajo de Diploma

Yo: Lilisbet Vázquez Gómez, autora de este trabajo de diploma con título: "Delimitación de escenarios susceptibles a la licuefacción inducidos por terremotos de gran magnitud en el municipio Pílon de la provincia Granma." y las tutoras MsC. Liuska Fernández Diéguez y MsC. Yexenia Viltres Milán.

Certificamos su propiedad intelectual a favor del Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa, Dr. Antonio Núñez Jiménez, el cual podrá hacer uso del mismo con fines educativos.

Firma del Diplomante

Firma del Tutor.



Dedicatoria:

- ❖ *A mi mamá Marlenis Gómez Estévez.*
- ❖ *A mi esposo Aniubal Velázquez Almaguer.*
- ❖ *A mi tutora Liuska Fernández Diéguez.*
- ❖ *A mi hermana Lisandra Reyes Gómez.*
- ❖ *A mi hermano Miguel Reyes Almaguer.*
- ❖ *A mis familiares y amigos.*
- ❖ *A todas las personas que influyeron directa e indirectamente en la realización de esta investigación.*



Agradecimientos

- *A mi mamá, por su apoyo, amor y entrega que me ha brindado siempre, para alcanzar mis metas y ser la persona que soy hoy.*
- *A mi hermana por ayudarme en todo lo que he necesitado.*
- *A mi esposo por brindarme su amor, contención y estar presente en cada paso que doy y por apoyarme en cada decisión.*
- *A toda mi familia, que siempre se ha mantenido a mi lado.*
- *A mi tutora por su paciencia y entrega para la realización de este trabajo.*
- *A mis amigas por apoyarme y ayudarme cuando las he necesitado.*
- *Al claustro de profesores por influir positivamente en mi formación.*



Pensamiento:

"No se puede enseñar, no se puede preparar la mente, ni dotarla de conocimientos teóricos sino se enseña otra cosa muy importante, sino se enseña a trabajar"

Fidel Castro.





RESUMEN

La necesidad de delimitar los escenarios susceptibles a la licuefacción en el asentamiento poblacional del municipio Pílon de la provincia Granma a partir de un estudio profundo de la respuesta de los suelos en caso de terremotos de gran magnitud, provocó la realización de la investigación, ya que esta provincia está sometida a un alto nivel de peligrosidad sísmica por su cercanía a la zona sismo génica de Bartlett-Caimán. La presente investigación se realizó con el objetivo de evaluar 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. Se 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, para ello se revisaron informes de la Empresa Nacional de Investigaciones aplicadas (ENIA) sede Holguín. Como resultado se identificaron los estratos con un suelo de tipo CL (arcilla de baja plasticidad), GC (grava o arena mal graduada) las cuales predominan en la formación Pílon y en los depósitos innominados del Cuaternario. Se concluye que los suelos donde se ubica la zona urbana del municipio no resultaron susceptibles a la licuefacción.



ABSTRACT

The need to delimit the scenarios susceptible to liquefaction in the Pilon municipality of Granma province based on an in-depth study of the response of soils in the event of large-scale earthquakes, allowed the realization of the investigation, since this province is subjected to a high level of seismic hazard due to its proximity to the Bartlett-Cayman gene quake zone. It was carried out with the objective of evaluating the geological engineer conditions that favor the occurrence of the liquefaction of soils and delimit susceptible scenarios. A set of methods was used to solve the need for research, such as the validation of the results according to the analysis of the indicators system proposed by Fernandez-Diequez, 2015 and the calculation of the corrected safety factor from the obtaining of variables corresponding to the physical-mechanical properties, for this purpose, reports from the National Applied Research Company (ENIA), Holguin Headquarters, were reviewed. As a result, the strata were identified with a CL type soil (low plasticity clay), GC (Gravel or poorly graded sand), which predominate in the Pilon formation and in the innominate deposits of the Quaternary. It is concluded that the soils where the urban area of the municipality is located were not susceptible to liquefaction.



TABLA DE CONTENIDO

Resumen	vi
Abstract	vii
Introducción.....	1
MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE	3
Principales categorías en las que se subdivide la licuefacción.....	4
Factores que influyen en la licuefacción	5
Factores que condicionan la ocurrencia de licuefacción.....	5
Causas que originan el fenómeno de licuación	6
Condición de un suelo para que sea licuable	8
Metodologías para el estudio de la licuefacción de los suelos.....	8
Métodos utilizados para evaluar la susceptibilidad a la licuefacción, (tomado de Lavañino- Fleita, 2017).....	10
Para evaluar el potencial de licuefacción de los suelos los métodos existentes pueden dividirse en tres grupos:.....	10
Evidencias históricas del fenómeno de licuefacción de suelos.....	11
Reportes históricos de terremotos fuertes y evidencias de licuefacción de los suelos en Cuba.....	14
Investigaciones realizadas en Cuba	16
CAPITULO I. CARACTERÍSTICAS FÍSICO-GEOGRÁFICAS Y GEOLÓGICAS DE LA REGIÓN DE ESTUDIO.....	27
Introducción	27
Características generales del municipio Pilon	27
1.1 Ubicación Geográfica.....	27
1.2 Relieve.....	28



1.3 Clima.....	29
1.4 Hidrografía.....	29
1.5 Vegetación.....	29
1.6 Geomorfología.....	30
1.7 Sismicidad.....	30
1.8 Geología Regional.....	31
1.9 Principales formaciones presentes en la región.....	32
CAPITULO II: METODOLOGÍA PARA ESTUDIAR EL POTENCIAL DE LICUEFACCIÓN.....	37
Introducción.....	37
2.1 Metodología de la investigación.....	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-Díéguez, (2015).....	39
CAPITULO III: EVALUACION DEL SISTEMA DE INDICADORES PARA DETERMINAR EL POTENCIAL DE LICUEFACCIÓN EN EL ÁREA DE ESTUDIO.....	47
Introducción.....	47
3.1 Criterios para la selección de escenarios susceptibles a la licuefacción.	47
3.2 Validación del sistema de indicadores propuestos en el municipio Pílon. ...	48
3.2.1 Análisis de las condiciones geológicas del área de estudio.....	48
3.2.2 Sismicidad.....	51
3.2.3 Características hidrográficas.....	52
3.2.4 Condiciones ingeniero-geológicas.....	52
Conclusiones parciales para el municipio Pílon.....	57



Trabajo de Diploma

Análisis global de los resultados	58
CONCLUSIONES.....	60
RECOMENDACIONES	61
BIBLIOGRAFÍA	62
ANEXOS	66



INTRODUCCIÓN

La licuefacción es un fenómeno que ocurre durante los terremotos cuando suelos saturados de agua y no cohesivos son sometidos a vibraciones, debido a la onda sísmica, provocando la pérdida de cohesión de estos y su subsecuente comportamiento como un fluido. Las deformaciones producto de la licuefacción del suelo son capaces de generar graves daños a los edificios y obras de infraestructura en general. Debido a este fenómeno, en ocasiones también ocurre agrietamiento, desplazamiento, hundimiento o levantamiento del terreno, además expulsión de agua y sedimentos a través de grietas y orificios. Esta situación se da en suelos arenosos y/o limosos que tengan un nivel freático cercano a la superficie.

Nuestro país no está exento de sufrir este fenómeno, ya que las experiencias derivadas de las catástrofes de Santiago de Cuba en 1932 y Granma en 1951 nos convocan a no dejar de prestar atención a la sismicidad como una premisa de desastres. Tras el sismo del 18 de octubre de 1551, este se conoce como el terremoto de Bayamo ya que fue la villa más importante donde se reportaron las afectaciones, varias personas fueron heridas, así como 16 casas colapsadas. El daño se extendió hacia asentamientos costeros como Niquero, Manzanillo y Cabo Cruz, como también hacia las zonas montañosas donde ocurrieron grandes caídas de rocas.

La región de Pílon- Chivirico se encuentra dentro de la zona de mayor actividad sísmica del país. Durante el 2017 en la región oriental hasta el 15 de mayo la mayor sismicidad estuvo relacionada a la región 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.

Por lo que la siguiente investigación está encaminada al estudio de la licuefacción de los suelos en la provincia de Granma, específicamente en el municipio de Pílon dado que con el transcurso de los años ha aumentado significativamente la densidad poblacional y ante un sismo fuerte puede causar mayores daños.



Problema de la investigación: Necesidad de evaluar las condiciones ingeniero-geológicas en el asentamiento poblacional del municipio Pílon de la provincia Granma para determinar si existen escenarios susceptibles a la licuefacción inducidos por sismos de gran magnitud.

Objeto de estudio: Los suelos de los principales asentamientos poblacionales en el municipio Pílon de la provincia Granma.

Objetivo general: Evaluar 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.

Objetivos específicos:

1. Identificar las propiedades físicas mecánicas del suelo del asentamiento poblacional del municipio Pílon para analizar si existe licuefacción inducidos por sismos de gran magnitud.
2. Aplicar el sistema de indicadores propuesto por Fernández Diéguez en 2015 a partir de las variables obtenidas de las propiedades físico mecánicas de los suelos para la determinación del potencial de licuefacción en el asentamiento poblacional del municipio Pílon de la provincia Granma.
3. Definir la susceptibilidad a la licuefacción del asentamiento poblacional del municipio Pílon de la provincia de Granma a partir de las condiciones geológicas para licuar o no.

Hipótesis:

Si se caracterizan los suelos del asentamiento poblacional del municipio Pílon de la provincia de Granma, a partir de las condiciones ingeniero-geológicas entonces será posible determinar el potencial de licuefacción ante un sismo de gran magnitud y delimitar los escenarios susceptibles.

Novedad de la investigación:



La caracterización ingeniero geológica y evaluación cuantitativa de los escenarios susceptibles a la licuefacción de los suelos en los principales asentamientos poblacionales en el municipio Pílon de la provincia Granma.

MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE

El fenómeno de licuación en arenas ocurre cuando las cargas cíclicas de movimiento sísmico causan un incremento en la presión de agua en los vacíos del suelo, reduciendo los esfuerzos efectivos y haciendo que el suelo pierda casi toda su resistencia al corte, volviéndose su consistencia parecida a la de un fluido dando lugar a movimientos verticales y horizontales de su masa que se traducen en deslizamientos o en grandes asientos (Vallejo 2002). La licuefacción de suelo describe el comportamiento de suelos que, estando sujetos a la acción de una fuerza externa (carga), en ciertas circunstancias pasan de un estado sólido a un estado líquido, o adquieren la consistencia de un líquido pesado. Es un tipo de corrimiento, provocado por la inestabilidad de un talud. Es uno de los fenómenos más dramáticos y destructivos y, además, más polémicos y peor explicados que pueden ser inducidos en depósitos por acciones sísmicas.

Conceptos de Licuefacción

- Según Rodríguez Pascua en 1997 (tomado de Parellada – Reyes, 2016) el suelo completamente saturado, con arenas sin cohesión, generalmente limpias, que pueden incluir algo de gravas puede ser licuefactado durante la sacudida sísmica.
- Vallejo en 2002, define como suelos licuables, aquellos suelos con contenido areno- limoso, en estado saturado, al experimentar esfuerzos cortantes anómalos y rápidos, permiten un aumento de las presiones intersticiales (por falta de drenaje), en que la resistencia al corte desaparece y el material se comporta como líquido, dando lugar a movimientos verticales y horizontales de su masa, que se traducen en deslizamientos, o en grandes asientos.



- Colectivo de Autores en 2003. San Pedro, Costa Rica expresa que 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.
- Rodríguez, Audemard, & Rodríguez en 2012. 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 en 2012 (tomado de Parellada – Reyes, 2016).

Principales categorías en las que se subdivide la licuefacción

Flujo por Licuación: El flujo por licuación es un fenómeno en el cual el equilibrio estático es destruido por cargas estáticas o dinámicas en un depósito de suelo con baja resistencia residual. La resistencia residual es aquella que posee el suelo después de haber licuado. Cargas estáticas, por ejemplo, pueden ser aplicadas por las edificaciones sobre una ladera en pendiente que ejerce fuerzas adicionales en el suelo por debajo de la cimentación. Los terremotos, voladuras, y el hincado de pilotes son ejemplos de cargas dinámicas que pueden producir flujo por licuación. Las fallas debido al flujo por licuación se caracterizan comúnmente por grandes y rápidos movimientos que producen efectos desastrosos después de ocurrido un terremoto.



Movilidad Cíclica: La Movilidad Cíclica es un fenómeno de licuación provocado por una carga cíclica, ocurre en depósitos de suelo con esfuerzos de corte estáticos menores que la resistencia del suelo. Las deformaciones debido a la movilidad cíclica se incrementan porque los esfuerzos estáticos y dinámicos subsisten durante un terremoto. El desplazamiento lateral, es un resultado común de la movilidad cíclica, puede ocurrir sobre terrenos suavemente inclinados y en terrenos llanos cercados por ríos y lagunas. Parellada – Reyes (2016)

Factores que influyen en la licuefacción

Los estudios realizados sobre la licuefacción llevaron a determinar las siguientes condiciones:

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

Factores que condicionan la ocurrencia de licuefacción

- **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.
- **Profundidad de las aguas subterráneas:** Mientras menor sea el nivel de las aguas subterráneas, mayor será la probabilidad de que ocurra licuefacción.
- **Densidad:** El suelo puede densificarse cuando está sujeto a una carga cíclica, reduciendo su volumen de suelo- agua e incrementando la presión intersticial si los poros intergranulares se llenan de agua. Cuando esto ocurre habrá menor posibilidad de que se produzca su licuefacción.
- **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.

- **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.
- **Edad del depósito:** Los suelos jóvenes (menores 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.
- **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. Alfaro (2013).

Causas que originan el fenómeno de licuación

➤ **Magnitud del Movimiento Sísmico**

La magnitud del movimiento está relacionada con la magnitud de los esfuerzos y deformaciones inducidos en el terreno por este movimiento. Dependiendo de la distancia hipocentral, la magnitud del movimiento producirá cierto valor de aceleración máxima en la roca basal, la cual sufrirá amplificación, dependiendo de las condiciones locales del suelo, hasta llegar a la superficie, de esta manera la propagación de las ondas de corte durante un terremoto a través del esqueleto del suelo, producirá una complicada distribución de esfuerzos de corte en función del tiempo, causando así deformaciones en la masa de suelo cuya magnitud dependerá de la magnitud del terremoto.

➤ **Duración del Movimiento Sísmico**

Normalmente la duración de un movimiento sísmico es corta (entre 5 a 40 segundos), pero si este es intenso, predominará la condición no drenada, es decir



la disipación de la presión de poros se verá restringida, y por el contrario se evidenciará el aumento de la misma, produciendo en algún momento condiciones de esfuerzo efectivo nulo, y, por lo tanto, licuación.

➤ **Granulometría del suelo**

Los suelos más susceptibles a sufrir licuación son aquellos que poseen una granulometría uniforme, siendo las arenas finas uniformes las que son más propensas a licuar que las arenas gruesas uniformes. Además, según algunos autores las arenas limosas poseen mayor resistencia a sufrir licuación con respecto a las arenas limpias o con escaso contenido de finos. El problema de licuación será más serio si el suelo tiene un coeficiente de uniformidad mayor o igual a 2.

➤ **Densidad Relativa**

Durante la ocurrencia de un terremoto, una arena suelta puede sufrir licuación mientras que este mismo suelo en un estado más compacto puede no evidenciar el fenómeno. Una arena con un valor de resistencia a la penetración estándar de 40 golpes/30cm (densidad relativa de 70 a 80 %) puede mostrar evidencias de licuación en la forma de volcanes de arena, pero no es probable que experimente más del 10 % de deformación por corte bajo la influencia de la vibración sísmica, aún después de que se hayan desarrollado altas presiones de poros. En contraste con ello, arenas con valor de 20 golpes/pie (densidad relativa de 30 a 60 %), pueden desarrollar relaciones de presiones de poro de 100 % y experimentar deformaciones por corte muy grandes del orden del 25-30 %, bajo la acción de los esfuerzos de corte aplicados Seed et al., en 1984 (tomado de Bauta – Torres, 2017).

➤ **Profundidad del Nivel Freático**

Es una condición necesaria para que ocurra licuación. La presión de poros, producida por el agua que ocupa los vacíos existentes entre las partículas del material debido a la posición del nivel freático, se incrementa por efecto de la vibración producida en el movimiento sísmico. Por consiguiente, la ubicación del nivel freático cuando se produzca un terremoto en un depósito arenoso, será de



mucha importancia porque regirá la condición de saturación y, por lo tanto, influirá también en el esfuerzo efectivo.

Condición de un suelo para que sea licuable

Wang en 1979, propone ciertas condiciones granulométricas que deben cumplir los suelos, particularmente los de granos finos para que ocurra la licuefacción. Estas son:

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

Seed and Idriss (1982) consideran que un suelo puede licuar si:

- El porcentaje en peso de partículas <0,005 mm es menor del 15 %
- Límite Líquido (LL)< 35 %
- Humedad natural/ Límite líquido W/LL>0,9

Metodologías para el estudio de la licuefacción de los suelos

Para la evaluación del riesgo de licuefacción de suelos, numerosos investigadores se han apoyado en los resultados de distintos ensayos de suelos para elaborar una metodología que facilite su estudio. Las más utilizadas inicialmente fue el criterio chino modificado de (Wang, 1979) y el método de (Seed & Idriss, 1982), y más recientemente (Youd et al. 2001), que recopila la información de las reuniones de NCEER ocurridas en 1996 y 1998. 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 vio la necesidad de desarrollar nuevos criterios con especial énfasis en la influencia del contenido de finos en el suelo.

Un grupo de investigadores de la Universidad de California en Berkeley y (Raymond y Seed, 2003) 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 et al.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. Alarcón en 1989 (tomado de Parellada – Reyes, 2016) 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). (Seed et al, 1983) y (Seed & De Alba 1986) en Estados Unidos han presentado el método simplificado, en base a ensayos de penetración estándar y el cono holandés. En Japón, (Tokimatsu & Yoshimi, 1981, 1983); (Iwasaki et al, 1978) e (Iwasaki, 1986) han presentado 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 & Campanella, 1985). La corrección de sobrecarga se realizó de acuerdo a (Liao & Whitman, 1986)

Los métodos han llegado a ser en la actualidad 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).



Métodos utilizados para evaluar la susceptibilidad a la licuefacción, **(tomado de Lavañino- Fleita, 2017)**

Para evaluar el potencial de licuefacción de los suelos los métodos existentes pueden dividirse en tres grupos:

- A. 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.
- B. 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.
- C. 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.

Los métodos del tipo A se basan en el hecho de que la resistencia a la licuefacción y ciertas propiedades determinadas mediante ensayos “in situ” (resistencia a la penetración y la velocidad de propagación de ondas de corte), varían de la misma forma en función de las características principales de los suelos. Sin embargo, a 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.

A su vez, los métodos B y C 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.

Evidencias históricas del fenómeno de licuefacción de suelos.

- **Argentina, 1894:** El 27 de octubre de 1894 se produjo un sismo con epicentro en el noroeste de la provincia de San Juan, considerado por sus efectos a grandes distancias del foco, como el de mayor magnitud ocurrido en territorio argentino. Bodebender,(1894) denomina este sismo “*Terremoto Argentino*” y le asigna una magnitud 8.2, ubicando su epicentro al noroeste de San Juan y La Rioja. Una de sus particularidades fue la gran alteración del terreno aún en áreas muy alejadas al epicentro, a más de 200 km de distancia. Se produjeron deslizamientos y fenómenos de licuefacción, agrietamiento del terreno, volcanes de arena y salida de agua en forma de chorros en los terrenos saturados de agua y sin cohesión. Los daños causados por la licuefacción incluyen fallas debajo de edificaciones, caminos, líneas férreas, canales de riego, campos, tanques y viviendas. Los depósitos holocénicos de llanura aluvial y playa han sido prácticamente los únicos tipos de depósitos afectados por este fenómeno.
- **Niigata (Japón)** en el año 1955, edificaciones físicas y obras viales (puentes) son abatidas por terremoto intenso y dilatado, inhabilitando la estabilidad en sus cimientos a causa de la insuficiencia de resistencia física del suelo, cuya caída se dio paulatinamente en varias horas
- **Zona de la Costa Sur de Alaska**, en el año 1964, un gran terremoto de magnitud 9. 2º Richter con duración de 3 minutos golpeó Prince William Soundo siendo afectado por la licuefacción del suelo \pm 500,000 kilómetros cuadrados de superficie.
- **Niigata (Japón)** en el año 1964 tuvo lugar un terremoto de magnitud 7.5 en la escala de Richter, ocasionando daños físicos en puente Showa debido a la expansión lateral del suelo, hubo daños muy graves causados por licuefacción en arenas. Muchas estructuras se asentaron más de un metro y



se inclinaron notablemente; en el terremoto un edificio giró 80 grados, quedando prácticamente tendido en el suelo (Fig.1).



Figura.1 Efectos del fenómeno de Licuefacción de los suelos en Niigata, Japón, 1964. (<http://www.planetacurioso.com/2008/12/16/sabias-que-existen-terremotos-donde-el-suelo-se-comporta-como-liquido/>, 2008)

- **El terremoto del 3 de marzo de 1985 en Chile**, el cual afectó la zona con mayor densidad de población, donde se encuentran los dos puertos más importantes del país, Valparaíso y San Antonio, y grandes estructuras de suelos o rellenos en forma de muelles, espigones y sitios de atraque. Los fuertes terremotos ocurridos en California, como Loma Prieta (1989) y Northridge (1994), además de otros como Kobe (1995), Turquía (1999) y Taiwán (1999) han proporcionado pruebas adicionales de los efectos dañinos de la licuefacción.
- **Mayomba, 4 de abril de 1991** un terremoto de magnitud 6.5 grados Richter e intensidad VII causó la inestabilidad y erosión de los suelos en los taludes asentamientos diferenciales y amplificación de suelos y deslizamientos.
- **Terremoto del 8 de octubre de 2005 Cachemira**, región fronteriza entre Pakistán y la India, informa de 86.000 muertos y 40.000 heridos en un movimiento telúrico de magnitud 7,6. En el lado indio se producen un millar de víctimas mortales.



- **Terremoto del 27 de mayo de 2006 en la isla de Java**, Indonesia, un seísmo de magnitud 6,2 en la escala de Richter deja 6.234 muertos, 20.000 heridos y 340.000 desplazados.
- **Terremoto del 15 de agosto de 2007 Perú**, un movimiento telúrico de magnitud 8 arrasa la costa de Perú y provoca 513 muertos y 1.090 heridos
- **El 12 de enero de 2010 en Haití**, un terremoto de magnitud 7.0 en la escala de Richter, con epicentro a unos 15 kilómetros al suroeste del centro de Puerto Príncipe y con hipocentro a unos 10 kilómetros de profundidad, sacudió la capital de Haití, destruyendo una parte importante de las zonas sur y suroeste de la capital haitiana, incluyendo a Leogane y Jacmel, y provocando cerca de 250,000 muertos, unos 300,000 heridos, 250,000 viviendas destruidas, 30,000 comercios colapsados y más de un millón de damnificados, siendo esta la mayor sacudida sísmica desde el año 1770. El terremoto de Puerto Príncipe, localizado en el extremo suroeste fue devastador. La razón fundamental es que la ciudad de Puerto Príncipe ha sido levantada sobre los suelos arcillosos flexibles, de muy mala calidad y bajas velocidades de ondas de corte, depositados en la llanura occidental remanente del antiguo canal marino de Enriquillo, y sobre sedimentos margosos y gravas gruesas y sueltas del pie de monte existente en la franja sur de la ciudad capital, lo que provocó un incremento extraordinario de la aceleración del suelo, haciendo que casi todas las columnas fallaran por esfuerzos cortantes y que las edificaciones se desplomaran verticalmente matando a cientos de miles de haitianos.
- **Terremoto 27 de febrero de 2010 Chile** El terremoto del 27 de febrero de 2010 tuvo una magnitud Mw 8,8, con un epicentro ubicado a 8 kilómetros al poniente de Curanipe, en la provincia de Cauquenes, VII Región del Maule. Este sismo es el quinto más intenso de la historia desde que existen registros y produjo pérdidas que, a la fecha, el Gobierno estima en cerca de US\$ 30.000 millones, equivalentes al 17% del Producto Interno Bruto (PIB). La licuefacción es un fenómeno que ocurre durante los terremotos cuando



suelos saturados de agua y no cohesivos son sometidos a vibraciones, debido a la onda sísmica, provocando la pérdida de cohesión de estos y su subsecuente comportamiento como un fluido (Figura. 2).



Figura. 2. Grietas, provocadas por licuefacción del terreno.

- **Terremoto de Costa Rica de 2012** llamado también Gran terremoto de la Península de Nicoya de 2012 fue un terremoto de 7,6 grados en la escala sismológica de magnitud de momento^[2] que afectó al país centroamericano el 5 de septiembre de 2012. El sismo se originó a las 08:42 hora local (UTC-6) y su epicentro se localizó a 8 kilómetros de Sámara en la provincia de Guanacaste

Reportes históricos de terremotos fuertes y evidencias de licuefacción de los suelos en Cuba.

Más del 60 % de los sismos perceptibles y fuertes reportados en el país han tenido su epicentro en Santiago de Cuba Chuy et al, en 2002 (tomado de Herrera - Delfín, 2015), siendo sacudida por más de 1000 sismos perceptibles desde el año 1528 hasta la fecha, Chuy (2010).

Terremoto del 18 de octubre de 1551 ubicado en Bayamo, los reportes históricos argumentan la ocurrencia de la licuefacción basados en datos de archivo general de Indias, declaran su aparición en la localidad de Cauto Embarcadero, en las



cercanías del río Cauto, identificado como el río de mayor extensión de Cuba, ubicado en la provincia Granma y su desembocadura la realiza en el Golfo del Guacanayabo. Los reportes históricos deben ser considerados como un área potencial de licuefacción para futuros terremotos, Cotilla & Córdoba en 2010 (tomado de Reinoso-Mercantety, 2016)

Terremoto en San Cristóbal en Artemisa 1880, el 23 de enero 1880 se reportó sismo de intensidad 8, magnitud 6 a los 22.70 grado de latitud norte y 83 grado de longitud oeste a las 4:39 am, Chuy (1999)

Terremoto en Manzanillo, Granma 1926, el 3 de agosto se reportó un sismo de intensidad 7, magnitud 5.4 a los 20.30 grado de latitud norte y 77.10 grado de longitud oeste a las 11:30 am, Chuy (1999)

El terremoto ocurrido el 3 de febrero de 1932, magnitud 6.75 en la escala Richter, intensidad sísmica de VIII MSK fue considerado muy fuerte, dados los daños producidos, en Santiago de Cuba (80 % de las edificaciones afectadas y 5 % totalmente destruidas. Aunque los daños fueron debidos principalmente a la baja calidad de los materiales utilizados en las construcciones, sin duda la composición de los suelos, sedimentos cuaternarios recientes que descansan sobre sedimentos de origen marino sedimentario multiplicaron los efectos desastrosos del sismo el que provocó, además, la licuefacción de la calle La Alameda donde se reportaron serios daños en la ciudad de Santiago de Cuba, fundamentalmente en los alrededores de la bahía. Chuy et. al, en 2002; (tomado de Herrera – Delfín, 2015) y el 8 de agosto de 1947, hubo 14 muertos y 300 heridos. La intensidad máxima alcanzó 8 grados (MSK) y la $M_s=6,75$, Cotilla en 1999 (tomado de Reinoso-Mercantety, 2016). En la Figura 3 se muestra la licuefacción de los suelos en calle La Alameda, Santiago de Cuba, Fernández-Diéguez (2015).



Figura 3: Foto. Licuefacción de los suelos en calle La Alameda, en Santiago de Cuba. Terremoto del 3 de febrero de 1932, Chuy, 2002 (tomado de Herrera – Delfin, 2015).

Terremoto en Pilón, Granma 1976, el 19 de febrero se reportó un sismo de intensidad 8, magnitud 5.7 a los 19.87 grado de latitud norte y 76.87 grado de longitud oeste a las 1:39 pm, Chuy (1999)

Investigaciones realizadas en Cuba

Para la evaluación del peligro sísmico se considera que las principales afectaciones están relacionadas con las fallas activas, constituyendo zonas débiles en superficie donde se producen incrementos de la intensidad sísmica, y donde también se pueden producir movimientos diferenciales por constituir límites de bloques con diferente dinámica, así como por servir de guía para ondas desde el foco sísmico o hipocentro; en ellas el potencial de daños ante los terremotos puede ser intensificado. Para corroborar la posible ocurrencia de este fenómeno en la región oriental de Cuba si realizaron investigaciones como la tesis de maestría Fernández, (2000) con el título “Posibilidad de ocurrencia del fenómeno de licuefacción en la cuenca de Santiago de Cuba por terremotos fuertes”, donde el autor hace un mapa esquemático pronóstico de ocurrencia del fenómeno de licuefacción en Santiago de Cuba por terremotos fuertes. 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. En esta investigación se



hace una suposición conjugando factores como la geología, geomorfología y el nivel freático.

El informe para el proyecto titulado “Mapa de riesgo sísmico de la ciudad de Santiago de Cuba” realizado por investigadores del Centro Nacional de Investigaciones Sismológicas (CENAI) fue otras de las investigaciones realizadas para la determinación de licuefacción evaluando 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 en 2000 (tomado de Herrera - Delfín, 2015).

En el trabajo “Zonación preliminar de la licuefacción de los suelos en la región de Cuba Oriental” Rosabal en 2011 (tomado de Parellada – Reyes, 2016) 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 empleando 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.



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

En el trabajo de diploma titulado “Procedimiento para la gestión de riesgos geológicos en la provincia de Santiago de Cuba” por Galván- Rodríguez (2014), expone un procedimiento para la gestión de riesgos geológicos en la provincia Santiago de Cuba basado en los principios de la gestión por procesos. 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. 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.

Otra de las investigaciones realizadas fue la tesis de grado Herrera-Delfín (2015) titulada “Delimitación de escenarios susceptibles a la licuefacción inducido por terremotos de gran magnitud en el consejo popular Guillermon Moncada del



municipio de Santiago de Cuba”, en este trabajo se hace evaluación de las condiciones ingeniero geológicas y las particularidades sísmicas del Consejo Popular. Se utilizaron un conjunto de métodos que resolvieran la necesidad de la investigación como el cálculo del factor de seguridad corregido, la determinación de intensidades máximas que se pueden obtener a partir de magnitudes sísmicas que provoquen licuefacción en el área de estudio. Se obtuvo como resultado un mapa de susceptibilidad a la licuefacción en el área de estudio donde pudimos apreciar que desde el punto de vista de clasificación de suelos que los mismos varían espacialmente de forma aleatoria da como resultado un mapa de susceptibilidad a la licuefacción a partir de interpretar factores como geología, nivel freático y las propiedades físicas y mecánicas lo que le permitió calcular el Factor de seguridad para la licuefacción(FSL) dando sectores entre Alto, medio y bajo lo cual dependen del tipo de suelo. Los resultados con FSL menores de 1 se caracterizan por ser suelos blandos representados por un material tipo cieno con un comportamiento común en cuanto al contenido de humedad $>$ al 30 %, densidades secas $<$ 13,50 kN/ m³, con pesos específicos que oscilan en el rango de (26,60 a 27,00) kN/ m³ y resistencia a la penetración dinámica de 4 a 6 golpes por cada 30cm de penetración (SPT), desde el punto de vista de clasificación de suelos varían entre una arcilla muy plástica con arena (CH) a una arena arcillosa con gravas(SC), predominando los suelos tipo (CH) en dirección norte, hacia el centro este los suelos tipo SC y hacia el sur los de tipo OL - OH. Esta investigación es de gran importancia ya que es actual y demuestra con datos la probabilidad de ocurrencia del fenómeno ante sismos de magnitud 7.5 y superiores. Se demostró que para magnitudes menores es muy poco probable la manifestación de la licuefacción de los suelos.

En la tesis de maestría de Fernández-Diéguez (2015), también se realiza un estudio del municipio de Caimanera, con el objetivo de evaluar las condiciones ingeniero-geológicas del suelo de Caimanera, para predecir de forma efectiva si son licuables ante un sismo de gran intensidad. Se llevó a cabo mediante un procedimiento que permite la caracterización del 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 y las menos licuables. Se elaboró un procedimiento que permitió caracterizar las condiciones ingeniero geológicas de los suelos y zonificar el potencial de licuefacción.

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

En el trabajo de diploma titulado “Determinación de escenarios susceptibles a la licuefacción inducidos por terremotos de gran magnitud en los municipios Baracoa, Yateras, El Salvador y Niceto Pérez de la provincia de Guantánamo” por Reinoso-Mercantety (2016) se utilizaron un conjunto de métodos que resolvieran la necesidad de la investigación, como la validación de los resultados el cálculo del factor de seguridad corregido y la determinación de intensidades máximas que se pueden obtener a partir de magnitudes sísmicas que provoquen licuefacción en el área de estudio. Se obtuvo como resultado la delimitación de escenarios susceptibles a la licuefacción en el municipio de Yateras para sismo de magnitudes mayores que 6.

Otro de los trabajos realizados es el de “Escenarios susceptibles a la licuefacción inducida por sismos de gran magnitud en Santiago de Cuba” desarrollado por



Fernández-Diéguez, et. al, (2016). El propósito fue obtener, para el Consejo Popular Guiller món Moncada del municipio de Santiago de Cuba, la zonación del potencial de licuefacción de los suelos; para ello se evaluaron las condiciones ingeniero-geológicas y las particularidades sísmicas que propician este fenómeno. Se calculó el factor de seguridad corregido después de determinar las intensidades máximas posibles, a partir de magnitudes sísmicas que puedan provocar licuefacción en el área de estudio. Se obtuvo como resultado el esquema de susceptibilidad a la licuefacción, a partir del cual se concluye que los sectores de mayor susceptibilidad a la ocurrencia de licuefacción ante sismos de magnitudes entre 7 y 8 se ubican hacia el centro-este del Consejo Popular, donde predominan los suelos arenos arcillosos. Este resultado es de gran utilidad para la ubicación y planificación de obras ingenieriles en el área.

También se realizó una investigación sobre la “Susceptibilidad a la licuefacción de los suelos en la ciudad de Caimanera, Guantánamo”, desarrollado por Fernández-Diéguez, et. al (2017) la cual tuvo como objetivo evaluar las condiciones ingeniero-geológicas de los suelos de Caimanera, provincia de Guantánamo, para determinar su potencial de licuefacción. Se analizó la posibilidad de amplificación de las ondas sísmicas teniendo en cuenta el efecto de sitio, a partir de las propiedades físico-mecánicas del área de estudio. El sistema de indicadores aplicado incluyó parámetros ingeniero-geológicos y el cálculo del factor de seguridad para la licuefacción. Se concluye que los suelos de mayor potencial para la ocurrencia de licuefacción se ubican al centro de la ciudad, donde se encuentra el mayor asentamiento poblacional y el material de relleno existente se comporta como un suelo tipo arena arcillosa y arcilla arenosa con grava.

Otro trabajo titulado “Delimitación 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”, Bauta-Torres (2017), dando cumplimiento a sus objetivos específicos los cuales eran la caracterización de las condiciones ingeniero geológicas de los suelos de los municipios antes



mencionados, la aplicación de un sistema de indicadores geotécnicos y sísmológicos que permitieron determinar escenarios licuables y delimitar estratos susceptibles a la licuefacción de los suelos. Obteniendo como resultado final la aplicación de un sistema de indicadores a partir de conjugar factores como: Geología, sísmicidad, 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.

El trabajo de diploma titulado "Delimitación de escenarios susceptibles a la licuefacción inducido por terremotos de gran magnitud en el municipio Santiago de Cuba", por Lavañino - Fleita (2017), responde a la necesidad de evaluar las condiciones ingeniero-geológicas del municipio Santiago de Cuba para delimitar los escenarios susceptibles a la licuefacción, utilizando las propiedades físico-químicas, la caracterización geológica del área de estudio y realizando el cálculo del factor de seguridad pudo obtener como resultado final que 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.

Los sismos en Cuba como el elemento disparador de la licuefacción de suelos.

La falla Oriente y la falla Norte de la Española constituyen las principales fallas activas de primer orden donde pueden ocurrir sismos fuertes que afectan el territorio oriental de Cuba. Con estas estructuras se relaciona la principal actividad sísmica registrada en esta región, tanto en magnitud como en frecuencia. La actividad sísmica más importante se ha registrado en el sector Pílon - Chivirico, específicamente al sur de la localidad de Uvero, municipio de Guamá, provincia de Santiago de Cuba relacionada con una serie de terremotos iniciada el 17 de enero con un sismo de 5.8 de magnitud, que fue sentido en toda la región oriental de Cuba



con afectaciones a viviendas en varias localidades de la provincia de Granma. La figura 4 ilustra un resumen de sismicidad registrada instrumentalmente por tres o más estaciones para la región oriental de Cuba, hasta el 15 de mayo 2017.

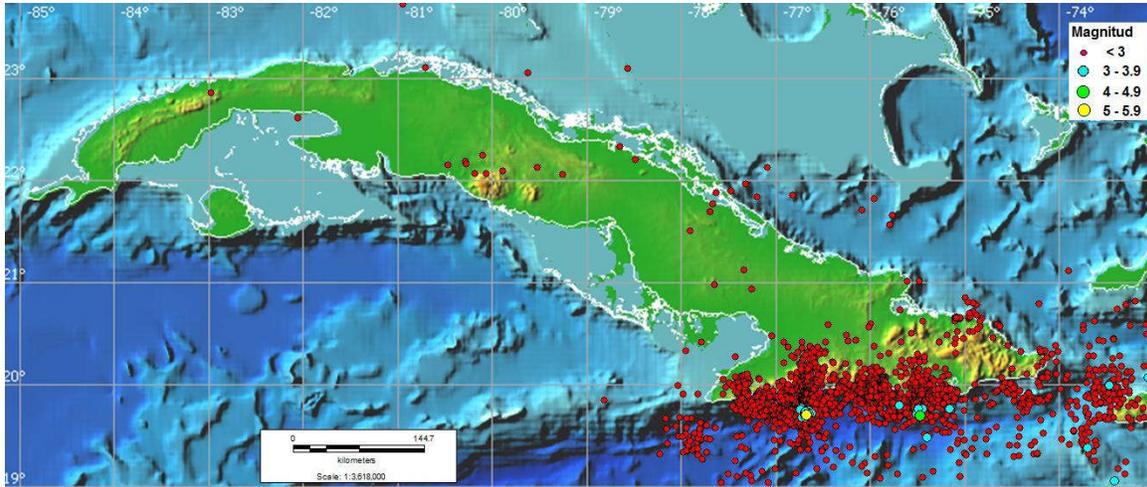


Figura 4. Esquemas de terremotos registrados por el Servicio Sismológico Nacional de Cuba hasta el 15 de mayo de 2017. Fuente: Centro Nacional de Investigaciones Sismológicas (CENAIIS).

En la figura 5 se representa el registro histórico de la ocurrencia en la región oriental de Cuba de terremotos de magnitud mayor de 5, desde el año 1900 hasta el 2015.

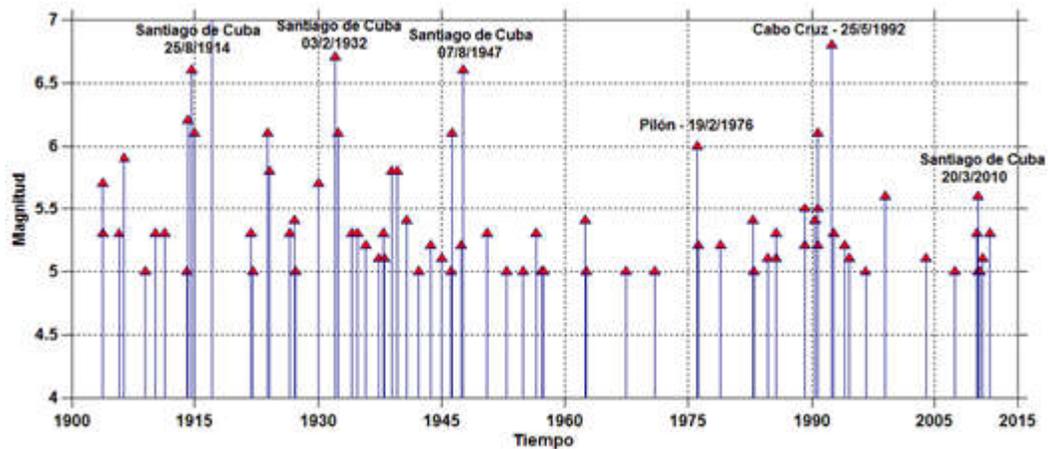


Figura 5. Terremotos de magnitud mayor de 5 reportados en la región suroriental de Cuba desde 1900. Fuente: CENAIIS.

En la Figura 6 se representan los epicentros de los terremotos perceptibles en la región Oriental durante el 2017.

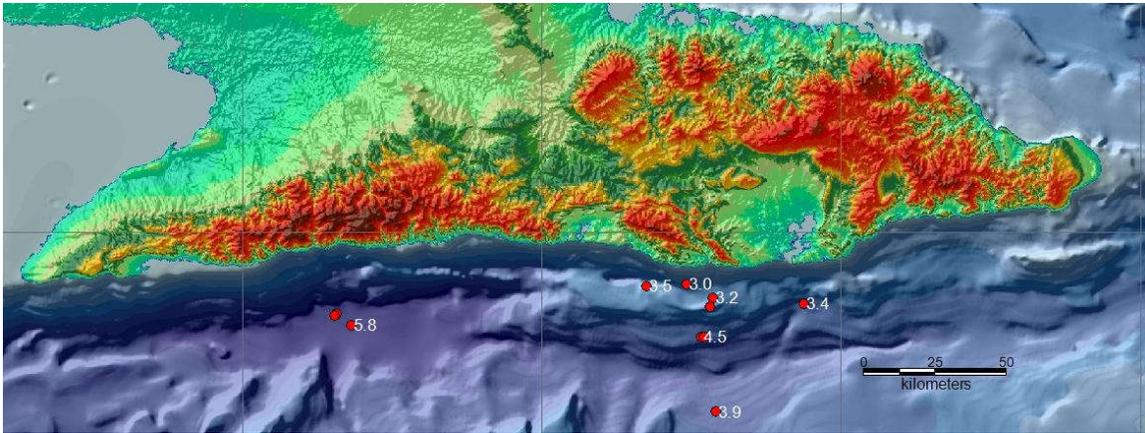


Figura 6: Mapa de epicentros de los terremotos perceptibles durante el 2017.

En la Figura 7 se representa el comportamiento de la sismicidad y como se observa, la mayor actividad sísmica la cual ha estado relacionada con la serie de terremotos del sur de Uvero. Para esta parte del país se ha establecido un ciclo sísmico de terremotos fuertes de entre 80 y 100 años, aproximadamente; esto significa que un sismo fuerte en esta región puede ocurrir en cualquier momento, debido a la energía acumulada desde los últimos sismos ocurridos en la primera mitad del siglo XX Guasch & Oliva en 2011 (tomado de Lavañino – Fleita, 2017).

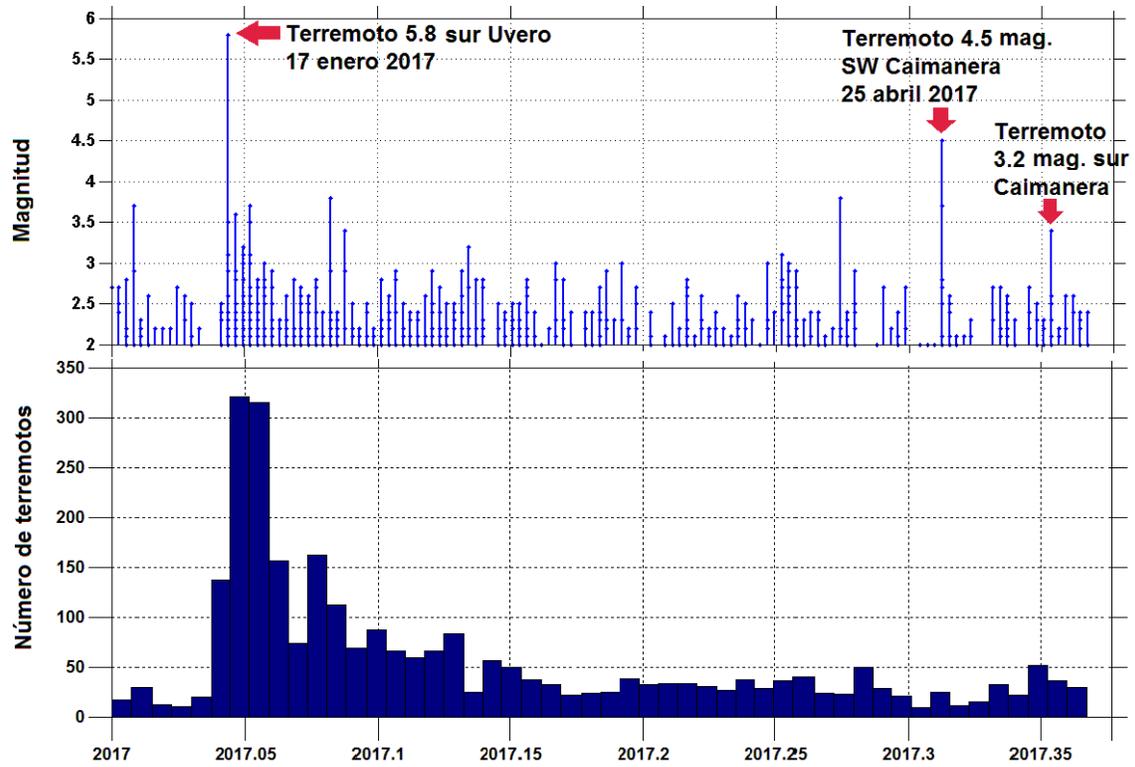


Figura 7: Comportamiento de la sismicidad durante el año 2017.



Capítulo I



CAPITULO I. CARACTERÍSTICAS FÍSICO-GEOGRÁFICAS Y GEOLÓGICAS DE LA REGIÓN DE ESTUDIO

1.1 Ubicación Geográfica

1.2 Relieve.

1.3 Clima.

1.4 Hidrografía.

1.5 Vegetación

1.6 Geomorfología.

1.7 Sismicidad

1.8 Geología Regional.

1.9 Principales formaciones presentes en la región.

Introducción

El presente capítulo tiene como objetivo destacar las características físico – geográficas y geológicas de la región de estudio, además de una información general de la hidrografía, el clima y vegetación de la región de estudio.

Características generales del municipio Pión

1.1 Ubicación Geográfica

El municipio de Pión se encuentra situado en la parte suroeste de la provincia Granma. Limita al norte con Media Luna y Campechuela, al oeste con Niquero, al este con Bartolomé Masó y al sur con el Mar Caribe. Ubicado a 42 km al este de Cabo Cruz.



Figura 8 Esquema de ubicación geográfica de Pílon (I.P.F provincia Granma).

1.2 Relieve.

El Programa Nacional de desertificación y lucha contra la sequía de la República de Cuba (2000) señala, como uno de los aspectos más característicos de la zona de estudio, el predominio de pendientes desnudas o con una cobertura de sedimentos sueltos, intensamente lavados en época de lluvia. El municipio está formado por una cadena montañosa más o menos paralela, donde sus alturas se orientan del E al W, y deben su origen a una gran falla longitudinal producida en el sur de la provincia.

En el plano de pendiente, se aprecia el predominio de dos rangos, el de más del 25 % que abarca el 35 % del territorio y el de 0 – 5 % que representa el 25 % del mismo. Las mayores alturas están hacia el este, entre 800 y 1200 msnm, alrededor aparecen alturas escalonadas de 100 - 300 msnm.

El sur del municipio está caracterizado por una extensa llanura que se extiende desde el río Toro hasta río Mota, Guasch et.al (2002).



1.3 Clima.

Los vientos típicos del norte, que azotan la región oriental de Cuba, al chocar con la Sierra Maestra, las masas de aire inferiores se ven forzadas a remontar el pie de monte y las laderas hasta las crestas (CITMA, 1985). Los vientos del norte son la causa fundamental de que allí existan condiciones micro climáticas muy perceptibles en el régimen pluviométrico y que sean habituales los períodos de sequía con categorías de moderados a fuertes, Guasch et.al (2002).

1.4 Hidrografía.

La red fluvial del área drena hacia el Mar Caribe. La mayoría de los cauces son intermitentes, a excepción de los ríos: Macío, Camaroncito y Mota, que provienen de las montañas circundantes y mantienen su caudal todo el año.

Las principales cuencas hidrográficas se asocian:

- Río Macío
- Río Camarón Grande
- Río Mota
- Río Cilantro
- Río Purgatorio
- Río Boca de Toro

De estos, Río Macío constituye al contacto, entre la Sierra Maestra Occidental y Central, y es la cuenca más desarrollada y típica del municipio. (Guasch et.al, 2002)

1.5 Vegetación

Históricamente, la semidesertificación de la franja del litoral sur de la Sierra Maestra, en la provincia Granma, ha sido considerada como producto de la actividad antrópica. Sin embargo, el estudio realizado sobre las diferentes especies que conforman los distintos tipos de vegetación que cubren esta estrecha faja de tierra,



señala la evidencia de un clima semidesértico desde épocas remotas. Guasch et.al, (2002)

Influencia del hombre (factor antrópico)

El hombre, al actuar sobre una superficie, crea condiciones que determinan particularidades locales en el clima. Estas particularidades y las modificaciones inducidas deben tomarse en cuenta sobre todo en la agricultura, en las construcciones y en la planificación de los núcleos humanos. Solo es posible la modificación del clima local como resultado de la exterminación de área de bosque y viceversa, mejorando la fertilidad del suelo, plantando franjas forestales, construyendo embalses de agua, etc. En toda la zona existe degradación química, física y biológica, con clara tendencia a la desertificación, debido a la combinación de los procesos degradativos naturales, antes mencionados, y, la tala y quema de bosques, uso de manglares y uverales para la fabricación de carbón, deficiente cortina rompe vientos y uso inadecuado de los suelos, Guasch et.al, (2002)

1.6 Geomorfología.

Geomorfológicamente el municipio se encuentra enclavado en la Sierra Maestra Occidental entra los bloques Cabo Cruz y Guama. Formando parte de la zona límite entre la placa de Norteamérica a la cual pertenece Cuba, con la micro placa de Gonave situada al sur. La zona de falla que separa a estas dos estructuras tectónicas de la corteza se conoce con el nombre Bartlett-Caimán, del tipo transformante, extendiéndose desde la zona de dispersión de la corteza oceánica (riff) de Caimán hasta La Española, Guasch et.al, (2002)

1.7 Sismicidad

El municipio Pilón se encuentra asociado al sistema de fallas transformantes Bartlett-Caimán. La sismicidad no se distribuye de forma homogénea en toda la zona del límite de placa al sur de Cuba, esta se concentra en dos grandes zonas al sur de Cabo Cruz, alrededor de los 77 grados 50' de latitud oeste y en las proximidades de la costa sur de la región oriental entre los 75 grados 10' y los 76



grados 50' de latitud oeste, destacándose una zona de nivel inferior de sismicidad, situado precisamente al sur-sur oeste de la localidad de Pilón.

En esta región la sismicidad se presenta en dos formas de génesis de sismos: de “entre placas” y de “interior de placas” esto significa que en este territorio no existe el mismo nivel de actividad sísmica en todas sus partes por lo que se considera la zona de mayor peligrosidad sísmica del país correspondiente a la estructura Bartlett-Caimán, Guasch et.al, (2002)

La sismicidad de interior de placa también se manifiesta de forma significativa en las zonas sismogénicas de baja actividad distribuidas en el territorio nacional. Los procesos sismogénicos ocurridos en Pilón no están relacionados directamente a la falla principal rumbo-deslizante, sino a procesos de ruptura del macizo rocoso en las inmediaciones de la costa cubana, como resultados también de los esfuerzos ocasionados por el movimiento lateral izquierdo de la Placa Norteamericana al chocar con la placa Caribe, Guasch et.al, (2002)

1.8 Geología Regional.

La constitución geológica del municipio, según la caracterización realizada por la Academia de Ciencias de Cuba (1989), para la confección del Nuevo Atlas Nacional de Cuba, señala diferentes orígenes para sus zonas. La zona montañosa y la parte norte del municipio pueden estar constituidos por aleurolitas, grauvacas, brechas, tobas, tufitas, andesitas y basaltos provenientes del Eoceno Inferior Medio.

La zona este, que contacta con parte de la provincia de Santiago de Cuba, debe su origen a las areniscas, calcarenitas, calizas, margas, pedernales, brechas, olistostromas, tobas, tufitas, andesitas y basaltos del Paleoceno y del Eoceno. La llanura costera, en casi toda su extensión, debe su origen a limos, arcillas, arenas aluviales, ocre, calcarenitas, calizas y conglomerados del Plioceno – Pleistoceno Inferior Húmedo.

Según la clasificación genética de los suelos, (1975) citada por CITMA, (2000), los suelos característicos del territorio son los siguientes: Carso Desnudo, Vertisuelos, Suelos Fersialíticos y Húmicos Calcimórficos.



Carso Desnudo o esquelético: Suelo de perfil ACD o AD, poco profundo (menos de 20 cm), con alto contenido de gravas en superficie, donde prácticamente el mineral aparece inalterable.

Vertisuelos: Suelo de perfil AC o A (B) C con poca diferenciación del solum, caracterizado por alto contenido de arcilla, principalmente montmorillonita, lo cual influye sobre las propiedades del suelo. La alternancia de las épocas de sequía y humedad causa fenómenos de contracción y dilatación.

Ferralsílicos: Agrupa a aquellos que se encuentran en un estado de evolución de sialíticos a ferralíticos o evolucionando a ferríticos, condicionado por la mezcla de minerales 2:1 y 1:1 y de sesquióxidos de hierro libre, que le confieren al perfil una coloración rojiza o un horizonte determinado.

Húmicos Calcimórficos: Los suelos de este agrupamiento presentan perfil, con transición brusca entre el horizonte (generalmente profundo) y el subyacente. Desarrollado en relieve ondulado y llano costero; en el primero sobre rocas calizas margosas, margas, etc., siempre de carácter friable y con presencia de CO_3Ca en todo el perfil o en parte de él, cuando ha sufrido lavado, y en el segundo, sobre roca calcárea cavernosa (diente de perro o karren), Guasch et.al, (2002).

1.9 Principales formaciones presentes en la región.

Grupo El Cobre: (Subdivisiones: fm. El Caney y fm. Pilón). Se puede localizar en los alrededores del poblado El Cobre y otras áreas de las provincias de Granma y Santiago de Cuba. Está constituida por diferentes tipos de rocas vulcanógenas y vulcanógeno-sedimentarias en distintas correlaciones y combinaciones alternantes, muy variables, tanto en sentido vertical como lateral. Las transiciones entre ellas a veces son bruscas y otras graduales y en muchos casos es prácticamente imposible establecer delimitaciones entre ellas. Las rocas más abundantes son: tobas, tobas aglomeráticas, lavas y lavas aglomeráticas de composición andesítica, andesidacítica y dacítica, raramente riolítica, riolacítica y basáltica. Con estas rocas se intercalan tufitas y calizas, además, se asocian a este complejo vulcanógeno-sedimentario cuerpos hipabisales y diques de diversa composición. En su



composición también participan tobas cineríticas, tufitas, tobas calcáreas, calizas tobáceas, areniscas polimícticas y vulcanomícticas y grauvacas. Yace discordantemente sobre las formaciones Manacal, Palma Mocha y Tejas. Está cubierta concordantemente por la fm. Puerto Boniato y discordantemente por las formaciones Cauto, Charco Redondo, Dátil, Jaimanitas (parte indiferenciada y su Mbro. Tortuguilla), Río Maya, San Luis, los grupos Guacanayabo (fm. Manzanillo), Guantánamo (miembros Guardarraya y Yacabo de la fm. Punta Imías) y el Mbro. Quintero (fm. La Cruz). Su edad es de Paleoceno- Eoceno Medio parte baja, Colectivos de Autores (2013).

Formación Pilón: Se manifiesta en la parte occidental de la Sierra Maestra, provincias de Granma y Santiago de Cuba. Se compone de areniscas y limonitas, calizas, con intercalaciones de tobas y tufitas que aumentan su proporción hacia arriba en el corte. Se intercalan rocas carbonatadas en forma de lentes cuya potencia varía lateralmente hasta alcanzar 30 m de potencia. Estas calizas presentan cierta silicificación producto de la presencia de radiolarios, en raras ocasiones fracción clástica formada por fragmentos de cuarzo, plagioclasas y rocas volcánicas. Su subyacente se desconoce. Está cubierta concordantemente por la fm. Caney y discordantemente por las formaciones Farallón Grande, Río Maya, Cabo Cruz y Sevilla Arriba. Su edad es Paleoceno-Eoceno Inferior, Colectivos de Autores (2013).

Formación Farallón Grande: Ocupa amplias áreas en la parte occidental de la Sierra Maestra, provincias de Santiago de Cuba y Granma y aislados parches en el borde sur de la cuenca. Es una unidad gruesamente fragmentaria constituida por brechas polimícticas, de fragmentos angulosos y subangulosos de tamaños variados, con intercalaciones de conglomerados de clastos bien seleccionados y en menor cantidad de areniscas de grano grueso. La matriz de la brecha y el conglomerado es arenosa tobácea. Yace discordantemente sobre las formaciones Charco Redondo y Pilón. Está cubierta concordantemente por la fm. San Luis y transgresivamente por las formaciones Dátil y Manzanillo. También está cubierta



por la fm. Barrancas sin conocerse el carácter del contacto. Su edad es Eoceno Medio (parte alta) por su posición estratigráfica, Colectivos de Autores (2013).

Formación Cabo Cruz: Se desarrolla desde el sur del río Limones hasta las cercanías del pueblo de Pílon, en el extremo suroccidental de la provincia de Granma. Compuesta por calizas biodetríticas arcillosas, fosilíferas, de color secundario rojizo a abigarrado, que por desagregación dan lugar a margas secundarias y pseudoconglomerados. Las calizas pueden aparecer ligeramente fosfatizadas y contienen abundantes tubos de *Kuphus incrassatus*. Se relaciona con el Mbro. Rolanda, yace discordantemente en su parte inferior sobre las formaciones Pílon y Sierra del Purial. Está cubierta concordantemente por la Fm. Manzanillo, con la cual transiciona lateralmente (de manera parcial) y, discordantemente, por la formación Río Maya. Su edad Mioceno Superior, Colectivos de Autores (2013).

Formación Jaimanitas: con una distribución en la costa de manera intermitente, formada por calizas biodetríticas masivas, generalmente carsificadas, muy fosilíferas, con contenido principalmente de conchas bien preservadas, corales de especies actuales y, ocasionalmente, biohermos. Los bolsones cársicos se encuentran en ocasiones rellenos por una fina mezcla carbonatico-arcillosa-ferruginosa, de color rojo ladrillo. Pasan a biocalcarenitas, de granulometría y estratificación variables o masivas. En mayor o menor cantidad, contienen fragmentos de sedimentos terrígenos, que incluyen calizas preexistentes. Es frecuente encontrar variaciones lito faciales y biofaciales. En general, la cementación es variable y en su superficie presenta un casquete recristalizado de evaporita y caliche combinados, de 1 m a 2 m de espesor, por debajo del cual, en ocasiones, la roca aparece desintegrada, convertida en un material terroso. La coloración predominante es blancuzca, rosácea o amarillenta. Yace discordantemente sobre las formaciones Güines, La Cruz, Río Maya, Vázquez, Vedado, Versailles, Turiguanó, y las formaciones Júcaro y Río Jagüeyes (Gr. Nipe). Está cubierta discordantemente por las formaciones Cocodrilo, El Salado, La Cabaña, Los Pinos, Cayo Guillermo y Playa Santa Fe y los depósitos innominados



del Holoceno en el territorio emergido y en la plataforma marina insular. Puede ser correlacionada con las formaciones Camacho, Jamaica y Cauto, de Cuba Oriental, y Si guanea, de Isla de la Juventud. Edad Pleistoceno Superior, Colectivos de Autores (2013).

Depósitos Innominados del Cuaternario: compuesta por bloques, cantos rodados, gravas, arenas, arcillas derivadas de la erosión fluvial y regional, se caracteriza por distintos tipos de cortes, yacencia y redondeos de los fragmentos, se distinguen los sedimentos desde lo periodos relativamente secos. La estratificación es generalmente cruzada y lenticular, típica de terrazas y desgarres fluviales. Posee 1-2 m de espesor y a veces de 10-20 m. (IIG-ENIA Holguín, Archivo 3-13-7 de1989)



Capítulo II

CAPITULO II: METODOLOGÍA PARA ESTUDIAR EL POTENCIAL DE LICUEFACCIÓN.

2.1 Metodología 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

Introducción

Este capítulo tiene como objetivo, elaborar la metodología para realizar los estudios en el área del asentamiento poblacional correspondiente al municipio Pílon de la provincia Granma, partiendo de las etapas de investigación (búsqueda bibliográfica, y trabajos de gabinete). Además de ofrecer un resumen de la metodología a aplicar para determinar los escenarios susceptibles a la licuefacción.

2.1 Metodología de la investigación.

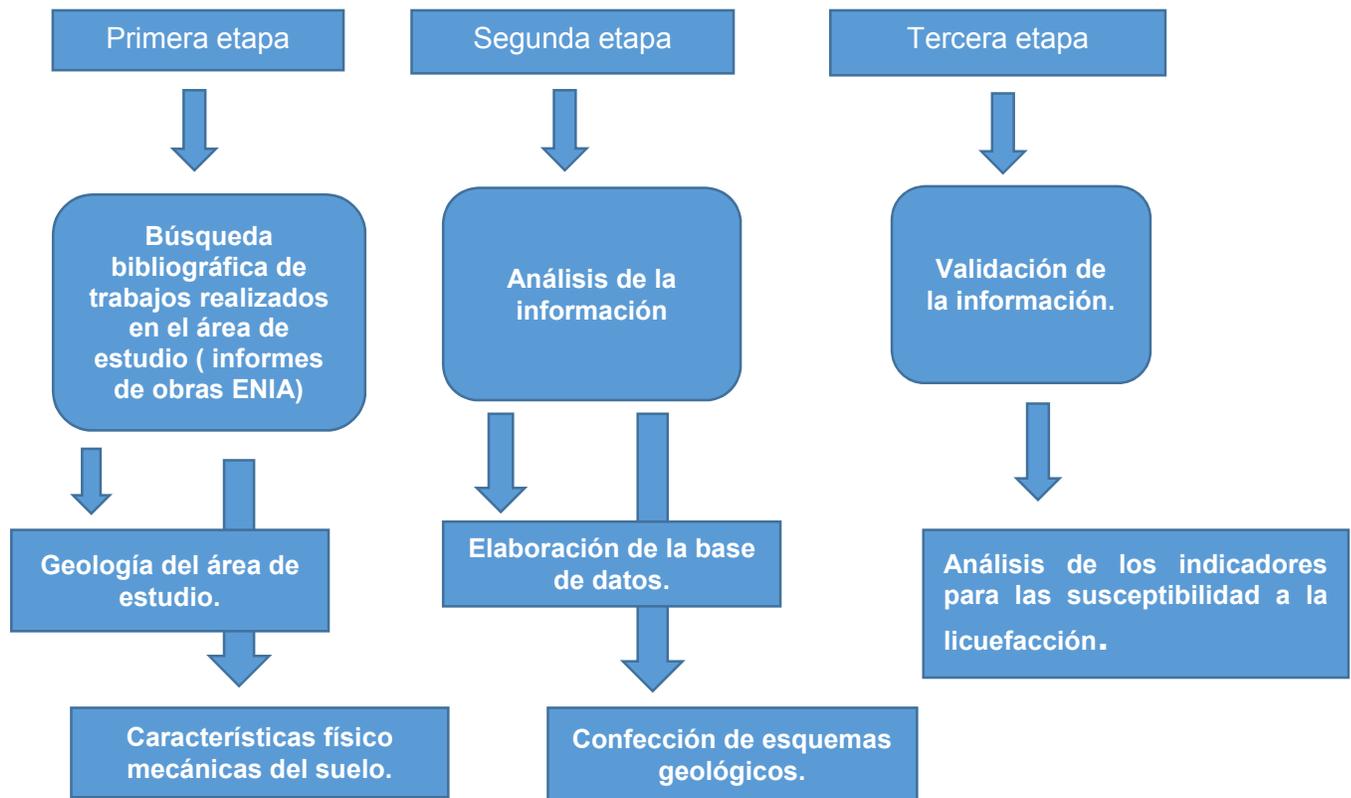


Figura 9: Esquema de metodología de la investigación



Primera Etapa: Revisión bibliográfica

En esta etapa se realizó una recopilación sobre información recogida en trabajos precedentes que abordan el tema, artículos publicados en Internet u otros sitios Web de interés, en revistas y libros, etc. Además de utilizar informes pertenecientes a los archivos de la Empresa Nacional de Investigaciones Aplicadas (ENIA) de la provincia de Holguín permitiendo una mejor comprensión de las condiciones del área de estudio. Toda esta información permitió un buen desarrollo del trabajo. El método seguido fue el Método histórico lógico, análisis y síntesis.

Segunda Etapa: Análisis de la información

En esta etapa se realizó el procesamiento de los datos provenientes de las perforaciones realizadas de un gran número de obras en el asentamiento poblacional del municipio Pílon de la provincia Granma, por parte de la ENIA de Holguín. Las perforaciones fueron realizadas años atrás, por lo que no fue posible presenciar las perforaciones de las calas, no obstante, se describieron los trabajos realizados a partir de un profundo estudio. Las calas se perforaron con máquina tipo Mark V de fabricación inglesa, por el método de perforación vertical a percusión con selección de testigos mediante la cuchara cubana o tubo dividido de 73 mm de diámetro y 460 cm de longitud lo que conllevó a la obtención de datos reales en cuanto a las propiedades geotécnicas del suelo, el conocimiento del nivel freático y las litologías presente.

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



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-Diéguéz, (2015).

Para evaluar el potencial de licuefacción se llevó a cabo mediante un sistema de indicadores en el cual se unifican los parámetros propuestos por diversos autores (Seed & Idress, 1971, 1982); (Wang, 1979), (González de Vallejo, 2002) y requisitos obtenidos de la revisión de análisis de casos, donde se propuso con un orden lógico los parámetros que deben cumplirse para que un suelo sea potencialmente licuable. Se hizo difícil determinar los parámetros debido a los diferentes criterios y factores que se proponían. Después de una revisión de las metodologías propuestas por los autores antes mencionados, se elaboró una propuesta que brindó un orden lógico y permite cuantificar el fenómeno. A partir de todo lo antes expuesto se propone analizar las condiciones siguientes:

Condiciones geológicas.

La primera condición que debe cumplir un suelo para que sea licuable es que corresponda a depósitos jóvenes (menos de 10.000 años) a las que pertenecen las formaciones del Cuaternario (Holoceno y Pleistoceno). Debe cumplir además que la relación entre el estrato licuable y el no licuable sea menor que 1. Coincidiendo también que el estrato de suelo no licuable encima del licuable debe ser menor de 8.0 m. Para la selección de los sectores inicialmente se hace una búsqueda en el mapa geológico y se seleccionan las formaciones pertenecientes al Cuaternario que están representadas por el color amarillo en sus diferentes tonalidades.

Sismicidad.

Otro factor importante para que pueda licuar un suelo es la sismicidad, para ello se analiza la cercanía con una zona sísmo generadora capaz de generar sismos fuertes o magnitud mayor de 5,5 y las aceleraciones de las partículas lleguen a ser iguales o superior $0,2 \text{ g/cm}^2$. Para la selección se tiene en cuenta la norma: Construcciones Sísmo resistentes. Requisitos básicos para el diseño y construcción de Cuba de 1999 (propuesta 2013) 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 período 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.

Es importante tener en cuenta 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 o el mapa de hidrohisopisa del Instituto de Recursos Hidráulicos (INRH) e Instituto de Meteorología (INSMET). Finalmente se confecciona el mapa de profundidad del nivel freático para el área de estudio.

Condiciones ingeniero geológicas.

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

- ✓ Por ciento de partículas finas ≤ 15
- ✓ Límite Líquido $\leq 35 \%$
- ✓ Contenido Natural de agua $> 0,9 LL$
- ✓ Índice de liquidez $< 0,75$
- ✓ Forma de las partículas. Principalmente redondas
- ✓ N de SPT < 20 golpes



- ✓ Compacidad relativa (C_r) < 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 por ciento de arcilla
- Arena con bajo por ciento de materia orgánica o
- Arena con partículas.
- Sedimentos eluviales, llanuras aluviales y zonas de manglar.

Cálculo del Factor de seguridad para la licuefacción.

Calcular el Radio de Tensiones Cíclicas (CSR) para determinar la resistencia a la licuefacción de los suelos arenosos y con contenidos de finos, la relación de tensiones cíclicas (CSR) se compara con la relación de resistencia cíclica (CRR), esta última se obtiene de correlaciones empíricas entre la relación de esfuerzos cíclicos requeridos para causar licuefacción y los valores del número de golpes (N SPT) normalizados por profundidad y energía de los golpes del martillo (valores de $(N_1, 60)$). En la figura 10 se muestran las curvas recomendadas por (Seed, et al.2003).

El análisis del potencial de licuefacción en este trabajo sigue procedimientos basados en la determinación de la razón de esfuerzos cíclicos (CSR). Esta razón CSR depende directamente de la máxima aceleración horizontal en el sitio; a fin de obtener un mejor estimado de este parámetro.

El procedimiento requiere calcular dos variables sísmicas que son:

a) La excitación sísmica del estrato de suelo, expresada en términos de la relación de tensiones cíclicas promedio ($CSR = \tau_{pro} / \sigma'_{vo}$).



b) La capacidad del estrato de suelo para resistir la licuefacción, en términos de la relación de resistencia cíclica (CRR).

En la mayoría de los procedimientos empíricos, el valor promedio de la relación de tensiones cíclicas (CSR) inducidos por el sismo se estima de los análisis de la respuesta dinámica del suelo, o mediante la expresión recomendada por Seed & Idriss en 1971 (tomado de Bauta – Torres, 2017). En este enfoque, la resistencia cíclica es caracterizada por la relación de esfuerzo cíclico (CSR). Básicamente, la CSR se define como el esfuerzo cortante promedio actuante en un estrato, normalizado por el esfuerzo efectivo de sobrecarga (σ'_{vo}).

$$CSR = 0.65 (a_{max} / g) (\sigma_{vo} / \sigma'_{vo})^{rd}$$

Dónde:

CSR: esfuerzos cíclicos y depende directamente de la máxima aceleración horizontal en el sitio.

A max: aceleraciones máximas generadas por un sismo de diseño.

σ_{vo} : esfuerzo normal vertical total, referido a la superficie del suelo.

σ'_{vo} : esfuerzo normal vertical efectivo, referido a la superficie del suelo.

rd: coeficiente de reducción del suelo, que toma en cuenta la deformabilidad del perfil de subsuelo. (Liao y Witman, 1986), para la práctica de ingeniería rutinaria, en proyectos no críticos, proponen las siguientes ecuaciones para estimar el rd:

Para $z \leq 9.15\text{m}$ $rd = 1.0 - 0.00765z$

Para $9.15\text{m} < z \leq 23\text{m}$ $rd = 1.174 - 0.0267z$

z: profundidad por debajo de la superficie del suelo en m.

A partir de los valores obtenidos con anterioridad de los informes provenientes de la ENIA se calculó el CSR y se plotearon los valores obtenidos en la curva de CSR vs SPT.



Una vez obtenido el resultado de CSR se compara con los valores de la figura 12 y se comprueba si es un estrato licuable o no.

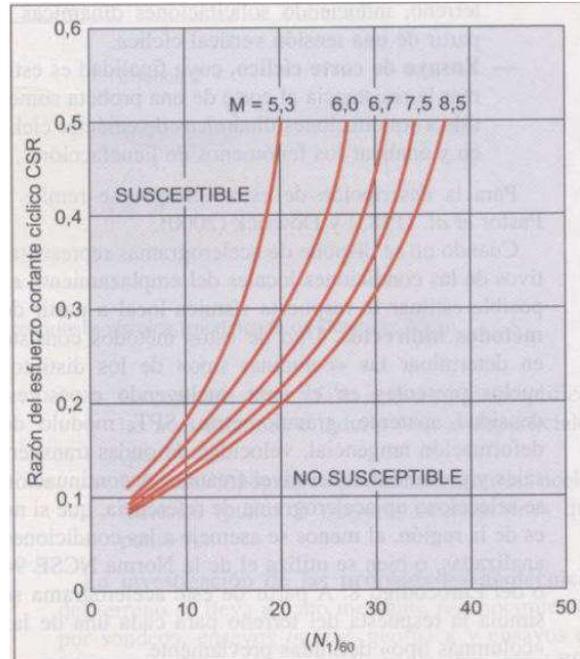


Figura 10: Susceptibilidad de licuefacción de un suelo en función de $(N_1)_{60}$ y la razón del esfuerzo cortante cíclico CSR, González de Vallejo en 2002(tomado de Bauta- Torres 2017).

Es un principio generalmente aceptado que el potencial de licuefacción de estratos arenosos puede evaluarse utilizando correlaciones entre datos de resistencia a la penetración (SPT) y la resistencia cíclica del material movilizado durante una fuerte excitación vibratoria. En este estudio se utilizaron datos de los ensayos SPT efectuado y la resistencia cíclica caracterizada por la relación de esfuerzo cíclico (CSR) definiéndolo como el esfuerzo cortante promedio actuante en un estrato normalizado por el esfuerzo efectivo de sobrecarga.

Cálculo del Coeficiente de Resistencia Cíclica CRR.

De los datos obtenidos de los informes se calcula CRR y se construye la curva CRR vs SPT. Si los valores son menores que 1 entonces se considera que es un estrato licuable



Enfoque de resistencia cíclica (CRR)

Para ello, científicos destacados como Youd et. al en 2001, Semillas et al en 1985, y otros, han elaborado a partir de datos obtenidos en campo a través de ensayos SPT, gráficas sobre la relación entre dos parámetros físicos que participan en la licuefacción de los suelos, estos son el Coeficiente Resistencia Cíclica (CRR, siglas en inglés) y $(N_1)_{60}$, es decir el número de golpes suministrado al terreno, representado también por la letra N.

$N_{160} = (N_1)_{60}$ = El número de golpes de la prueba SPT normalizada a un esfuerzo geostático de 100 kPa y a la energía del martillo de 60%.

CRR = La relación de resistencia cíclica para un sismo de diseño.

$$CRR = \frac{1}{34 - N} + \frac{N}{13.5} + \frac{50}{[10N + 45]^2} - \frac{1}{200}$$

Esta ecuación es válida para los $(N_1)_{60} < 30$. Para $(N_1)_{60} \geq 30$, los suelos granulares limpios tienen el grado de compacidad demasiado alto para sufrir la licuefacción.

La resistencia a la penetración utilizada en las correlaciones corresponde al número de golpes medido en terreno (N) al cual se le aplica una corrección por tensión efectiva (Llao y Whitman, 1986):

$$C_N = \left(\frac{1}{\sigma'_v} \right)^{0.5}$$

$$N_1 = N \times C_N$$

Dónde:

C_N = factor de corrección para una tensión efectiva de sobrecarga de 1 ton/pie²

σ_v = tensión efectiva vertical en atmósferas



La resistencia del suelo queda representada por (N 1,60), la cual es la cantidad de golpes del SPT corregido para una presión de sobrecarga efectiva de 1 Ton/pie 2 ($\approx 1 \text{ kg/cm}^2$), y para una razón de energía del 60% de la máxima teórica.

Corrección por energía aplicada, equipamiento y efectos de procedimientos para obtener un valor estandarizado de:

$$N_{1,60} = N_1 \cdot C_R \cdot C_S \cdot C_B \cdot C_E$$

Tabla 1: Correcciones a SPT (Skempton, 1986).

FACTOR	VARIABLE DE EQUIPO	TERMINO	CORRECCION
presión vertical normal efectiva	N/A	C_N	$(Pa/\sigma'_{vo})^{0.5}$
presión vertical normal efectiva	N/A	C_N	$C_N \leq 1.7$
relación de energía	martillo tipo dona	C_Z	0.5 - 1.0
relación de energía	martillo de seguridad	C_Z	0.7-1.2
relación de energía	martillo automático tipo dona	C_Z	0.8-1.3
diámetro de la perforación	65-115 mm	C_B	1
diámetro de la perforación	150 mm	C_B	1.05
diámetro de la perforación	200 mm	C_B	1.15
longitud de la barra	< 3 m	C_R	0.75
longitud de la barra	3-4 m	C_R	0.8
longitud de la barra	4-6 m	C_R	0.85
longitud de la barra	6-10 m	C_R	0.95
longitud de la barra	10-30 m	C_R	1.0
muestreo	muestreador estándar	C_S	1.0
muestreo	muestreador sin ademe	C_S	1.1-1.3



Capítulo III



CAPITULO III: EVALUACION DEL SISTEMA DE INDICADORES PARA DETERMINAR EL POTENCIAL DE LICUEFACCIÓN EN EL ÁREA DE ESTUDIO.

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

3.2 Validación del sistema de indicadores propuestos en el municipio Pilón.

Introducción.

Los indicadores propuestos para determinar si los escenarios son licuables o no ante un sismo de gran magnitud serán validados en este capítulo. A continuación, se explica cómo se llevará a cabo a través de los criterios para la selección de escenarios susceptibles a la licuefacción en el asentamiento poblacional y de la validación del sistema de indicadores propuestos.

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

El primer criterio que se analizó fue el histórico. No existen reportes de ocurrencia del fenómeno de licuefacción en el municipio estudiado. 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.

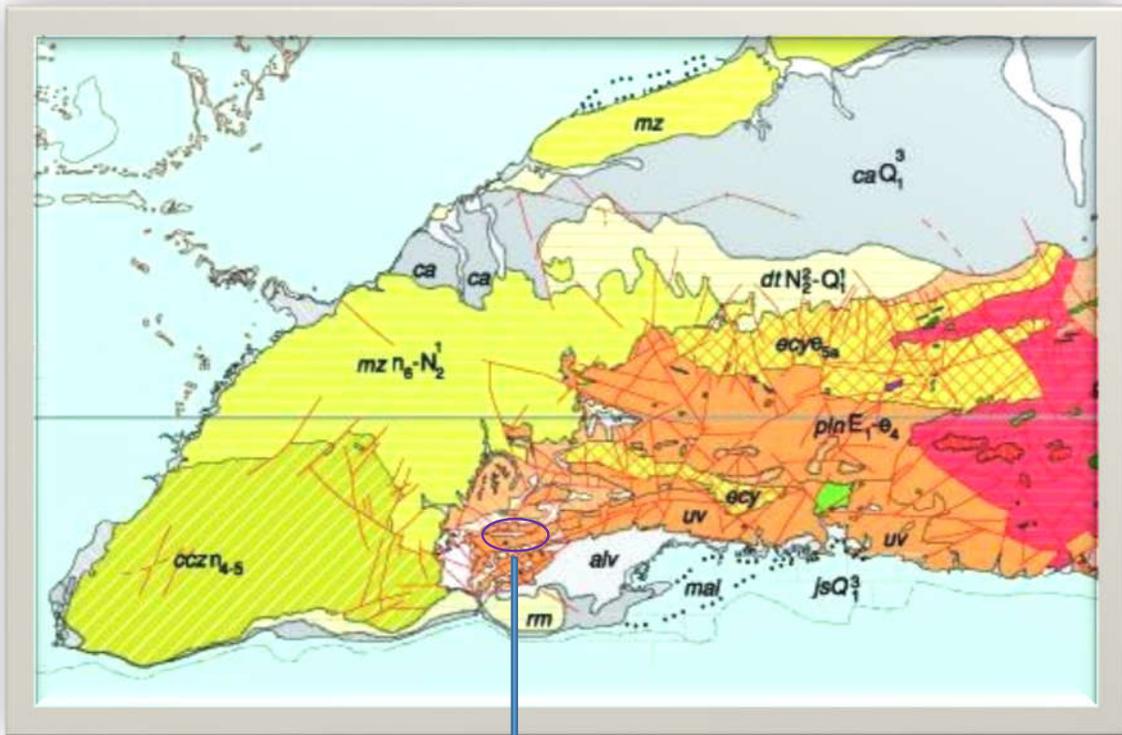
La cercanía a una zona sismo generadora, la probabilidad de ocurrencia y período de recurrencia de un sismo fuerte fue otro criterio que se tuvo en cuenta. La sismicidad del área y las posibles amplificaciones de las aceleraciones sísmicas dado el efecto de sitio. Este aspecto no se puede dejar de tener en cuenta como prueba de susceptibilidad pues el municipio es considerado en la provincia, uno de los de mayor peligrosidad sísmica, por los terremotos ocurridos y que ocurren cerca de él (Uvero 17-1-2017), y por los valores altos de magnitud e intensidad alcanzadas históricamente. Esto se debe en gran medida por su tipo de sismicidad conocido como entre placas y de interior de placas, correspondiente a la estructura fallada Bartlett-Caimán.



3.2 Validación del sistema de indicadores propuestos en el municipio Pílon.

3.2.1 Análisis de las condiciones geológicas del área de estudio.

El asentamiento poblacional del municipio Pílon, se encuentra ubicado preferentemente sobre la Formación Pílon, la cual se manifiesta en la parte occidental de la Sierra Maestra. Se compone de areniscas y limonitas, calizas, con intercalaciones de tobas y tufitas que aumentan su proporción hacia arriba en el corte. Se intercalan rocas carbonatadas en forma de lentes cuya potencia varía lateralmente. Estas calizas presentan cierta silicificación producto de la presencia de radiolarios, en raras ocasiones fracción clástica formada por fragmentos de cuarzo, plagioclasas y rocas volcánicas. Está cubierta concordantemente por la formación Caney y discordantemente por las formaciones Farallón Grande, Río Maya, Cabo Cruz y Sevilla Arriba. Su edad es Paleoceno-Eoceno Inferior, Colectivo de Autores (2013). También se encuentran los depósitos innominados del Cuaternario la cual está compuesta por bloques, cantos rodados, gravas, arenas, arcillas derivadas de la erosión fluvial y regional. Se caracteriza por distintos tipos de cortes, yacencia y redondeos de los fragmentos. Se distinguen los sedimentos desde lo períodos relativamente secos. La estratificación es generalmente cruzada y lenticular, típica de terrazas y desgarres fluviales. Posee 1-2 m de espesor y a veces de 10-20 m. (IIG-ENIA Holguín, Archivo 3-13-7 de1989). En estos sectores es muy difícil que licue, depende en gran medida del porcentaje de arena y arcilla, así como el grado de plasticidad de la misma, los estratos de los suelos estudiados son muy compactos y bien consolidados.



Asentamiento Poblacional



Trabajo de Diploma

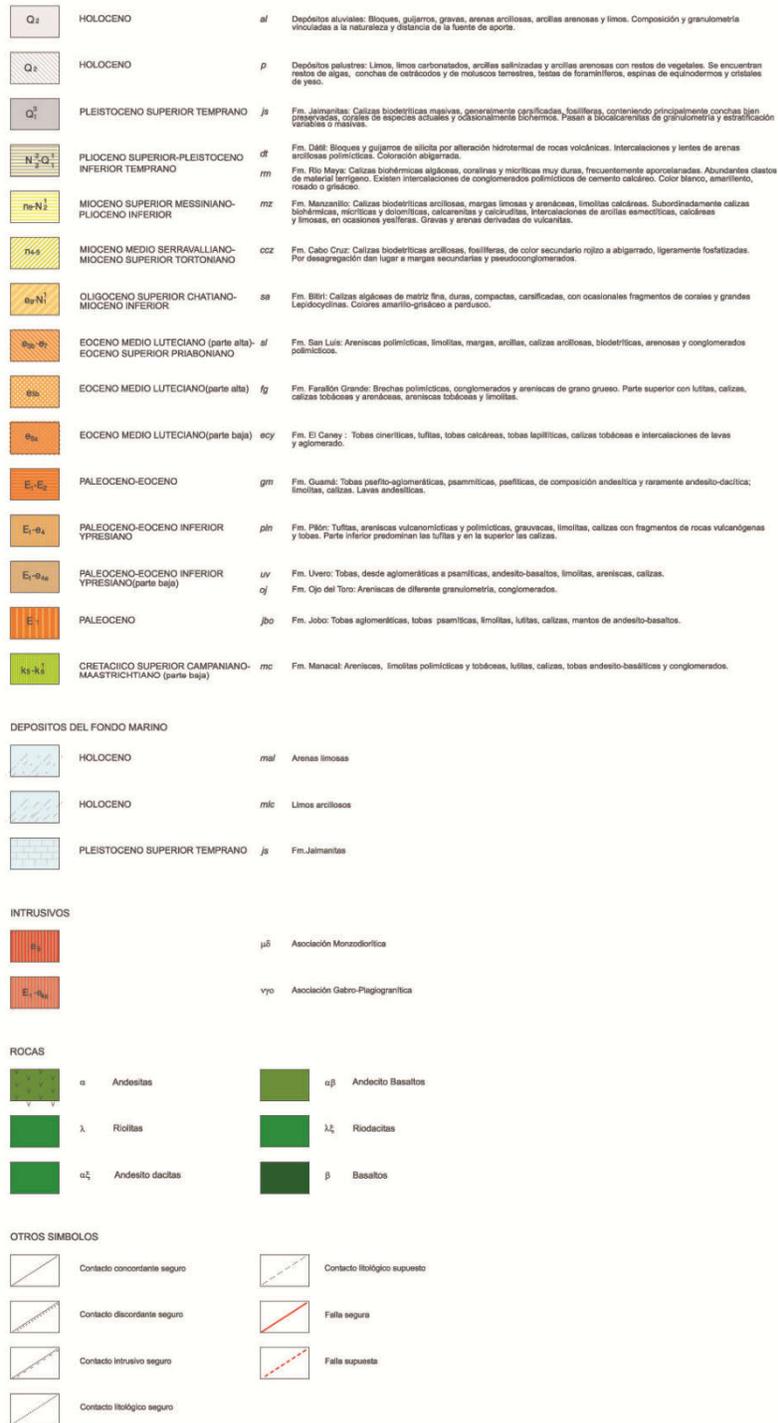


Figura 13: Esquema Geológico donde se encuentra el municipio Pilón, provincia Granma. Tomado del IGP 1:100 000 (2011)



3.2.2 Sismicidad.

Según la norma NC 46 -2013 este municipio se encuentra ubicado dentro de la zona 4 que presenta un riesgo sísmico alto, 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 un sismo de diseño. Los valores de la aceleración espectral horizontal máxima del terreno para el cálculo de S_a estarán entre 0,5 y 0,8 g para períodos cortos S_s y entre 0.20 y 0.30 para periodos largos S_1 .

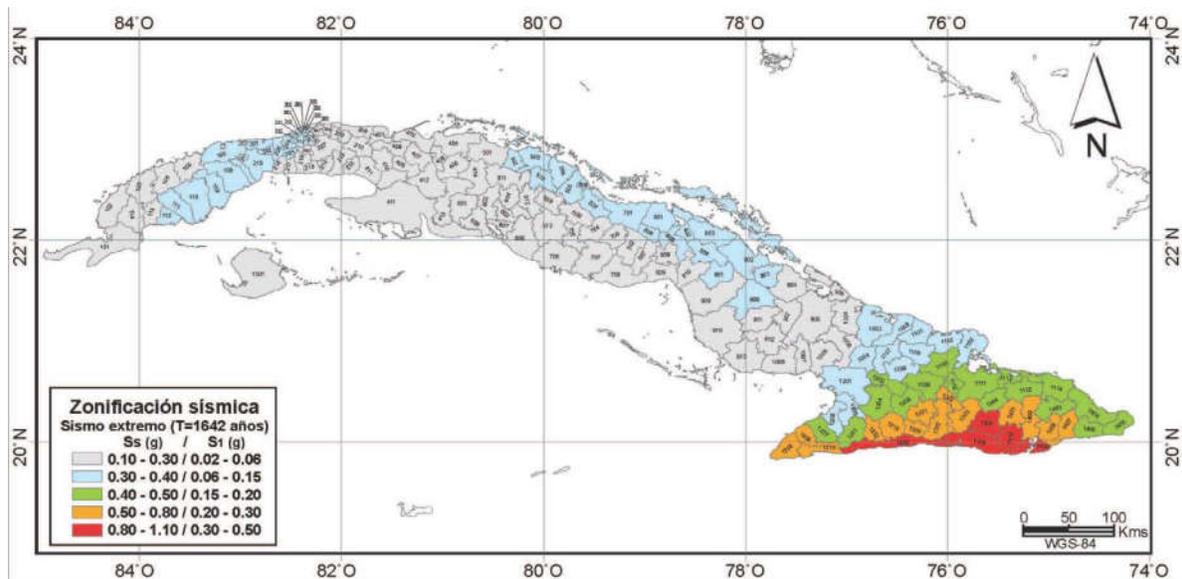


Figura 14. Mapa de zonificación sísmica para la República de Cuba

En el resumen de sismicidad hasta el 15 de mayo de 2017, el día con mayor cantidad de terremotos fue el 17 de enero con 189 sismos, las magnitudes en este día fueron 0.5-3.6. La zona donde se registró la mayor cantidad de terremotos (Pilón-Chivirico) con 1521 sismos, siendo esta la zona más energética.(Centro Nacional de Investigaciones Sismológicas Ministerio de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente)

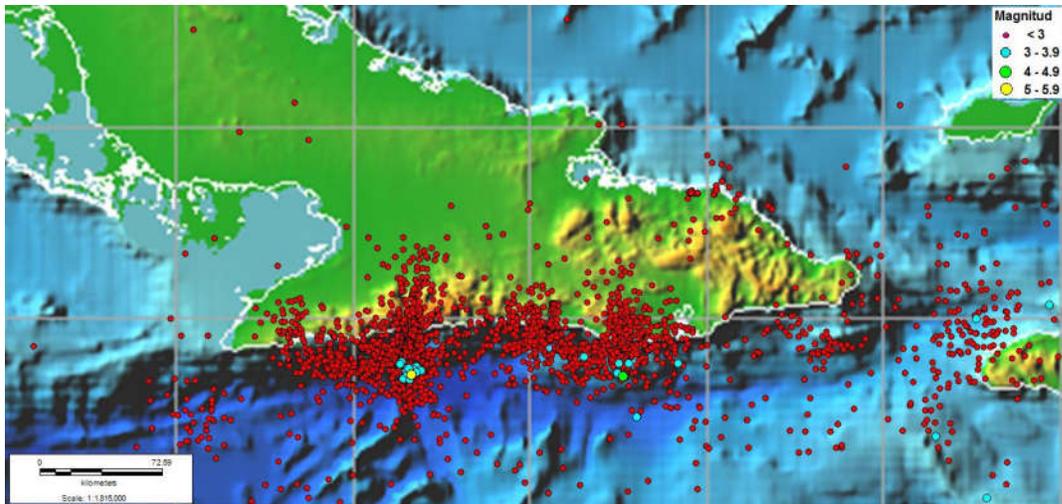


Figura 15. Mapa de la sismicidad registrada durante el 2017 en la región Oriental.

Por lo antes expuesto se considera una zona de alto peligro sísmico y capaz de generar sismos fuertes, una de los indicadores necesarios para que ocurra la licuefacción.

3.2.3 Características hidrográficas

El análisis del comportamiento del nivel freático en el área de estudio se realizó a través de la revisión de los informes técnicos de las obras realizadas por parte de la ENIA Holguín, en el municipio de Pílon de la provincia de Granma.

En el municipio se encuentra el Río Macío, el cual constituye el contacto entre la Sierra Maestra Occidental y Central, y es la cuenca más desarrollada y típica del municipio. Las principales cuencas hidrográficas se asocian a continuación a Río Macío, Río Camarón Grande, Río Mota, Río Cilantro, Río Purgatorio, Río Boca de Toro. El nivel freático varía entre 0.60 y 8.40 m, aunque en algunos informes no se cortó el nivel freático hasta la profundidad alcanzada por la cala a más de 10 metros

3.2.4 Condiciones ingeniero-geológicas.

Se revisaron los informes ingeniero geológicos efectuados por la Empresa Nacional de Investigaciones Aplicadas (ENIA) de Holguín y se seleccionaron las propiedades físicas y mecánicas por cada obra en el municipio estudiado.



De un total de 29 informes consultados pertenecientes a investigaciones llevadas a cabo por la ENIA Holguín, se escogieron 11 para realizar la interpretación y procesamiento de la información, los restantes carecían de variables correspondientes a varias propiedades físico mecánicas de los suelos, así como coordenadas. Se confeccionó la tabla resumen con algunas propiedades entre las que se encuentran: por ciento de arena (Ar), por ciento de finos (Fi), límite líquido (LL), humedad natural (W), peso específico húmedo (PEH), peso específico seco (PES), prueba estándar de penetración (N de SPT), cohesión (C). (Tabla 2).

Tabla 2: Clasificación geotécnica del suelo del municipio Pílon.

Obras	N de SPT	LL	% Finos	% Arena	Wn (%)	PEH	PES	C (KPa)	Descripción
Torre de trasmisión El Mamey	Rec/ comp.	-	-	-	27	25	24.8	30	
Sala de Rehabilitación del Policlínico.	Rec/ comp.	45	35	26	12	18	16	37	CL-GS
Vivienda para médicos Rpto Los Edificios.	16	32	43	29	31	19.1	16.5	28	GC-CL
Viviendas en Pílon.	44.5	43	35	19	11.5	18.2	19.5	0.1	GC
Escuela de retardo psíquico en Pílon.	Rec/ comp.	30	34	21	10.2	3	2	0.3	GC-GC-CL
Puente sobre Río purgatorio (calabaza) Pílon.	28	49	28	29	25	19.4	15.5	0.5	GC



Circulo Infantil	60	34	34	32	16	2.67	1.68		GC
tanque elevado sobre Pilón. hospital	41	24	51	52	11	1.7	1.6	0.08	CL-SM
Ampliación del Centro Telefónico	Rec/ comp.	49	19.5	28.5	23.2				
Almacén de víveres en Pilón.	30	31	-	-	9				
Puente sobre el Río Purgatorio Km 27 carretera Pilón - Stgo de Cuba.	Rec/ comp.	36	-	-	5.7	25.2	20.3	0.3	CL-SW

Debido a que los parámetros propuestos de condiciones geológicas, profundidad del nivel freático, y las condiciones ingeniero-geológicas de las propiedades físico-mecánicas del suelo, no cumplen, se puede demostrar que ningún estrato estudiado es susceptible a licuar, ya que este sistema de indicadores es aplicado para el estudio de la susceptibilidad a la licuefacción.

En la Figura 16 y 17 se muestran esquemas representativos del comportamiento de la litología en el asentamiento poblacional del municipio Pilón. En la primera columna estratigráfica lo que predomina es una capa vegetal con una potencia de 0,40 m, seguido por una secuencia compuesta por un relleno gravo arcilloso con una potencia de 1,20 m, luego una arena gravosa hasta los 3.40m seguido a una arcilla limosa hasta los 6.80m de profundidad, también está presente las brechas polimícticas hasta los 7.20m y calizas seguido de esta hasta los 10m de profundidad. En la segunda columna litoestratigráfica (figura 17) encontramos una capa vegetal de 0.60m de espesor, brechas polimícticas hasta 1.20m de



profundidad, también presenta areniscas de grano grueso hasta los 3.40 m, hasta los 6.80m encontramos limonitas, y finalmente a los 7.20m aparece las calizas tobáceas silicificadas por encima de las tufitas que se encuentran a los 10m de profundidad.

Columna litoestratigráfica esquemática, municipio Pilón. Granma.

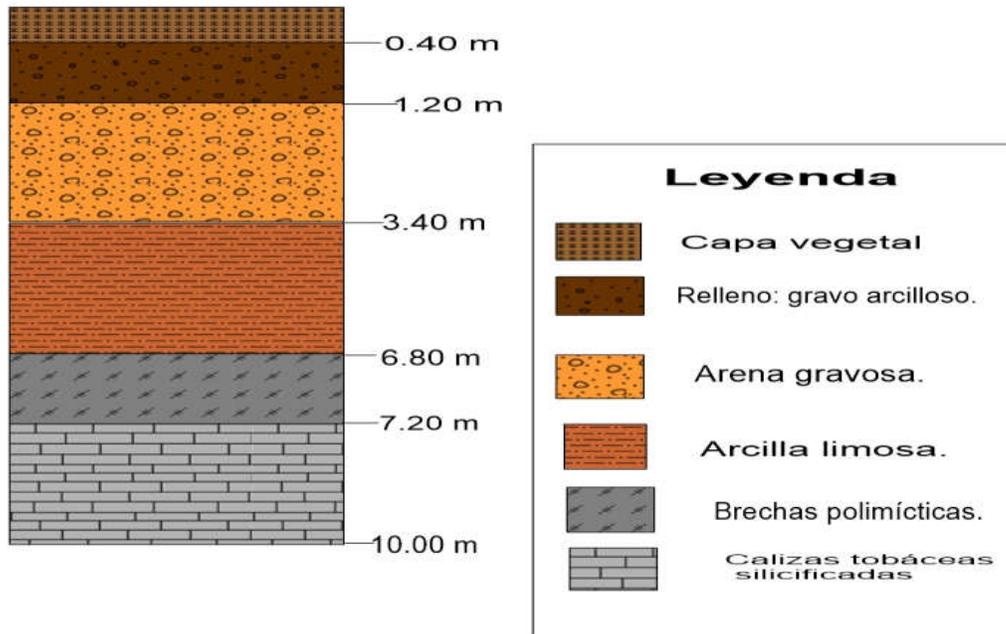


Figura 16 Columna lito estratigráfica esquemática de la formación Pilón del municipio Pilón, de la provincia de Granma.



Columna Litoestratigráfica Esquemática, municipio Pilón

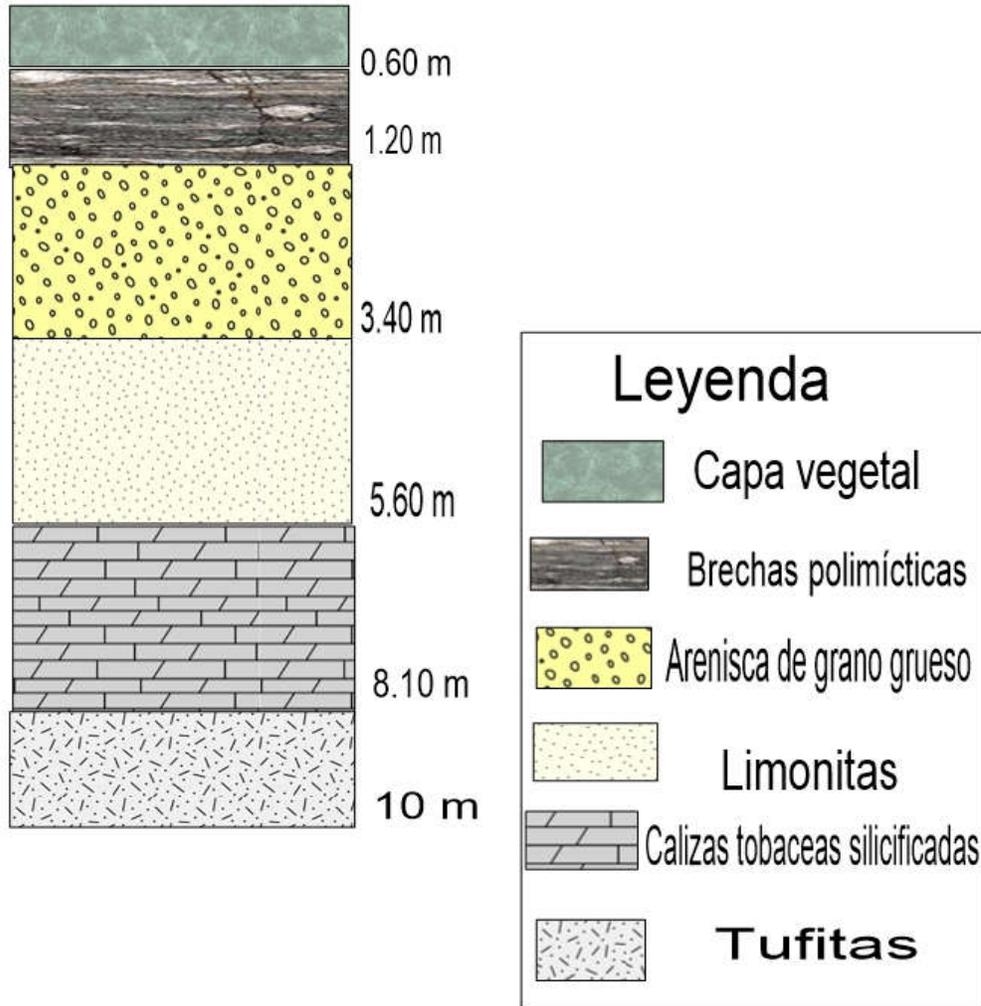


Figura 17 Columna lito estratigráfica esquemática de la formación Pilón del municipio Pilón, de la provincia de Granma

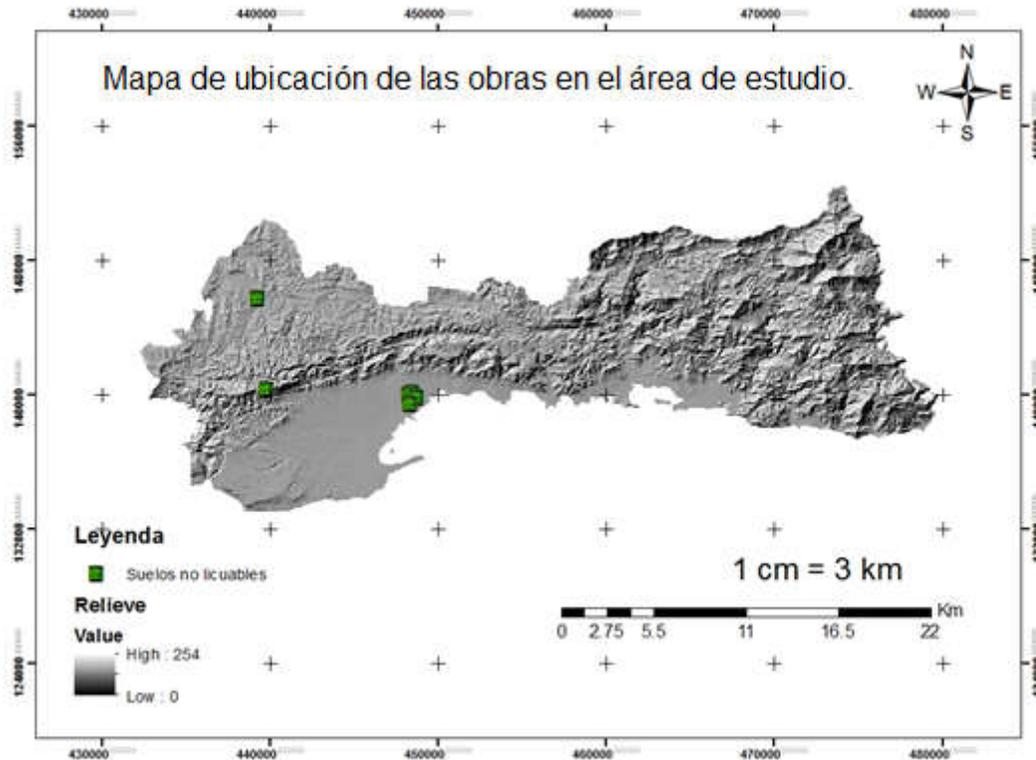


Figura 18: Mapa de peligro por licuefacción en la zona urbana del municipio Pílon, provincia Granma.

Conclusiones parciales para el municipio Pílon.

Los suelos del municipio Pílon, en su mayoría pertenecen a la Formación Pílon de edad Paleoceno-Eoceno Inferior. Están presentes las areniscas, limonitas, calizas con intercalaciones de tobas, intercalaciones carbonatadas bien silicificadas por lo que presenta una buena compactación. También pertenecen a los depósitos innominados del Cuaternario los cuales están compuestos por cantos rodados, gravas, arenas, arcillas derivadas de la erosión fluvial y regional. Los mismos están clasificados según el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS) como (GC) que es grava o arena con cantidad apreciable de fino, muy plástico en combinación con los símbolos genéricos, también se pueden clasificar como (CL) las cuales son arcillas de baja plasticidad que es favorable debido a su baja plasticidad. La presencia del nivel freático no se pudo detectar a la profundidad de las calas realizadas, por lo que no es probable la ocurrencia de este fenómeno ya que no se encuentra cerca de la superficie las aguas subterráneas. El porcentaje de



finos son mayores del 15 %, la cohesión es 12.16 kPa y el límite líquido en la mayoría de las obras es superior al 35 %. Los valores de N de SPT se encontraban en la mayoría de los casos superiores a las normas, mayores a 30 golpes/30 cm, en menos de 10 metros de profundidad de la capa estudiada, por lo que son valores muy altos, lo que indican que la consistencia es de media a alta. Estas características no son favorables para que el suelo en estos puntos estudiados licue.

En este caso no se realizó el análisis del cálculo del factor de seguridad para la licuefacción (FSL), puesto que, no todas las obras estudiadas presentaban las propiedades físicas y mecánicas necesarias para el cálculo, tales como: profundidad del nivel freático, saturación, compactación, coordenadas etc. y ninguno de los estratos analizados resultó con condiciones, por lo que no es necesario realizar el cálculo.

Solo en algunos puntos específicos consideramos que podría ocurrir el fenómeno, lo que no descarta la posibilidad tras la ocurrencia de un terremoto superior a los 7.50 y en determinadas condiciones de los depósitos innominados.

Análisis global de los resultados

El municipio Pílon, provincia Granma, desde el punto de vista geológico se encuentra ubicado dentro de la región de la cuenca Pílon. La principal formación que podemos encontrar en la región es Pílon y los depósitos innominados del Cuaternario. Las principales litologías encontradas en el área de estudio son: tufitas, brechas, areniscas vulcanomícticas y polimícticas, arenisca de grano grueso, grauvacas, limolitas y calizas con fragmentos de rocas vulcanógenas y tobas.

El nivel freático es muy variable dependiendo en gran medida de la época del año en que se encuentre, siendo mayor en los períodos de lluvia y menor en épocas de sequías; además de la influencia del relieve y del coeficiente de infiltración. Según los informes ingenieros geológicos revisados este alcanza en ocasiones niveles en la mayoría de los casos encontrándose entre 0.60 y 8.40 m de profundidad.

Este municipio se encuentra muy próximo a la principal zona sísmo generadora activa del país, donde han ocurrido innumerables sismos con epicentros en el área



de la propia ciudad o muy cercanas a ellas, provocando daños a las estructuras, etc.

Según el mapa de zonificación sísmica propuesto para Cuba en la Norma Cubana para la construcción de obras sismo resistentes; este municipio se encuentra en la zona 4, de alto riesgo sísmico, que puede ocasionar daños a las construcciones debiéndose tomar medidas sismo resistentes 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.

Las áreas más propensas a licuar son aquellas que se encuentran fundamentalmente en la llanura de inundación de los ríos o en depósitos aluviales y palustres, donde se encuentran los sedimentos más recientes, no se descarta que ante la ocurrencia de un terremoto que exceda los 7.5 grados ocurra el fenómeno en algunas áreas no identificadas en este estudio dada que los datos son puntuales.



CONCLUSIONES

- Las condiciones ingeniero geológicas de los suelos estudiados de la zona urbana del municipio Pílon en sentido general no son favorables para que ocurra la licuefacción dado que está compuesto por materiales de compactación alta o roca bien consolidada, el nivel freático se encuentra entre 7 y 12 metros de profundidad, baja saturación y alta concentración de partículas finas.
- A partir del sistema de indicadores aplicado se obtuvo estratos compuestos por arcilla de baja plasticidad (CL), areniscas compactas (GC), calizas silicificadas (Calizas) de la formación Pilon de edad Paleoceno- Eoceno Medio, lo que permitió evaluar el potencial de licuefacción en los escenarios propuestos del asentamiento poblacional.
- Las áreas con posibles condiciones ingeniero geológicas favorables para licuar son las arcillas de baja plasticidad (CL), encontrándose sobre sedimentos pertenecientes a los depósitos innominados del Cuaternario en la cuenca Pílon.



RECOMENDACIONES

- Tener en cuenta para el ordenamiento territorial y planificación física futura si se aumentara el asentamiento poblacional, las características de las construcciones, ya que, si se encuentra sobre los depósitos innominados del Cuaternario, hay que realizar un estudio detallado de las propiedades físico-mecánicas, nivel freático, pues está compuesta por sedimentos aluviales jóvenes.
- Realizar un estudio más detallado de peligro, vulnerabilidad y riesgo en el municipio ya que se encuentra sobre una zona sismo generadora.
- Socializar la información mediante visitas a los diferentes centros de Gestión para la Reducción del Riesgo, Consejos de Asambleas Municipales y Provinciales.
- Tomar medidas para la construcción ya que pueden existir depósitos licuables y debe construirse en base a la norma sismo resistente.



BIBLIOGRAFÍA

- ALFARO. “Comparación entre la metodología para evaluar el potencial de riesgo de licuefacción y los catastros realizados luego del terremoto de 2010 en concepción. Trabajo de diploma. Universidad del Bio.2013.
- AUTORES, C.D. Léxico estratigráfico de Cuba. En MINAS, I.D.G.Y.P.S.G.D.C.M.D.E.Y., 2013, vol. 3.
- BAUTA - TORRES, W. 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 2017.Trabajo de diploma.
- CETIN, K.O.; et. al. Standard penetration test-based probabilistic and deterministic assessment of seismic soil liquefaction potential. *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, 2004, 130(12): 1314-1340.
- CHUY, R. Modelo del peligro sísmico de la provincia de Santiago de Cuba. *Archivos CENAIIS. Santiago de Cuba*, 2010.
- CHUY, T.-J. Macrosísmica de Cuba y su aplicación en los estimados de peligrosidad y microzonación sísmica. *Fondos de la Fundación “García Siñériz”, España*, 1999.
- ECURED., C.D. Provincia Granma. En: *Ecured* [en línea]. 2018a. Disponible en:<[<http://www.ecured.cu/Provincia_de_Granma_\(Cuba\)>](http://www.ecured.cu/Provincia_de_Granma_(Cuba))>.



- FERNÁNDEZ - DIÉGUEZ, L. Licuefacción de los suelos generada por sismos de gran magnitud. Caso de estudio Caimanera y Santiago de Cuba. Tesis de maestría. ISMM. Moa, 2015.
- FERNÁNDEZ - DIÉGUEZ, L.B.-C., IRAYASELIS; GUARDADO - LACABA, RAFAEL; OLIVA ÁLVAREZ, RICARDO Susceptibilidad a la licuefacción de los suelos en la ciudad de Caimanera, Guantánamo. En Minería y Geología. 2017.
- FERNÁNDEZ, B. 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, 2000.
- GALVÁN, L. Procedimiento para la gestión y reducción de riesgos geológicos en la provincia Santiago de Cuba. Tesis doctoral. Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa, 2014.
- GONZÁLEZ DE VALLEJO, L.I. Ingeniería geológica., 2002. 744.
- GUASCH, F y ARANGO – ARIAS, E; ZAPATA – BALENQUE,J; ESCOBAR – PEREZ,E; HERNANDEZ – SURO, E.; ARTIMEZ – NUMA, A; VEGA – CUZA,I; DIEZ – ZALDIVAR, E. Monografía: Tierra que tiembla, 2002.
- GUTIÉRREZ - SÁNCHEZ, A. Evaluación de riesgo por licuefacción en los municipios de Guamá, III Frente y Contramaestre de la provincia de Santiago de Cuba 2017.
- HERRERA - DELFÍN, I. Delimitación de escenarios susceptibles a la licuefacción inducida por terremotos de gran magnitud en el consejo popular Guillermón Moncada, municipio Santiago de Cuba. ISMM, geologia, 2015.
- IWASAKI, T. A practical method for assessing soil liquefaction potential based on case studies at various sites in Japan. En: Proc. Second Int. Conf. Microzonation Safer Construction Research Application, 1978. 1978, p. 885-896.
- NORMA CUBANA PARA CONSTRUCCIONES SISMORESISTENTES 46. Requisitos básicos para el diseño y construcciones,2 013.



- IWASAKI, T. Soil liquefaction studies in Japan: state-of-the-art. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 1986, 5(1): 2-68.
- LAVAÑINO - FLEITA, D. Identificación de escenarios susceptibles a la licuefacción inducido por terremotos de gran magnitud en el municipio Santiago de Cuba 2017.
- LIAO, S.S. y R.V. WHITMAN. Overburden correction factors for SPT in sand. *Journal of Geotechnical Engineering*, 1986, 112(3): 373-377.
- OBANDO, T. 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 UNÍA (Huelva, España). Huelva. 900pág, 2009.
- ORDAZ-HERNÁNDEZ, A.; et. al. La susceptibilidad a la licuefacción en el emplazamiento de la ciudad de San Cristóbal, Cuba Occidental. *Minería y Geología*, 2013, 29(2).
- PARELLADA - REYES, O. 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, 2016.
- REINOSO – MERCANTETY, D. Determinación de escenarios susceptibles a la licuefacción inducido por terremotos de gran magnitud en los municipios Baracoa, Yateras, El Salvador y Niceto Pérez de la provincia de Guantánamo. 2016
- ROBERTSON, P.K. y R.G. CAMPANELLA. Liquefaction potential of sands using the CPT. *Journal of Geotechnical Engineering*, 1985, 111(3): 384-403.
- RODRÍGUEZ, L.M.; F.A. AUDEMARD y J.A. RODRÍGUEZ. CASOS HISTÓRICOS DE LICUACIÓN DE SEDIMENTOS INDUCIDOS POR SISMOS EN VENEZUELA DESDE 1530. 2012
- SEED, H. y I. IDRIS. Ground motions and soil liquefaction during earthquakes: engineering monographs on earthquake criteria, structural design, and strong motion records. MNO-5. Earthquake Engineering Research Institute, Oakland, Calif, 1982.

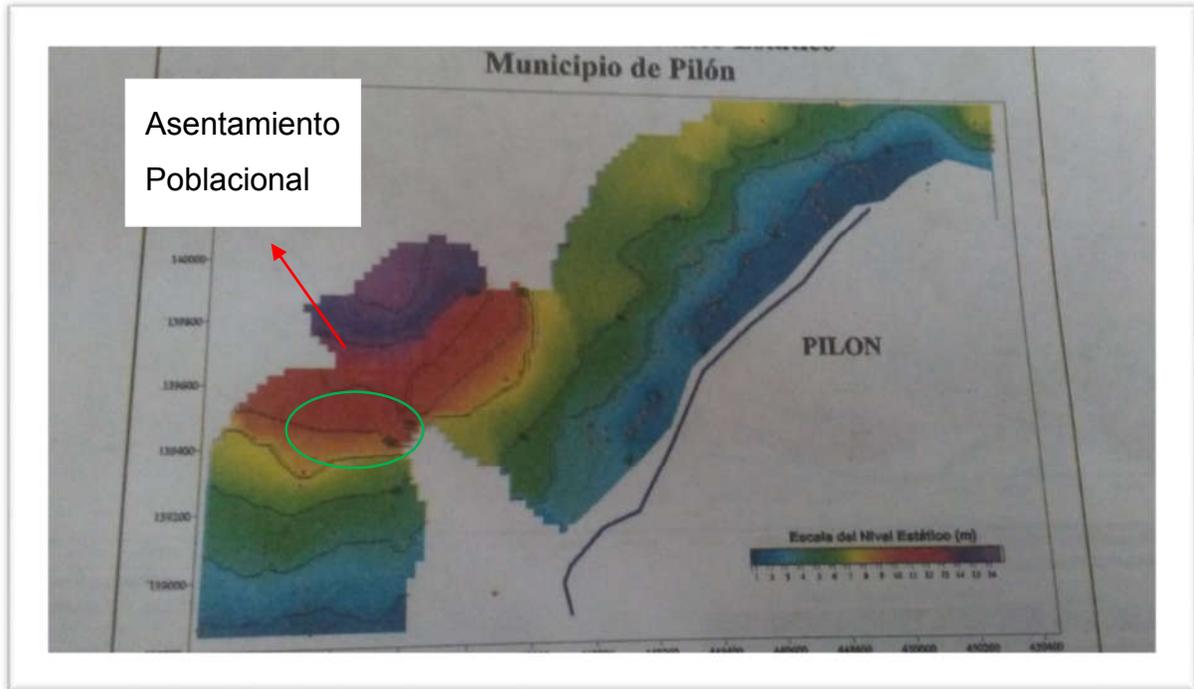


- SEED, H.B. Special lecture: Evaluation of the dynamic characteristics of sands by in-situ testing techniques. *Revue française de géotechnique*, 1983, (23): 91 -99.
- SEED, H.B. y P. DE ALBA. Use of SPT and CPT tests for evaluating the liquefaction resistance of sands. En: *Use of in situ tests in geotechnical engineering*. ASCE, 1986, p. 281 -302.
- SEED, R.B.; et. al. Recent advances in soil liquefaction engineering: a unified and consistent framework. En: *Proceedings of the 26th Annual ASCE Los Angeles Geotechnical Spring Seminar: Long Beach, CA*. 2003.
- TOKIMATSU, K. y Y. YOSHIMI. Empirical correlation of soil liquefaction based on SPT N-value and fines content. *Soils and Foundations*, 1983, 23(4): 56-74.
- VICEDIRECCIÓN TÉCNICA, C. SISMICIDAD REGISTRADA EN EL TERRITORIO NACIONAL EN EL AÑO 2017 Y ESTADO DE LA RED DE ESTACIONES DEL SERVICIO SISMOLOGICO NACIONAL. 2018.
- WANG, W. Some findings in soil liquefaction. *Earthquake Engineering Department, Water Conservancy and Hydroelectric Power Scientific Research Institute*, 1979.
- WIKIPEDIA, C.D. Provincia de Granma. En: *Wikipedia, La enciclopedia libre*. 60. [en línea]. 2018a. Disponible en: <https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Especial:Citar&page=Provincia_de_Granma&id=99049527>.
- YOUD, T.L. y I.M. IDRIS. Liquefaction resistance of soils: summary report from the 1996 NCEER and 1998 NCEER/NSF workshops on evaluation of liquefaction resistance of soils. *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, 2001, 127(4): 297-313.



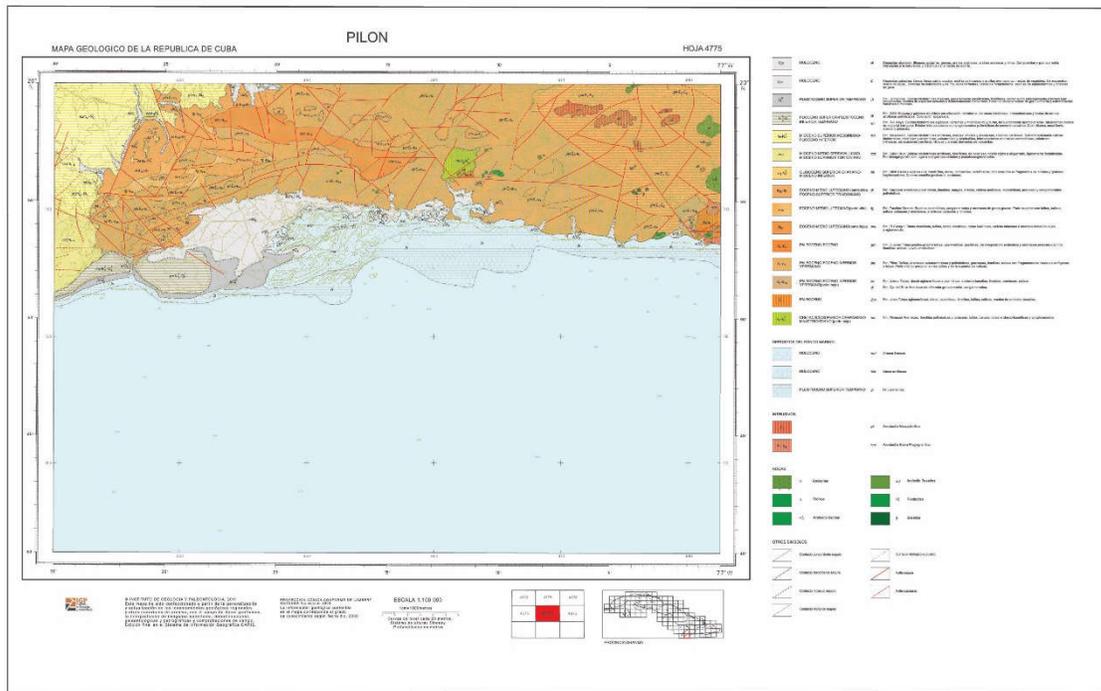
ANEXOS

Anexo 1. Imagen del mapa de nivel freático del municipio Pílon. Tomado: (Guasch, et.al, 2002)





Anexo 2. Mapa de Formaciones Geológicas del municipio Pílon, (IGP), Escala 1:100 000 en 2011.



Anexo 3: Tabla de propiedades físico – mecánicas de las obras estudiadas.

Obra	Capas	Nivel Freático	N de SPT	LL	LP	% F	% A	Wn (%)	PEH (Kn/m ³)	PES (kN/m ³)	C(k Pa)	Descripción de las capas
Torre de transmisión Mamey	de El relleno Capa1	no se cortó	Rec/ Completa.					27	25	24.3		



Sala de rehabilitación del policlínico.	Capa 1 Capa 2	no se corto	Rec/Comp leta.	45 NP	2 N P	2 61 10	30 23	18 7	16.5 19.5	14 18.2	70 5	CL GS
Vivienda para médicos Rto Los Edificios	Capa vegetal Capa1/ Capa2/	no se corto		15 17	29 36	21 5 19	2 30	28 14		20.2 17.7	15 42	GC CL
Puente sobre el río Cilantro	Capa1/ Capa2/ Capa3/m	1.70										
Secundaria Básica	Capa1/ Capa2/ Capa3/corto	no se corto	Rec/Comp leta.									CL GS SM
Viviendas en Pilón	Capa vegetal Capa1/corto	no se corto		45 43	43 35	19		11. 5		18.2 19.5	0.1	GC
Escuela de retardo psíquico en Pilón	Capa vegetal Capa1/			30	20	61	8 17	25 14	6 2.72	2.71 1.5	1.6 0.3	GC GC CL



	Capa2/ Capa3/												
Circulo Infantil	Capa vegeta no se Capa1/ corto	60	34	21	34	32	16	2.6	1.68				GC
Tanque elevado hospital Pilón	Capa vegetal Capa1/ no Capa2/ se Capa3/ corto			17	30	42	60	40	13	1.81	1.6	0.6	CL CL SM
					19	N	69	31	14	1.71	1.52	0.1	
		41	NP	P	26	84	6.3						
puente sobre el rio mota.	relleno capa vegetal 0.60- 0.80 Capa1 0.90- Capa2 5.30 Capa3 m												
puente sobre rio purgatorio (Calabaza). Pilón	Rellen Capa1 Capa2 3- Capa3 4m	28	49	21	21	29	25	19.4	15.5	0.5			
						35	29	25					



Ampliación del Centro Telefónico	Rellen												
	Capa1		Rec/		24	8	44	23					
	Capa2	8.30	Comp	46	26	31	13	23.					
		8.40	leta	52				4					
Almacén de víveres en Pilón	Relleno	no se											
	Capa1	corto	30	31	20								
Puente s/rio Purgatorio Km 27 carretera Pilón - Stgo	capa1				21						0.1	CL	
	capa2	no se	Rec/	57	19			5.4	16.2	26.3	5	SW	
	capa3	corto	Comp	26	27			6.3	26.6	18.4	0.1	CL	
			leta	47				5.4	27.4	16.4	5		
											0.6		



Anexo 4. Imagen de las grietas de las casas en Pílon cuando el terremoto del 19 de febrero de 1976. Tomado: Guasch, et.al, en 2002.

