

Trabajo de Diploma en Opción al título de Ingeniero Geólogo

TÍTULO: Identificación de escenarios susceptibles a la licuefacción inducido por terremotos de gran magnitud en el municipio Santiago de Cuba.

AUTOR: DIANELIS LAVAÑINO FLEITA

TUTOR: MSC. LIUSKA FERNÁNDEZ DIÉGUEZ

DECLARACIÓN DE AUTORIDAD

Yo: Danelis Lavañino Fleita autor de este trabajo de diploma y Liuska Fernández Diéguez tutor de la tesis, declaramos la propiedad intelectual de este trabajo al departamento de Geología y Minería del Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa para que disponga de su uso cuando estime conveniente.

Danelis Lavañino Fleita

Ms. C. Liuska Fernández Diéguez



DEDICATORIA

- A MI MADRE YAYSET FLEITA TORRES
- A MI PADRE JOAQUÍN JORGE LAVAÑINO PUPO
- A TODA MI FAMILIA
- A MIS AMIGOS
- A MIS PROFESORES
- A MIS COMPAÑEROS DE GRUPO

AGRADECIMIENTOS

-A MIS PADRES POR TODO EL APOYO INCONDICIONAL QUE ME HAN BRINDADO, AMOR, DEDICACIÓN Y SOBRE TODAS LAS COSAS LA PACIENCIA Y CONFIANZA QUE SIEMPRE ME HAN TENIDO.

-A TODA MI FAMILIA POR BRINDARME SIEMPRE TANTO AMOR Y CONFIANZA, EN ESPECIAL A MIS ABUELOS Y MI HERMANO.

-A MIS AMISTADES (KARINA, LISANDRA), POR LA DEDICACIÓN Y CARIÑO QUE HAN SABIDO BRINDARME DE MANERA INCONDICIONAL.

-A MIS COMPAÑEROS DE GRUPO (DANIEL, CARLOS LUIS, NORGES, WILFREDO, ADRIAN, JULIO, LUIS, ENMANUEL, LUIS ALBERTO, ARIAN, ALISNEYDEYS, KEILÍN, DAYANET, LISEBEL, GEYSI, ARIANNA, IRINA, YUSBEL, DANAY, MARIELA, MAIDELÍN).

-A ERNESTO POR EL CARIÑO Y APOYO INCONDICIONAL QUE HA SABIDO BRINDARME.

A MIS COMPAÑEROS DEL CUARTO (VIRGEN, ANNIÉ, GRECHER) POR ACOMPAÑARME EN ESTA MARAVILLOSA AVENTURA LLAMADA UNIVERSIDAD.

-A MI TUTORA LIUSKA FERNÁNDEZ DIÉGUEZ POR LA DEDICACIÓN BRINDADA A ESTE TRABAJO.

-A TODOS LOS PROFESORES QUE HAN CONTRIBUIDO A MI FORMACIÓN (JUANA, ANGELA, ANIA, NICOLÁS, YURISLEY, DIOELIS).

A TODOS, GRACIAS !!!!!!!!!!!



PENSAMIENTOS

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

Walt Disney

Resumen.

El presente trabajo se realizó para identificar los escenarios susceptibles a la licuefacción inducido por terremotos de gran magnitud en el municipio Santiago de Cuba en la provincia de igual nombre. Respondió a la necesidad de conocer las condiciones ingeniero-geológicas del municipio, para así evaluarlas. Se utilizó 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 propuesto por Fernández, D, 2015 y el cálculo del factor de seguridad. Como resultado se identificaron los estratos de arcillas de baja plasticidad (CL) y limos de baja plasticidad (ML), de las formaciones El Caney y Pílon, los que resultaron susceptibles a la licuefacción de los suelos en el municipio Santiago de Cuba para sismos de magnitudes iguales o mayores a 6. Los suelos más susceptibles se encuentran ubicados en las cercanías de la bahía.

Abstract.

The present work was carried out to identify the scenarios susceptible to the liquefaction induced by earthquakes of great magnitude in the municipality Santiago de Cuba in the province of the same name. He responded to the need to know the geological-engineering conditions of the municipality, in order to evaluate them. 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 system of indicators proposed by Fernández, D, 2015 and the calculation of the safety factor. As a result, the layers of low plasticity (CL) and low plasticity silts (ML) of the El Caney and Pilón formations were identified, which were susceptible to the liquefaction of soils in the municipality of Santiago de Cuba for earthquakes of Magnitudes equal to or greater than 6. The most susceptible soils are located in the vicinity of the bay.

Índice.

Introducción.....	1
MARCO TEÓRICO CONCEPTUAL Y ESTADO DEL ARTE.....	3
CAPÍTULO I: CARACTERÍSTICAS FÍSICO GEOGRÁFICAS Y GEOLOGICAS DE LA REGIÓN DE ESTUDIO. 23	
Introducción.....	23
1.1Características generales del municipio: Santiago de Cuba.....	23
1.1.2 Ubicación Geográfica.....	23
1.1.3 Relieve.....	24
1.1.4 Clima.....	24
1.1.5 Geomorfología.....	25
1.1.6 Características Hidrogeológicas.....	26
1.1.7 Geología Regional.....	27
1.1.8 Principales formaciones geológicas presentes en la región.....	28
1.1.9 Sismicidad y régimen sísmico.....	30
1.1.10 Desarrollo económico social.....	33
CAPITULO II: METODOLOGÍA PARA ESTUDIAR EL POTENCIAL DE LICUEFACCIÓN.....	35
Introducción.....	35
2.1 Metodología de la investigación.....	35
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, D, 2015).	36
2.2.1 Condiciones geológicas.....	37
2.2.2 Sismicidad.....	37
2.2.3 Profundidad del Nivel Freático.....	38
2.2.4 Condiciones ingeniero geológicas.....	38
2.2.5 Cálculo del Factor de seguridad para la licuefacción.....	39
2.2.6 Cálculo del Coeficiente de Resistencia Cíclica CRR.....	42
2.3 Metodología aplicada para el análisis de los indicadores para el estudio de la susceptibilidad a la licuefacción en el área de estudio.....	43
2.3.1 Análisis de las condiciones geológicas del área de estudio.....	43
2.3.2 Análisis del comportamiento del nivel freático en el área de estudio.....	44
2.3.3 Análisis de las condiciones ingeniero geológicas.....	44
2.3.4 Análisis del cálculo del factor de seguridad para la licuefacción (FSL).....	44

CAPITULO III: EVALUACION DEL SISTEMA DE INDICADORES PARA DETERMINAR EL POTENCIAL DE LICUEFACCIÓN EN EL ÁREA DE ESTUDIO.....	46
Introducción.	46
3.1 Criterios para la selección de escenarios susceptibles a la licuefacción.	46
3.2 Validación del sistema de indicadores propuestos en el municipio Santiago de Cuba.	47
3.2.1 Condiciones geológicas.	47
3.2.2 Sismicidad.....	47
3.2.3 Características Hidrográficas.	49
3.2.4 Condiciones ingeniero-geológicas (Tabla 4).....	49
3.2.5 Cálculo de Factor de seguridad para la licuefacción.	50
3.2.6 Conclusiones parciales para Santiago de Cuba.	52
Conclusiones.	54
Recomendaciones.	55
Bibliografía.	56
Anexos	

Introducción.

Diversos son los fenómenos naturales o inducidos que conocemos: huracanes, sismos, deslizamientos e inundaciones etc. Pero uno de los más dramáticos, destructivos, además de polémico y menos explicado, es la licuefacción, que comenzó a hacerse notar a partir del terremoto de Niigata en 1964. Este término incluye todos los fenómenos donde ocurren excesivas deformaciones o movimientos como resultado de transitorias o repetidas perturbaciones de suelos saturados poco cohesivos (Perucca, Pérez, A. & Navarro, C, 2006). Nuestro país no está exento de estos riesgos, ya que las experiencias derivadas de las catástrofes de Santiago de Cuba 1932 nos convocan a no dejar de prestar atención a la sismicidad como una premisa de desastres para Cuba. Por lo que la siguiente investigación está encaminada al estudio de la licuefacción de los suelos en la provincia de Santiago de Cuba, específicamente en el municipio de Santiago de Cuba.

Problema de la investigación: Necesidad de identificar los escenarios susceptibles a la licuefacción en el municipio Santiago de Cuba a partir de evaluar las condiciones ingeniero-geológicas.

Objeto de estudio: Los suelos de los principales asentamientos poblacionales en el municipio Santiago de Cuba.

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

Objetivo general: Identificar los escenarios susceptibles en el municipio Santiago de Cuba a partir de evaluar las condiciones ingeniero geológicas que favorecen la ocurrencia de la licuefacción.

Objetivos específicos:

1. Determinar los valores de las propiedades físico-mecánicas vinculadas al fenómeno de la licuefacción en los suelos del municipio Santiago de Cuba.

2. Aplicar un sistema de indicadores geotécnicos y sismológicos que permitan determinar escenarios proclives a la licuefacción.
3. Identificar dentro de los escenarios susceptibles las principales formaciones geológicas con condiciones para la ocurrencia de la licuefacción.

Hipótesis:

Si se caracterizan los suelos a partir de las condiciones ingeniero-geológicas entonces será posible determinar el potencial de licuefacción ante un sismo de gran magnitud e identificar los escenarios susceptibles.

Novedad de la investigación:

Evaluación cuantitativa de los escenarios susceptibles a la licuefacción de los suelos en los principales asentamientos poblacionales en el municipio Santiago de Cuba.

MARCO TEÓRICO CONCEPTUAL Y ESTADO DEL ARTE.

La licuefacción del 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 desastrosos y peor explicados que pueden ser inducidos en depósitos por acciones sísmicas, las que van a provocar sacudidas aumentando la presión de agua en los poros, lo que reduce la tensión efectiva, y por lo tanto disminuye la resistencia al corte de la arena. Además, si existe una corteza de suelo seco o una cubierta impermeable, el exceso de agua puede a veces surgir en la superficie a través de grietas en la capa superior, arrastrando en el proceso arena licuificada, lo que produce borbotones de arena, comúnmente llamados "volcanes de arena". (Wikipedia, 2016)

Definiciones de licuefacción y suelos licuables.

- ❖ (Vallejo en 2002; tomado de Parellada, O, 2016) 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 horizontales de su masa, que se traducen en deslizamientos, o en grandes asientos.
- ❖ (Rodríguez, Audemard, & Rodríguez; tomado de Parellada, O, 2016) del Departamento de Ciencias de la Tierra, Fundación Venezolana de Investigaciones sismológicas 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.
- ❖ (Colectivo de Autores de la Sección de Sismología, Vulcanología y Exploración Geofísica, Geología. 2003. San Pedro, Costa Rica; tomado de Parellada, O, 2016). 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.

- ❖ La licuefacción de sedimentos es la “disminución de la resistencia al corte en un suelo no cohesivo saturado, debido al aumento de la presión intersticial durante un terremoto, pudiendo llegar a producirse la anulación de la presión efectiva entre sus partículas” lo que hace que el terreno fluya como si fuera un líquido. (Colectivo de Autores, 2012; tomado de Parellada, O, 2016)
- ❖ Según Rodríguez Pascua, 1997 (Tomado de Parellada, O, 2016) el suelo completamente saturado, con arenas sin cohesión, generalmente limpias, que pueden incluir algo de gravas pueden licuefactar durante la sacudida sísmica.

Factores que influyen en la licuefacción.

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

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

Factores que condicionan la ocurrencia de licuefacción. (Shadenet, 1990; tomado de Parellada, O, 2016)

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

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

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

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

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

6- Edad del depósito. Los suelos jóvenes (menos de 3,000 años) son débiles y no cohesivos, de modo que tienen mayor probabilidad de licuarse que aquellos más antiguos donde actuaron procesos como compactación y cementación que incrementaron su resistencia.

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

Condición de un suelo para que sea licuable.

Seed, B, and Idriss, M. (1982) consideran que un suelo puede licuar si:

- El porcentaje granulométrico en peso de partículas es menor de 0,005 mm, menor del 15 %.
- Límite Líquido (LL) menor 35 %.
- Humedad Natural (W), w/LL mayor de 0,9 %.

A este criterio se le conoció como criterio chino (Wang, W, 1979).

Estudio.

El limitado conocimiento relativo a este fenómeno se debe en gran parte a dos factores:

- Dificultad en observar sus características en condiciones reales.
- Complejidad del fenómeno, pues además de ser el resultado de una acción sísmica de carácter altamente variable, induce en el suelo un comportamiento notable no lineal e histerético con fuerte degradación de las características mecánicas del suelo de cada ciclo determinada por la generación de presiones neutras en la muestra bajo acción sísmica.

Uno de los problemas fundamentales es el conocimiento rudimentario sobre los mecanismos de rotura y deformación, asociados al fenómeno de la licuefacción; lo que limita el uso de ensayos elementales para estudiarlo.

- No existe una definición única para el fenómeno de la licuefacción.

Metodologías para el estudio de la licuefacción de los suelos.

Muchos investigadores han desarrollado metodologías para evaluar el riesgo de licuefacción de suelos basado en distintos ensayos de suelos, siendo las más utilizadas inicialmente el criterio chino modificado de (Wang, W, 1979) y el método de (Seed, B, and Idriss, M, 1982), y más recientemente (Youd, T 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 granos finos en el suelo.

En 2003 Raymond B. Seed y un grupo de investigadores de la Universidad de California en Berkeley, (Tomado de Parellada, O, 2016) 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, B et al.2003; tomado de Parellada, O, 2016), complementada con los estudios de (Cetin et al. 2004; tomado de Parellada, O, 2016). Esta metodología utiliza un valor N del ensayo SPT (Pruebas de penetración estándar) normalizado por profundidad y ajustado por la cantidad de finos para cuantificar la susceptibilidad del suelo a la licuefacción. Alarcón, 1989, (Tomado de Parellada, O, 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, T, 2009).

En Estados Unidos, (Seed, B et al, 1983) y (Seed, B. & De Alba, P, 1986) han presentado el método simplificado, en base a ensayos de penetración estándar y el cono holandés. En Japón, Tokimatsu, K. & Yoshimi Y. 1981, 1983 e Iwasaki et al, 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 1983, 1985; tomado de Parellada, O, 2016). La corrección de sobrecarga se realizó de acuerdo a (Liao S. y Whitman R.V, 1986).

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

Métodos utilizados para evaluar la susceptibilidad a la licuefacción.

Los métodos existentes para evaluar el potencial de licuefacción de los suelos pueden dividirse en tres grupos (Tomado de Parellada, O, 2016)

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, velocidad de propagación de ondas de corte, etc.), 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.

A causa de lo anterior, parece aconsejable, al menos desde el punto de vista de una aplicación práctica usual, la utilización de los métodos del tipo A prestando especial atención a aquellos basados en resultados de ensayos de penetración (SPT y CPT).

Dentro de estos métodos, los que son aplicables a obras nuevas (a partir del 2000) están bastante estudiados, y con ellos se han obtenidos resultados satisfactorios. No existiendo el mismo nivel de conocimiento en el caso de las aplicaciones a obras ya ejecutadas. (Obando, T, 2009). (Ver tabla 1)

Tabla 1: Clasificación de algunos métodos para evaluar el potencial de licuefacción, (Instituto de Investigaciones en salud de la población (PHRI), 1997; tomado de Parellada, O, 2016)

Evaluación de la resistencia a la licuefacción	Evaluación de los efectos sísmicos	Ejemplos de métodos de
	Magnitud Richter y distancia epicentral	Kuribayashi y Tatsuoka (1975) y Wakamatsu (1991)
Geomorfología		Kotoda <i>et al.</i> (1988)
Gradación/Valor de N-SPT		"Standard for regulation of hazardous materials por Fire Defense Agency" (1978)
Gradación/Valor de N-SPT	Máxima aceleración en la superficie del suelo	Especificaciones para puentes altos por Japan Road
Gradación/Valor de N-SPT	Máxima aceleración en la superficie del suelo y magnitud Richter	Recomendaciones para el diseño de cimentaciones de edificaciones por Architectural
Gradación/Valor de N-SPT	Modelo de esfuerzos totales	Técnicas estándar para puertos (facilidades y comentarios) por Japan Ports and Harbours
Prueba Triaxial Cíclica	Modelo de esfuerzos totales	Seed e Idriss (1967) Ishihara
Prueba Triaxial Cíclica	Modelo de esfuerzos efectivos	Finn <i>et al.</i> (1977) Iai <i>et</i>

Evidencias históricas del fenómeno de licuefacción de suelos.

El Terremoto del 18 de octubre de 1844 Salta (Argentina). Se produjo un sismo de magnitud 6,5 grados y 30 km de profundidad. Se produjeron daños en construcciones y se registraron fenómenos de licuefacción "hubo varios reventones de tierra: de algunas brotó agua, y de otras la tierra interior apareció en la superficie"(Toscano 1901; tomado de Parellada, O, 2016). Según otro relato, "La tierra se entreabrió en varios lugares, expeliendo grandes cantidades de agua y arena" (Diario El Orden 1884; tomado de Herrera, D, 2015). El sismo fue percibido en Tucumán, Catamarca, La Rioja y Santiago del Estero.

El Terremoto del 20 de marzo de 1861 Mendoza (Argentina). Se produjo un terremoto de magnitud 7,2 grados profundidad de 30 km con epicentro en la ciudad de Mendoza, el que produjo más de 12,000 muertos (Rickard 1863; tomado de Parellada, O, 2016), alrededor a 1,000 heridos y numerosas casas destruidas. La ciudad de Mendoza fue completamente devastada y se registraron fenómenos de licuefacción.

El 27 de octubre de 1894 se produjo un sismo con epicentro en el noroeste de la provincia de San Juan (Argentina), considerado por sus efectos grandes a distancias del foco, como el de mayor magnitud ocurrió en territorio argentino. Bodenbender, 1894 denomina este sismo "Terremoto Argentino" y le asigna una magnitud 8,2 grados, ubicando su epicentro al noroeste de San Juan y La Rioja. Una de sus particularidades fue la gran alteración del terreno aún en áreas muy alejadas al epicentro, a más de 200 km de distancia. Se produjeron deslizamientos y fenómenos de licuefacción, agrietamiento del terreno, volcanes de arena y salida de agua en forma de chorros en los terrenos saturados de agua y sin cohesión. Bodenbender le asigna una importancia fundamental a la presencia de agua subterránea en la formación de estas estructuras y establece que estos efectos se producirían en los suelos de los valles y llanuras formados por depósitos blandos de arenas, arcillas y rodados con el agua subterránea a poca profundidad. La licuefacción fue uno de los efectos principales de todos los terremotos ocurridos

en la región. Las grietas, volcanes de arena, derrames, han sido muy abundantes en áreas distantes hasta 260 km del epicentro, y afectaron áreas de hasta 4000 km². (Tomado de Perucca et al, 2006).

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 9,2 grados, con duración de 3 minutos golpeó Prince William Soundo siendo afectado por la licuefacción del suelo más menos a 500,000 Km² de superficie.

Niigata (Japón) en el año 1964, sometido a sismo de considerable magnitud ocasionando daños físicos en puente Showa debido a la expansión lateral del suelo.

Chimbote, Perú, 31 de mayo de 1970, un sismo de magnitud 7,8 grados a una profundidad focal de 45 km a unos 50 km costa a fuera al oeste de Chimbote. Con una intensidad de VI provocó el desplazamiento lateral del terreno en depósitos deltaicos y de playa. Agrietamiento del terreno y compactación diferencial en el centro de Chimbote además de volcanes de arena y eyección de agua.

Loma Prieta, San Francisco (USA) en el año 1989, que bajo influencia de terremoto de magnitud 7,1 grados ocasionó que los suelos se licuasen, interrumpiendo la funcionalidad del Puerto de Oakland, y daños en numerosas tuberías subterráneas en distintos distritos de San Francisco.

Rioja (Perú), el 29 de mayo de 1990, un terremoto de magnitud 6,0 grados e intensidad VII causó la inestabilidad y erosión de los suelos en los taludes, asentamientos diferenciales y amplificación de suelos y deslizamientos.

Las Filipinas, particularmente, en ciudad Dagupan en el año 1990, sujeto a sismos de magnitud 7, 7 grados, causó colapsos e inclinaciones de edificaciones físicas, y puentes inhabilitados en sus terraplenes debido a la expansión lateral de los sedimentos.

Valle de la Estrella (Costa Rica), en el año 1991, abatido por terremoto de 7,4 grados de magnitud, en que obras viales, particularmente puentes, fueron perjudicados por expansión lateral de los sedimentos.

Mayomba (África), 4 de abril de 1991, un terremoto de magnitud 6,5 grados causó la inestabilidad y erosión de los suelos en los taludes, asentamientos diferenciales así como la amplificación de suelos y deslizamientos.

El 12 de enero de 2010 en Haití, un terremoto de magnitud 7,0 grados, con epicentro a unos 15 Km al suroeste del centro de Puerto Príncipe y con hipocentro a unos 10 Km 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 existentes 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 que no tuvieron tiempo para salir, ni para protegerse.(Figura 1)



Figura 1: Izquierda. Perfil de los suelos arenosos arcillosos del valle de la Ciudad de Puerto Príncipe, generador de altas intensidades durante el proceso sísmico. Derecha. Se muestra una vista aérea, en planta del terreno, donde todas las viviendas sufrieron grandes daños provocados por su asentamiento en suelos licuables de la ciudad. (Tomado de Herrera, D, 2015)

Reportes históricos de licuefacción de los suelos en Cuba.

Las investigaciones sismológicas de Cuba sitúan a la provincia Santiago de Cuba como la de mayor peligro sísmico del territorio nacional. Más del 60 % de los sismos perceptibles y fuertes reportados en el país han tenido su epicentro en Santiago de Cuba (Chuy, R et al., 2002; tomado de Herrera, D, 2015), siendo sacudida por más de 1000 sismos perceptibles desde el año 1528 hasta la fecha (Chuy, R, 2010.). A tales efectos se recuerdan en el municipio Santiago de Cuba y más específicamente en su ciudad cabecera, los grandes terremotos ocurridos el 3 de febrero de 1932, magnitud 6,75 grados en la escala Richter, provocó la licuefacción de la calle La Alameda (Chuy, R, 1999; tomado de Herrera, D, 2015) y el 8 de agosto de 1947, donde se reportaron serios daños en la ciudad de Santiago de Cuba, fundamentalmente en los alrededores de la bahía. (Chuy, R et. al, 2002; tomado de Herrera, D, 2015).



Figura 2: Foto. Licuefacción de los suelos en calle La Alameda, en Santiago de Cuba. Terremoto del 3 de febrero de 1932. Tomado de Herrera, D, 2015

Terremoto del 18 de octubre de 1551 ubicado en Bayamo, los reportes históricos argumentan la ocurrencia de la licuefacción (Cotilla & Córdoba, 2010; tomado de Reinoso, D, 2016) 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 de Guacanayabo. Los reportes históricos deben ser considerados como un área potencial de licuefacción para futuros terremotos.

Investigaciones realizadas en Cuba.

Nuestro país no ha estado exento a la ocurrencia de licuefacción, ya que existen ambientes sedimentarios propicios para que se manifieste este fenómeno por sollicitación sísmica en cercanía de los grandes sistemas de fallas activas que cruzan la región oriental de Cuba, donde se ubican ciudades de gran importancia. El fenómeno de licuefacción en épocas pasadas causó grandes daños en algunas poblaciones, como la ciudad de Santiago de Cuba 1932 y en Bayamo 1947. Para corroborar la posible ocurrencia de este fenómeno en la región oriental de Cuba se realizaron investigaciones como la tesis de maestría (Fernández, B, 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, 2013; tomado de Parellada, O, 2016) 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, 2000; tomado de Herrera, D. 2015).

En el trabajo “Zonación preliminar de la licuefacción de los suelos en la región de Cuba Oriental” (Rosabal, 2001; tomado de Herrera, D, 2015) 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, H. 2013; tomado de Herrera, D, 2015), 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 obtenidos fueron de acuerdo con la aplicación del criterio de Brandes (2003); la ciudad de San Cristóbal se emplaza mayormente sobre sedimentos no susceptibles a licuar (93 % de la superficie), los sedimentos medianamente susceptibles cubren el 6 % del área y los susceptibles apenas el 1 %. De forma general, solo en pequeños sectores coincidieron las dos condiciones (límite líquido y fracción de arcilla) para catalogarlos como suelos susceptibles. En estos sectores la columna de suelos está conformada, predominante por arenas, formando estratos de hasta dos metros de espesor, intercalados con lentes de arcilla de 1,5 m. Ligeramente más propagados espacialmente se encuentran los suelos medianamente susceptibles. Estos coinciden aproximadamente con las terrazas de inundación del río San Cristóbal, en el extremo noreste del área, aunque también se identificaron en algunos sectores dentro de la Fm Guane.

En el trabajo de diploma titulado “Procedimiento para la gestión y gestión de riesgos geológicos en la provincia de Santiago de Cuba por (Galván, L, 2014) propone 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, D, 2015) titulada “Delimitación de escenarios susceptibles a la licuefacción inducido por terremotos de gran magnitud en el consejo popular Guillermón 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 dando como resultado un mapa de susceptibilidad a la licuefacción a partir de interpretar factores como geología, nivel freático y las propiedades físicas y mecánicas de los suelos, 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 mayor al 30 %, densidades secas menores de $13,50 \text{ kN/m}^3$, con pesos específicos que oscilan en el rango de $(26,60 \text{ a } 27,00) \text{ kN/m}^3$ y resistencia a la penetración dinámica de 4 a 6 golpes por cada 30 cm de penetración SPT (Pruebas de penetración estándar), 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(orgánico de baja plasticidad) y OH(orgánico de alta plasticidad). 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 grados 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, D, 2015), también se realiza un estudio del municipio de Caimanera, con el objetivo de evaluar las condiciones ingeniero geológicas del suelo 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 los 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 inducido por terremotos de gran magnitud en la zona sur de la Provincia Guantánamo por (Parellada, O, 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, D, 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 inducido por terremotos de gran magnitud en los municipios Baracoa, Yateras, El Salvador y Niceto Pérez de la provincia de Guantánamo por (Reinoso, D, 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, D 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 areno 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, D 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.

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

La región oriental es la de mayor peligro sísmico del territorio cubano, se presenta en detalle la sismicidad registrada en esta porción del país. La falla activa Oriente y la falla Norte de la Española constituyen las principales fallas donde pueden ocurrir sismos fuertes que afecten el territorio oriental de Cuba. A estas estructuras se relaciona la principal actividad sísmica registrada en esta región, tanto en magnitud como en frecuencia. En las figuras 3 y 4 se representa la sismicidad registrada en la región del Caribe.



Figura 3: Sismicidad del Caribe y Centroamérica en los últimos 10 años.

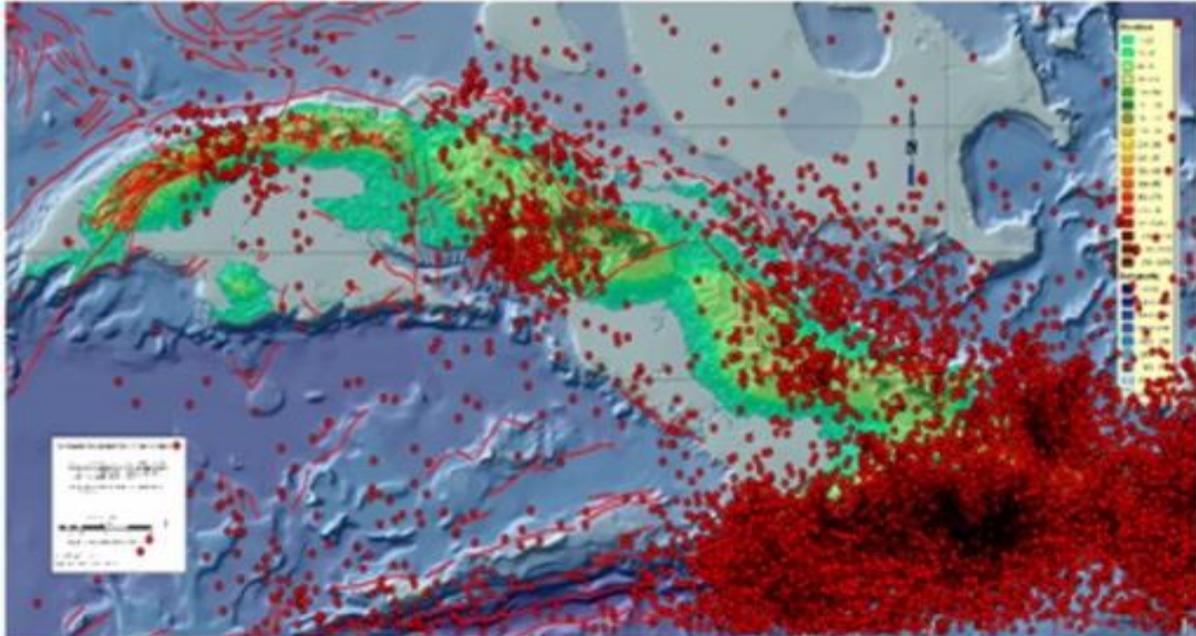


Figura 4: Sismos registrados desde 1998-2014. Fuente Informe del CENAIIS.(Tomado de Herrera, D, 2015)

El comportamiento de la ocurrencia de terremotos de magnitud mayor a 5 en la escala Richter desde el año 1900 hasta la fecha en función del tiempo se puede observar en la figura 4 y donde se aprecian los sismos más significativos. En el mismo se aprecia que desde los años 1932 y 1947 no ocurre en Santiago de Cuba un sismo de magnitud superior a 6. Para los sismos que ocurren en esta parte del país se ha establecido un ciclo sísmico de terremotos fuertes de entre 80 y 100 años aproximadamente. Esto significa que un sismo fuerte que afecte a esta parte del país puede ocurrir en cualquier momento, debido a la energía acumulada desde los últimos sismos ocurridos en la primera mitad del siglo pasado. (Guasch, F & Oliva, R, 2014). (Figura 5).

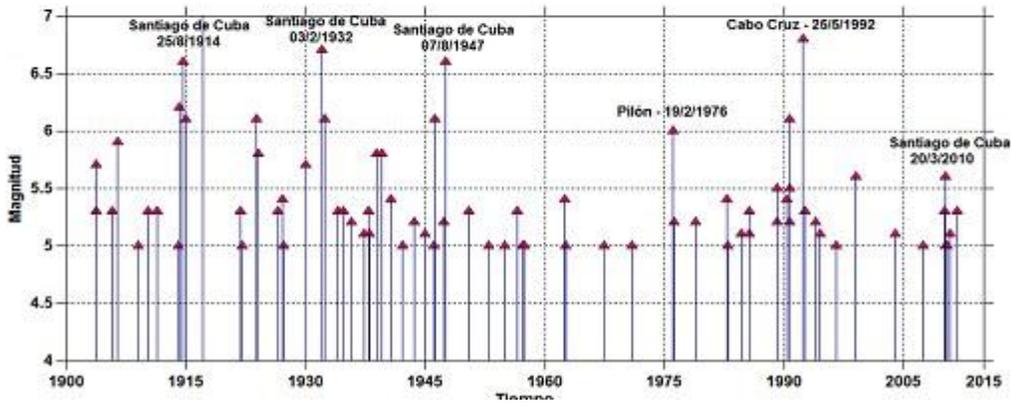
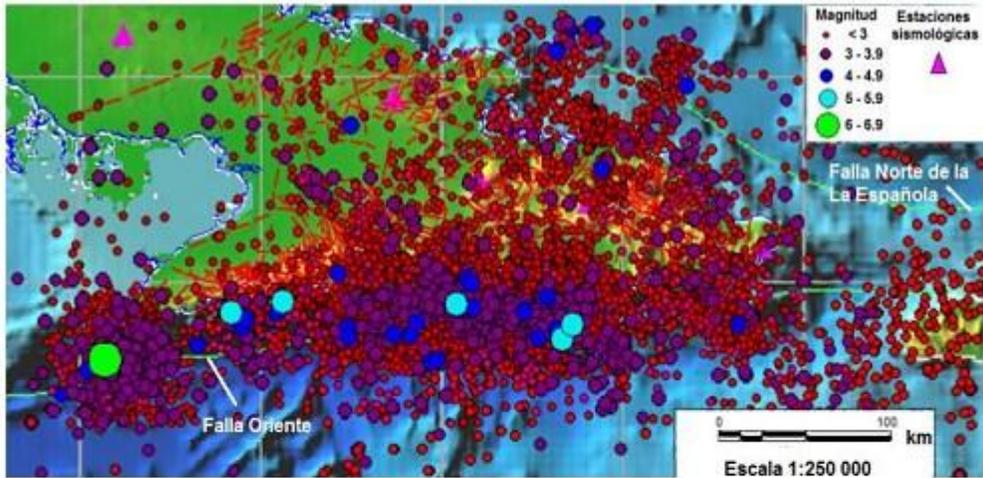


Figura 5: Ocurrencia de los terremotos de magnitud mayor a 5 reportados en la región suroriental de Cuba desde 1900. Fuente CENAIIS.

CAPÍTULO I: CARACTERÍSTICAS FÍSICO GEOGRÁFICAS Y GEOLOGICAS DE LA REGIÓN DE ESTUDIO.

Introducción.

El presente capítulo tiene como objetivo destacar las características físico – geográficas y geológicas de la región de estudio. Además, obtener una información general de las condiciones ingeniero-geológicas, climatológicas, tectónicas y sísmicas existentes en la región.

1.1 Características generales del municipio: Santiago de Cuba.

1.1.2 Ubicación Geográfica.

El municipio Santiago de Cuba se encuentra situado al sur de la provincia de igual nombre y colinda por el norte con los municipios San Luis y Songo La Maya; por el sur con el Mar Caribe; por el este con la provincia Guantánamo y por el oeste con los municipios Guamá y Palma Soriano (Figura 6) siendo sus Coordenadas Lambert aproximadas : X_1 : 579 319,500 m- X_2 : 651 778,500 m y Y_1 : 137 356,000 m- Y_2 : 164 642,000 m. (Tomado de Herrera, D, 2015)

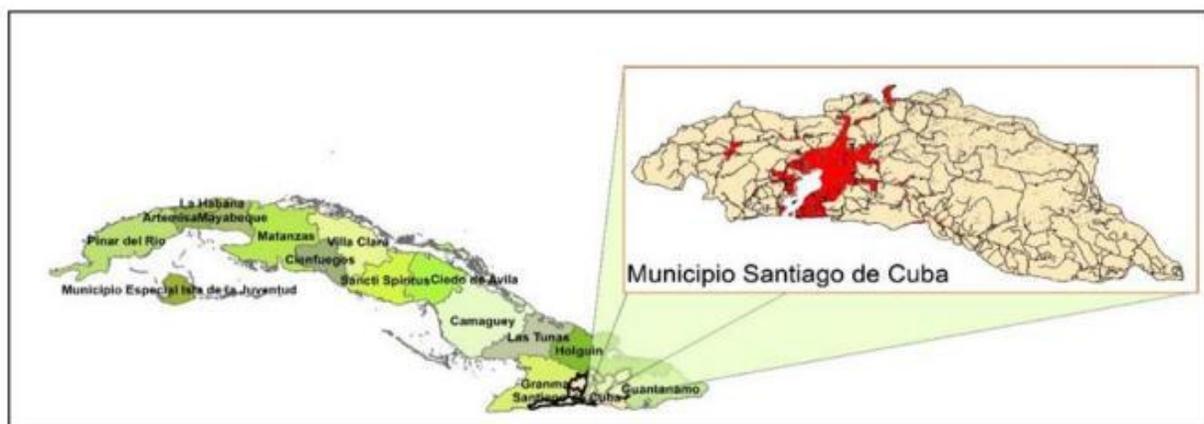


Figura 6: Ubicación geográfica del municipio Santiago de Cuba en el contexto Provincial y Nacional. (Tomado de Herrera, D, 2015)

1.1.3 Relieve.

El relieve de Santiago de Cuba es básicamente de alturas y montañas, formando parte de la región fisiográfica del Este, que se caracteriza por ser el más vigoroso del país. Aquí también puede mencionarse como un accidente geográfico importante la Bahía de Santiago de Cuba (largo: 8,5 Km; ancho: 2,4 Km; profundidad: entre 8,8 y 13,7 m). (Tomado de Ecured, 2016).

1.1.4 Clima.

Desde el punto de vista climático el municipio Santiago de Cuba es uno de los municipios más calurosos del país, al menos al nivel del mar, con una temperatura máxima media de $32,2^{\circ}$ C y una mínima media de $22,1^{\circ}$ C en la ciudad, la lluvia media anual en el año 2012 fue de 1175 mm. (I.N.R.H, 2012; tomado de Herrera, D, 2015)

El clima es subtropical cálido; con un período lluvioso de mayo a octubre donde se registran de un 80 a un 100 % de los totales anuales; los meses de septiembre y octubre son los de mayor ocurrencia, seguidos de agosto y noviembre. El período seco va de noviembre a abril, con el 20 % y los meses de menor ocurrencia son mayo, junio y julio. (Figura 7). (Herrera, D, 2015)

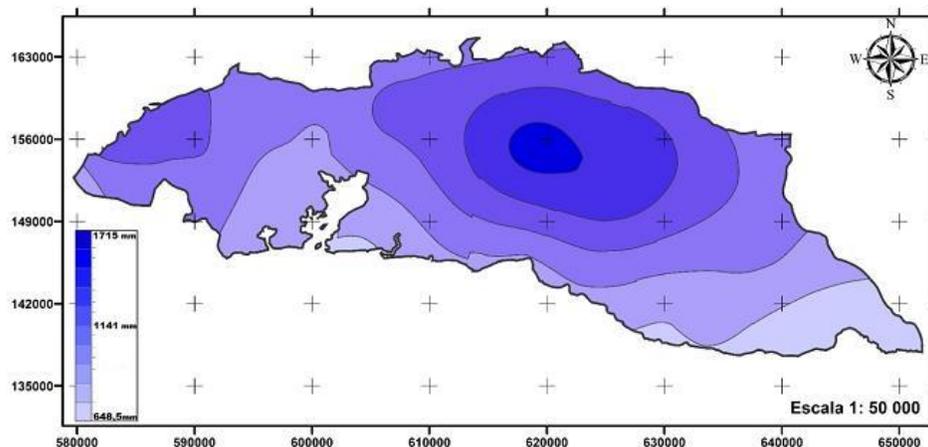


Figura 7: Mapa de Precipitaciones medias anuales del municipio Santiago de Cuba. Fuente: (I.N.R.H., 2012; tomado de Herrera D, 2015)

1.1.5 Geomorfología.

En el municipio de Santiago de Cuba el relieve es accidentado y variado siendo hacia el norte semimontañoso, constituido por elevaciones jóvenes y alargadas, las cuales forman un arco bordeando la cuenca de pendientes medianamente abruptas y cimas en forma de crestas separadas por pequeños valles. Este sistema montañoso forma parte de la Sierra Maestra, aunque con menores alturas (la Sierra del Cobre, la Sierra de Boniato y la Sierra de la Gran Piedra), con pendientes que en varios casos sobrepasan el 45 %, un factor favorable para la ocurrencia de deslizamientos.

Al sur el relieve es llano a ondulado constituido por escasas elevaciones de pendientes suaves predominando las costeras en forma de mesetas alargadas formando hacia la cercanía de las costas varias terrazas escalonadas. En la bahía la costa es escarpada y se desarrollan elevaciones de aspecto terraciforme. (Herrera, D, 2015). (Figura 8)

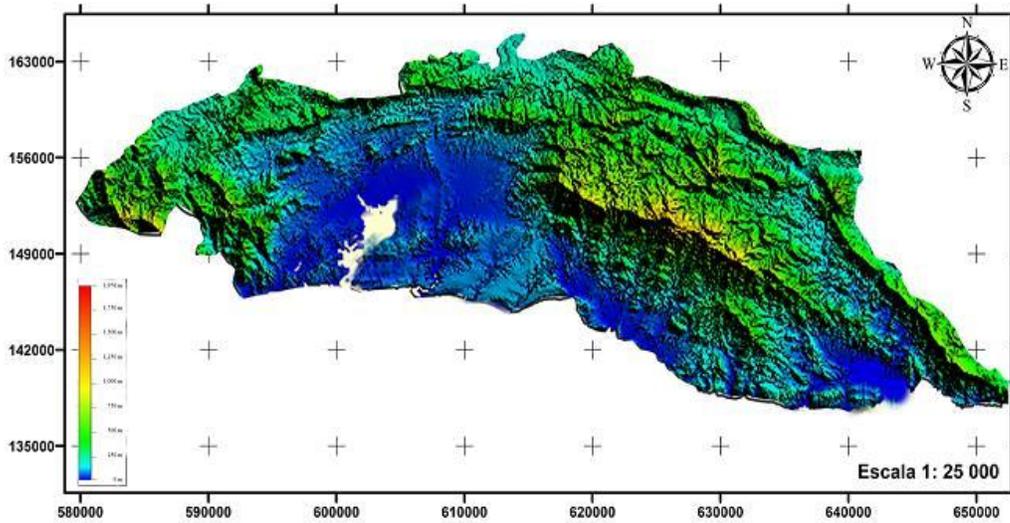


Figura 8: Modelo digital del terreno del municipio Santiago de Cuba. Fuente:(Geocuba, 2010; tomado de Herrera, D, 2015)

1.1.6 Características Hidrogeológicas.

En el municipio Santiago de Cuba la red hidrográfica se encuentra poco desarrollada donde tienen un papel importante el régimen de las lluvias dentro de los factores climáticos, observándose escasas corrientes fluviales con carácter intermitente que atraviesan el municipio y que desaparecen en períodos secos. Los ríos por lo general corren con dirección norte – sur, entre los más importantes del municipio se encuentran: el Cobre (que alimenta la Presa Paradas), San Juan, Juraguá, Daiquirí y Baconao; además existen otros con menor desarrollo en sus cuencas: Sardinero, Los Guaos, Yarayó, que corren al oeste y vierten sus aguas en la bahía de Santiago de Cuba. A nivel regional sus ríos de mayor importancia son el Contramaestre y el Baconao. La provincia está atravesada por la Sierra Maestra y su principal elevación es Pico Real del Turquino con 1,974 m de altura, la mayor de Cuba, en cuya zona se encuentra el Parque Nacional Turquino. (Herrera, D, 2015).

El 2015 fue un año seco en la provincia de Santiago de Cuba, precipitaron 1041,0 mm de lluvia, para un 77 % de su promedio histórico, y un déficit de 312,0 mm. Entre los municipios con menor láminas de lluvia en este año se encontró Santiago de Cuba, pudiéndose mostrar los resultados en el gráfico 1(Boletín Hidrogeológico Santiago de Cuba, 2015). (Figura 9)

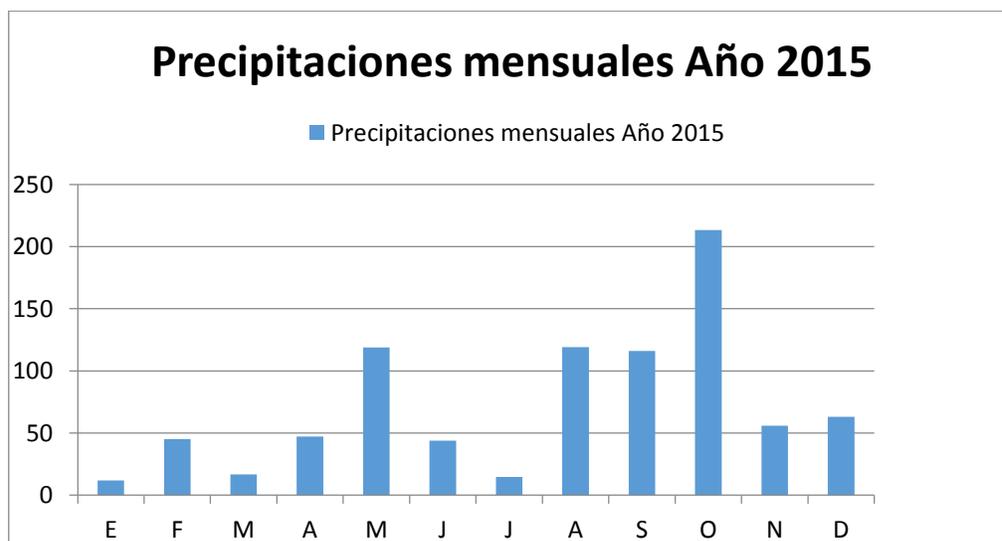


Figura 9: Gráfico de precipitaciones anuales año 2015 (Boletín Hidrológico Santiago de Cuba 2015)

1.1.7 Geología Regional.

Geológicamente, en los macizos montañosos del sur del municipio predominan las rocas ígneas del tipo granítico hacia el sureste, máficas alrededor de la cuenca Santiago, del tipo vulcanógenas y vulcanógenas-sedimentarias hacia el suroeste en distintas correlaciones, combinaciones alternantes y muy variables, tanto en sentido vertical como lateral. Las rocas del tipo sedimentarias predominan sobre todo en la Cuenca Santiago (centro sur) y en su parte meridional, observándose una alternancia de calizas biodetríticas, calizas limosas y limoso- arcillosas, calcarenitas de matriz margosa, margas, aleurolitas y más subordinadamente arcillas, conglomerados y areniscas polimícticas con cemento calcáreo, formadas principalmente por vulcanitas; aunque también es posible encontrarlas metamorfizadas hacia el sureste principalmente. (Carrillo, 2009; tomado de Herrera, D, 2015)

Estratigráficamente, las formaciones más antiguas provienen del período Cretácico Superior, donde predominan las rocas sedimentarias, vulcanógenas y vulcanógeno sedimentarias, aunque se revelan algunas del tipo metamórficas en los contactos con los macizos de origen vulcanógeno y vulcanógeno sedimentarios hacia la parte sureste (Mármoles Jurásico: (Kozary, 1970, Carrillo, 2009; tomado de Herrera, D, 2015)

Se representan además formaciones del Paleógeno representadas abundantemente por formaciones pertenecientes al grupo El Cobre, ampliamente distribuidas a lo largo de la Sierra Maestra; las rocas más abundantes son: tobas, tobas aglomeráticas, lavas y lavas aglomeráticas de composición andesítica y dacítica, raramente riolítica, riodacítica y basáltica. Con estas rocas se intercalan tufitas y calizas, además, se asocian a este complejo vulcanógeno- sedimentario cuerpos hipoabisales y diques de diversa composición. En su constitución también participan tobas cineríticas, tufitas, tobas calcáreas, calizas tobáceas, areniscas polimícticas, vulcanomícticas y grauvacas.

En el Paleógeno también se desarrollan formaciones sedimentarias de origen terrígeno y de ambientes marinos, entre las que se destacan la Formación Jaimanitas en la faja costera, Formación Cauto, terrígena ubicada hacia la parte centro oeste, y otras formaciones tales como Punta Imías, Bitirí, etc. (Carrillo, 2009; tomado de Herrera, D, 2015).

Dentro de la evolución geológica del Neógeno se encuentran un grupo de formaciones sedimentarias fundamentalmente carbonatadas representadas por Formación La Cruz (periferia de la bahía de Santiago de Cuba), Formación San Luis, Formación Camarones y además, otras predominantemente terrígenas como la Formación Puerto Boniato. Las formaciones más recientes, predominantemente sedimentarias, pertenecen al Cuaternario y se desarrollan en forma discontinua en pequeñas áreas de la cuenca de Santiago de Cuba; representadas en las formaciones Camaroncito y Maya, desarrollándose depósitos arrecifales que alternan con episodios de intenso aporte de materiales clásticos terrígenos (Carrillo, 2009; tomado de Herrera, D, 2015)

El entorno geológico local donde se encuentra el municipio Santiago de Cuba es favorable para la ocurrencia de deslizamientos en dependencia de las condiciones puntuales en combinación con factores externos como la lluvia y la aceleración sísmica. Es preciso destacar que en el territorio se encuentran muy expandidas las rocas vulcanógeno-sedimentarias con textura arcillosa en potencias que en algunos casos sobrepasan los 30 metros de espesor, las que igualmente favorecen la consecución de deslizamientos en zonas de pendiente elevada.(Herrera, D, 2015)

1.1.8 Principales formaciones geológicas presentes en la región.

Formación: La Cruz (Icz):

Está representada por una secuencia terrígena- carbonática en la base y el techo, siendo en su parte media carbonato- terrígena. Existen alternaciones de calizas biodetríticas, a veces limosas o arcillosas, calcarenitas de matriz margosa y subordinadamente margas, conglomerados, areniscas polimícticas y aleurolitas

con cemento calcáreo, formadas principalmente por vulcanitas. En menor proporción aparecen intercalaciones de arcillas esmécticas. Coloración gris verdosa a pardusca abigarrada en los horizontes terrígenos y blancuzcos y crema en los carbonáticos. Existen horizontes muy fosilíferos. Las limolitas del borde SE de la Bahía de Santiago de Cuba aparecen ligeramente fosfatizadas. Edad: Mioceno Superior- Plioceno Superior (Colectivo de autores, 2013). (Anexo 1).

Grupo: El Cobre (ec):

Está constituido 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, andesita-dacítica y dacítica, raramente riolítica, riodacítica 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. Edad: Paleoceno- Eoceno Medio parte baja. Subdivisiones: Fm. El Caney y Fm. Pilón . (Colectivo de autores, 2013). (Anexo 1)

Formación: El Caney (ecy):

Representado por una alternancia de tobas cineríticas, tufitas, tobas calcáreas, calizas tobáceas, lapilitas e intercalaciones de lavas y aglomerados. Edad: Eoceno Medio. (Colectivo de autores, 2013). (Anexo 1).

Formación: Pilón (pln):

Tufitas, areniscas vulcanomícticas y polimícticas, grauvacas, aleurolitas, calizas (frecuentemente con fragmentos de rocas vulcanógenas) y en menor cantidad

tobas. En general, en la parte inferior del corte predominan las tufitas y en la parte superior las calizas. Edad: Paleoceno-Eoceno Inferior parte baja. (Colectivo de autores, 2013). (Anexo 1).

Formación: Palma Mocha (pmc):

Rocas terrígeno-clásticas y vulcanógenas, en menor cantidad aparecen calizas; intercalaciones de argilitas. Las tobas y aglomerados de esta unidad son de composición básica. En el hipoestratotipo, en la parte baja predominan las tobas y aglomerados; en la parte media los aglomerados y en la parte superior predominan las calizas sobre las areniscas tobáceas y las tobas; en todo el corte hay intercalaciones de argilitas y gravelitas tobáceas. Edad: Cretácico inferior (Aptiano)-Cretácico Superior (Turoniano). (Colectivo de autores, 2013). (Anexo 1).

1.1.9 Sismicidad y régimen sísmico.

Desde el punto de vista tectónico la provincia Santiago de Cuba está situada al borde de los límites sur de la placa Norteamericana y norte de la placa Caribe (Figura 10), es interceptada por numerosas estructuras tectónicas, varias de las cuales determinan los límites de bloques con diferente dinámica en las zonas sismogénicas de la región oriental del país. En particular, se destaca el tipo de sismicidad conocida como de entre placas, vinculada a la estructura Bartlett-Caimán (zona sismogénica oriente) la cual se caracteriza por ser un sistema de fallas transformantes abierto con una fosa en su centro (Figura 11).

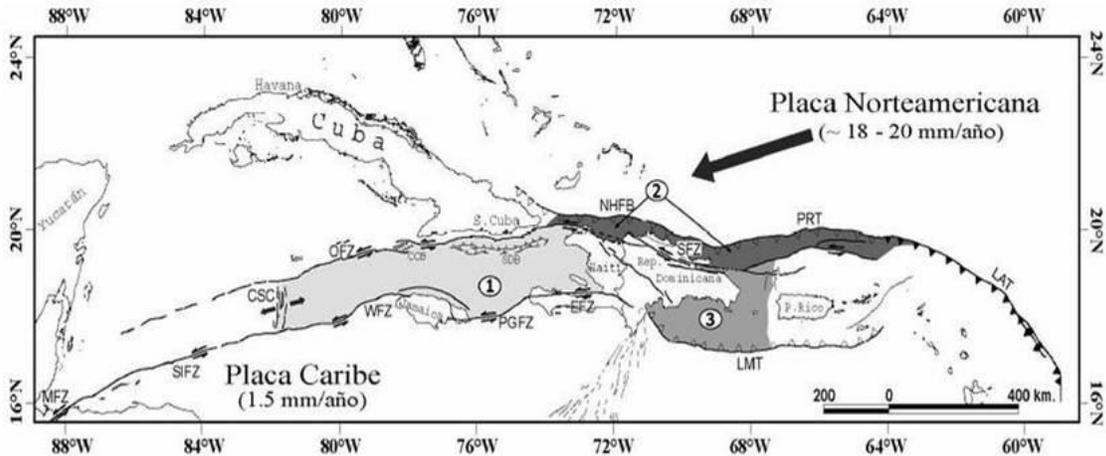


Figura 10: Mapa del Caribe donde se destacan las placas y sus límites. 1- microplaca de Gonave, 2- microplaca Septentrional, 3- microplaca La Española. Fuente: Mann, 1995; tomado de Galván, L, 2014)

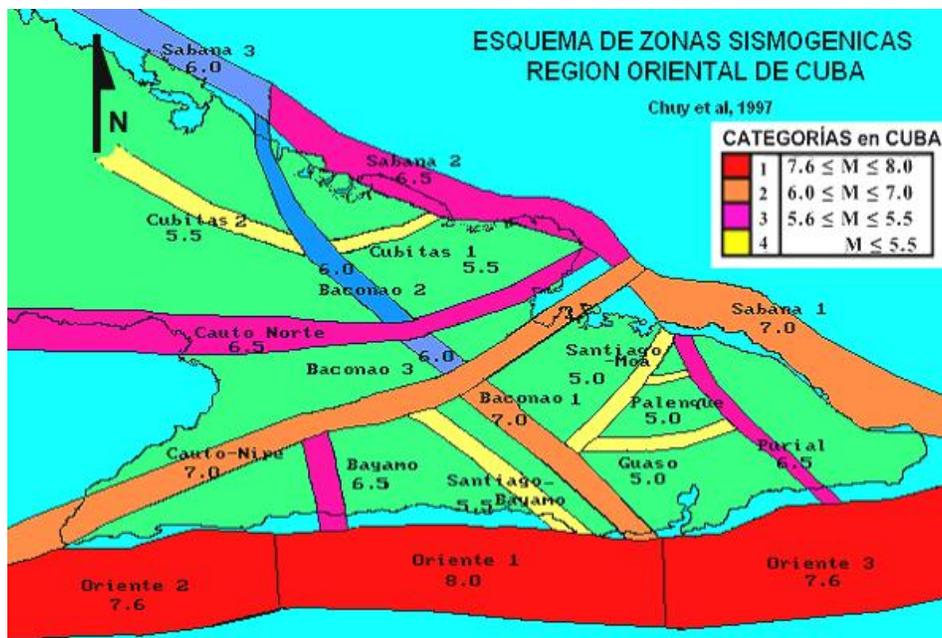


Figura 11: Esquema de zonas sismogénicas de la región oriental de Cuba. Fuente: (Chuy et al, 1997; tomado de Galván, L, 2014)

Las investigaciones sismológicas de Cuba sitúan a la provincia Santiago de Cuba como la de mayor peligro sísmico del territorio nacional. Más del 60 % de los sismos perceptibles y fuertes reportados en el país han tenido su epicentro en esta

provincia, registrándose 20 reportes de sismos fuertes (Intensidad I07, 0 MSK) en el sector comprendido entre las localidades de Chivirico a Baconao (Tabla 2) (Chuy et al, 2002; tomado de Herrera, D, 2015) siendo sacudida por más de 1000 sismos perceptibles desde el año 1528 hasta la fecha.

Tabla 2 Cantidad de reportes de Sismos Perceptibles de la provincia Santiago de Cuba por periodos de 100 años. Fuente (Chuy, 1999; tomado de Herrera, D, 2015).

No.	FECHA	INTENSIDAD (escala MSK)							Total
		3	4	5	6	7	8	9	
1	1571-1640					1	1		2
2	1641-1740	1				2	1		4
3	1741-1840	6	2	1	4	3	1	1	18
4	1841-1940	76	80	40	13	6	2	1	218
5	1941-1990	161	96	27	10	1			295
TOTALES		244	178	68	27	13	5	2	537

Nota: En Intensidad I = 3 (MSK) se incluyen los de I = ? y 3.5, en los de I = 4 los de I = 4.5, en los de I = 5 los de I = 5.5 y así sucesivamente.

Es de especial interés significar que, de estos sismos fuertes ocurridos en Santiago de Cuba, 2 de ellos produjeron intensidad I = 9.0 MSK (Escala Medvédev-Sponhever-Kárník) en 1766 y 1852, reportándose de ambos considerables daños en toda la región oriental. Así también, que los más recientes que han afectado a esta ciudad se reportan en 1932 (Magnitud (Ms) = 6,75; Intensidad (I) = 8,0) y 1947 (Magnitud (Ms) = 6,75; Intensidad (I) = 7,0). El primero de estos últimos produjo grandes afectaciones en esta ciudad. Con independencia del equipamiento que se ha utilizado en diferentes periodos por la Red de Estaciones Sismológicas del Centro Nacional de Investigaciones Sismológicas, es en la región de Santiago de Cuba, por la potencialidad sismotectónica de la estructura de Bartlett - Caimán, donde se han registrado con mayor frecuencia terremotos con mayores rangos energéticos (Chuy, R, 2010).

En la Figura 12 se presentan los Mapas de Epicentros de terremotos registrados en la región Oriental desde 1968 hasta el 2000, en la región 19,50 – 21,50 de Latitud Norte y 74,00 – 78,00 de Longitud Oeste con magnitudes mayores de 3 y 4 respectivamente.

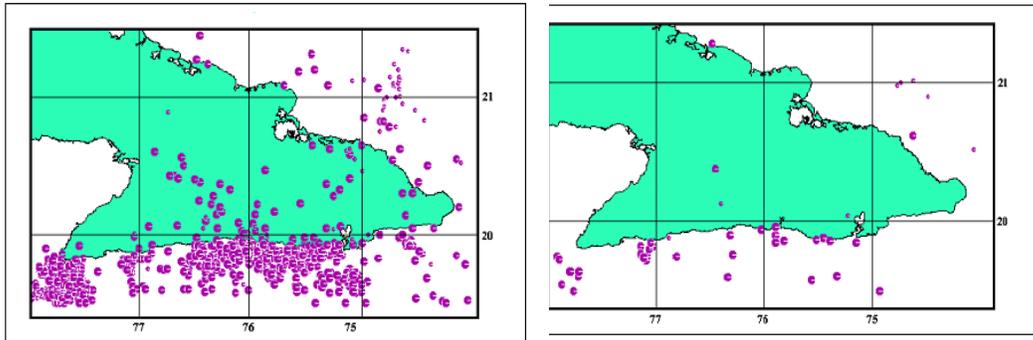


Figura 12: Mapa de Epicentros de Terremotos de magnitud mayor a 3, a la izquierda y magnitud mayor a 4 a la derecha para el período 1968 -2000. Región Oriental. Fuente (CENAI; tomado de Galván, L, 2014)

Se evidencia en estas figuras que las mayores concentraciones de sismos, incluyendo los de mayor magnitud, se localizan siempre en la región Suroriental y tiene una connotación particular, el sector vinculado con la provincia y ciudad de Santiago de Cuba. No obstante, por razón del terremoto de Cabo Cruz de 1992 hay un pico de actividad en esa región también, como consecuencia del registro de las réplicas de ese sismo de magnitud 7.0 Richter. (Herrera, D, 2015)

1.1.10 Desarrollo económico social.

Santiago de Cuba muestra hoy un diversificado desarrollo de la industria y los servicios asociados, constructivos, turísticos y científicos. Según informes oficiales, más del 60 % de la producción mercantil de este lado cubano es sostenido por la actividad industrial, que tiene fuertes pilares en el procesamiento de combustibles, la generación eléctrica, la obtención de azúcar, cemento, cereales y una variada gama de productos y servicios del área sideromecánica.

Santiago es la cuna de una gran cantidad de géneros musicales. Ha sido reconocida como la cuna del son y el bolero, mientras que la trova tradicional y la expresión coral cuentan con un profundo arraigo. Allí nacieron grandes músicos, como Sindo Garay, Ñico Saquito, Eliades Ochoa, Compay Segundo, por solo mencionar algunos. Es sin duda una ciudad excepcional, distinguida por su cultura e identidad, en la que se combinan múltiples valores que permiten al visitante entrar en contacto con la idiosincrasia de su gente, la cultura e historia del lugar, mientras disfruta de la naturaleza exótica. Las fiestas populares de mayor importancia son el Carnaval Santiaguero (considerado el mejor del país) y la Fiesta del Fuego. Por estas razones y más se explica que la provincia, en especial su municipio cabecero, sea con asiduidad sede de importantes eventos artístico-culturales como el Festival del Caribe, el Festival Internacional de Coros, el Festival del Son "Miguel Matamoros", el Festival Internacional de la Trova "Pepe Sánchez y el Festival del Bolero, entre otros. Otros aspectos distinguen a Santiago, en ella está la primera casa de América, la majestuosa catedral de Santiago de Cuba (la primera de su tipo en Cuba), la primera mina de cobre a cielo abierto ubicada en el poblado de El Cobre y el Museo Bacardí, el primero de su tipo en territorio nacional. Posee además varios centros de educación superior, entre los más importantes están la Universidad de Oriente, el Instituto Superior de Ciencias Médicas y el Instituto Superior Pedagógico Frank País.

CAPITULO II: METODOLOGÍA PARA ESTUDIAR EL POTENCIAL DE LICUEFACCIÓN.

Introducción.

Este capítulo tiene como objetivo, explicar la metodología para realizar los estudios en el área correspondiente al municipio de Santiago de Cuba, en la provincia de igual nombre, 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.

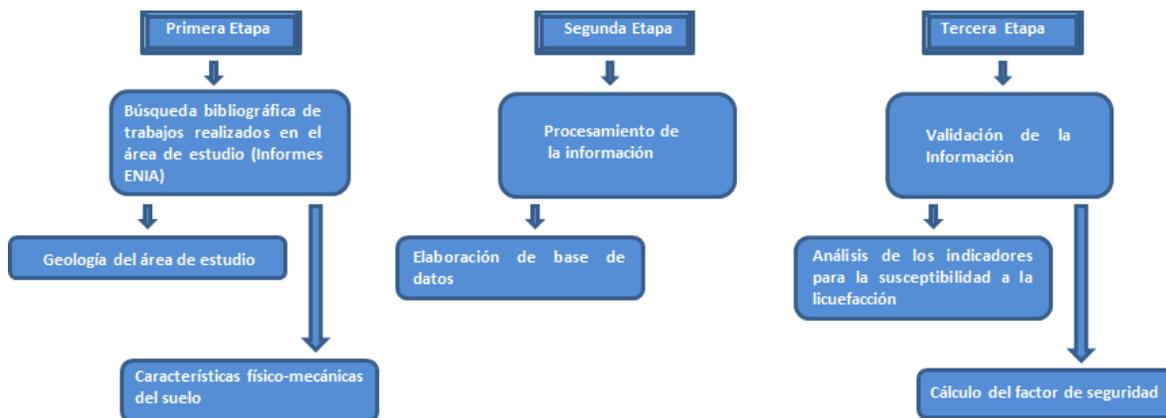


Figura 13: Metodología de la investigación

2.1 Metodología de la investigación.

2.1.1 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 Santiago de Cuba 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 y Análisis y Síntesis.

2.1.2 Segunda Etapa: Procesamiento de la información.

En esta etapa se procedió al procesamiento de los datos provenientes de las perforaciones realizadas de un gran número de obras en el municipio Santiago de Cuba por parte de la ENIA de Santiago de Cuba. 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 VI 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 la litología presente.

2.1.3 Tercera Etapa: Interpretación de la información.

Los datos previamente procesados de las perforaciones, el reconocimiento geológico del área, la descripción y el muestreo, las pruebas hidrogeológicas y las observaciones sistemáticas) y de laboratorios (los ensayos de granulometría y los límites de Atterberg) fueron expresados mediante el análisis del nivel freático, las propiedades físico mecánicas del suelo, el cálculo del factor de seguridad 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, D, 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; tomado de Parellada O, 2016) 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 diferentes factores que se proponían. Después de una exhaustiva 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:

2.2.1 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 y los suelos del Cuaternario (Holoceno y Pleistoceno).

Debe cumplir además que la relación de espesor 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 y los suelos pertenecientes al Cuaternario que están representadas por el color amarillo en sus diferentes tonalidades.

2.2.2 Sismicidad.

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

aceleración sísmica y la zona sísmica a la que pertenece cada región. Esta información puede ser obtenida, además, de los informes de especialistas del CENAIIS.

2.2.3 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 hidroisopias 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. (Ver anexo 3).

2.2.4 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 (Pruebas de Penetración Estándar) entre otras). Se tiene en cuenta:

- ✓ Por ciento de partículas finas menor o igual al 15 %.
- ✓ Límite Líquido (LL) menor o igual al 35 %.
- ✓ Contenido Natural de agua mayor al 0,9 %.
- ✓ Índice de liquidez menor al 0,75 %.
- ✓ Forma de las partículas principalmente redondas.
- ✓ N de SPT (Pruebas de Penetración Estándar) menor a 20 golpes.

- ✓ Compacidad relativa (Cr) menor al 75 %.
- ✓ Uniformidad de la arena (Cu) menor al 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.

2.2.5 Cálculo del Factor de seguridad para la licuefacción.

Calcular el Cyclic Stress Ratio (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 de N (SPT) normalizados por profundidad y energía de los golpes del martillo (valores de $(N_1, 60)$). En la Figura 14 se muestran las curvas recomendadas por (Seed, et al.2003; tomado de Parellada, O, 2016)

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 ($CSR = \tau_{pro} / \sigma'_{vo}$).

T pro: tensiones promedios.

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

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, B and Idriss, M, 1971). 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}').

$$CSR = 0.65 (a_{max} / g) (\sigma_{vo} / \sigma_{vo}') r_d$$

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.

r_d : 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 r_d :

Para $z \leq 9,15$ m $r_d = 1,0 - 0,00765 z$

Para $9,15$ m $< z \leq 23$ m $r_d = 1,174 - 0,0267 z$

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 14 y se comprueba si es un estrato licuable o no.

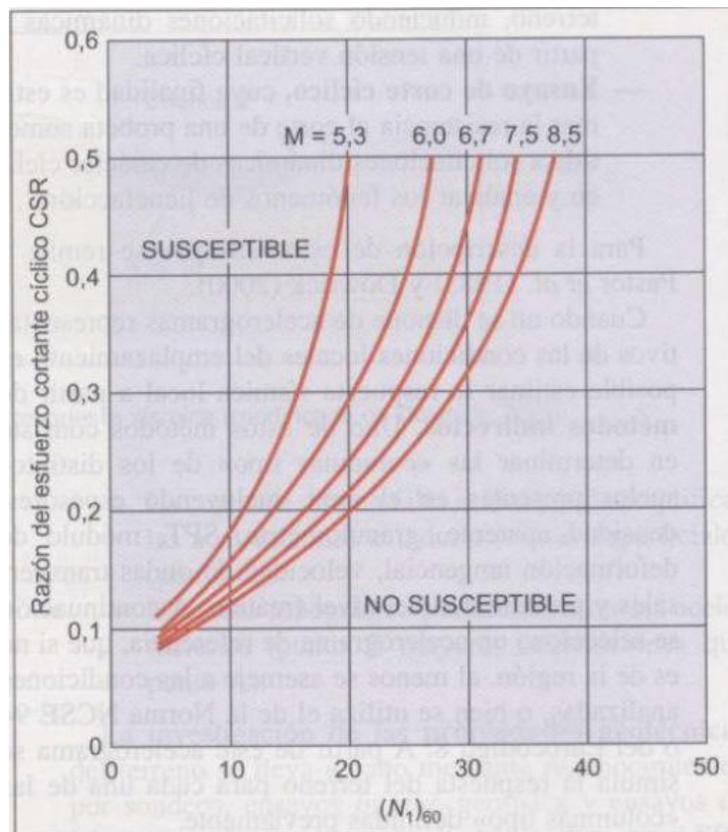


Figura 14: Susceptibilidad de licuefacción de un suelo en función de $(N_1)_{60}$ y la razón del esfuerzo cortante cíclico CSR (Ho et al., 1986; tomado de Parellada, O, 2016)

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.

2.2.6 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, T. & Idriss, I, 2001; Semillas et al.1985; tomado de Parellada, O, 2016) 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 (N1) 60, es decir el número de golpes suministrado al terreno, representado también por la letra N.

(N1)60 = (N1)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 (N1) 60 menor de 30. Para (N1) 60 mayores e iguales a 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 (Liao S. y Whitman R.V, 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/pie² ($\approx 1 \text{ kg/cm}^2$), 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 3: Correcciones a SPT (Skempton, 1986; tomado de Parellada, O, 2016).

FACTOR	VARIABLE DE EQUIPO	TERMINO	CORRECCION
presión vertical normal efectiva	N/A	C_N	$(Pa/\sigma_v^1)^{0.5}$
presión vertical normal efectiva	N/A	C_N	$CN \leq 1.7$
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

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

2.3.1 Análisis de las condiciones geológicas del área de estudio.

Se evaluaron las condiciones geológicas, determinando las formaciones presentes en el municipio y de acuerdo a las edades y sedimentos de cada una de ellas se delimitó cuáles eran las más favorables a la ocurrencia del fenómeno de

licuefacción. Se analizan también, los valores de propiedades como Límite Líquido, por ciento de finos, cohesión entre otras.

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

En el municipio de Santiago de Cuba, de manera general, aparecen litotipos tales como: arcillas, limos, conglomerados, arcillas, rocas volcánicas y calizas, lo que permiten la determinación del nivel freático con más facilidad partiendo de la observación del mismo cuando se realizaron las perforaciones en el área de estudio las cuales fueron ejecutadas con una máquina perforadora MARK VI de fabricación inglesa por los métodos a percusión y rotario. Los datos se obtuvieron a partir de los antecedentes de investigación de las obras emplazadas en el área.

2.3.3 Análisis de las condiciones ingeniero geológicas.

Se revisaron los informes ingeniero geológicos efectuados por la Empresa Nacional de Investigaciones Aplicadas (ENIA) y se seleccionaron las propiedades físicas y mecánicas por cada obra en el municipio estudiado. Y se confeccionó una base de datos con los principales parámetros que influyen para que un suelo sea licuable, entre los que se encuentran (Límite Líquido, Índice de Plasticidad, humedad natural, densidad húmeda y densidad seca, por ciento de partículas finas, cortante, saturación, compactación del suelo a partir del N de ST entre otras)

2.3.4 Análisis del cálculo del factor de seguridad para la licuefacción (FSL).

El FSL se calcula a partir de las formulas explicadas anteriormente y con los datos obtenidos de los informes ingeniero geológicos. Primero se calcula el CSR, luego CRR, y MSF. Si el valor es menor o igual a 1 se considera que es un estrato licuable. Si los valores dieran relativamente mayor que 1 se puede considerar posible licuefacción siempre que el estrato inferior sea licuable. Teniendo en cuenta la magnitud del sismo el estrato puede licuar aunque en menor medida.

El análisis del potencial de licuefacción en este estudio siguió 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. Como

resultado de este análisis se definieron los estratos que son potencialmente licuables y se confeccionaron los perfiles geotécnicos en los que se mostró los espesores máximos esperados de estratos en los cuales puede ocurrir licuefacción.

El factor de Seguridad corregido se calculó por la ecuación siguiente

$$FS = \frac{CRR}{CSR} MSF$$

Dónde:

MSF: Factor de escala de acuerdo con la magnitud de sismo y se calcula por la siguiente ecuación

$$MSF = \frac{10^{2.24}}{M_w^{2.56}}$$

Mw: Magnitud del sismo de diseño.

El factor de escala de acuerdo con la magnitud de sismo se calculó para sismos de magnitud 6; 7; y 8. A continuación se muestran los resultados.

Tabla 4: Factor de escala de acuerdo a la magnitud del sismo.

Magnitud del sismo	MSF
6	1.76
7	1.19
8	0.84

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

Introducción.

Los indicadores propuestos para determinar si los escenarios propuestos son licuables o no ante un sismo de gran magnitud serán validados en este capítulo. A continuación, se explica cómo se llevará a cabo en los escenarios con condiciones favorables.

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

Los escenarios propuestos coinciden con varios criterios (Kramer & Stewart, 2004. Tomado de Parellada, O, 2016) para determinar si un suelo es licuable o no. Primeramente se analizó el criterio histórico. En el municipio de Santiago de Cuba existen reportes de ocurrencia del fenómeno de licuefacción, observándose que esta ocurre frecuentemente en los mismos lugares cuando las condiciones del sitio se han mantenido constantes, por lo que estas pruebas de evidencias de ocurrencias históricas pueden ser utilizadas como una susceptibilidad en el lugar.

También se tuvo en cuenta dentro de los criterios la cercanía a una zona sismo generadora, así como la probabilidad ocurrencia de un sismo de gran magnitud. Además de la sismicidad del área de estudio y las posibles amplificaciones de las aceleraciones sísmicas. De igual forma se analizan las condiciones geológicas, este es otro de los criterios analizados, donde algunos de los escenarios propuestos están cerca de depósitos fluviales, así como playas, aunque no sean tan susceptibles. Los suelos de los escenarios propuestos se encuentran semi saturados y saturados dada la pequeña profundidad del nivel freático en sectores de la bahía.

Además, se analizó la edad de los depósitos, donde el área estudiada pertenece a formaciones del Cretácico, Paleógeno y Neógeno, donde los estratos son relativamente jóvenes, teniendo en cuenta que los depósitos fueran de poco contenido de finos y preferiblemente compuestas de partículas redondeadas, así como arenas arcillosas, arenas limosas etcéteras. Analizándose la posibilidad de que fueran rellenos, tierras recuperadas por drenaje, tierras recuperadas, relleno

límite entre las arenas, rellenos sobre pantanos o ciénagas y/o muelles, estos son los más susceptibles.

3.2 Validación del sistema de indicadores propuestos en el municipio Santiago de Cuba.

3.2.1 Condiciones geológicas.

En el municipio Santiago de Cuba predomina el grupo El Cobre, con sus subdivisiones pertinentes: Formación Pilón y Formación El Caney, compuesto por diferentes tipos de rocas vulcanógenas y vulcanógeno- sedimentarias También está presente la formación La Cruz representada por una secuencia terrígeno-carbonática en la base y el techo, siendo en su parte medio carbonato- terrígeno. Además de la Formación Palma Mocha constituida por rocas terrígeno-clásticas y vulcanógenas y en menor cantidad aparecen calizas. (Colectivo de Autores, 2013). (Ver anexo 6 y7)

3.2.2 Sismicidad.

Dada la norma NC 46:2013 el municipio de Santiago de Cuba, se encuentra ubicado en la zona sísmica 5, la cual se caracteriza por ser de riesgo sísmico muy alto en el territorio nacional que puede ocasionar daños graves 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 máxima del terreno para el cálculo S_a estarán entre 0,80-1,10g para períodos cortos (S_s) y entre 0,30-0,50 g para períodos largos (S_1). (Figura 15)

S_a : Aceleración espectral máxima.

S_s : Ordenada espectral de período corto.

S_1 : Ordenada espectral con período de 1 segundo.

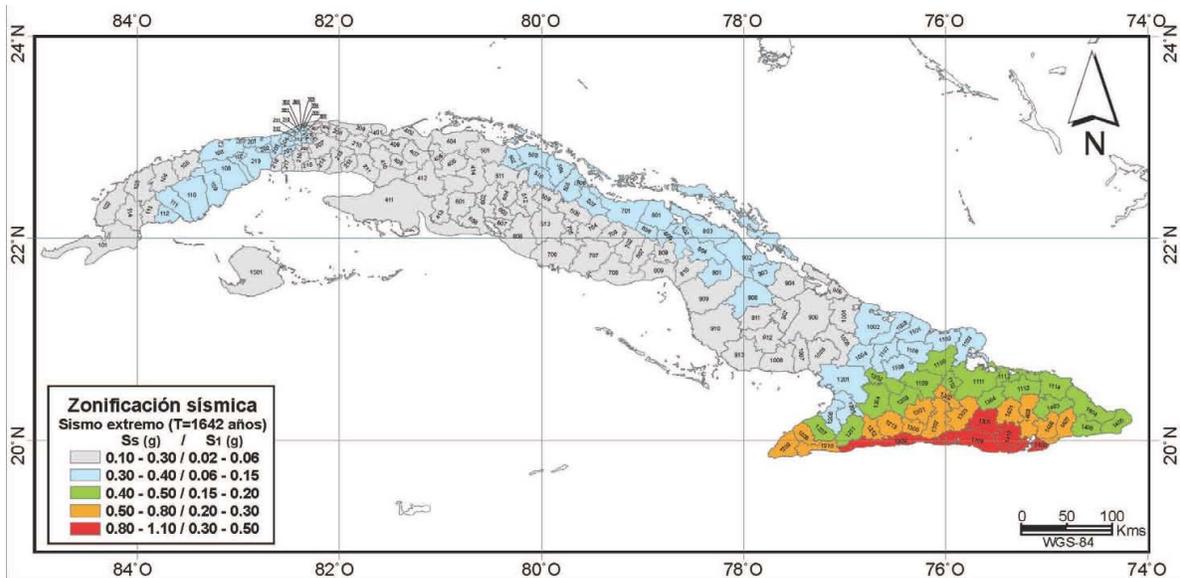


Figura 15: Mapa de zonificación sísmica para la República de Cuba (Tomado de Fernández, D, 2016).

A partir del resumen realizado durante el 2017 en la región oriental hasta el 15 de mayo sobre la actividad sísmica, del total de 2781 terremotos en el área de Cuba, 808 tuvieron lugar en el municipio de Santiago, así como en la zona de Baconao respectivamente, con una magnitud de 0,5-4,5, una sismicidad de 4,5, y en cuanto a la sismicidad-energía fue alta. (Figura 16)

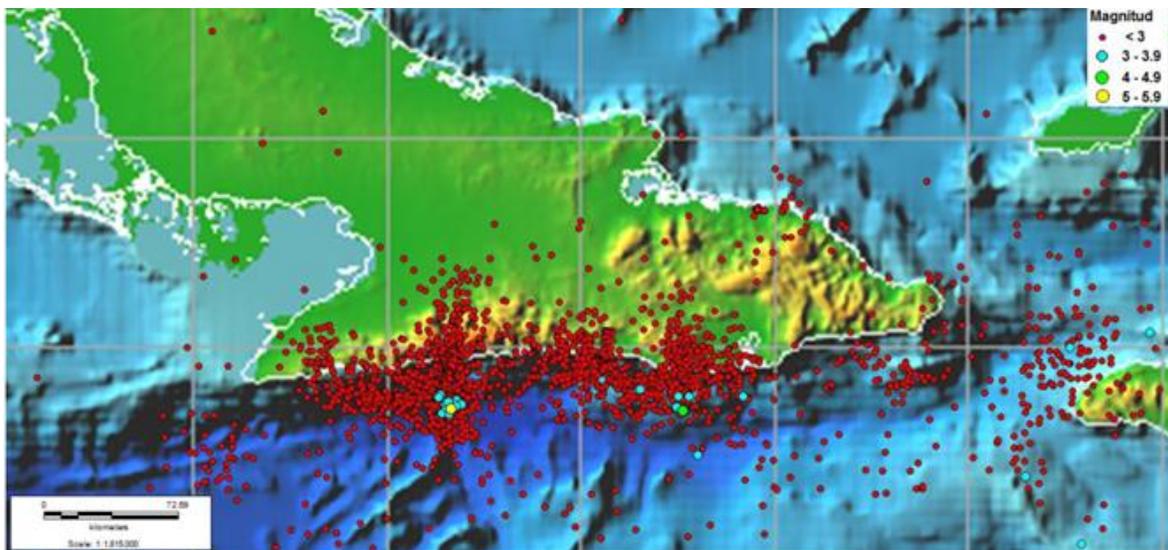


Figura 16: Mapa de sismicidad registrado durante el 2017 en la región oriental hasta el 15 de mayo (Tomado de Fernández, D, 2017).

3.2.3 Características Hidrográficas.

La hidrología en Santiago de Cuba cumple con características climáticas destacadas de altas temperaturas, y una red hidrográfica poco desarrollada, donde tiene un importante papel el régimen de lluvias. La profundidad del nivel freático varía entre los 1,3 y 6,6 m, siendo la misma propensa a que se manifieste el fenómeno de licuefacción. (Ver anexo 4.)

3.2.4 Condiciones ingeniero-geológicas (Tabla 4).

Para el estudio de las condiciones ingeniero geológicas 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), densidad húmeda (Yf), densidad seca (Yd), peso específico y prueba estándar de penetración(SPT). A continuación, en la tabla se muestran los valores de estos parámetros para las obras estudiadas. (Tabla 4)

Tabla 4: Clasificación geotécnica del suelo del municipio Santiago de Cuba

Obras	N de SPT	LL	% Finos	% Arenas	Wn (%)	Yf	Yd	C (KPa)	Descripción
Empresa de camiones de Oriente (UDECAM)	8	42	65	25	27	17.85	14	30	CL –CH-SC
E.I.A José Maceo		35	41	29	10	18.85	17.14	49	OH-GC-CL
Hotel Imperial (Remodelación)	15	59	41	32	18.87	18.57	15.62	20	LH-SC
Mini Fábrica de Cerveza	5	43	64	20	25	19.21	15.37	15	SC-CH

Hospital Oncológico	40	45	63	23	23.7	17.40	14.10	30	LH-CL
Policlínico Julián Grimau	12	45	37	35					SM-ML
ECOCEM Empresa Provincial de Cemento	22	37	16	33	16.7	18.86	16.16	20	LH-SC-CL

De 111 informes ingenieros geológicos revisados solo se pudieron utilizar 44, que contenían las coordenadas y la mayoría de las propiedades físico mecánicas, de estas, se les pudo realizar el cálculo de FSL a 11, las cuales contenían los parámetros necesarios como N de SPT, Yf, Yd y nivel freático.

Para la correlación del SPT del campo los valores utilizados fueron los de la Norma utilizada en Cuba conocida como la cuchara cubana. Obteniéndose a partir de la revisión de los informes de las obras elaborados por la ENIA. Respondiendo Obsterberg, Dennison, muestras de cuchara, porta testigos doble tubo rígido y porta testigo simple, utilizaron perforación a percusión para la hincada de muestreador cuchara SPT (Penetración dinámica). Penetración estática del muestreado Shelbys (Presión hidráulica). Los diámetros utilizados son: 73, 89 y 108 mm Martillo 300 libras. Caída del martillo 18 pulgadas con Varillas 0,40; 1,50 y 3,00 m. Muestreadores: Shelbys

3.2.5 Cálculo de Factor de seguridad para la licuefacción.

Resultados de calcular la Relación de Esfuerzo Cíclico (CSR)

Se realizó el cálculo de Relación de Esfuerzo Cíclico para el que por sus condiciones ingeniero-geológicas tienen mayor potencial para que se produzca la licuefacción y para otras que coincidían algunos parámetros. Los mismos fueron ejecutados a obras dirigidas pues algunas carecen de información importante

como el número de golpes en el campo N de SPT y no se podía calcular el FSL. (Tabla 5)

Tabla: 5 Resultados del cálculo del FSL para Santiago de Cuba

Obras	CRR	CSR	FSL Para Mw 6	Licuables	FSL Para Mw 7	Licuables	FSL Para Mw 8	Licuables
Viviendas Martí y La Línea	0.085	1.028	0.145	Si	0.098	Si	0.069	Si
Industria Deportiva	3.891	0.702	9.760	No	6.599	No	4.658	No
Base de Suministros de Alimentos de Buques	0.793	0.886	1.574	No	1.064	No	0.751	Si

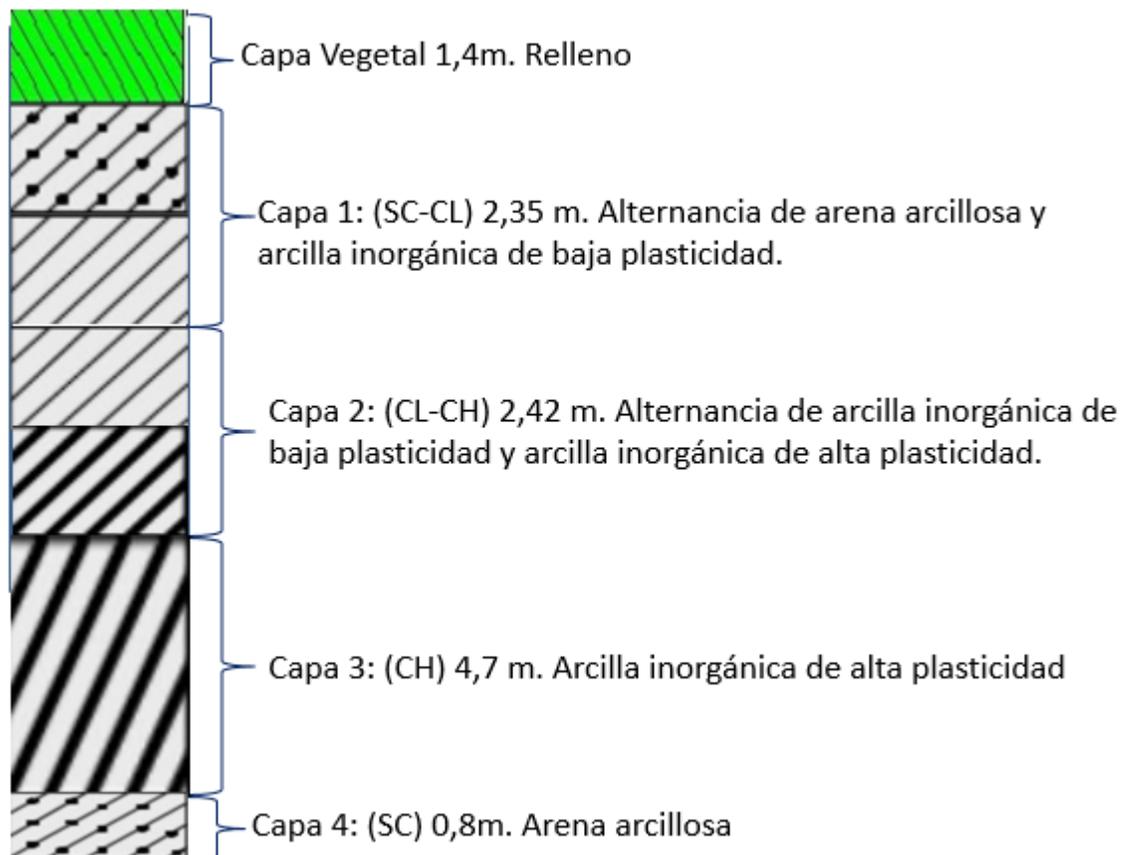


Figura 17: Columna Lito-estratigráfica del suelo en el municipio Santiago de Cuba.

3.2.6 Conclusiones parciales para Santiago de Cuba.

Se puede concluir que los suelos del municipio de Santiago de Cuba son sedimentos pertenecientes al Mesozoico (Cretácico) y al Cenozoico (Paleógeno, Neógeno, Cuaternario), concernientes a formaciones tales como: La Cruz, con un ambiente de sedimentación depositado en condiciones de bahía, y zonas de lagunas costeras con manglares. La formación El Caney presenta rocas típicas de un ambiente de cuencas de aguas profundas con abundantes aportes de material tufogénico y terrígeno, influenciado por una considerable movilidad tectónica. La formación Pílon, en ambientes de cuencas marinas de profundidad media, en zonas alejadas de focos magmáticos, pero con un considerable aporte de material piroclástico y terrígeno, la formación Palma Mocha, presenta un ambiente de sedimentación en cuencas marinas de profundidades grandes y medias. Estas han sido clasificados por el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS) como: Orgánico de alta plasticidad (OH), Limo de alta plasticidad (MH), Arena arcillosa (SC.), Grava limosa (GM), Arcilla de baja plasticidad (CL), Arena limosa (SM), Arcilla de alta plasticidad (CH), Limo de baja plasticidad (ML), Limo de alta plasticidad (MH), Grava arcillosa (GC).

La sismicidad en este municipio es considerada de muy alto riesgo, con un valor de aceleración máxima de 0,513. El porcentaje de humedad natural es del 5-35 % y el porcentaje de granos finos es variable, con valores entre 14-68 %.

Los resultados obtenidos a partir de las 11 obras que se le realizó el cálculo fue que ante un sismo de magnitud mayor o igual a 6 podían dañarse las obras siguientes: sismo de magnitud 6: Viviendas Martí y La Línea y Estación de Bombeo No 4 Santiago de Cuba. (Ver anexo 5)

Para un sismo de magnitud 8: Base de Suministros de Alimentos a Buques, Planta de Tratamiento de Residuales Toma 3.

Los sectores que dieron licuables se encuentran enmarcados sobre suelos limosos de baja plasticidad (ML), arcillas de baja plasticidad (CL) y arcillas de alta

plasticidad (CH), pertenecientes al grupo El Cobre, formación: El Caney de edad Eoceno Medio. (Ver tabla 6).

Otras de las obras que podrían licuar, aunque no fue posible realizarles el cálculo dado a que no contaban con todos los parámetros necesarios para la ejecución del mismo son: Edificio Socio Administrativo UEB Ferrocarriles Santiago de Cuba, Escuela Primaria 30 de Noviembre, Urbanización Repto San Pedrito (Crombet y Jesús Menéndez), Parque San Juan Asta Bandera, Mini Fábrica de Cerveza, Hotel Plaza, Policlínico Julián Grimau, Parque Fotovoltaico EL Brujo (1), Hospital Oncológico Conrado Benítez, Hotel Imperial (Remodelación), Bachiplam Micro III Abel Santamaría.

Estas se encuentran ubicadas sobre sedimentos pertenecientes a la formación La Cruz, la cual presenta características favorables para la ocurrencia del fenómeno de licuefacción, tales como: una distribución geográfica ubicada en la periferia de la Bahía de Santiago de Cuba, extendiéndose al W de la misma a lo largo de la costa S en una faja estrecha hacia el E de la Bahía, en una faja más ancha pero irregular. La edad es del Mioceno Superior-Plioceno Superior. La litología está compuesta por una secuencia terrígeno-carbonática en la base y el techo, siendo en su parte media carbonato-terrígeno. La profundidad del nivel freático se encuentra mayormente de 2,5-5 m. Además de que el origen de los sedimentos es de condiciones de bahía, y zonas de lagunas con manglares. (Ver anexo 5.)

Tabla 6: Suelos más susceptibles a licuefacción según la magnitud del sismo, en el municipio Santiago de Cuba, después de realizar el cálculo del factor seguridad.

Magnitud de los sismos	Magnitud 6	Magnitud 7	Magnitud 8
Suelos más susceptibles	ML	ML, CL	ML, CL, CH

Conclusiones.

- Las propiedades físico-mecánicas asociadas a los fenómenos de licuefacción estudiadas en el municipio Santiago de Cuba arrojaron valores de: entre 14 y 68 % de granos finos; humedad natural entre 5 y 35 %; límite líquido de 25 a 57 %; plasticidad entre 7 y 33 % y grado de saturación entre 36 y 97 %.
- Se aplicó el sistema de indicadores, dando como resultado que los limos de baja plasticidad (ML) y las arcillas de baja plasticidad (CL), de la formación La Cruz, a partir de las condiciones ingeniero geológicas son suelos proclives a la ocurrencia de la licuefacción, la misma cumple con las condiciones necesarias: las profundidades del nivel freático varían de 1,6-5 m, el N de SPT es mayor a 40 golpes, la relación W/LL es mayor a 0,9, la humedad natural varía del 10-20 %, se encuentra ubicada en las cercanías de la bahía.
- En el municipio de Santiago de Cuba, los sectores más susceptibles a la licuefacción definidos a partir del cálculo del Factor de Seguridad fueron los limos de baja plasticidad (ML) y las arcillas de baja plasticidad (CL) del Gr. El Cobre; en las cercanías de la bahía de la ciudad.

Recomendaciones.

- Solicitar a los trabajadores de la ENIA que en los informes incluyan e parámetros que permitan calcular el Factor de seguridad para la licuefacción, el análisis integral de los suelos así como propuestas de medidas de mejoras del terreno.
- Aplicar los resultados obtenidos en las planificaciones, decisiones y proyectos para un mejor ordenamiento territorial de los Organismos del Estado.
- Socializar la información mediante visitas a los diferentes centros de Gestión para la Reducción del Riesgo, Consejos de Asambleas Municipales y Provinciales.

Bibliografía.

ALVA H.; & PARRA D.; (2011) Evaluación del potencial de licuefacción de suelos. Chimbote, Perú.

ALVA, J.E. “Breve Historia del Fenómeno de Licuefacción de Suelos en el Perú”, IV Congreso Nacional de Mecánica de Suelos e Ingeniería de Fundaciones, Lima, Perú. 1983.

ÁLVAREZ, CHUY & COTILLA. “Peligrosidad sísmica en Cuba. Una aproximación a la regionalización sísmica del Territorio Nacional”. Revista Geofísica. Instituto Panamericano de Geografía e Historia 1991.No 35, 125-150.

ARANGO, D; FERNÁNDEZ, B & REYES. “Peligro Geológico de la Ciudad de Santiago de Cuba y sus alrededores”. CENAI. (2000).

Boletín Hidrogeológico Santiago de Cuba. 2015

CARRILLO. “Licuefacción de suelos durante el sismo Pisco-Perú” Sixth Laccei International Latin American and Caribbean conference for Engineering and Technology (laccei'2008) “Partnering to success: engineering, education, research and development” June 4 – June 6 2008, Tegucigalpa, Honduras. 2008.

CHUY, R. “Modelo del peligro sísmico de la provincia de Santiago de Cuba”. CENAI. 2010.

Colectivo de Autores, Léxico Estratigráfico. 2013

Ecured, 29 de noviembre 2017. www.ecured.cu

FERNÁNDEZ & CRUMLEY. Estudio del riesgo de licuación para la represa de río blanco. Comparación entre metodologías existentes. Geoconsult, Inc. – Geotechnical Engineers. P.O. Box 362040, San Juan, Puerto Rico.

FERNÁNDEZ, B. “Posibilidad de ocurrencia del fenómeno de licuación en la cuenca de Santiago de Cuba catalizado por terremotos fuertes. Tesis de maestría. ISMM. Moa. 2000.

FERNÁNDEZ, D. Licuefacción de los suelos generada por sismos de gran magnitud. Caso de estudio Caimanera y Santiago de Cuba. Tesis de maestría. ISMM. Moa 2015.

FERNANDEZ, D, GUARDADO, L, HERRERA, D, OLIVA, A, DÍAZ, S. Escenarios susceptibles a la licuefacción inducida por sismos de gran magnitud en Santiago de Cuba. Minería y Geología/ v.32 n.2/abril-junio/2016/p 53-69.

GALVÁN, L. Procedimiento para la gestión y educación de riesgos geológicos en la provincia Santiago de Cuba. Tesis presentada en opción al Grado Científico de Doctor en Ciencias Geológicas. ISMM. Moa 2014.

GONZÁLEZ, C “Comparación entre la metodología para evaluar el potencial de riesgo de licuefacción y los catastros realizados luego del terremoto de 2010 en concepción. Tesis de diploma. Universidad del Bio Bio. Argentina. 2011.

GONZÁLEZ. L. Ingeniería Geológica. PEARSON EDUCACION. (2002 Madrid.744p

GUASCH, F & OLIVA, R. Análisis de la vulnerabilidad habitacional y los riesgos inducidos en los edificios altos de la ciudad de Santiago de Cuba. CENAIS. Santiago de Cuba. 2014.

GUASCH, F. “Apreciación de la amenaza sísmica de Cuba”. CENAIS, Ministerio de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente. 2014.

HERRERA, D. Delimitación de escenarios susceptibles a la licuefacción inducido por terremotos de gran magnitud en el consejo popular Guillermón Moncada del municipio Santiago de Cuba. Holguín. Tesis de diploma. ISMM. Moa. 2015

IWASAKI T., TATSUOKA F., TOKIDA K. Y YASUDA S. “A practical method for assessing soil liquefaction potential based on case studies at various sites in japan”, 5th japan symposium on earthquake engineering, november.1978.

KRAMER, S., & STEWART, J. Geotechnical Aspects of Seismic Hazards. En Y. Bozorgnia, & V. Bertero, Earthquake Engineering: From Engineering Seismology to Performance-Based Engineering. London. Taylor and Francis Group. 2004.

LEONI. "Procesos de licuefacción de suelo área geotecnia". Facultad de ingeniería Universidad nacional Federico Villarreal escuela universitaria de post-grado. U.N.L.P.

LEYTON. "Geología Superficial, frecuencias predominante de suelos y observaciones de licuefacción en Curicó tras el terremoto de Maule 2010. Tesis de diploma. Chile. 2011

LIAO S. Y WHITMAN R.V. "Overburden Correction Factors for SPT in Sand", Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, March, pp 373-377. 1986.

MUSSIO, V. "Potencial de licuefacción mediante el método de microtemores en la colonia solidaridad social", Mexicali. Dr. Efraín Ovando Shelley. Tesis de maestría. Universidad Nacional Autónoma de México. 111p. 2012.

NAVARRO, N., & MARÍN, E. "Evaluación de los edificios 12, 15 y 28". Informe Ingeniero Geológico. ENIA. Santiago de Cuba. 2004.

OBANDO, T. "Antología de los Efectos de la licuefacción en suelos sujetos a sollicitaciones sísmicas. Ejemplos de Casos". Universidad Internacional de Andalucía UNÍA (Huelva, España).

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.

OLIVA, R. "Vulnerabilidad Sísmica de la ciudad de Santiago de Cuba". CENAI. Santiago de Cuba. 1989.

PARELLADA, O. Delimitación de escenarios susceptibles a la licuefacción inducida por terremotos de gran magnitud en la zona sur de la provincia de Guantánamo. Holguín. Tesis de Diploma. ISMM. 2016.

PERUCCA, PÉREZ, A. & NAVARRO, C. "Fenómenos de licuefacción asociados a terremotos históricos. Su análisis en la evaluación del peligro sísmico en la Argentina". Rev. Asoc. Geol. Argent. v.61 n.4 Buenos Aires Oct. /dic. 2006.

Reinoso, D. (2016). Determinación de escenarios susceptibles a la licuefacción inducido por terremotos de gran magnitud en los municipios Baracoa, Yateras, El Salvador y Niceto Pérez de la provincia Guantánamo. Holguín. Tesis de Diploma. ISMMM.

ROBERTSON, K., & WRIDE, E. "Evaluating cyclic liquefaction potential using the cone penetration test", Canadian Geotechnical Journal, 1998.Vol. 35, N° 3, 442-459.

RODRIGUEZ, M. I. "Propiedades físico – mecánicas de los suelos de la provincia de Holguín". Holguín. Tesis de Diploma. ISMM. 1983. 71p.

SEED, B. & DE ALBA, P. "Use of SPT and CPT Test for Evaluating the Liquefaction Resistance of Sands", Use of In situ Test in Geotechnical Engineering, ASCE, 1986, pp 281-302.

SEED, B. & LEE, L. "Liquefaction on saturated sands during cyclic loading", Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, 1966. 92 (SM6), 105-134.

SEED, B., AND IDRIS, M. "A Simplified procedure for evaluating soil liquefaction potential", Journal of soil Mechanics and Foundation Engineering Division, ASCE, 1971. 97, SM9, 1249- 1273.

SEED, B, AND IDRIS, M. "Ground motions and soils liquefaction during Earthquakes", Technical report, Earthquake Engineering Research Institute. 1982.

SEED, B., IDRIS, M. & ARANGO I. "Evaluation of Liquefaction Potential Using Field Performance Data", Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 1983. Vol 109, N°3, pp 481-485.

SOTO & PARRA. Evaluación del potencial de licuación basado en el ensayo triaxial cíclico. Dinámica de Suelos. Universidad nacional de ingeniería. Facultad de ingeniería civil.

THOMPSON, O. "Estudio del suelo correspondiente al área seleccionada para la construcción de la Sede Universitaria en Caimanera. Informe Ingeniero Geológico. ENIA. Santiago de Cuba. 2005.

THOMPSON, O. "Ampliación de policlínico de Caimanera". Informe Ingeniero Geológico. ENIA. Santiago de Cuba. 2004

TOKIMATSU, K. & YOSHIMI Y. "Empirical Correlation of Soil Liquefaction Based on SPT N-value and Fines Content", Soils and Foundations, 1983, Vol 23, N°4, pp. 56-74.

TOKIMATSU, K. & YOSHIMI Y. "Field Correlation of Soil Liquefaction with SPT and Grain Size", International Conference of Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics, University of Missouri-Rolla, 1981. Pp 203-208.

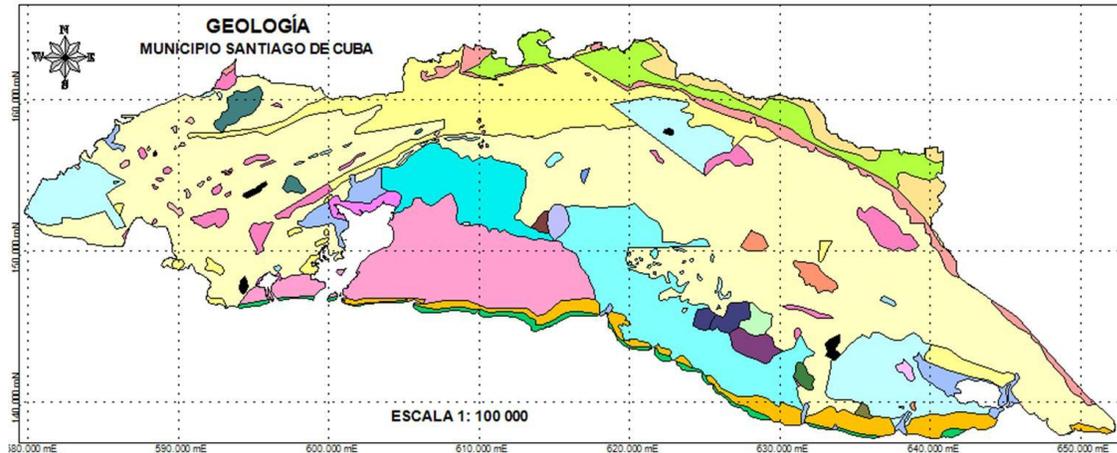
Wang, w. "Some finding in soil liquefaction". Water conservancy and hydroelectric power scientific research institute, Beijing, China. 1979.

Wikipedia. www.wikipedia.org

YOU, T. & IDRIS, I. "Liquefaction resistance of soils: Summary Report from the 1996 and 1998 NCEER/NSF Workshops on evaluation of liquefaction resistance of soils", Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 2001. Vol. 127, N° AISSN 1090-0241.

Anexos.

Anexo 1: Imagen del mapa geológico actualizado municipio Santiago de Cuba. Fuente: Instituto de Geología y Paleontología (IGP), 2008; tomado de Fernández, D, 2016.

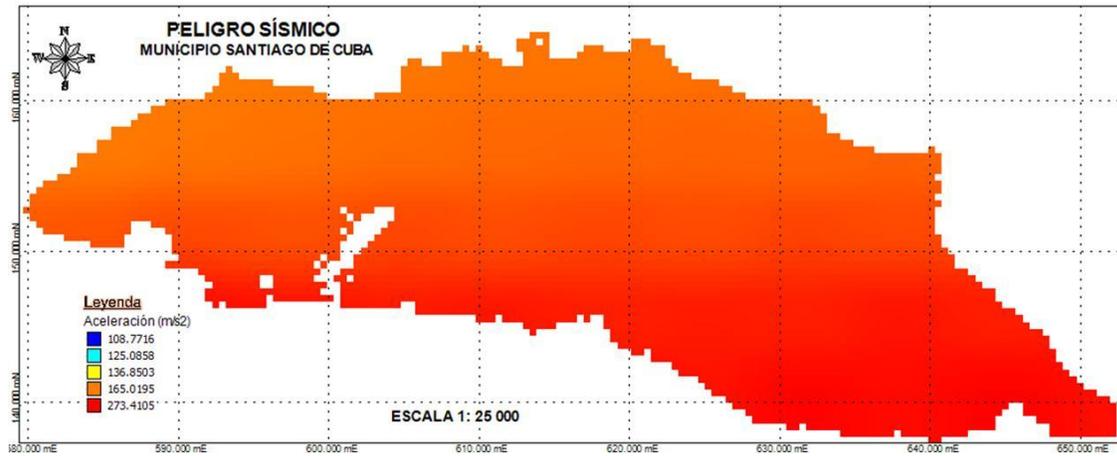


Leyenda

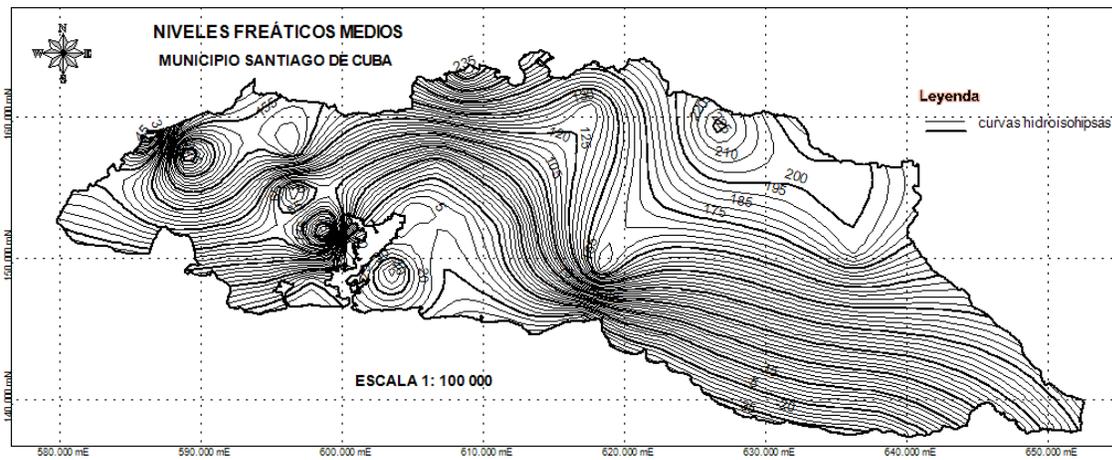
GEOLOGÍA

- Alternancia de calizas y margas con intercalaciones de sílice.
- Alternancia de tobas, tufitas, calizas tobáceas, lapilitas e intercalaciones de
- Andesitas
- Andesito-basaltos
- Arenas arcillosas, arenas, limos con gravas y guijaros polimícticos.
- Areniscas polimícticas, limolitas, margas, arcillas, calizas arcillosas, calizas
- Argilitas calcáreas limoso-arenáceas con interestratificaciones de limolitas y c
- Calizas biohémicas dolomitizadas, arcillas e intercalaciones de conglomerados p
- Calizas biohémicas masivas, carsificadas con conchas y corales y escasas interc
- Calizas porosas, calizas porosas y margas.
- Calizas, calcarenitas y margas, conglomerados, areniscas polimícticas y limolita
- Calizas, lutitas y silicitas.
- Conglomerados polimícticos y areniscas polimícticas de grano grueso.
- Cuerpos de metamorfitas de alta presión y mayor grado (principalmente zoisilitas)
- Depósitos en valles aluviales de composición y granulometría heterogénea.
- all others

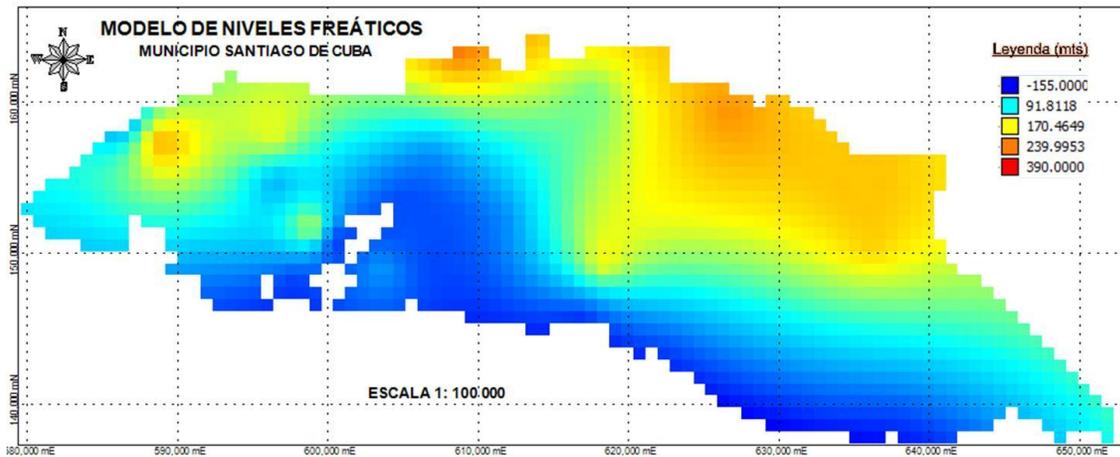
Anexo 2: Imagen del modelo de peligrosidad sísmica municipio Santiago de Cuba. Fuente: Chuy et al 2010; tomado de Galbán, L, 2014.



Anexo 3: Imagen del mapa de hidroisohipsas municipio Santiago de Cuba. Fuente: Elaborado por Liber Galbán Rodríguez, 2014 a partir de los datos cedidos para la investigación por la Delegación provincial de Recursos Hidráulicos de Santiago de Cuba.



Anexo 4: Imagen del modelo de niveles freáticos municipio Santiago de Cuba. Fuente: Elaborado por: Liber Galbán Rodríguez, 2014.

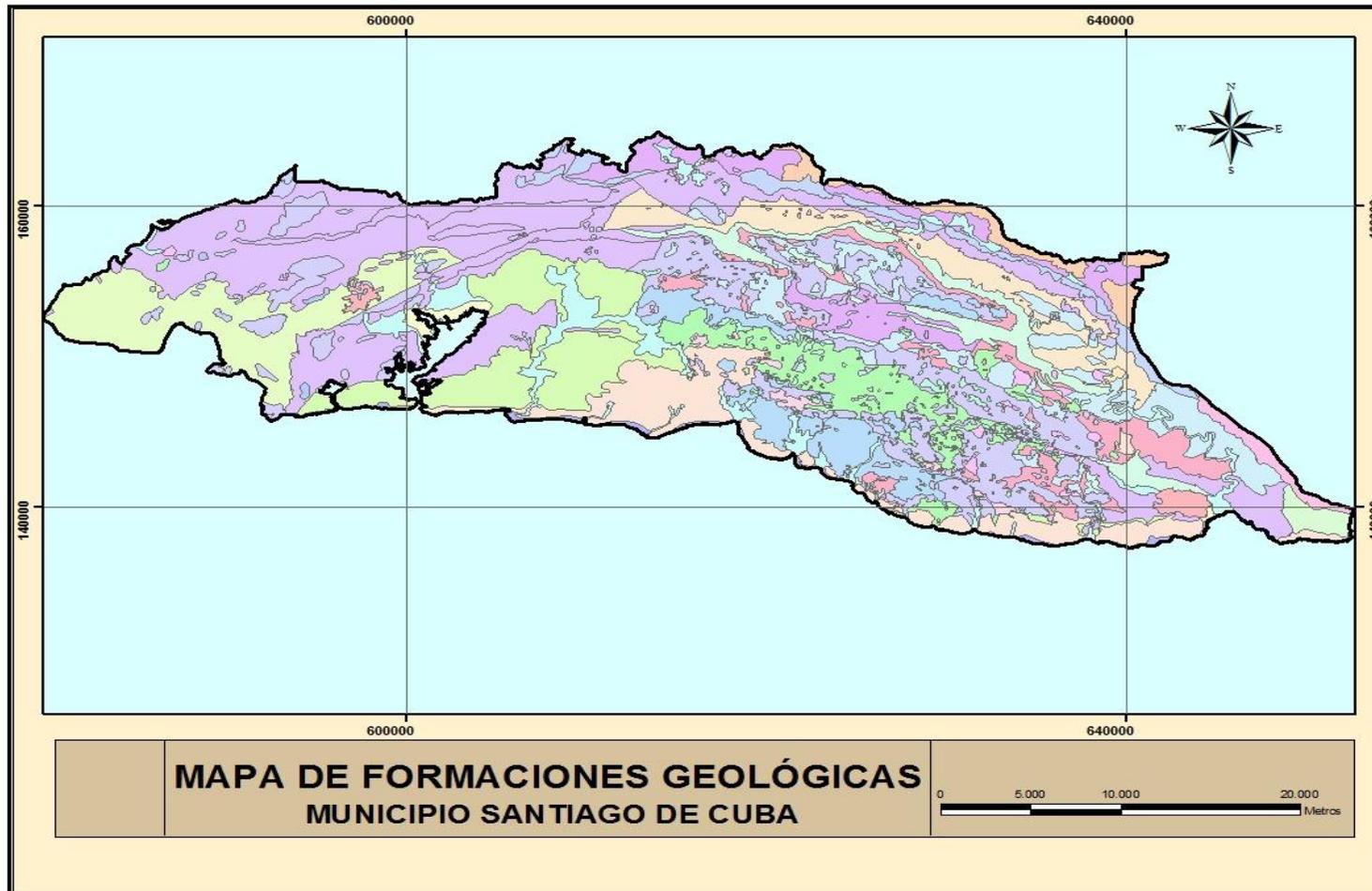


Anexo 5: Cálculo del factor de seguridad para el municipio Santiago de Cuba.

Obras Santiago de Cuba	N	valor de N1.60	CRR	Yd	H	(σ) encima n.f	γ_f	H	(σ) debajo n.f	μ	(σ^*)	(σ_t)	rd	amax	CSR	FSL para mag 6	FSL para mag 7	FSL para mag 8
Viviendas Martí y La Línea	0,6	0,54	0,085	15,06	0,6	9,036	18,57	0,5	9,285	5	4,285	13,321	0,991585	0,513	1,028	0,144804985	0,097907916	0,06911147
ECOCEM Empresa Nacional de Cemento	1,3	1,17	0,128	16,16	1,05	16,968	18,86	0,95	17,917	9,5	8,417	25,385	0,982788	0,513	0,988	0,227364566	0,153729451	0,108514906
Centro Oftalmológico Hospital Saturnino Lora	22	19,8	1,533	15,8	3	47,4	19,1	2,5	47,75	25	22,75	70,15	0,9541	0,513	0,981	2,750209557	1,859516689	1,312600016
Lixiviación y Cementación de Cobre	53	47,7	3,456	17	4	68	19,3	6	115,8	60	55,8	123,8	0,9235	0,513	0,683	8,901691322	6,018757201	4,248534495

.Mina Grande El Cobre																		
Industria Deportiva	37	33,3	3,891	15,56	2,7	42,012	19,04	3,8	72,352	38	34,352	76,364	0,94645	0,513	0,702	9,760293441	6,599289315	4,65832187
Base de Suministro de Alimentos a Buques	11,3	10,17	0,793	14,6	1	14,6	18,54	1	18,54	10	8,54	23,14	0,980875	0,513	0,886	1,574084834	1,064295996	0,751267762
Edificio IMS 18 Plantas, Trocha y Carretera del Morro Stgo de Cuba	50	45	3,238	15,7	1,1	17,27	18,7	3	56,1	30	26,1	43,37	0,9541	0,513	0,529	10,77869352	7,287866641	5,144376452
Edificio IMS 12 Plantas Micro IV Distrito José Martí	26	23,4	1,823	15,7	0,2	3,14	19,2	4,7	90,24	47	43,24	46,38	0,94798	0,513	0,339	9,46453946	6,399319294	4,517166561
Planta de Tratamiento de Residuales Toma 4 Bahía	16	14,4	1,114	14,3	1,2	17,16	18,6	1,8	33,48	18	15,48	32,64	0,97246	0,513	0,684	2,867807782	1,939029125	1,368726441

Anexo 6: Mapa de formaciones geológicas.



Anexo 7: Mapa de formaciones geológicas con la ubicación de algunas obras.

