



ISMM

INSTITUTO SUPERIOR MINERO
METALÚRGICO DE MOA
DR. ANTONIO NUÑES JIMENEZ



Facultad: Geología y Minería
Ingeniería Geológica

Trabajo de Diploma

Para Optar por el Título de

Ingeniero Geólogo

Título: 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.

Autor: Dailena Reinoso Mercantety

Tutor: MSc. Liuska Fernández Diéguez

Moa, 2016

“Año 58 de la Revolución”

Dedicatoria

Le dedico con todo mi corazón esta tesis a mi papá que a pesar de no estar a mí lado sé que desde el cielo se siente orgulloso de su hija, a mi madre que tanto me ha apoyado y que gracias a ella he logrado mi sueño, a mi niña que es el motor que me da fuerzas para seguir adelante, a mi padrastro que ha sido como un padre en estos años de universidad, a mis hermano, a mis abuelas, a mis amigas que me han apoyado en los momentos más difíciles, en especial a Idis, Yainelis, Yale, Mariana y Daylen.

AGRADECIMIENTOS

Gracias a mi tutora MsC. Liuska Fernández Diéguez que tanto me apoyo y ayudo para desarrollar con éxitos esta investigación.

Gracias a mi compañero Orlando (chino) por su apoyo incondicional y estar dispuesto cuando lo necesité.

Gracias a todos los profesores que formaron parte de mi desarrollo profesional y especial al decano Yurisley Valdez que nos apoyó desde el primer día de clase.

A mi familia, a mis amigos, a Despaigne por formar parte de mi vida y apoyarme en los primeros años en la universidad, a Marianelis por brindarme su ayuda cuando más lo necesitaba.

A todas las personas que de una forma u otra aportaron para la realización de este trabajo.

PENSAMIENTO

“Cuando un persigue un sueño todo el universo conspira a tu favor.”

Pablo Coelho

RESUMEN

La investigación está encaminada a la delimitar los escenarios susceptibles a la licuefacción inducido por terremotos de gran magnitud en los municipios de Baracoa, Yateras, Niceto Pérez y El Salvador de provincia de Guantánamo. Este trabajo responde a la necesidad de conocer las condiciones ingeniero geológicas de los suelos del territorios, en el que se piensa determinar y evaluar dichas condiciones. Se utilizaron un conjunto de métodos que resolvieran la necesidad de la investigación, como la validación de los resultados de acuerdo al análisis del sistema de indicadores propuestos por Fernández Diéguez en el 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. Se obtuvo como resultado la delimitación de escenarios susceptibles a la licuefacción en el municipio de Yateras para sismo de magnitudes mayores que 6.

ABSTRACT

The research aims to delimit the likely scenarios to liquefaction induced by earthquakes of great magnitude in the municipalities of Baracoa, Yateras, Niceto Pérez and El Salvador of Guantánamo province. This work responds to the need to know conditions geological engineer of soils in the territories, which is intended to determine and evaluate these conditions. We used a set of methods that resolve the need for the investigation, as the validation of the results according to the analysis of the system of indicators proposed by Fernandez Dieguez in 2015, the calculation of fixed safety factor and the determination of maximum intensities that can be obtained from seismic magnitudes that cause liquefaction in the study area. Resulted in the delimitation of stages susceptible to liquefaction in the municipality of Yateras for earthquake of magnitudes greater than 6.

INDICE

INTRODUCCIÓN	1
ESTADO DEL ARTE.....	3
Evidencias históricas del fenómeno de licuefacción de suelos.....	3
Reportes históricos de licuefacción de los suelos en Cuba	9
Investigaciones realizadas en Cuba.	10
CAPITULO I. CARACTERÍSTICAS FISICO-GEOGRAFICAS Y GEOLÓGICAS DE LA REGION DE ESTUDIO.....	14
Introducción	14
1.1 Características generales de los municipios Baracoa, Yateras, Niceto Pérez y El Salvador de la Provincia Guantánamo.....	14
1.1.1 Ubicación Geográfica.....	14
1.1.2 Relieve.....	15
1.1.3 Clima.....	17
1.1.4 Geomorfología	18
1.1.5 Características hidrogeológicas.....	18
1.1.6 Geología regional.....	19
1.1.7 Sismicidad y régimen sísmico.....	20
1.1.8 Condiciones ingeniero – geológicas. Por los informes de la Empresa Nacional de Investigaciones Aplicadas (ENIA).....	22
1.1.9 Desarrollo económico social	22
CAPITULO II: MARCO TEÓRICO CONCEPTUAL. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN PARA EVALUAR LA SUSCEPTIBILIDAD A LA LICUEFACCIÓN DE LOS SUELOS DEL ÁREA DE ESTUDIO.	24
Introducción	24
2.1 Marco teórico conceptual.....	24
2.2 Metodologías para determinar los escenarios susceptibles a la licuefacción.	45
2.3. Metodología aplicada para el análisis de los indicadores para el estudio de la susceptibilidad a la licuefacción en el área de estudio.	46

CAPITULO III: VALIDACIÓN DEL SISTEMA DE INDICADORES PROPUESTOS EN LOS MUNICIPIOS..... 48

3.1. Criterios para la selección de escenarios susceptibles a la licuefacción. ...	48
3.2 Validación del sistema de indicadores propuestos en el municipio Baracoa.	49
3.2.1 Condiciones geológicas.	49
3.2.2 Sismicidad	52
3.2.3 Características hidrográficas	52
3.2.4 Condiciones ingeniero geológicas	53
3.2.5 Cálculo de Factor de seguridad para la licuefacción.....	55
Conclusiones parciales para el municipio Baracoa.....	57
3.3 Validación del sistema de indicadores propuestos en el municipio Yateras.	57
3.3.1 Condiciones geológicas	57
3.3.2 Sismicidad	60
3.3.4 Condiciones ingeniero geológicas	61
3.3.5 Cálculo de Factor de seguridad para la licuefacción.....	62
Conclusiones parciales para el municipio Yateras.....	63
3.4 Validación del sistema de indicadores propuestos en el municipio Niceto Pérez.	64
3.4.1Condiciones geológicas.	64
3.4.2 Sismicidad	66
3.4.3Características hidrográficas	66
3.4.4 Condiciones ingeniero geológicas	67
3.4.5 Cálculo de Factor de seguridad para la licuefacción.....	68
Conclusiones parciales para el municipio Niceto Pérez.....	69
3.5 Validación del sistema de indicadores propuestos en el municipio El Salvador.....	70
3.5.1 Condiciones geológicas	70
3.5.2 Sismicidad	71
3.5.3 Características hidrográficas	72
3.5.4 Condiciones ingeniero geológicas	73

3.5.5 Cálculo de Factor de seguridad para la licuefacción.....	74
Conclusiones parciales para el municipio El Salvador.....	75
Conclusiones	76
Recomendaciones	77
Bibliografía.....	78
Anexos:.....	83



INTRODUCCIÓN

Los terremotos son fenómenos debidos a la brusca liberación de la energía acumulada durante largos periodo de tiempo en la zona superficial de la tierra. Los sismos producen ondas de varios tipos, que se propagan desde su foco en todas las direcciones a través de la tierra. Este movimiento del suelo tiene una característica importante como su irregularidad, por lo cual las construcciones pueden verse afectada por fuerzas sísmicas actuando en cualquier dirección. La sismicidad es uno de los fenómenos naturales que más ha preocupado a la humanidad a través de los tiempos, pues los extraordinarios y rápidos avances de la ciencia ni antes ni ahora se han podido disponer de un mecanismo predictivo capaz de alertarnos ante la inminencia de un terremoto y siguen ocurriendo las destrucciones de grandes ciudades, las incalculables pérdidas de vidas humanas y perdidas en la economía de los países afectados. Durante los terremotos el movimiento del terreno puede causar una pérdida de la firmeza o rigidez del suelo provocando resultados como el desplome de edificaciones, deslizamientos de tierra, daños en las tuberías, entre otros. Este fenómeno está principalmente, asociado con suelos saturados poco cohesivos. El término licuefacción, incluye entonces todos los fenómenos donde se dan excesivas deformaciones o movimientos como resultado de transitorias o repetidas perturbaciones.

Cuba es amenazada por fenómenos naturales e inducidos, destacándose entre los principales y más conocidos los huracanes, sismos, inundaciones y deslizamientos. La licuación de los suelos es un fenómeno inducido de la actividad sísmica, este es un fenómeno poco estudiado en nuestro país. Actualmente existe gran preocupación por parte del Estado e investigadores, por realizar una planificación física y ordenamiento territorial en armonía con la naturaleza teniendo en cuenta las condiciones geológicas, geomorfológicas e ingeniero geológicas del territorio nacional. Las provincias orientales son las de mayor peligro sísmico según estudios realizados por diversos investigadores, es por ello que se le debe prestar mayor atención a los fenómenos inducidos en el territorio. Normalmente la mayoría de los estudios de peligro se enmarcan en la provincia de Santiago de Cuba, mas la provincia de Guantánamo no está exenta de sufrir grandes



afectaciones ante un sismo de gran magnitud. La licuefacción es provocada por terremotos bajo ciertas condiciones del suelo, estas condiciones son las que se desean determinar en los diferentes municipios de la provincia Guantanamera. Es por ello que la investigación se realiza para resolver dudas relacionadas con la susceptibilidad de los suelos a licuar ante un sismo de gran magnitud.

Problema de la investigación: Necesidad de evaluar las condiciones ingeniero-geológicas de los municipios de Baracoa, El Salvador, Yateras y Niceto Pérez para determinar si son licuables o no ante un sismo de gran magnitud.

Objeto de estudio: Los suelos de los principales asentamientos poblacionales en los municipios de Baracoa, El Salvador, Yateras y Niceto Pérez de la provincia Guantánamo.

Objetivo general: Evaluar las condiciones ingeniero geológicas de los suelos de los municipios de Baracoa, El Salvador, Yateras y Niceto Pérez de la provincia Guantánamo para saber si son licuables ante un sismo de gran magnitud.

Objetivos específicos:

- ✚ Clasificar los suelos predominantes en las áreas de estudio a partir de las condiciones ingeniero geológicas.
- ✚ Realizar el cálculo del factor de seguridad en los suelos de las áreas de estudio.
- ✚ Determinar los escenarios susceptibles a la licuefacción en las áreas de estudio según las condiciones ingeniero-geológicas

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 y delimitar los escenarios susceptibles.



ESTADO DEL ARTE

La licuefacción de suelo describe el comportamiento de los suelos que, estando sujetos a la acción de una fuerza externa (carga), en ciertas circunstancias pasan de un estado sólido a un estado líquido, o adquieren la consistencia de un líquido pesado. Es un tipo de corrimiento, provocado por la inestabilidad de un talud. Es uno de los fenómenos más dramáticos y destructivos y, además, más polémicos y peor explicados que pueden ser inducidos en depósitos por acciones sísmicas. La licuefacción ocurre en suelos granulados sueltos saturados o moderadamente saturados con un drenaje pobre, tales como arenas sedimentadas o arenas y gravas que contienen vetas de sedimentos impermeables. Además durante este proceso donde actúa la fuerza exterior, por lo general es una fuerza cíclica sin drenaje, tal como una carga sísmica, las arenas sueltas tienden a disminuir su volumen, lo cual produce un aumento en la presión de agua en los poros y por lo tanto disminuye la tensión de corte, originando una reducción de la tensión efectiva (Wikipedia, la enciclopedia libre.htm).

Evidencias históricas del fenómeno de licuefacción de suelos.

Según el Instituto Nacional de Prevención Sísmica en el 2006 (INPRES) los procesos de licuefacción han ocasionado los efectos más destructivos durante los principales terremotos ocurridos en la Argentina. Sin embargo, a excepción de la provincia de San Juan, los estudios referidos a estos fenómenos son escasos, fundamentalmente debido a la pobre preservación de las estructuras. Aunque los fenómenos de licuefacción han sido descriptos en muchas regiones sísmicas del mundo, en Argentina sus efectos han sido subestimados. Después de la colonización española, se han registrado al menos trece terremotos con características destructivas y fenómenos de licuefacción asociados (1817, 1861, 1844, 1894, 1899, 1920, 1927, 1929, 1944, 1948, 1949, 1952) que han impactado negativamente en el desarrollo y la economía de la región a lo largo de los últimos 200 años. Sin embargo, no existe una relación clara entre sus epicentros y las principales estructuras cuaternarias y en la mayoría de los casos, tampoco se han reconocido superficies de ruptura histórica asociadas, a excepción de las



observadas en la Laja (1944), Lago Fagnano (1949) y Niquizanga (1977). También es probable que muchos de los terremotos de gran magnitud se hayan caracterizado por deformaciones distribuidas en plegamientos y fracturación secundaria, antes que en rupturas superficiales. Durante estos sismos, los efectos de licuefacción fueron los resultados más espectaculares de las sacudidas sísmicas, ocasionando gran parte de los daños.

Por ello, el estudio de los terrenos que presentan las condiciones físicas y litológicas susceptibles de sufrir procesos de licuefacción durante la ocurrencia del movimiento sísmico en las áreas pobladas de la Argentina, resulta un campo de investigación prioritario para realizar una adecuada planificación urbana y de obras de infraestructura, elementos vitales para el desarrollo de la región oeste del territorio (INPRES 2006).

Los análisis de evaluación del peligro sísmico en las últimas décadas han sido progresivamente mejorados con la utilización de los datos geológicos que permiten obtener la historia sísmica de las fallas activas. Los registros históricos e instrumentales son sumamente cortos en esta porción del continente sudamericano como para reflejar precisión en los valores de sismicidad a largo plazo y efectuar correctas evaluaciones del peligro de terremotos (INPRES 2006).

La región oeste de Sudamérica posee una compleja morfología, con un margen occidental activo, representado por una topografía y sismicidad típicas debido a la deriva de las placas de Nazca, Antártica y Sudamérica. Esta convergencia comenzó hace aproximadamente 200 millones de años con la subducción de las placas oceánicas por debajo de la continental, con pendiente hacia el este, con un desplazamiento al oeste del contacto océano-continente a una velocidad absoluta de 2,2 cm/año (Uyeda y Kanamori 1979). Las velocidades en las distintas épocas geológicas probablemente fueron diferentes en magnitud y direcciones, lo que generó movimientos que son prácticamente imperceptibles debido a que los



intervalos de las observaciones son cortos con respecto al tiempo total de movimiento (INPRES 2006).

EL TERREMOTO DEL 13 DE DICIEMBRE DE 1692 (SALTA)

En diciembre de 1692 a las 11 hs. se produjo en la población de Talavera del Esteco (provincia de Salta), un violento sismo de Ms 7,0. La profundidad hipocentral fue de 30 km y la intensidad máxima IX en la escala Mercalli Modificada (EMM) (INPRES 2006).

Entre las 10 y 11 de la mañana, se produjo un violento terremoto, que por dos días posteriores se repitió con mayor o menor intensidad, desapareciendo Talavera y produciendo derrumbes y agrietamientos en el Valle de Lerma donde estaba la ciudad de Salta. El derrumbe de los edificios y los ruidos subterráneos mantuvieron a la población en crisis" (Lozano 1873).

Según antiguos relatos, "la tierra se abrió en varias partes y lanzó una manga de agua, que inundó todo, no dejando tras sí, sino un montón de ruinas". Otros relatos mencionan que "Esteco se arruinó enteramente con un terremoto que abriendo la tierra por varias partes arrojó borbotones de agua que inundaron todo el terreno" (Alcedo 1789).

EL TERREMOTO DEL 4 DE JULIO DE 1817 (SANTIAGO DEL ESTERO)

El 4 de julio de 1817, en la capital de la provincia Santiago del Estero a las 17:30 hs se produjo un fuerte sismo a una profundidad de 30 km., Ms 7,0 e intensidad máxima de VIII (EMM) (INPRES 2006). Citan el 4 de julio de 1817 en Santiago del Estero fenómenos de licuefacción "Informes fidedignos que se han tomado ha causado el terremoto del día 4 del corriente, rige los más espantosos estragos en la jurisdicción, así al norte de la ciudad se desplomaron las Iglesias, se destruyeron los edificios, se abrieron grietas en la tierra y salió agua, en este pueblo ruinoso en lo material según el quebranto que han sufrido los templos y los conventos sin poderse registrar una casa particular que no haya sufrido algo"



(Actas Capitulares de Santiago del Estero, 1817). Hubo destrozos en Tucumán y Jujuy y en los alrededores de la ciudad de Salta, la tierra se abrió arrojando cantidad de agua y arenas de distintos colores (Temple 1920).

EL TERREMOTO DEL 18 DE OCTUBRE DE 1844 (SALTA)

El 18 de octubre de 1844, en la ciudad de Salta a las 23 hs. se produjo un sismo de Ms 6,5 y 30 km de profundidad. Su intensidad máxima fue de VII (EMM) Se produjeron daños en construcciones y se registraron fenómenos de licuefacción "hubieron varios reventones de tierra: de algunas brotó agua, y de otras la tierra interior apareció en la superficie" (Toscano 1901). Según otro relato, "La tierra se entreabrió en varios lugares, expeliendo grandes cantidades de agua y arena" (Diario El Orden 1884). El sismo fue percibido en Tucumán, Catamarca, La Rioja y Santiago del Estero (INPRES 2006).

EL TERREMOTO DEL 20 DE MARZO DE 1861 (MENDOZA)

El 22 de marzo de 1861 a las 23 hs. se produjo un terremoto de Ms 7,2, profundidad de 30 km e intensidad máxima IX - X (EMM), con epicentro en la ciudad de Mendoza, el que produjo más de 12.000 muertos (Rickard 1863), alrededor a 1.000 heridos y numerosas casas destruidas. La ciudad de Mendoza fue completamente destruida y se registraron fenómenos de licuefacción (INPRES 1995, 2006).

Buena Nueva y Las Ciénagas fueron las zonas más afectadas por la licuefacción, con grandes fisuras y grietas, con eyección de agua y formación de volcanes de arena y derrames. Ponte (1987) describe que durante este terremoto se generó una grieta en la localidad de Borbollón de la que salieron gases y agua con fuerte olor a podrido, conocido como "Los baños del Obispo".

Meliton González de Solar en una de sus cartas (En: Revista de la Junta de Estudios Históricos de Mendoza, 1936) describe grandes masas de rocas cayendo de las laderas montañosas y numerosas fisuras en la localidad de Uspallata. Este



autor describe el colapso de terrenos y menciona que el área denominada "La Ciénaga" (Lavallo) fue completamente desecada luego del sismo y se originó una fisura de más de una legua que formó una nueva corriente llamada "río del temblor", cuyas aguas contenían sulfuros en sus partes más profundas (INPRES 2006).

Forbes (1861) describió que después de una violenta detonación y una sacudida general cayeron grandes masas rocosas. A la mañana siguiente observó fisuras y grietas en las colinas montañosas donde enormes masas rocosas rodaron hacia los valles, "algunas laderas han sido fisuradas surgiendo abundante agua".

Bastías *et al.* (1993) relacionan este sismo con la denominada falla La Cal, ubicada inmediatamente al norte del cerro del mismo nombre. Mingorance (2000a y 2000b) también reconoció evidencias topográficas de rupturas recientes, al NE de la antigua ruta 7 (ruta provincial 83) y asoció esta falla al terremoto de 1861.

LICUACION DE SUELOS EN CHIMBOTE.

Sismo del 31 de mayo de 1970:

Uno de los casos mejor documentados de licuación de suelos en el Perú. La ciudad de Chimbote se ubica a 400 km al norte de Lima. El sismo fue de subducción con magnitud $M_s = 7.8$, profundidad focal de 45 km y ocurrió 50 km costa afuera al oeste de Chimbote. La máxima intensidad fue de IX grados en la escala de Mercalli Modificada. Desplazamiento lateral del terreno por licuación de depósitos deltaicos y de playa. Agrietamiento del terreno y compactación diferencial en el centro de Chimbote Volcanes de arena y eyección de agua debido a licuación (INPRES 1995, 2006), (ver figura 1).



Figura 1: Izquierda: Agrietamiento del terreno en la llanura aluvial del Río Lacramarca. Derecha: Daño en el Puerto de Chimbote. Derrumbe del camino pavimentado. Una y otra imagen fue tomada luego del terremoto en Chimbote, Perú (1970).

Terremoto del 12 de enero del 2010

El 12 de enero de 2010 en Haití, un terremoto de magnitud 7.0 en la escala de Richter, con epicentro a unos 15 kilómetros al suroeste del centro de Puerto Príncipe y con hipocentro a unos 10 kilómetros de profundidad, sacudió la capital de Haití, destruyendo una parte importante de las zonas sur y suroeste de la capital haitiana, incluyendo a Leogane y Jacmel, y provocando cerca de 250,000 muertos, unos 300,000 heridos, 250,000 viviendas destruidas, 30,000 comercios colapsados y más de un millón de damnificados, siendo esta la mayor sacudida sísmica desde el año 1770. El terremoto de Puerto Príncipe, localizado en el extremo suroeste fue devastador. La razón fundamental es que la ciudad de Puerto Príncipe ha sido levantada sobre los suelos arcillosos flexibles, de muy mala calidad y bajas velocidades de ondas de corte, depositados en la llanura occidental remanente del antiguo canal marino de Enriquillo, y sobre sedimentos margosos y gravas gruesas y sueltas del pie de monte existente en la franja sur de la ciudad capital, lo que provocó un incremento extraordinario de la aceleración del suelo, haciendo que casi todas las columnas fallaran por esfuerzos cortantes y que las edificaciones se desplomaran verticalmente matando a cientos de miles de haitianos que no tuvieron tiempo para salir, ni para protegerse, (ver figura 2).



Figura 2. Izquierda. Perfil de los suelos arenosos arcillosos del valle de la Ciudad de Puerto Príncipe, generador de altas intensidades durante el proceso sísmico. Estos suelos son muy licuables. 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.

Reportes históricos de licuefacción de los suelos en Cuba

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.

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& Oliva, 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



Santiago de Cuba (Chuy et al., 2002), siendo sacudida por más de 1000 sismos perceptibles desde el año 1528 hasta la fecha (Chuy, 2010).

A tales efectos se recuerdan en el municipio Santiago de Cuba y más específicamente en su ciudad cabecera, los grandes terremotos ocurridos el 3 de febrero de 1932, magnitud 6.75 en la escala Richter, intensidad sísmica de VIII MSK provocó la licuefacción de la calle La Alameda (Chuy, 1999) y el 8 de agosto de 1947, donde se reportaron serios daños en la ciudad de Santiago de Cuba, fundamentalmente en los alrededores de la bahía (Chuy et.al., 2002), (ver figura 3)



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

Investigaciones realizadas en Cuba.

Nuestro país no ha estado exento 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. 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 si realizaron investigaciones como la tesis de maestría (Fernández, 2000) con el título “Posibilidad de ocurrencia del fenómeno de licuefacción en la cuenca



de Santiago de Cuba por terremotos fuertes”, donde el autor hace un mapa esquemático pronóstico de ocurrencia del fenómeno de licuefacción en Santiago de Cuba por terremotos fuertes. En la investigación utiliza por primera vez la combinación de factores importantes como la geología, geomorfología, sísmica y la información ingeniero geológica de forma automatizada. En esta investigación se hace una suposición conjugando factores como la geología, geomorfología y el nivel freático.

El informe para el proyecto titulado “Mapa de riesgo sísmico de la ciudad de Santiago de Cuba” realizado por investigadores del Centro Nacional de Investigaciones Sismológicas (CENAI) fue otras de las investigaciones realizadas para la determinación de licuefacción evaluando aspectos importantes como:

- Tipología y propiedades de los suelos
- Profundidad del nivel freático
- Topografía del terreno
- Magnitud y distancia de los terremotos.

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

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



antiguos cauces o actual llanura fluvial, principal deficiencia encontrada en el trabajo.

Otra de las investigaciones es la realizada por (Ordaz-Hernández, 2013) enfocada en la evaluación de la susceptibilidad a la licuefacción de los sedimentos cuaternarios del emplazamiento de la ciudad de San Cristóbal, provincia de Artemisa, Cuba. Los resultados de 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, sola 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.

Otra de las investigaciones realizadas fue la tesis de grado (Herrera, 2015) titulada “Delimitación de escenarios susceptibles a la licuefacción inducido por terremotos de gran magnitud en el consejo popular Guillermon Moncada del municipio de Santiago de Cuba”, en este trabajo se hace evaluación de las condiciones ingeniero geológicas y las particularidades sísmicas del Consejo Popular. Se utilizaron un conjunto de métodos que resolvieran la necesidad de la investigación como el cálculo del factor de seguridad corregido, la determinación de intensidades máximas que se pueden obtener a partir de magnitudes sísmicas que provoquen licuefacción en el área de estudio. Se obtuvo como resultado un mapa de susceptibilidad a la licuefacción en el área de estudio donde pudimos apreciar que desde el punto de vista de clasificación de suelos que los mismos varían espacialmente de forma aleatoria. da como resultado un mapa de susceptibilidad a la licuefacción a partir de interpretar factores como geología, nivel freático y las propiedades físicas y mecánicas lo que le permitió calcular el Factor de seguridad



para la licuefacción(FSL) dando sectores entre Alto, medio y bajo lo cual dependen del tipo de suelo. Los resultados con FSL menores de 1 se caracterizan por ser suelos blandos representados por un material tipo cieno con un comportamiento común en cuanto al contenido de humedad $>$ al 30 %, densidades secas $< 13,50 \text{ kN/m}^3$, con pesos específicos que oscilan en el rango de (26,60 a 27,00) kN/m^3 y resistencia a la penetración dinámica de 4 a 6 golpes por cada 30 cm de penetración (SPT), desde el punto de vista de clasificación de suelos varían entre una arcilla muy plástica con arena (CH) a una arena arcillosa con gravas (SC), predominando los suelos tipo (CH) en dirección norte, hacia el centro este los suelos tipo SC y hacia el sur los de tipo OL - OH. Esta investigación es de gran importancia ya que es actual y demuestra con datos la probabilidad de ocurrencia del fenómeno ante sismos de magnitud 7.5 y superiores. Se demostró que para magnitudes menores es muy poco probable la manifestación de la licuefacción de los suelos.

En la tesis de maestría de (Fernández, 2015), también se realiza un estudio del municipio de Caimanera, con el objetivo evaluar las condiciones ingeniero geológicas de los suelos para predecir de forma efectiva si son licuables ante un sismo de gran intensidad. Se llevó a cabo mediante un procedimiento que permite la caracterizar el área de estudio y calcular el factor de seguridad para la licuefacción. Se obtuvo como resultado un esquema pronóstico de susceptibilidad a la licuefacción de cada sector de estudio definiendo las zonas potencialmente licuables y los menos licuables. Se elaboró un procedimiento que permitió caracterizar las condiciones ingeniero geológicas de los suelos y zonificar el potencial de licuefacción.



CAPITULO I. CARACTERÍSTICAS FISICO-GEOGRAFICAS Y GEOLÓGICAS DE LA REGION 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 de los municipios Baracoa, Yateras, Niceto Pérez y El Salvador de la Provincia Guantánamo.

1.1.1 Ubicación Geográfica.

Baracoa se encuentra situada al norte de la provincia de Guantánamo, muy próximo al extremo Oriental de la isla de Cuba. Limita con otros municipios: al Sureste con Maisí, al suroeste con Imías y San Antonio del Sur, al Oeste con Yateras y Moa, este último perteneciente a la provincia de Holguín, y al norte con el Océano Atlántico. El territorio ocupa un área de 976,6 km² y alcanza su mayor extensión de este a oeste entre la desembocadura de los ríos Yumurí, al Oriente, y Jiguaní, al Occidente. Es el mayor municipio de la provincia de Guantánamo; ocupa el 15,3% del territorio provincial (Tomado de Ecured).

El municipio de Niceto Pérez se encuentra ubicado hacia la porción suroeste de la provincia de Guantánamo, ocupa un área de 639,8 kilómetros cuadrados, limita al Norte con el municipio de El Salvador, al Este con los municipios de Caimanera y Guantánamo, al Sur con el Mar Caribe y al Oeste con la provincia de Santiago de Cuba (Tomado de Ecured).

El Salvador municipio situado en la provincia de Guantánamo. Tiene 637 km² y una población de 45.461 habitantes. Se ubica al noroccidente de la provincia. Linda al Norte con el municipio Sagua de Tánamo perteneciente a la Provincia de Holguín; al sur con el municipio Niceto Pérez; al Este con el municipio de Manuel Tamez y al Oeste con la provincia de Santiago de Cuba, municipios de Segundo Frente y Songo la Maya (Tomado de Ecured).



El municipio Yateras, limita al Norte con el municipio de Moa de la provincia de Holguín, al Suroeste con el municipio Manuel Tames, y al este con el municipio Baracoa. Posee una extensión territorial de 6664,2 km², lo que representa un 10.74% de la totalidad del territorio de la provincia Guantánamo; con una población de 19866 habitantes (de ellos 10513.0 hombres y 9353.0 mujeres) y una densidad poblacional de 30 habitante por km² (Mesa Romero, 2007), (ver figura 4).

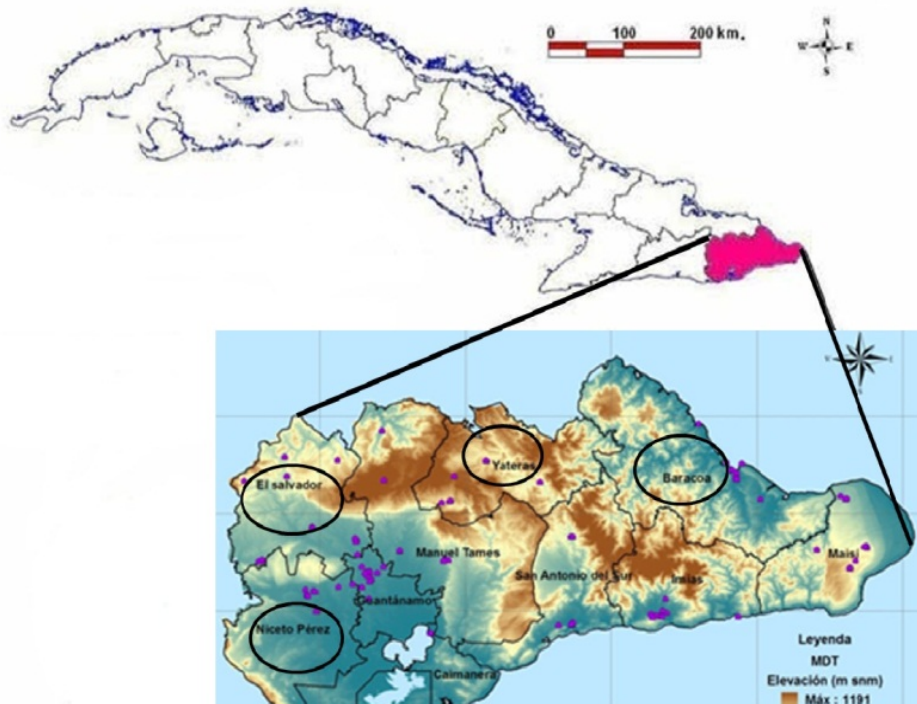


Figura 4: Ubicación geográfica de los municipios Baracoa, Yateras, Niceto Pérez y El Salvador de la provincia Guantánamo.

1.1.2 Relieve

En el área de estudio podemos encontrar un relieve variado, existiendo zonas de montañas y de llanuras, predominando las zonas montañosas. En los municipios El Salvador, Yateras y Baracoa podemos encontrar un relieve montañoso, mientras que el municipio de Niceto Pérez está enmarcado en la zona de la cuenca de Guantánamo. (Ver figura 5)

El Salvador según el Atlas Nacional de Cuba presenta montaña bajas en forma de mesa dentro del grupo de bloque erosivo tectónico correspondiente a los



macizos alpinos medios, denotándose la presencia de bloques de nudos, formas carsicos-sufosivas, cuevas grandes y carso cónico o de cúpulas. Hacia el NE de municipio, el relieve pasa a ser del tipo de montañas bajas profundamente diseccionadas (cuchillas), esto corresponde solo de modo muy general al aspecto del área y se adapta a la zona oriental. Predominan pendientes entre el 15 y 30%, ocupando el 46% del área total (EcuRed.html).

En Baracoa existen zonas que presentan un relieve suavemente montañoso cortado con diferencias de alturas entre 100 y 300 m, los ángulos de inclinación varían entre 10° y 70° predominando las pendientes con 20- 30 m, se observan zonas elevadas conformando un grupo de montañas de cimas en forma de mesetas, picos y laderas abruptas (Domínguez, Martínez, 1991).

Niceto Pérez pertenece a la cuenca de Guantánamo con características topográficas llanas y ligeras ondulaciones, por entre las cuales fluyen ríos que nacen en las tierras vecinas. Las rocas predominantes son sedimentarias como: calizas, margas y areniscos (EcuRed.html).

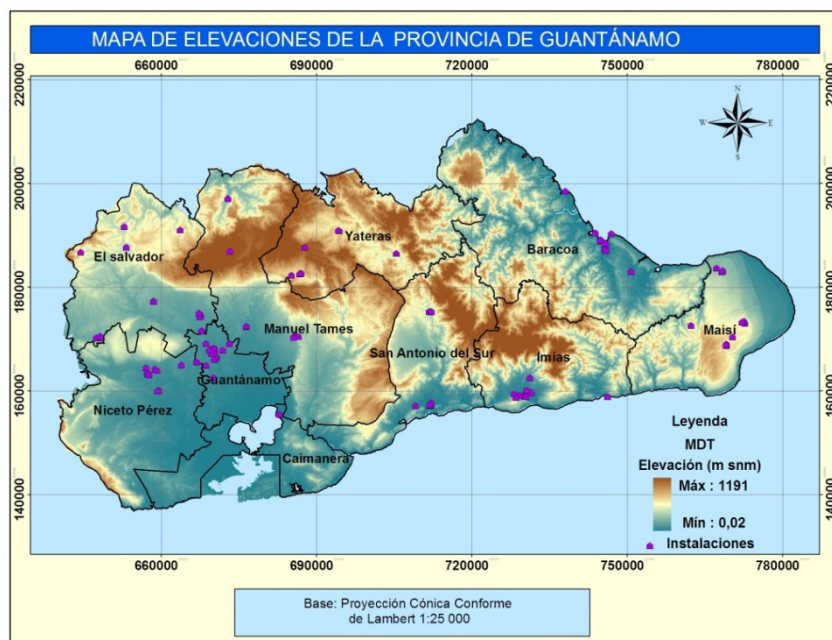


Figura 5: Esquema de elevaciones de la provincia Guantánamo realizado por Geo-Cuba Guantánamo.



1.1.3 Clima

El clima presente en estos municipios es tropical de sabana, por ser parte de la isla de Cuba y por estar ubicada en la zona tropical. En el municipio El Salvador la media anual de precipitaciones aumenta desde el llano a la montaña de 800 – 1200 mm a 1200 – 1600mm. La humedad relativa es de aproximadamente 79%. Los vientos predominantes son del Este y Noreste, del SE y NW con menor frecuencia. La temperatura media anual es de 25,8⁰ C. En Baracoa el clima presente según la clasificación de Koppen es tropical lluvioso. Con lluvias distribuidas estacionalmente en forma muy marcada con más del 65% del acumulado anual en el periodo lluvioso (mayo-octubre). En general se caracteriza con elevadas temperaturas todo el año: los meses más cálidos son julio y agosto con temperaturas 27.8 y 27.6 °C respectivamente, los más frescos enero y febrero con 23.7 y 24.0°C. La temperatura media anual es de 25.8°C con una tendencia al aumento. Estas altas temperaturas dan lugar a evaporación y evapotranspiración alta, que conjuntamente con la pobre precipitación, determina el carácter seco (semiárido) de la zona en algunos meses. La precipitación media anual es de 2 700 mm, siendo el mes de julio el menos lluvioso con una media de 93,5 mm (Domínguez, Martínez, 1991).

Mientras que Yateras está caracterizado por un clima templado-frío acompañado de precipitaciones con valores entre 100 y 300 mm anuales, que tributan al suelo potencialidades productivas de los cultivos varios, vegetales y frutas. Lo identifica la presencia del meridiano 75 de Greenwich que rigen los usos horarios; así como sus extensas elevaciones propias del grupo montañoso Nipe-Sagua –Baracoa (Mesa Romero, 2007).

En Niceto Pérez atendiendo a datos recogidos de la estación meteorológica de Guantánamo; presenta un balance térmico que varía desde las costas hacia el interior. En la porción litoral la temperatura media normal del aire oscila entre 26 °C y 29 °C, abarca fundamentalmente el sur de la localidad pues recibe con mayor incidencia la influencia marítima. En el centro y este la temperatura media normal es aproximada a unos 25 °C y 26 °C al igual que en los restantes puntos, siendo el



mes más cálido Julio con 27.7 °C y el más frío Enero con 23.7 °C. En general las precipitaciones anuales están comprendidas entre los 1 000 y 1 200 mm aproximadamente. Estas escasas lluvias tiene su explicación en gran medida en la poca influencia de la humedad que traen los vientos alisios del noreste que arriban a la localidad casi secos y además, a la eliminación de numerosas áreas de árboles que permitían reguardar la humedad de la localidad sobre todo hacia el sur. Respecto a los ciclones tropicales, se destaca que no han afectado considerablemente al territorio, no obstante el ciclón Flora de octubre de 1963, causó numerosas pérdidas por su duración e intensidad (EcuRed.html).

1.1.4 Geomorfología

El territorio estudiado presenta un relieve montañoso, las montañas se han formado por acciones conjuntas de diferentes factores tanto climatológicos como tectónicos, durante la etapa Plioceno Cuaternario, en este periodo se formaron diferentes tipos de superficies, entre las que se destacan, superficies formadas por los procesos exógeno (denudación y acumulación) y endógenos (litomórficos, volcánicos y tectonomórficos). La porción del Municipio Niceto Pérez pertenece a la cuenca de Guantánamo con características topográficas llanas y ligeras ondulaciones, por donde fluyen ríos que nacen en las tierras vecinas. Las rocas predominantes son sedimentarias como: calizas, margas y areniscos. Existen zonas que presentan un relieve bastante joven, se complica por la existencia de numerosos fallas, verticales o casi verticales, que se manifiestan en la morfología por la presencia de formas acodadas y tramos de anomalías en los ríos, así como escalones tectónicos claramente evidenciados (EcuRed.html). El territorio de Yateras está constituido por montañas, premontañas y alturas tectónicas erosivas, horst y bloques, muy diseccionadas, cuya altitud no sobrepasa los 900 m (Mesa Romero, 2007), (ver figura 8).

1.1.5 Características hidrogeológicas.

En estos municipios existe una desarrollada red de drenaje superficial, localizándose las subcuencas de los ríos Sagua, Jaibo, Guantánamo y Bano, el primero escurre a la vertiente Norte del Grupo Sagua – Baracoa y el resto a la del



Sur, irrigando con sus aguas al valle de Guantánamo. Estos ríos en su curso superior poseen potencial hidroenergético. Las cuencas del río Jaibo y Sagua se ven afectadas por la degradación, producto de la deforestación y mal manejo, con serios procesos erosivos, así como la contaminación producida por el vertimiento de los residuales de las despulpadoras existentes en las mismas. En Baracoa la red fluvial de la zona es densa, formada por ríos y arroyos los cuales a veces se secan durante los períodos de seca, son ríos de montaña de corta y larga longitud, los cuales drenan sus aguas hacia las vertientes sur y norte con una dirección predominante sub-meridional. Sus valles son en forma de U y V, en sus cursos superficiales abundan los saltos de agua con altura que oscilan entre 1-4 a 20-50m. Entre los ríos que representan la región tenemos: Sierra, Jagüeyes, Jobito, Colonia, Pino, Yagrumaje, Minas, Viaya, Yarey, etc., que en tiempo de lluvia son rápidos y se producen grandes avenidas. Estos constituyen su principal vía de abastecimiento de y en algún caso de electricidad (Domínguez, Martínez, 1991).

1.1.6 Geología regional

La zona entra dentro del sector geológico de Cuba Oriental donde aparece un mosaico muy amplio de rocas de diferentes edades y de diferentes tipos, Eoceno Medio parte alta- Eoceno Superior, Eoceno Medio y Eoceno Medio, parte alta - Eoceno Superior. La región de Baracoa se caracteriza por una gran complejidad condicionada por la variedad litológica, las formaciones presente en esta zona son: Sierra del Purial, San Luis, Cabo Cruz, Charco redondo, Cabacú y Rio Maya, existen depósitos aluviales, biogénicos, de arenas y limo grueso, limo arcilloso y depósitos palustres. El municipio de Niceto Pérez está representado por la formación Puerto Boniato, Camarones, Charco redondo, El Cobre y San Luis (SLU), representada por intercalaciones rítmicas de areniscas aleurolitas calcáreas, margas y subordinadamente calizas y conglomerados polimícticos, también hay presencia de depósitos aluviales y palustres. En el Salvador las formaciones presente son, Charco Redondo, San Luis, Maquey, Santo Domingo, Puerto Boniato y hay presencia de depósitos aluviales. Por otro lado el municipio



de Yateras está enclavado en una zona de alta complejidad geológica, en la misma afloran formaciones geológicas de diferentes edades, composición litológica, génesis y características estructurales, como Charco Redondo, Cilindro, Gran Tierra, Maquey, Mucaral, Sabaneta, San Luis, Sierra del Purial, y Yateras compuesta principalmente de conglomerados, tobas y lavo brechas, andesidacitas, areniscas polimícticas, areniscas derivadas de granitoides e intercalaciones y lentes de calizas compactas (Colectivo de autores, Léxico Estratigráfico, 2013). (Ver anexo 1).

1.1.7 Sismicidad y régimen sísmico

La región oriental es la de mayor peligro sísmico del territorio cubano, la falla Oriente y la falla Norte de la Española constituyen las principales fallas activas de primer orden donde pueden ocurrir sismos fuertes que afecten el territorio oriental de Cuba. A estas estructuras se relaciona la principal actividad sísmica registrada en esta región, tanto en magnitud como en frecuencia. En la figura 6 se representa la sismicidad registrada instrumentalmente de 1967 a Agosto de 2014 por 3 o más estaciones para la región oriental de Cuba (CENAIIS). Los municipios de Baracoa y Yateras, pertenecen a la zona 3 la cual es de riesgo sísmico moderado, Mientras que el municipios El Salvador pertenecen a la zona sísmica 4 de riesgo sísmico alto que puede ocasionar grandes daños y el municipio de Niceto Pérez pertenece a la zona sísmica 5 de riesgo sísmico alto en el territorio nacional (NC 46-2013 propuesta 0 (proyecto de norma), (ver figura 7).

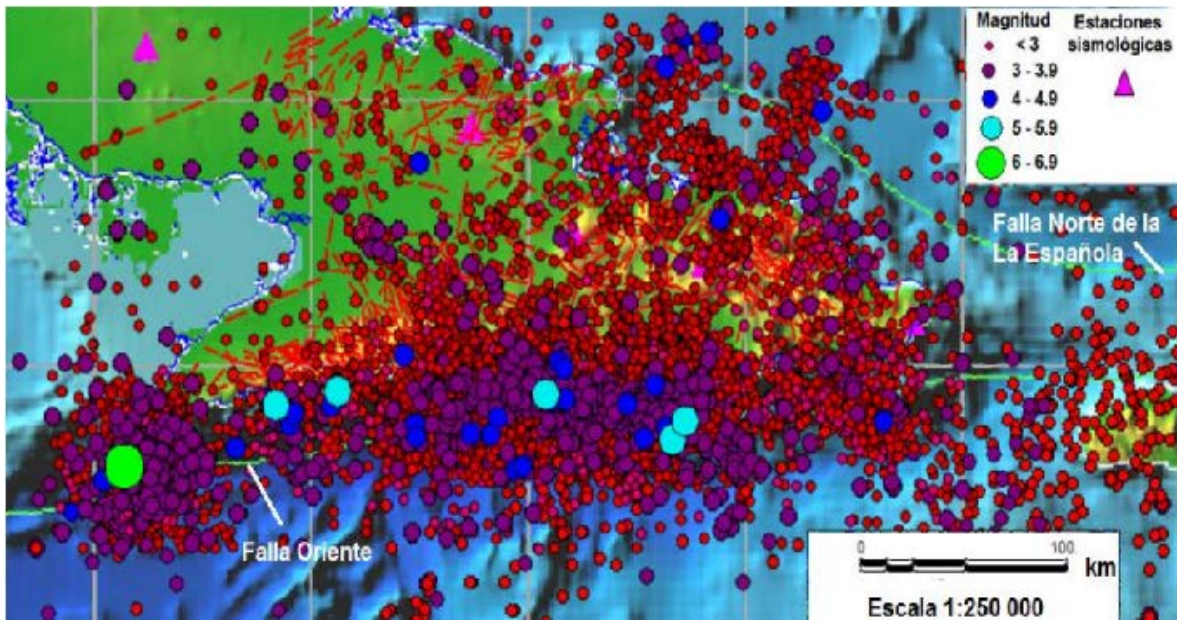


Figura 6: Terremotos registrados por el Servicio Sismológico Nacional de Cuba de 1967 a Agosto del 2014 en la región oriental de Cuba.(artículo del CENAIIS).

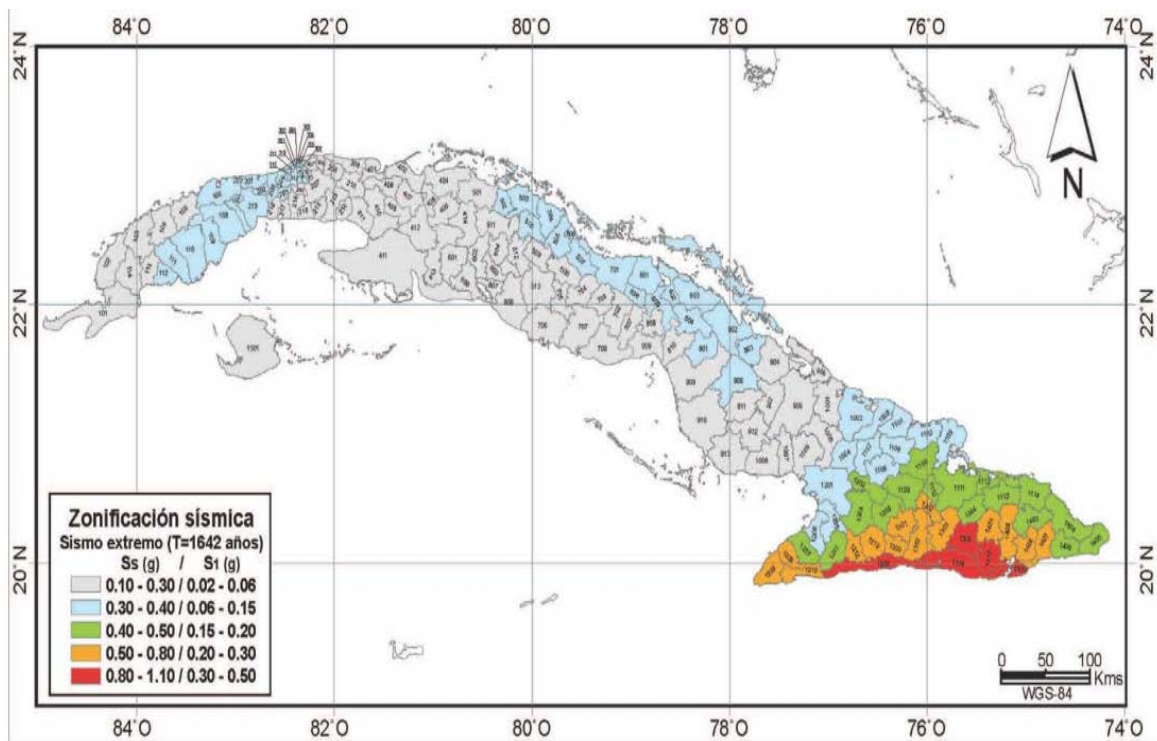


Figura 7: Esquema de la Zonación Sísmica para la República de Cuba. (NC 46-2013 propuesta 0 (proyecto de norma)).



1.1.8 Condiciones ingeniero – geológicas. Por los informes de la Empresa Nacional de Investigaciones Aplicadas (ENIA)

La sobresaturación de suelos es un fenómeno común en algunas zonas. En esta situación influyen las corrientes de agua subterránea que existen, por ejemplo en las cercanías de los valles aluviales de los ríos. En el territorio estudiado del se distinguen cuatro capas y una capa vegetal: la capa vegetal está representada por Arcilla orgánica muy plásticas con un espesor que varía 0.30- 1m. La primera capa está intercalaciones de lutitas calcáreas y areniscas de granos finos a medios fuertemente meteorizados y arena arcillosa, su espesor es de 1.0-1.5 m. La segunda capa está representada por gravas arcillosas (GC) con arena medio a grueso, mezclada con capa vegetal y resto de materiales de construcción (relleno), color carmelita oscuro, su espesor varia en 0.60m y 1.50m. Su tercera capa está representada por conglomerados polimícticos con cemento calcáreo y fragmentos de calizas de baja a media resistencia a la compresión axial, color carmelita claro y la capa 4 contiene intercalaciones de lutitas calcáreas y areniscas de granos finos a medios ,meteorizadas (GM3), color gris verdoso ,de baja resistencia a la compresión axial.

1.1.9 Desarrollo económico social.

El desarrollo económico de la región descansa fundamentalmente en la agricultura, así como en otras ramas secundarias como son: industria ligera, alimenticia, el turismo, etc. Baracoa fue fundada el 15 de agosto de 1511 con el nombre de Nuestra Señora de la Asunción de Baracoa por el conquistador español Diego Velázquez que ostentaba entonces el título de Adelantado. Es el más antiguo asentamiento de la Isla después de la llegada de los colonizadores españoles y de ahí debe su nombre de Ciudad Primada. En 1518 recibió el nombramiento de ciudad. Fue la primera capital y el primer obispado de la Isla, es una ciudad situada en la provincia de Guantánamo (Cuba). Los principales productos de la región son el coco, el cacao y el café, aunque desde finales de la década del 90 del pasado siglo el turismo se ha convertido en una de sus



principales fuentes de ingreso debido a su extraordinaria belleza (Domínguez, Martínez, 1991).

Declarada Monumento Nacional, la ciudad está situada entre los ríos Macaguanigua y Miel. Entre sus atracciones naturales se encuentra el río Toa, marcado por numerosas cascadas, siendo la más conocida El Saltadero con 17 metros de altura y las montañas del Yunque que debe su nombre a la similitud de la misma con la pieza que usan los herreros. La llamada la Bella Durmiente, vista desde lejos, asemeja a una joven echada. En esta ciudad se conserva dentro de una vitrina y con un pedestal de plata la Cruz de la Parra, símbolo de la cristiandad, que trajera Cristóbal Colón en su primer viaje (Domínguez, Martínez, 1991).

La parte agropecuaria descansa fundamentalmente en el sector azucarero donde se cultiva la caña de azúcar en las partes bajas de la región localizándose cultivos cítricos en el municipio Niceto Pérez. Es una de las áreas de mayor importancia en la provincia desde el punto de vista educacional, ganadero y agrícola. La zona de Malabé- Santa María de gran importancia por sus yacimientos de arena, los mayores en explotación en la provincia de Guantánamo, así como fuente importante de abastecimiento de agua potable a la ciudad de Guantánamo (Tomado, EcuRed.html).

El municipio Yateras tiene una gran importancia desde el punto de vista socioeconómico y ambiental, cuenta con un gran potencial económico dentro de la industria cafetalera, acentuado por lo arraigada que está en actividad entre sus pobladores y su elevado nivel de especialización en estas labores, en la producción cafetalera, el municipio se destaca como el tercer mayor productor de café en la provincia de Guantánamo (Mesa Romero, 2007).



CAPITULO II: MARCO TEÓRICO CONCEPTUAL. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN PARA EVALUAR LA SUSCEPTIBILIDAD A LA LICUEFACCIÓN DE LOS SUELOS DEL ÁREA DE ESTUDIO.

Introducción

En el capítulo se elabora la metodología para realizar el estudio al área de interés a partir de las etapas de investigación (búsqueda bibliográfica, interpretación de la información y trabajos de gabinete). Se muestra un resumen de los procedimientos metodológicos para el estudio del potencial de licuefacción teniendo en cuenta las condiciones ingeniero geológicas y sismológicas del medio.

2.1 Marco teórico conceptual.

Se puede decir que los suelos más susceptibles a la licuefacción son aquellos formados por depósitos jóvenes (producidos durante el Holoceno, depositados durante los últimos 10,000 años) de arenas y sedimentos de tamaños de partículas similares, en capas de por lo menos más de un metro de espesor, y con un alto contenido de agua (saturadas). Tales depósitos por lo general se presentan en los lechos de ríos, playas, dunas, y áreas donde se han acumulado arenas y sedimentos arrastrados por el viento y/o cursos de agua. Algunos ejemplos de licuefacción son arena movediza, arcillas movedizas, corrientes de turbidez, y licuefacción inducida por terremotos (Wikipedia, la enciclopedia libre.htm).

El proceso de licuefacción se produce en suelos granulares:

- Arenas limosas saturadas
- Arenas muy finas redondeadas (*loess*)
- Arenas limpias
- Rellenos mineros



Conceptos de licuefacción.

➤ Vallejo en 2002, define como suelos licuables, aquellos suelos con contenido areno- limoso, en estado saturado, al experimentar esfuerzos cortantes anómalos y rápidos, permiten un aumento de las presiones intersticiales (por falta de drenaje), en que la resistencia al corte desaparece y el material se comporta como líquido, dando lugar a movimientos verticales y horizontales de su masa, que se traducen en deslizamientos, o en grandes asientos.

➤ Rodríguez, Audemard, & Rodríguez, 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. San Pedro, Costa Rica expresa que la licuefacción de los suelos es un fenómeno en el cual los terrenos saturados de agua, particularmente sedimentos recientes como arena o grava pueden perder mucha de su fuerza o firmeza y fluyen ante la acción de esfuerzos provocados por temblores. Esto aumenta significativamente el daño a estructuras como casas y edificios, las cuales pueden ser desplazadas, hundidas o volcadas, aun cuando permanezcan intactas estructuralmente.

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



Factores que influyen en la licuefacción

Los estudios de la licuefacción sísmica de Seed en 1966 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.

El conocimiento del proceso y sus efectos se ha basado en tres diferentes principios:

- Observaciones de campo antes y después de los terremotos.
- Experimentos en el laboratorio en muestras de suelos saturados, y en modelos de fundaciones y estructuras.
- Estudios teóricos

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

- 1- Distribución del tamaño de los granos.** La arena uniformemente graduada, con granos muy gruesos tiene mayor probabilidad de licuarse, mientras que las arenas limosas y gravas lo hacen bajo cargas cíclicas muy severas.
- 2- Profundidad de las aguas subterráneas.** Mientras menor sea el nivel de las aguas subterráneas, mayor será la probabilidad de que ocurra licuefacción.
- 3- Densidad.** El suelo puede densificarse cuando está sujeto a una carga cíclica, reduciendo su volumen de suelo- agua e incrementando la presión intersticial si los poros intergranulares se llenan de agua. Cuando esto ocurre habrá menor posibilidad de que se produzca su licuefacción.
- 4- Peso del recubrimiento y profundidad del suelo.** Las tensiones entre partículas aumentan a medida que aumenta la presión del recubrimiento y mientras mayor sea dicha tensión menor será la probabilidad que ocurra



licuefacción. Por lo general, ocurre a profundidades menores de 9 metros; rara vez a mayores de 15 metros.

- 5- **Amplitud y duración de la vibración del terreno.** La licuefacción de suelos bajo condiciones de tensión provocadas por un terremoto puede ocurrir ya sea: cerca del epicentro si son pequeños o moderados, o a cierta distancia si son moderados a severos.
- 6- **Edad del depósito.** Los suelos jóvenes (menos de 3.000 años) son débiles y no cohesivos, de modo que tienen mayor probabilidad de licuarse que aquellos más antiguos donde actuaron procesos como compactación y cementación que incrementaron su resistencia.
- 7- **Origen del suelo.** El suelo depositado por procesos fluviales se sedimenta fácilmente y sus granos tienen poca probabilidad de compactarse, de modo que se licuarán con facilidad. Los depositados glacialmente, por lo general ya son bastante densos y tienen menor probabilidad de licuarse (Shadenet, 1990).

Condición de un suelo para que sea licuable.

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

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

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

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



A este criterio se le conoció como criterio chino.

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

De acuerdo con el Sistema Unificado de Clasificación de los Suelos (SUCS), arenas clasificadas como arcilla de baja plasticidad y limo (CL-ML), arena limosa con grava y arena arcillosa con grava (SM-SC), o areniscas con aleurolitas con cementos calcáreo y grava arcillosa con arena (GM-GC), son potencialmente licuables, (Youd, 1998). Por otro lado Wang en 1979) considera que si un material granular tiene menos del 15 % de finos (arcillosos) y el límite líquido (LL) es mayor que 35 % y el contenido natural de agua es menor de 90 %, estos materiales también se consideran no licuables.

Otras de las condiciones necesarias para que tenga lugar este modo de comportamiento del suelo es que el nivel freático esté alto, cerca de superficie; que el grado de compactación sea bajo, equivalentes a valores de número de golpes por pruebas de penetración estándar (N de SPT) inferior a 20 golpes. De acuerdo con la observación de zonas afectadas por licuefacción, ésta tiene lugar en las siguientes circunstancias:

- ✓ Sismos con magnitud igual o superior a 5.5 con aceleraciones superiores o iguales a 0.2 g.
- ✓ Por debajo de 15 metros de profundidad no se han dado licuefacciones.
- ✓ En la mayoría de los casos donde se han observado licuefacciones el nivel freático estaba a poca profundidad, inferior a 3 metros; por debajo de 5 metros la susceptibilidad de licuefacción es muy baja

Algunos expertos consideran que una de las propiedades más importante que caracterizan los suelos licuefactibles es el bajo grado de compactación, es decir $N < 10$ para profundidades < 10 m y $N < 20$ para profundidades > 10 metros (González, 2002).



La susceptibilidad a la licuefacción de los suelos depende de varios parámetros como son (Carrillo, 2007).

- Densidad relativa.
- Radio de sobre consolidación.
- Curva granulométrica / cohesión.

Se han realizados estudios estadísticos sobre licuefacción y no exactamente sobre licuefacción de suelos, que han sido abandonados para ampliar la caracterización de susceptibilidad de los suelos a partir de investigaciones más engorrosas y de mayor detalle. En estos casos se realizan muestreos los cuales permitirán proponer las zonas susceptibles a licuefacción; para esto se tienen en cuenta los siguientes parámetros, obtenidos a partir de muestreos ingeniero - geológicos en zonas importantes.

Son susceptibles a licuefacción bajo determinadas condiciones:

- Sedimentos arenosos y arenas.
- Suelos arcillosos (Dependiendo del tamaño de los granos).

No son susceptibles a licuefacción bajo ningún caso:

- Suelos gravosos con D10 mayor que 2 mm.
- Suelos arcillosos (Dependiendo del tamaño de los granos).

Fenómenos Asociados a la licuefacción

Cuando la licuefacción es acompañada por algún tipo de desplazamiento o falla del terreno, los efectos destructivos de la licuefacción pueden tomar muchas formas como: falla de flujo, desplazamiento lateral, oscilación del terreno, pérdida de capacidad portante, asentamientos, e incrementos en las presiones laterales sobre muros de contención y pilotes. A continuación se amplían los conceptos relacionados con algunas de las formas destructivas en las que se manifiesta el fenómeno de licuefacción.



Falla de flujo

Es el tipo de falla más catastrófica causada por la licuefacción, ya que por lo general desplaza grandes masas de suelo por decenas de metros. Los flujos pueden estar compuestos de suelo completamente licuado o por bloques intactos de material flotando sobre la capa de suelos licuados. Los flujos se presentan en arenas, limos sueltos y saturados, y en taludes con pendientes superiores a los 3 grados (Youd, 1992).

Desplazamiento lateral

El corrimiento lateral involucra el desplazamiento de grandes bloques de suelo como resultado de la licuefacción. El desplazamiento ocurre en respuesta a la combinación de las fuerzas de la gravedad y las inerciales generadas por el sismo. Los desplazamientos laterales se presentan por lo general en pendientes suaves (comúnmente menores a los 3 grados) y se incrementan en las cercanías a un canal o un río, (Youd, 1992).

Como se muestra en la figura 8 la magnitud de los desplazamientos horizontales generalmente es del orden de los metros. Las capas de suelos desplazados en general presentan fisuras, fracturas, escarpes y hundimientos de bloques (Youd, 1992).



Figura 8: Foto que muestran en desplazamiento horizontal, en instalaciones portuarias en Puerto Príncipe, Haití.



Oscilaciones del terreno

Donde el terreno es plano o la pendiente demasiado suave para permitir desplazamientos laterales, la licuefacción de estratos subyacentes puede causar oscilaciones que no dependen de capas superficiales, la cual se manifiesta hacia los lados, arriba y abajo en la forma de ondas de terreno. En general, dichas oscilaciones son acompañadas por la apertura y cierre de fisuras en el suelo, y la fractura de estructuras rígidas como los pavimentos y tuberías (Youd, 1992).

Pérdida de la resistencia del suelo de soporte

Cuando el suelo que soporta un edificio u otra estructura se licua y pierde su resistencia, se pueden presentar grandes deformaciones en su interior, las cuales hacen que las estructuras superficiales se asienten y se inclinen. Las fallas más espectaculares que se conocen por este fenómeno ocurrieron en el sismo de Niigata, Japón, en 1964, observadas en la figura 9, (Youd, 1992).



Figura 9: fotos que muestran la pérdida de la resistencia del suelo de soporte. A la derecha producto al terremoto de 1960 en Niigata, Japón y al izquierda al terremoto de 2011 en Chistchurch.

Volcanes de arena

Al presentarse la licuefacción de arenas, se generan presiones de poro muy altas, las cuales obligan a que el agua fluya rápidamente a la superficie, formando pequeños volcanes de arena. Este flujo ascendente de agua puede ocurrir durante

o después de un sismo. Los volcanes de arena indican también zonas de posibles asentamientos (Youd, 1992).

Asentamientos

En muchos casos el peso de la estructura puede ser insuficiente para causar los grandes asentamientos asociados con las pérdidas de capacidad portante descritas anteriormente. Sin embargo, pueden ocurrir pequeños asentamientos cuando la presión de poro se disipa después de un sismo. Estos asentamientos pueden causar daños aunque menores a los producidos por fallas de flujo, desplazamientos laterales o pérdidas de capacidad portante (Youd, 1992). (Figura 10)



Figura 10: A la izquierda: Asentamiento del pilar central del Puente San Nicolás en la región de Bio Bio, Chile. A la derecha del Puente Juan Pablo II, Concepción, Chile, ambos caso se produjeron posterior al terremoto del 27 de febrero de 2010.

Incrementos de la presión lateral sobre muros de contención

Si el suelo de relleno de un muro de retención se licua, las presiones laterales sobre dicho muro se pueden incrementar enormemente. Como un resultado de esto, el muro puede desplazarse en el sentido lateral, cabecear o fallar estructuralmente, como se ha observado en un gran número de rompeolas e islas artificiales durante varios sismos (Youd, 1992).



2.2.1 Metodologías para el estudio de la licuefacción de los suelos.

En muchas investigaciones se han utilizado metodologías para evaluar el riesgo de licuefacción de suelos basado en distintos ensayos de suelos, utilizándose inicialmente el criterio chino modificado de (Wang, 1979) y el método de (Seed & Idriss, 1982), y más recientemente (Youd et al. 2001). Luego de los terremotos de Kocaeli (Turquía) y Chi-Chi (Taiwán) en 1999, donde ocurrieron severos daños debidos a licuefacción en lugares donde los métodos disponibles no la predecían, se vio la necesidad de desarrollar nuevos criterios con especial énfasis en la influencia del contenido de finos en el suelo. En 2003 Raymond B. Seed y un grupo de investigadores de la Universidad de California en Berkeley publicaron un documento que unificaba los resultados de investigaciones recientes acerca del fenómeno de licuefacción de suelos. A pesar de que existen nuevas investigaciones, algunas de ellas controversiales, se utiliza la metodología propuesta por (Seed et al. 2003), complementada con los estudios de (Cetin et al. 2004). Esta metodología utiliza un valor N del ensayo SPT normalizado por profundidad y ajustado por la cantidad de finos para cuantificar la susceptibilidad del suelo a la licuefacción. Alarcón, (1989) opina que la aproximación práctica de Seed consiste en comparar las curvas de tensión cíclica provocadas por N ciclos del terremoto de cálculo con la curva, determinada en laboratorio, de la tensión cíclica capaz de producir la licuefacción en N ciclos en el terreno en cuestión. De esta comparación es posible extraer la zona peligrosa, aunque para ello ha sido preciso desarrollar criterios que permiten pasar de un movimiento sísmico real a otro equivalente y uniforme (Obando, 2009).

En Estados Unidos, (Seed et al., 1983) y (Seed & De Alba 1986) han presentado el método simplificado, en base a ensayos de penetración estándar y el cono holandés. En Japón, (Tokimatsu & Yoshimi, 1981, 1983); (Iwasaki et al., 1978) e (Iwasaki, 1986) han presentado también el método simplificado en base a la experiencia japonesa. Estas metodologías simplificadas fueron programadas en lenguaje Basic 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). La corrección de sobrecarga se realizó de acuerdo a (Liao&Whitman, 1986).

Actualmente 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).

2.2.2 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:

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 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, 2009)

Tabla 1: Clasificación de algunos métodos para evaluar el potencial de licuefacción, PHRI (1997)

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" (1979)
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>



2.2.3 Sistema de indicadores para el estudio de la susceptibilidad a la licuefacción de los suelos en la región oriental de Cuba (Diéguez, 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) 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:

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 del Cuaternario (Holoceno). Debe cumplir además que la relación entre el estrato licuable y el no licuable sea menor que 1 m de espesor. Coincidiendo también que el estrato de suelo no licuable encima del licuable debe ser menor de 8m. Para la selección de los sectores se hace una búsqueda en el mapa geológico y se seleccionan las formaciones pertenecientes al cuaternario que están representadas por el color amarillo en sus diferentes variantes.

2. Sismicidad

Otro factor importantes para que pueda licuar un suelo es la sismicidad, para ello se analiza la cercanía con una zona sismogeneradora capaz de generar sismos fuertes o magnitud mayor de 5,5 y las aceleraciones de las partículas lleguen a ser iguales o superior $0,2g/cm^2$. Para la selección se revisó la norma: Construcciones Sismoresistentes. Requisitos básicos para el diseño y construcción de Cuba de 2014 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.

3. Profundidad del Nivel Freático

Otro factor importante a tener en cuenta son los valores del nivel freático en el área. Este debe estar cerca de la superficie, se considera potencialmente licuable cuando está a menos de 3 metros, por lo general, ocurre a profundidades menores de 9 metros; a profundidades mayores de 15 metros no se ha reportado la licuefacción de los suelos. Los valores del nivel freático se obtienen a partir de las calas perforadas en el área de estudio. Finalmente se confecciona el mapa de profundidad del nivel freático para el área de estudio.

4. Condiciones ingeniero geológicas

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

Se tuvo en cuenta:

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



- ❖ Compacidad relativa (C_r) $< 75\%$
- ❖ Uniformidad de la arena. $C_u < 5$

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

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

5. Calculo 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 11 se muestran las curvas recomendadas por (Seed, et al.2003).

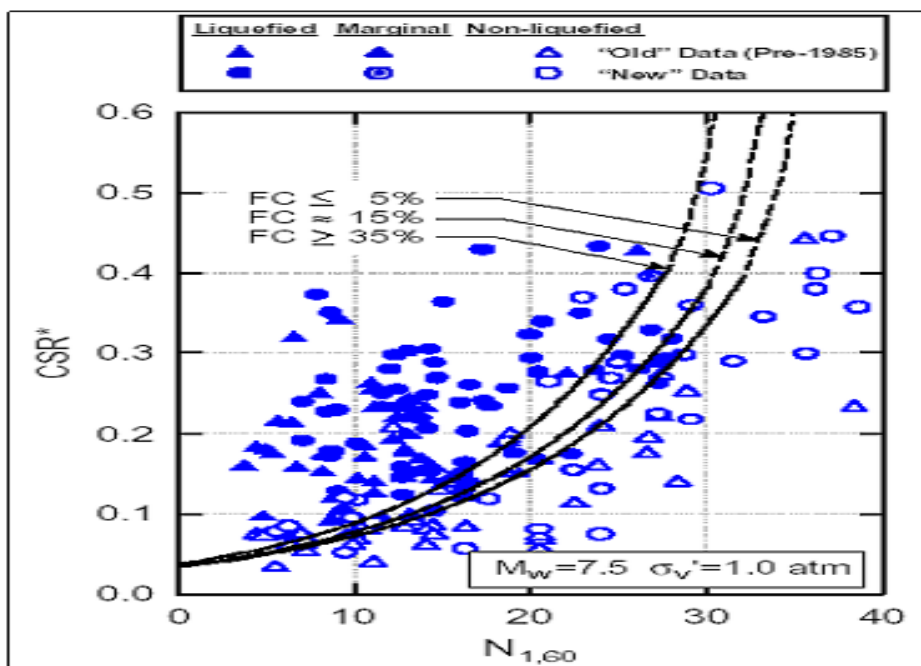




Figura 11: Relación entre razones de tensiones causantes de licuefacción y valores corregidos del SPT (para $MW=7.5$ y $\sigma_v=1$ atm) con ajuste de contenido de finos. Fuente: Seed, et al 2003.

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

El procedimiento requiere calcular dos variables sísmicas que son:

- a) La excitación sísmica del estrato de suelo, expresada en términos de la relación de tensiones cíclicas promedio ($CSR = \tau_{avg} / \sigma'_{vo}$).
- b) La capacidad del estrato de suelo para resistir la licuefacción, en términos de la relación de resistencia cíclica (CRR)

En la mayoría de los procedimientos empíricos, el valor promedio de la relación de tensiones cíclicas (CSR) inducidos por el sismo se estima de los análisis de la respuesta dinámica del suelo, o mediante la expresión recomendada por (Seed & Idriss, 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 (τ_{avg}) actuante en un estrato, normalizado por el esfuerzo efectivo de sobrecarga (σ'_{vo}).

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

Dónde:

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

a_{max} : aceleraciones máximas generadas por un sismo de diseño.

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

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



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

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

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

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

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

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

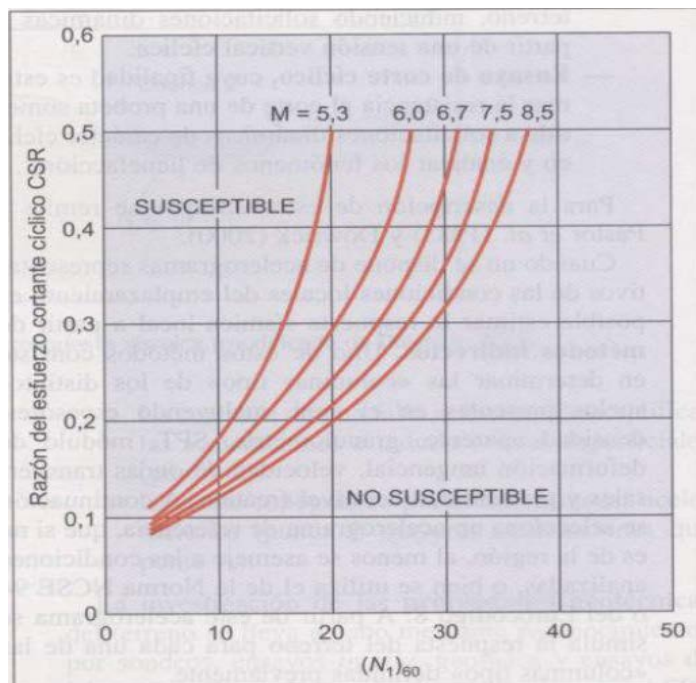


Figura 12: Susceptibilidad de licuefacción de un suelo en función de $(N_1)_{60}$ y la razón del esfuerzo cortante cíclico CSR (Ho et al., 1986) tomado de (González, 2002)



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

Cálculo del Coeficiente de Resistencia Cíclica CRR

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

Enfoque de resistencia cíclica (CRR)

Para ello, científicos destacados como (Youd et. al 2001), (Semillas et al.1985) y otros, han elaborado a partir de datos obtenidos en campo a través de ensayos SPT, gráficas sobre la relación entre dos parámetros físicos que participan en la licuefacción de los suelos, estos son el Coeficiente Resistencia Cíclica (CRR, siglas en inglés) y (N₁)₆₀, es decir el número de golpes suministrado al terreno, representado también por la letra N.

N₁₆₀ = (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 < 30. Para (N₁)₆₀ ≥ 30, los suelos granulares limpios tienen el grado de compacidad demasiado alto para sufrir la licuefacción.



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

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

$$N_1 = N \times C_N$$

donde:

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 (≈ 1 kg/cm²), 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:

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

donde:



Tabla 2: Correcciones a SPT (Skempton, 1986).

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

Calculo del factor de seguridad para la licuefacción (FSL)

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.

Magnitud del sismo	MSF
6	1,76
7	1,19
8	0.84

2.2 Metodologías para determinar los escenarios susceptibles a la licuefacción.

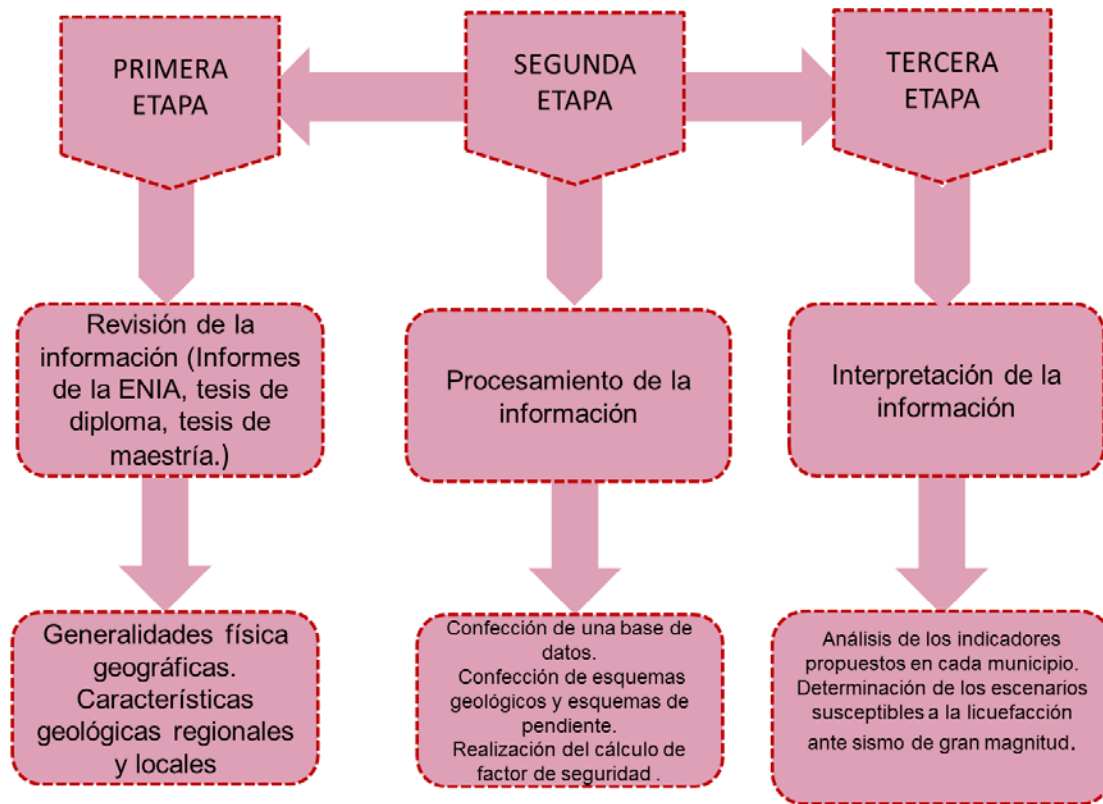


Figura 13: Esquema de flujo de la Metodología de la Investigación.

Primera Etapa: Revisión bibliográfica

En esta primera etapa se realizó una búsqueda bibliográfica, recopilando un gran número de informaciones en los trabajos de diplomas que abordan el tema, artículos publicados en Internet u otros sitios Web de interés, en revistas y libros, etc. También se revisaron los informes en el archivo de la Empresa Nacional de Investigaciones Aplicadas (ENIA) de Santiago de Cuba facilitándonos una mejor comprensión de las condiciones ingeniero geológica del área de estudio y obteniendo así un mejor desarrollo en la investigación. En esta etapa se usó el Método Histórico lógico y el método de análisis y síntesis

Segunda Etapa: Procesamiento de la información.



En la etapa de procesamiento, se analizó los resultados obtenidos en las perforaciones realizadas en años anteriores como las propiedades geotécnicas del suelo, el conocimiento del nivel freático y la litología presente, de las obras realizadas en los municipios Baracoa, Yateras, Niceto Pérez y El Salvador en la provincia de Guantánamo por parte de la ENIA e INVESCONS Santiago de Cuba. Estas propiedades se procesaron en una base de datos y se elaboró un esquema geológico y un esquema de pendiente de la región de estudio y por último se realizó el cálculo del Factor de Seguridad.

Tercera Etapa: Interpretación de la información

En esta tercera etapa se analizaron los indicadores para cada uno de los municipios, con resultados obtenidos al analizar estos indicadores se delimitaron los escenarios susceptibles a la licuefacción por la ocurrencia de un sismo de magnitud igual o mayor que 6.

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 realizaron los mapas de esquema geológicos por parte de la oficina de Geo-Cuba Guantánamo de los municipios estudiados: Baracoa, Yateras, Niceto Pérez, y El Salvador. Permitiendo evaluar las condiciones geológicas, determinando las formaciones presentes en cada municipio y de acuerdo a las edades y sedimentos de cada una de ellas se determinó cuáles eran las más favorables a que ocurra el fenómeno de licuefacción.

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

Para analizar este indicador se estudió la Norma para Construcciones Sismoresistentes. Requisitos básicos para el diseño y construcción. Tomando las descripciones de las zonas sísmicas de los municipios en estudio.



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

Para analizar el comportamiento del nivel freático se revisaron los informes realizados la ENIA, seleccionando los valores de nivel freático obtenidos en cada perforación realizada para las construcciones ubicadas en el área.

2.3.4. Análisis de las condiciones ingeniero geológicas

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

2.3.5. 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.

Conclusiones parciales.

En este capítulo se exponen diferentes conceptos de licuefacción, se mencionan factores y condiciones para que un suelo se licuable y se describieron los indicadores propuestos para determinar el potencial de licuefacción. También se indica una metodologías para saber si un suelo puede licuar ante sismos de magnitudes iguales o mayores que 6



CAPITULO III: VALIDACIÓN DEL SISTEMA DE INDICADORES PROPUESTOS EN LOS MUNICIPIOS.

Introducción:

En este capítulo se validarán los indicadores propuestos para determinar si los escenarios estudiados son licuables o no ante un sismo fuerte. Se llevará a cabo en los dos escenarios con condiciones favorables las que se explican a continuación.

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

Los escenarios propuestos coinciden con varios criterios (Kramer & Stewart, 2004) para determinar si un suelo es licuable o no. El primero que se analizó fue el criterio histórico. No existen reportes de ocurrencia del fenómeno de licuefacción en los municipios de Baracoa, Yateras, Niceto Pérez y El Salvador de la provincia de Guantánamo. Se ha observado que la licuefacción ocurre frecuentemente en los mismos lugares cuando las condiciones del sitio se mantienen constantes, es por esto que la evidencia de la ocurrencia histórica de licuefacción, puede ser utilizada como prueba de susceptibilidad en un determinado lugar.

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

Se analizaron las condiciones geológicas como otro criterio de gran importancia, algunos de los escenarios propuestos están cerca de depósitos fluviales y deltaicos, además, hay pequeña representación de depósitos de abanicos aluviales, playas y estuarios, aunque estos no son tan susceptibles como en los casos anteriores mencionados pero pudieran ser susceptibles. Los suelos de los escenarios propuestos se encuentran semisaturados y saturados dado la pequeña profundidad del nivel freático.



Se analizó además, la edad de los depósitos. Las áreas que se estudiaron pertenecen a formaciones del cuaternario y en algunos casos al Holoceno donde los estratos son poco consolidados y de poca densidad. Se tuvo en cuenta que los depósitos fueran de arena arcillosa, arena limosa, entre otras con poco contenido de finos que estuvieran uniformemente gradadas y limpias, compuestas de partículas redondeadas preferiblemente. Se analizó la posibilidad de que fueran muelles, tierra recuperada, canal de río abandonado, relleno límite entre las arenas y las tierras bajas, relleno sobre pantano o ciénaga y/o relleno de tierra recuperada por drenaje.

Los valores utilizados para la corrección del SPT del campo fueron los de la norma utilizada en Cuba conocida como la cuchara cubana. Se obtuvieron a partir de la revisión de los informes de las obras ejecutados por la ENIA.

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

Con el estudio ingeniero geológico de los municipios Baracoa, Yateras, Niceto Pérez y El Salvador de la provincia Guantánamo, se hace posible realizar evaluaciones sobre la licuefacción como fenómeno geológico secundario.

3.2.1 Condiciones geológicas.

En el municipio predomina la formación Sierra del Purial compuesta por Andesito-basaltos y basaltos, principalmente tobas y lavo brechas, andesidacitas, areniscas polimícticas, areniscas derivadas de granitoides e intercalaciones y lentes de calizas con edad del Cretácico Inferior (Aptiano) - Cretácico Superior (Campaniano) (J. L. Cobiella, 1984), otra formación presente en el área es San Luis está compuesta por una secuencia terrígena, de rocas clásticas y terrígeno-carbonatadas, de granulometría variada desde arcillas hasta conglomerados. También contiene areniscas polimícticas de grano medio a fino, de color gris, que en ocasiones aparecen en capas gruesas; limolitas de color marrón-pardusco; limolitas calcáreas de color crema; lutitas calcáreas de color marrón, masivas; calizas micríticas arcillosas, de color beige; calizas biotriticas, con abundantes



foraminíferos bentónicos grandes; margas de color crema-blanquecino, que pueden pasar lateralmente a calizas con edad Eoceno Medio, parte alta - Eoceno Superior (S. Taber, 1934), dado a estas características puede ser susceptible a la licuefacción.

En menor grado encontramos la formación Cabo Cruz compuesta calizas biodetríticas arcillosas, fosilíferas, pertenecientes al Mioceno Superior (M.T. Kozary, 1955), la formación Charco Redondo está compuesta por Calizas compactas organodetríticas, fosilíferas, de color variable, predominando los tonos blancos a grises verdosos. En la parte inferior del corte, son frecuentes las brechas, donde predomina la estratificación gruesa, mientras que en la parte superior predomina la estratificación fina del Eoceno Medio (W. P. Woodring y S. N. Daviess, 1944.) donde es probable que no ocurra el fenómeno de licuefacción, Picota está compuesta por conglomerados polimícticos con intercalaciones de areniscas polimícticas y conglomerados con brechas mal seleccionadas, que se intercalan con argilitas del cretácico superior (Campaniano-Maastrichtiano) (G. E. Lewis y J. A. Straczek, 1955), donde puede existir licuefacción en dependencia con su litología.

Está presente además la formación Cabacú compuestas gravelitas, areniscas y limolitas polimícticas (provenientes principalmente de ultramafitas y vulcanitas), de cemento débilmente arcilloso-calcáreo y ocasionales lentes de margas arcillosas en la parte inferior del corte, del Oligoceno Superior - Mioceno Inferior parte baja (K. Brezsnianszky y E. Nagy, 1976), en esta área puede que algunas rocas sufran licuefacción. Otra formación presente es Cabo Cruz compuestas por calizas biodetríticas arcillosas, fosilíferas, de color secundario rojizo ha abigarrado, que por desagregación dan lugar a margas secundarias y pseudoconglomerados. Las calizas pueden aparecer ligeramente fosfatizadas y contienen abundantes tubos de *Kuphus incrassatus* del Mioceno Superior (M.T. Kozary, 1955), en estas formaciones no es posible ocurrencia de la licuefacción.



La formación Jaimanitas contiene calizas biodetríticas masivas, generalmente carsificadas, muy fosilíferas, con contenido principalmente de conchas bien preservadas, corales de especies actuales. En mayor o menor cantidad, contienen fragmentos de sedimentos terrígenos, que incluyen calizas preexistentes del Pleistoceno Superior, parte baja (Sangamon), (J. Brödermann, 1940).

La formación Sabaneta está compuesta por tobas de ácidas a medias, de colores claros, vitroclásticas, litovitroclásticas, cristalovitroclásticas con intercalaciones de tufitas calcáreas, arenis tobáceas, calizas, conglomerados tobáceos, limolitas, margas, gravelitas, conglomerados vulcanomícticos y ocasionalmente pequeños cuerpos de basaltos, andesitas, andesito- basaltos y andesito-dacitas. Es muy característica, debido a la alteración de las tobas, la presencia de minerales del grupo de la montmorillonita (bentonita) y de las zeolitas (zeolitas). En las tobas, el promedio de vidrio volcánico es superior al 60%(Paleoceno Inferior (Daniano, parte alta) - Eoceno Medio) (M. Iturralde, 1976).

La formación Santo Domingo se caracteriza por el dominio del componente piroclástico en el corte, con intercalaciones de litofacies terrígenas finas, silicitas, tufitas, efusivos principalmente de composición andesítica-basáltica y andesítica, raramente hasta dacíticas, con la presencia de cuerpos de dioritas, dioritas cuarcíferas, gabro-dioritas, gabrodiabas y diabasas, con desarrollo limitado de rocas esquistosas calcáreas, calizas y corneanas del Cretácico Inferior (Aptiano) - Cretácico Superior (Turoniano) (M. Iturralde-Vinent, 1976). También existen depósitos aluviales, biogénicos, de arenas y limo grueso, limo arcilloso y depósitos palustres, en la zona donde se encuentren estos sedimentos es puede que exista licuefacción y formaciones, Sierra Verde, Yateras también están presentes en el municipio.

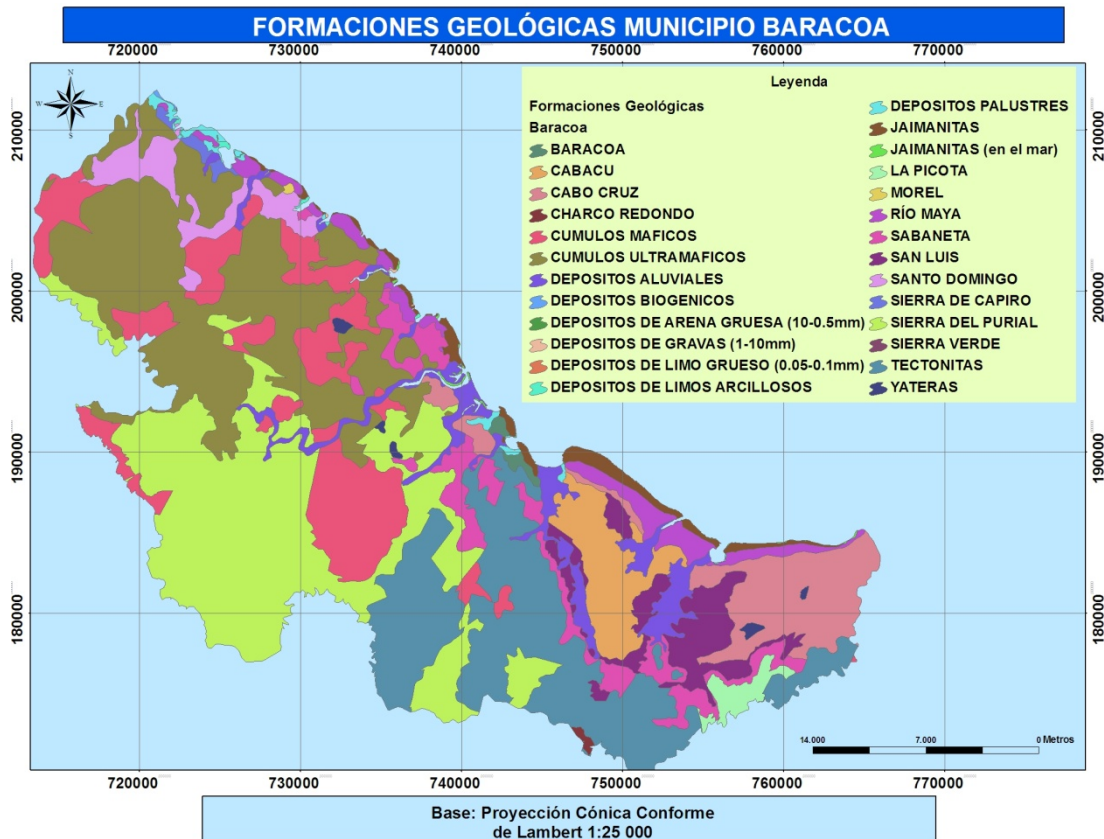


Figura 14: Esquema geológico del Municipio Baracoa, (por Geo-Cuba Guantánamo)

3.2.2 Sismicidad

Este municipio presenta riesgo sísmico moderado, que puede ocasionar daños a las construcciones debiéndose tomar medidas sismorresistentes en todas las estructuras y obras en función de la categoría ocupacional de las mismas y el nivel de protección definido según la probabilidad de exceder un sismo de diseño. Los valores de la aceleración espectral horizontal máxima del terreno para el cálculo S_a estarán entre 0,40-0,50 g para periodos cortos(S_s) y entre 0,15-0,20 g para periodos largos(S_1). (NC 46-2013 propuesta 0 (proyecto de norma))

3.2.3 Características hidrográficas

En Baracoa la red fluvial de la zona es densa, formada por ríos y arroyos los cuales a veces se secan durante los períodos de seca, son ríos de montaña de corta y larga longitud, los cuales drenan sus aguas hacia las vertientes sur y norte

con una dirección predominante sub-meridional. Sus valles son en forma de U y en sus cursos superficiales abundan los saltos de agua con altura que oscilan entre 1-4 a 20-50m. Entre los ríos que representan la región tenemos: Sierra, Jagüeyes, Jobito, Colonia, Pino, Yagrumaje, Minas, Viaya, Yarey, etc., que en tiempo de lluvia son rápidos y se producen grandes avenidas. La profundidad del nivel freático varía entre los 2,50 y valores mayor que 10 m, lo cual es una profundidad en la que la susceptibilidad de licuefacción no existe.

3.2.4 Condiciones ingeniero geológicas

Se confeccionó una tabla para el estudio de las condiciones ingeniero geológicas con los parámetros más importantes como: 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. A continuación en la tabla se muestran los valores de estos parámetros para las obras estudiadas.

Tabla 3: Validación de condiciones ingeniero geológica de las obras en Baracoa.

Obras	N de SPT(golpes/30 cm)	LL	% finos	% arena	Wn (%)	Yf	Yd	C (kPa)	descripción
Edificio gran panel IV. Asentamiento Van- Van	19	np	9	61	28	19,20	15	0	SW y SC
Muro de contención vial estadio Baracoa	19	np	2	92	14	16,50	14,47	0	SP



Finca Bioturista Siguas Maraví. Baracoa. Restaurante.		np	31	50	11,20	18,39	16,54	5	SM
Vivienda ALMEST. Parcela Cabacún.	23	np	3	77	15	18,30	15,91	0	SP
Escuela primaria salvador Pascual	33	np	3	77	15	18,30	15,91	0	SP con gravas
Puente Jamal y muro de contención	15	17	19	47	16,25	18,60	16	10	SC y SM
Viviendas especiales Cabacú (Bacanera)	3	41	15	51	23,2	19,40	15,75	18	SC

Se revisaron 76 informes ingeniero geológico, 20 contenían las coordenadas y varias propiedades físico mecánicas necesarias para realizar los estudios. Solo se pudo realizar el cálculo a 6 por no presentar los valores de N de SPT.

3.2.5 Cálculo de Factor de seguridad para la licuefacción.

Resultados de calcular el Relación de Esfuerzo Cíclico (CSR)

Se calculó la 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 cálculos se realizaron de forma aleatoria pues algunas obras carecen de información importante como el número de golpes en el campo N de SPT y no se podía calcular el FSL. Los valores del Radio de Resistencia Cíclica (CRR) concuerdan en gran medida con los valores de CSR para las diferentes capas de las obras estudiadas, lo que nos da una idea sobre la probabilidad de licuar o no los suelos. Se describe el resultado del cálculo de FSL para cada municipio.

Tabla 4: Resultado del cálculo de FSL para Baracoa.

Obras	CRR	CSR	FSL para Mw 6	Licuable	FSL para Mw 7	Licuable	FSL para Mw 8	Licuable
Edificio gran panel IV. Asentamiento Van- Van	1,32	0,081	28,57	No	16,07	No	13,63	No
Muro de contención vial estadio Baracoa	1,32	0,081	28,71	No	16,15	No	13,70	No



Vivienda ALMEST. Parcela Cabacú.	1,60	0,07	37,80	No	21,26	No	18,04	No
Escuela primaria salvador Pascual	2,42	0,11	37,15	No	20,90	No	17,73	No
Puente Jamal y muro de contención	1,04	0,08	22,71	No	12,77	No	10,84	No
Viviendas especiales Cabacú (Bacanera)	0,23	0,07	5,55	No	3,12	No	2,65	No

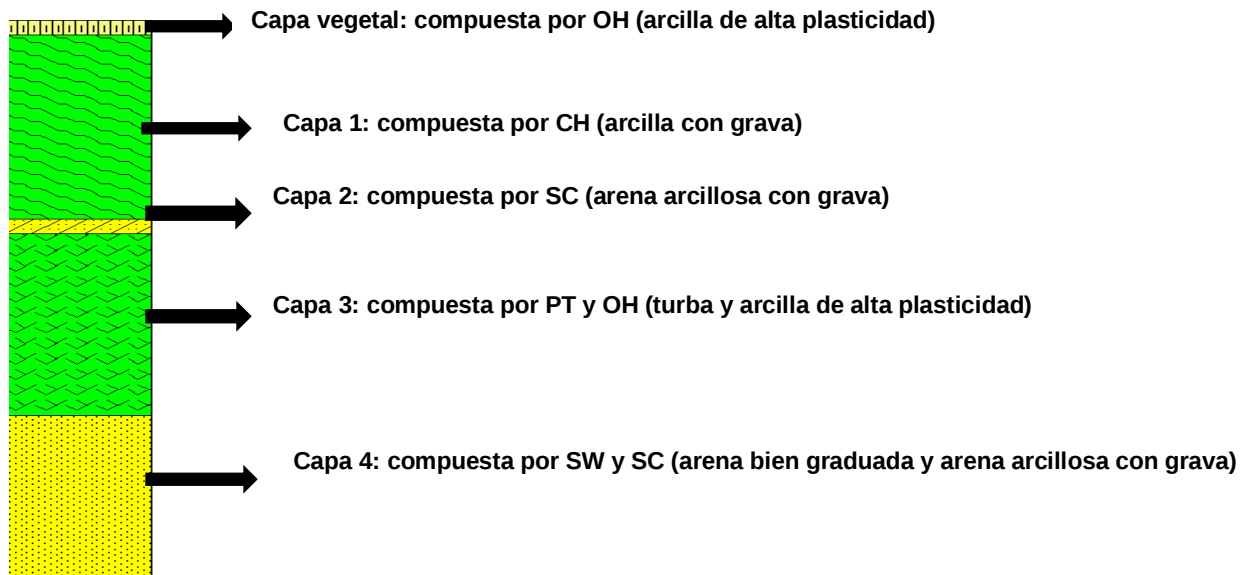


Figura 15: Columna litoestratigráfica esquemática del municipio Baracoa.

Conclusiones parciales para el municipio Baracoa.

Baracoa esta constituidos por sedimentos de edad Cretácico, Eoceno y el Mioceno, clasificados por un Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS) como SW que es arena bien graduada, SC que es una arena arcillosa con grava, SP arena mal graduada y SM (arena limosa con grava), los niveles freáticos varían entre 0.55-3m siendo esto favorable a la licuefacción pero en algunas obra pueden alcanzar valores mayores 10 m. En esta zona la cohesión es muy baja siendo esto un factor importante para la ocurrencia de este fenómeno, los resultados arrojaron que el municipio no existe susceptibilidad a la ocurrencia de licuefacción.

3.3 Validación del sistema de indicadores propuestos en el municipio Yateras.

3.3.1 Condiciones geológicas

El municipio de Yateras está enclavado en una zona de alta complejidad geológica, en la misma afloran formaciones geológicas de diferentes edades, composición litológica, génesis y características estructurales, como Charco Redondo que está compuesta por calizas compactas organodetríticas, fosilíferas, de color variable, predominando los tonos blancos a grises verdosos. En la parte inferior del corte, son frecuentes las brechas, donde predomina la estratificación



gruesa, mientras que en la parte superior predomina la estratificación fina del Eoceno Medio (W. P. Woodring y S. N. Daviess, 1944), donde la ocurrencia de licuefacción es muy baja.

Sabaneta está compuesta por tobas de ácidas a medias, de colores claros, vitroclásticas, litovitroclásticas, cristalovitroclásticas con intercalaciones de tufitas calcáreas, arenis tobáceas, calizas, conglomerados tobáceos, limolitas, margas, gravelitas, conglomerados vulcanomícticos y ocasionalmente pequeños cuerpos de basaltos, andesitas, andesito- basaltos y andesito-dacitas. Es muy característica, debido a la alteración de las tobas, la presencia de minerales del grupo de la montmorillonita (bentonita) y de las zeolitas (zeolitas). En las tobas, el promedio de vidrio volcánico es superior al 60%(Paleoceno Inferior (Daniano, parte alta) - Eoceno Medio) (M. Iturralde, 1976), San Luis está compuesta por una secuencia terrígena flyschoides, finamente estratificada, de rocas clásticas y terrígeno-carbonatadas, de granulometría variada desde arcillas hasta conglomerados. También contiene areniscas polimícticas de grano medio a fino, de color gris, que en ocasiones aparecen en capas gruesas; limolitas de color marrón-pardusco; limolitas calcáreas de color crema; lutitas calcáreas de color marrón, masivas; calizas micríticas arcillosas, de color beige; calizas biodetríticas, con abundantes foraminíferos bentónicos grandes; margas de color crema-blancuecino, que pueden pasar lateralmente a calizas con edad Eoceno Medio, parte alta - Eoceno Superior (S. Taber, 1934), en estas formaciones también la ocurrencia de licuefacción es muy baja.

Sierra del Purial es otra de las formaciones presente en el municipio compuesta por Andesito-basaltos y basaltos, principalmente tobas y lavo brechas, andesidacitas, areniscas polimícticas, areniscas derivadas de granitoides e intercalaciones y lentes de calizas. Estas rocas se encuentran metamorfozadas en condiciones de muy bajo grado y baja presión, en las facies de esquistos verdes. Los colores son de tonalidades grises, verdes y hasta negros con edad del Cretácico Inferior (Aptiano) - Cretácico Superior (Campaniano) (J. L. Cobiella, 1984), otra de las formaciones existente es Gran Tierra compuesta principalmente



de conglomerados monomícticos con cemento calcáreo, que transicionan hasta calizas fragmentarias producto de la disminución del volumen de material clástico. Se intercalan areniscas calcáreas vulcanomícticas y tobáceas, limonitas, tufitas, margas y tobas del (Paleoceno Inferior (Daniano) (M. Iturralde-Vinent, 1976), donde no es posible que puedan licuar las rocas.

Maquey es también una formación presente en este municipio y se caracteriza por presentar alternancia de areniscas, limolitas y arcillas calcáreas de color gris y margas de color blanco a crema, que contienen intercalaciones de espesor variable de calizas biodetríticas, arenáceas y gravelíticas de colores blanco amarillo y crema, ocasionalmente amarillo grisáceo. La estratificación es fina a media, menos frecuentemente gruesa o masiva del Oligoceno Superior - Mioceno Inferior parte baja (N. H. Darton, 1926), es una formación que puede presentar una alta ocurrencia de licuefacción.

La formación Mucaral está representada secuencia terrígena compuesta principalmente por margas, margas arcillosas y margas calcáreas bien estratificadas, con intercalaciones frecuentes de calizas margosas, arcillosas y biodetríticas, más raramente de areniscas calcáreas. La secuencia, en su parte inferior, presenta intercalaciones frecuentes de margas y calizas tobáceas, de tobas y tufitas redepositadas que en varios lugares es subyacente, de edad Eoceno Medio parte alta - Eoceno Superior (J. L. Cobiella, 1983).

La formación Yateras y el miembro Cilindro también están presentes en el municipio, este constituido por conglomerados polimícticos con estratificación lenticular, y a veces cruzada, débilmente cementados, con lentes de areniscas, que contienen lignito. La matriz es arenítica polimíctica, conteniendo carbonato. Coloración abigarrada de edad Oligoceno Superior -Mioceno Inferior parte baja (K.Breznayánszky y G. L. Franco, 1976). Existen otras litologías en la zona como cúmulos máficos y ultramáficos y depósitos aluviales.

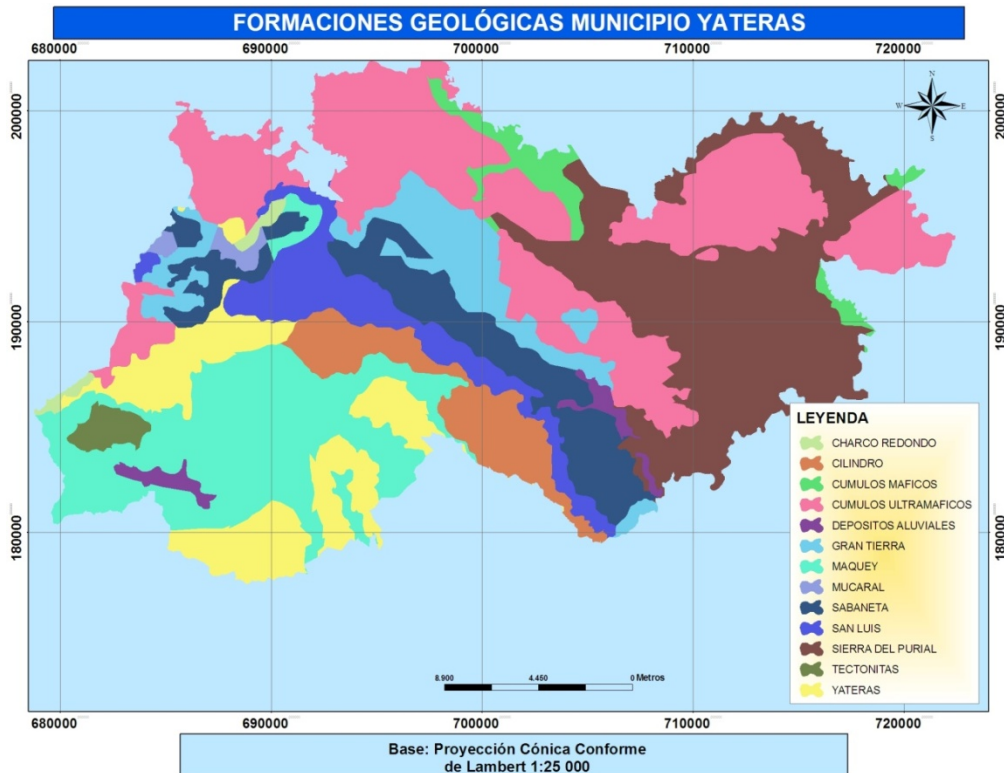


Figura 16: Mapa geológico del Municipio Yateras, (por Geo-Cuba Guantánamo).

3.3.2 Sismicidad

Yateras, pertenecen a la zona 3 la cual es de riesgo sísmico moderado, que puede ocasionar daños a las construcciones debiéndose tomar medidas sismorresistentes en todas las estructuras y obras en función de la categoría ocupacional de las mismas y el nivel de protección definido según la probabilidad de exceder un sismo de diseño. Los valores de la aceleración espectral horizontal máxima del terreno para el cálculo S_a estarán entre 0,40-0,50 g para periodos cortos (S_s) y entre 0,15-0,20 g para periodos largos (S_1) (NC 46-2013 propuesta 0 (proyecto de norma)).

3.3.3 Características hidrográficas

El territorio de Yateras está constituido por montañas, premontañas y alturas tectónicas erosivas, horst y bloques, muy disecionadas, cuya altitud no sobrepasa los 900 m, está caracterizado por un clima templado-frío acompañado

de precipitaciones con valores entre 100 y 300 mm anuales, que tributan al suelo potencialidades productivas de los cultivos varios, vegetales y frutas. El nivel freático en este municipio varía entre 2 y 5 m por lo que podemos decir que es una profundidad en la que se podría manifestar el fenómeno de licuefacción.

3.3.4 Condiciones ingeniero geológicas

Tabla 5: Validación de condiciones ingeniero geológica de las obras en Yateras

Obras	N de SPT(golpes/30 cm)	LL	% finos	% arena	Wn (%)	Yf	Yd	C (kPa)	descripción
Investigación ingeniero-geológica de cinco deslizamientos en la carretera la clarita-palenque en el tramo loma la sierra, etapa técnico ejecutiva.		30	23	45	15,86	18,55	16,01	15	SC
Sala de fisioterapia y rehabilitación con fango.	10	np	33	45	19,48	18,55	16,01	0	Arena limosa
Reconstrucción y ampliación de		45	19	29	8,07	23,29	21,55	10	GC y GM



escuela felicidad									
Muro de contención del rio Yateras	28	45	19	29	15,07	15,07	23,29	10	GC-GM
Hospital Fausto Cremé.	10	60	12	38	19,48	19,29	16,14	18	SC

Se revisaron 40 informes ingeniero geológico, 16 contenían las coordenadas y varias propiedades físico mecánicas necesarias para realizar los estudios. Solo se pudo realizar el cálculo a 3 por no presentar los valores de N de SPT.

3.3.5 Cálculo de Factor de seguridad para la licuefacción.

Tabla 6: Resultado del cálculo de FSL para Yateras.

Obras	CRR	CSR	FSL para Mw 6	Licuable	FSL para Mw 7	Licuable	FSL para Mw 8	Licuable
Sala de Fisioterapia y Rehabilitación con Fango	0,70	2,29	0,54	Si	0,30	Si	0,25	Si
Muro de contención del rio Yateras	1,97	0,23	14,73	No	8,28	No	7,03	No

Hospital				No		No		No
Fausto								
Cremé	0,70	0,13	9,21		5,18		4,40	

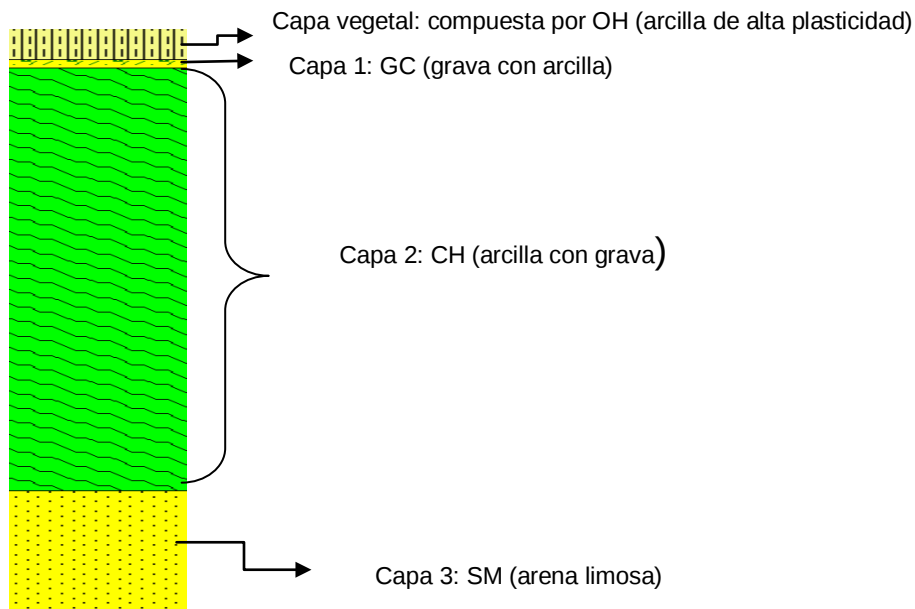


Figura 17: Columna litoestratigráfica esquemática del municipio Yateras.

Conclusiones parciales para el municipio Yateras.

El Municipio Yateras se caracteriza por presentar suelos de edad del Eoceno y Oligoceno, estos suelos están clasificados como CH arcilla con grava, CL arcilla de baja plasticidad, GC grava arcillosa con arena, SC que es una arena arcillosa con grava y GM que son areniscas con aleurolitas con cemento calcáreo. El nivel freático varía entre 2.50-5m y hasta mayor de 6,50 m, presenta además bajos valores para la cohesión, siendo características de suelos licuables. Los resultados obtenidos indican que ante un sismo de magnitud 6, 7 y 8 en el municipio podrían verse afectada por licuefacción en la obra (Sala de Fisioterapia y Rehabilitación con Fango) la misma enmarcada en suelos compuestos por arena limosa de la formación Maquey.



3.4 Validación del sistema de indicadores propuestos en el municipio Niceto Pérez.

3.4.1 Condiciones geológicas.

El municipio de Niceto Pérez está representado por la formación Puerto Boniato constituidas por una alternancia de calizas organodetríticas aporcelanadas, algáceas y margas, con intercalaciones finas de sílice, limolitas y lutitas. En su corte predominan las calizas, de forma subordinada está la presencia de tufitas y areniscas tobáceas calcáreas; cercanas al contacto con la Formación Caney se observan horizontes de rocas piroclásticas. Se observa aporte variable de material tobáceo, de granulometría psamítica, representada por granos de plagioclasas, clinopiroxenos, anfíboles y rocas efusivas, de edad Eoceno Medio. (E. Nagy, 1976), en esta formación la ocurrencia de licuefacción es muy baja. La formación Camarones está constituida por conglomerados polimícticos, de cantos subredondeados y redondeados, y areniscas polimícticas, de grano grueso. La matriz del conglomerado es de composición arenosa y polimíctica. Estas litologías gruesas transicionan hasta areniscas de grano medio, de edad Eoceno Superior. (G.E. Lewis y J. A. Straczek, 1955), en esta formación puede ocurrir licuefacción, el Cobre es otras de las formaciones presentes en el área, constituidas por diferentes tipos de rocas volcánógenas, volcánógeno-sedimentarias y tufogénicas, con una gran variabilidad facial, tanto en sentido vertical como lateral. Las transiciones entre las diferentes litologías a veces son bruscas, otras graduales y, en muchos casos, es prácticamente imposible establecer delimitaciones entre ellas. Las rocas más abundantes son: tobas, desde aglomeráticas hasta cineríticas, lavas, lavas brechas y aglomeráticas, de composición andesítica, andesito-dacítica y dacítica raramente riolítica, riodacítica y basáltica. En su constitución también participan tobas cineríticas, tufitas, tobas calcáreas, calizas tobáceas, areniscas polimícticas y vulcanomícticas, así como grauvacas de edad Paleoceno - Eoceno Medio parte baja (S. Taber, 1931.), la presencia del fenómeno de licuefacción es muy escasa en la zona donde exista este tipo de roca.



Charco redondo está compuesto por Calizas compactas organodetríticas, fosilíferas, de color variable, predominando los tonos blancos a grises verdosos. En la parte inferior del corte, son frecuentes las brechas, donde predomina la estratificación gruesa, mientras que en la parte superior predomina la estratificación fina del Eoceno Medio (W. P. Woodring y S. N. Daviess, 1944).

San Luis (SLU) está compuesta por una secuencia terrígena flyschoides, finamente estratificada, de rocas clásticas y terrígeno-carbonatadas, de granulometría variada desde arcillas hasta conglomerados. También contiene areniscas polimícticas de grano medio a fino, de color gris, que en ocasiones aparecen en capas gruesas; limolitas de color marrón-pardusco; limolitas calcáreas de color crema; lutitas calcáreas de color marrón, masivas; calizas micríticas arcillosas, de color beige; calizas biodetríticas, con abundantes foraminíferos bentónicos grandes; margas de color crema-blانquecino, que pueden pasar lateralmente a calizas con edad Eoceno Medio, parte alta - Eoceno Superior (S. Taber, 1934). En este municipio hay presencia de depósitos aluviales y palustres, siendo muy favorable para la ocurrencia de la licuefacción.

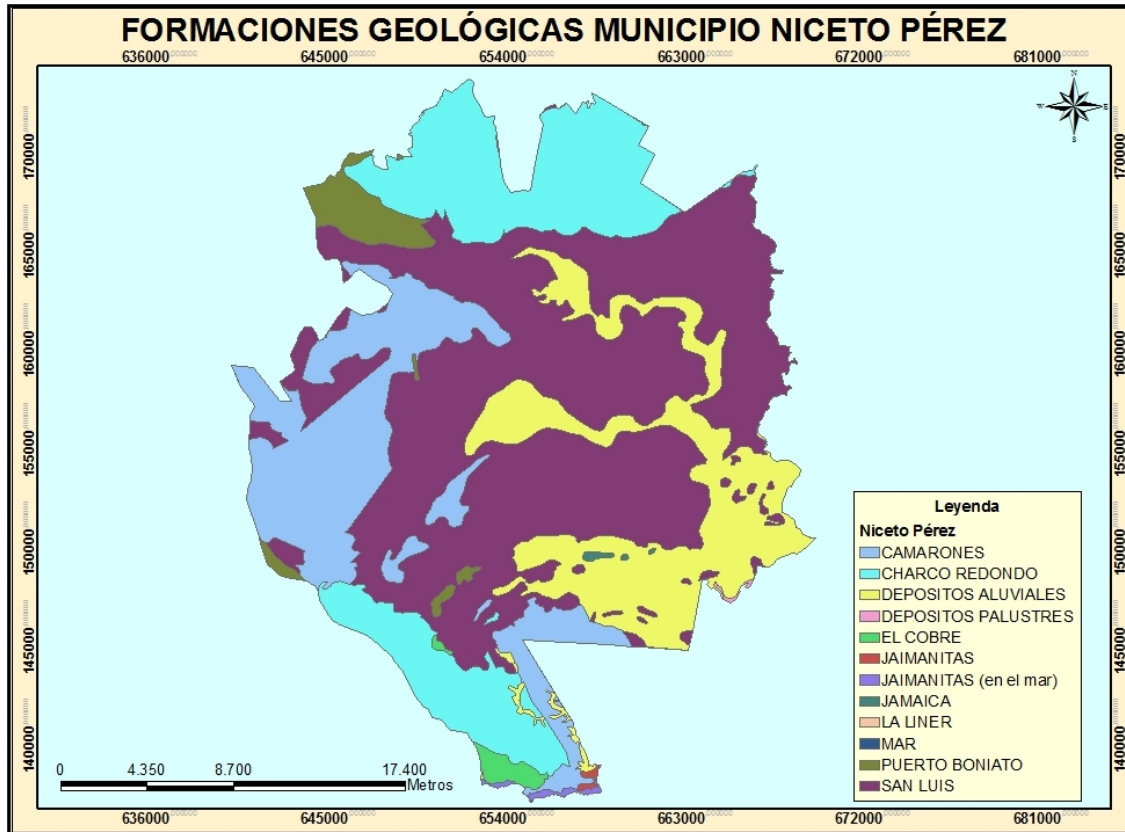


Figura 18: Esquema geológico del Municipio Niceto Pérez, (por Geo-Cuba Guantánamo).

3.4.2 Sismicidad

El municipio de Niceto Pérez pertenece a la zona 5 de riesgo sísmico alto en el territorio nacional que puede ocasionar daños graves en las construcciones debiéndose tomar sismorresistencia en las estructuras y obra en función de la categoría ocupacional de las mismas y el nivel de protección definido según la probabilidad de exceder un sismo de diseño. Los valores de la aceleración espectral horizontal máxima del terreno para el cálculo S_a estarán entre 0.80-1.10 g para periodos cortos S_s y entre 0.30-0.50 para periodos largos S_1 (NC 46-2013 propuesta 0 (proyecto de norma)).

3.4.3 Características hidrográficas

Se localizan un total de 7 ríos propiamente dichos, 3 de los cuales tienen su origen fuera de la localidad; Río Guantánamo, Río Jaibo, Río Iguanábano, Río Maca, Río

Ojo de Agua, Río Ulloa, Río Hatibonico. Existe además un gran número de arroyos de escurrimiento efímero, que en su mayor porción son afluente de los ríos ya analizados. En todo el municipio hay un gran número de pequeñas micro presas muchas de las cuales tienen una explotación contable

También existen lagunas pequeñas de uso limitados entre otras están El Meandro ubicada en la Localidad del Cuero, tiene uso agrícola. Como embalses se encuentra la Presa La Yaya, la obra hidráulica más grandes de la provincia, la misma regula las aguas del río Guantánamo teniendo su cierre en Canabacoa y extendiéndose hasta Cabaña, con una longitud de río inundado de 16 Km y una longitud de embalses de 10 Km, 3 Km de anchos y 31.9 M de profundidad aproximadamente en el lugar más hondo, cuando tiene su nivel normal de agua. El nivel freático de esta zona varía entre los valores 3.50m.-5.0m por lo que podemos decir que es una profundidad en la que se podría manifestar el fenómeno de licuefacción.

3.4.4 Condiciones ingeniero geológicas

Tabla 7: Validación de condiciones ingeniero geológica de las obras en Niceto Pérez.

Obras	N de SPT(golpes/30 cm)	LL	% finos	% arena	Wn (%)	Yf	Yd	C (kPa)	descripción
20 Viviendas	18	43	25	50	7,84	18,94	17,56	0,1	SC
Escuela primaria José Martí Pérez	17	34	29	36	17,76	18,66	15,85		SC
Policlínico	50	34	34	31	15	19,53	16,58	40	GM y GC



Niceto Pérez									
Construcción de viviendas para médicos	50	43	41	20	8,78	21,80	20,04	14	GM y GC y abundante CaCO ₃
Torre auto soportada de 42 m de altura	34				17,17	18,86	16,10	68	GM4

Se revisaron 35 informes ingeniero geológico, 10 contenían las coordenadas y varias propiedades físico mecánicas necesarias para realizar los estudios. Solo se pudo realizar el cálculo a 5 por no presentar los valores de N de SPT.

3.4.5 Cálculo de Factor de seguridad para la licuefacción.

Tabla 8: Resultado del cálculo de FSL para Niceto Pérez.

Obras	CRR	CSR	FSL para Mw 6	Licuable	FSL para Mw 7	Licuable	FSL para Mw 8	Licuable
Escuela Primaria José Martí	1,18	0,27	7,54	No	4,24	No	3,59	
Construcción de vivienda	3,23	0,94	6,03	No	3,39	No	2,88	No

para médicos								
Torre soportadora de 42 m de altura	2,55	0,30	14,62	No	8,22	No	6,97	No

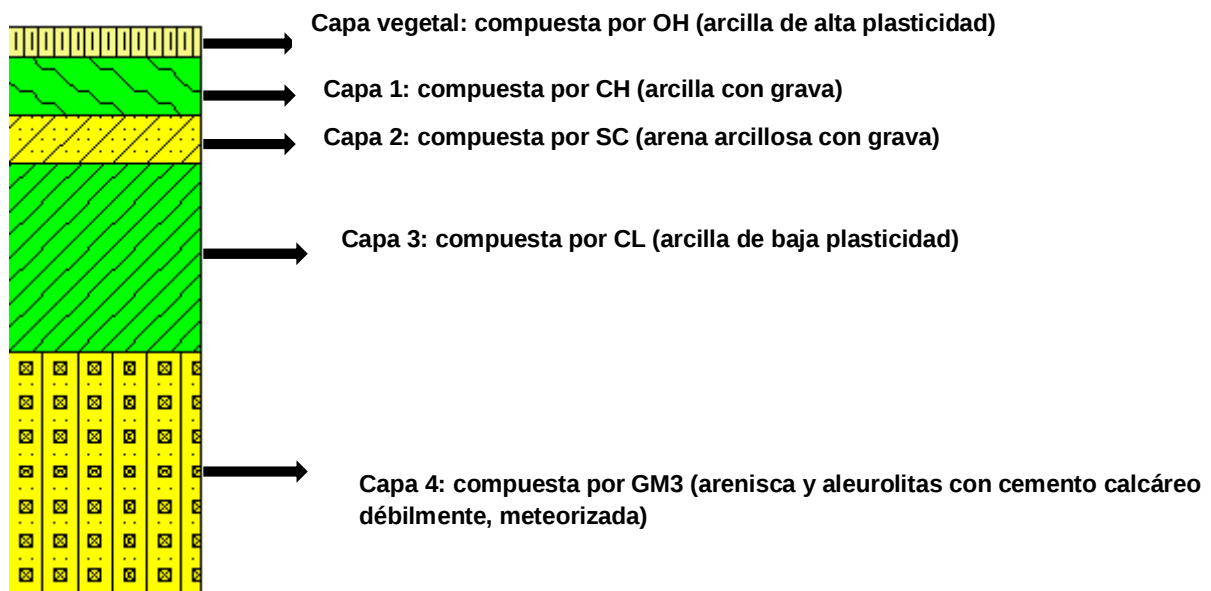


Figura 19: Columna litoestratigráfica esquemática del municipio Niceto Pérez

Conclusiones parciales para el municipio Niceto Pérez.

El municipio se caracteriza por presentar suelos de edad Eoceno, están clasificados como GM que son areniscas y aleurolitas con cemento calcáreo, SC que es una arena arcillosa con grava, GM4 que son areniscas y aleurolitas con cemento calcáreo fuertemente motorizadas, CL arcilla de baja plasticidad, GC grava arcillosa con arena y CH que es una arcilla con grava. Los valores de límite líquido y el por ciento de partículas finas (0.005mm) son muy elevados con promedio mayor de 25. La profundidad de los niveles freáticos varía entre 1.5-6.0m y en ocasiones mayor de 10m, siendo poco probable que ocurra la



licuefacción, los resultados obtenidos indican que el municipio no presenta susceptibilidad a la licuefacción.

3.5 Validación del sistema de indicadores propuestos en el municipio El Salvador.

3.5.1 Condiciones geológicas

En el Salvador las formaciones presente son, Charco Redondo, San Luis está compuesto por una secuencia terrígena, de rocas clásticas y terrígeno-carbonatadas, de granulometría variada desde arcillas hasta conglomerados. También contiene areniscas polimícticas de grano medio a fino, de color gris, que en ocasiones aparecen en capas gruesas; limolitas de color marrón-pardusco; limolitas calcáreas de color crema; lutitas calcáreas de color marrón, masivas; calizas micríticas arcillosas, de color beige; calizas biodetríticas, con abundantes foraminíferos bentónicos grandes; margas de color crema-blancuecino, que pueden pasar lateralmente a calizas con edad Eoceno Medio, parte alta - Eoceno Superior (S. Taber, 1934), dado a estas características puede ser vulnerable a la licuefacción, Maquey es también una formación presente en este municipio y se caracteriza por presentar alternancia de areniscas, limolitas y arcillas calcáreas de color gris y margas de color blanco a crema, que contienen intercalaciones de espesor variable de calizas biodetríticas, arenáceas y gravelíticas de colores blanco amarillo y crema, ocasionalmente amarillo grisáceo. La estratificación es fina a media, menos frecuentemente gruesa o masiva del Oligoceno Superior - Mioceno Inferior parte baja (N. H. Darton, 1926), es una formación que puede presentar una alta ocurrencia de licuefacción.

Puerto Boniato constituido por una alternancia de calizas organodetríticas aporcelanada, algáceas y margas, con intercalaciones finas de sílice, limolitas y lutitas. En su corte predominan las calizas, de forma subordinada está la presencia de tufitas y areniscas tobáceas calcáreas; cercanas al contacto con la Formación Caney se observan horizontes de rocas piroclásticas. Se observa aporte variable de material tobáceo, de granulometría psamítica, representada por granos de

plagioclasas, clinopiroxenos, anfíboles y rocas efusivas, de edad Eoceno Medio. (E. Nagy, 1976), en esta formación la ocurrencia de licuefacción es muy baja, Santo Domingo es otra de las formaciones presentes que se caracteriza por el dominio del componente piroclástico en el corte, con intercalaciones de litofacies terrígenas finas, silicitas, tufitas, efusivos principalmente de composición andesítica-basáltica y andesítica, raramente hasta dacíticas, con la presencia de cuerpos de dioritas, dioritas cuarcíferas, gabro-dioritas, gabrodiabas y diabasas, con desarrollo limitado de rocas esquistosas calcáreas, calizas y corneanas de edad cretácico Inferior (Aptiano) - Cretácico Superior (Turoniano). (M. Iturralde-Vinent, 1976) y hay presencia de depósitos aluviales que son favorables.

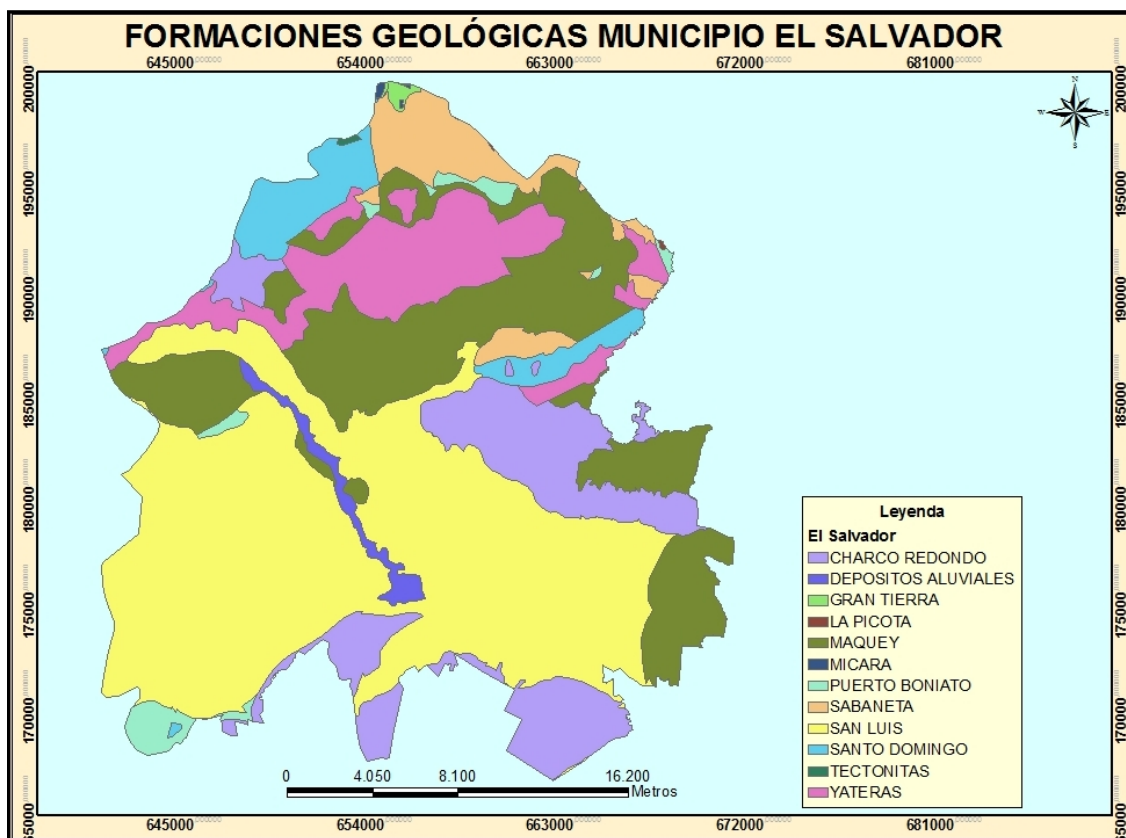


Figura 20: Esquema geológico del Municipio El Salvador, (por Geo-Cuba Guantánamo).

3.5.2 Sismicidad

El Salvador pertenece a la zona sísmica 4 de riesgo sísmico alto que puede ocasionar daños significativos en las construcciones debiéndose tomar medidas



sismorresistentes en las estructuras y obras en función de la categoría ocupacional de las mismas y el nivel de protección definido según la probabilidad de exceder un sismo de diseño. Los valores de la aceleración espectral horizontal máxima del terreno para el cálculo S_a estarán entre 0,50-0,80 g para periodos cortos (S_s) y entre 0,20-0,30 g para periodos largos (S_1) (NC 46-2013 propuesta 0 (proyecto de norma)).

3.5.3 Características hidrográficas

En este municipio existe una desarrollada red de drenaje superficial, localizándose las subcuencas de los ríos Sagua, Jaibo, Guantánamo y Bano, el primero escurre a la vertiente Norte del Grupo Sagua – Baracoa y el resto a la del Sur, irrigando con sus aguas al valle de Guantánamo. Estos ríos en su curso superior poseen potencial hidroenergético. Las cuencas del río Jaibo y Sagua se ven afectadas por la degradación, producto de la deforestación y mal manejo, con serios procesos erosivos, así como la contaminación producida por el vertimiento de los residuales de las despulpadoras existentes en las mismas. El nivel freático es muy variable, en algunas zona se comporta entre 1.50- 3 por lo que podemos decir que es una profundidad en la que se podría manifestar el fenómeno de licuefacción pero en otras zonas varía entre 5 y valores mayores que 10, donde no es posible la ocurrencia de licuefacción.



3.5.4 Condiciones ingeniero geológicas

Tabla 9: Validación de condiciones ingeniero geológica de las obras en El Salvador.

Obras	N de SPT(golpes/30 cm)	LL	% finos	% arena	Wn (%)	Yf	Yd	C (kPa)	Descripción
E.A.F.M. Arturo Lince. Combinado porcino Las cabras		49	66	24	20,87	19,17	15,86	20	relleno (CL)
Empresa de gases industriales Gasificadora Guantánamo		51	84	11	20,25	18,92	15,73	44	CH
Escuela primaria Hermanos Sánchez		48	84	15	24,66	18,49	14,83	25	ML
Escuela primaria Floro Pérez	25	49	84	11	20,25	18,92	15,73	22	CL
Policlínico Rafael Tiopis.	7	91	16	8	37,16	37,16	17,69	40	CH



Bayate									
Escuela Primaria Carlos M. De Céspedes. Costa Rica.	15				22,73	18,95	15,44	10	GM4
Construcción de viviendas para Médicos en Buenos Aires.	25	30	16	50	11,30	19,73	17,73	50	SC

Se revisaron 45 informes ingeniero geológico, 15 contenían las coordenadas y varias propiedades físico mecánicas necesarias para realizar los estudios. Solo se pudo realizar el cálculo a 7 por no presentar los valores de N de SPT.

3.5.5 Cálculo de Factor de seguridad para la licuefacción.

Tabla 10: Resultado del cálculo de FSL para El Salvador.

Obras	CRR	CSR	FSL para Mw 6	Licuabl e	FSL para Mw 7	Lic uabl e	FSL para Mw 8	Licuabl e
Policlínico Rafael Tiopis. Bayate	0,50	0,13	6,61	No	3,71	No	3,15	No
Construcción de viviendas para médicos.	2,46	0,11	38,53	No	21,67	No	18,39	No

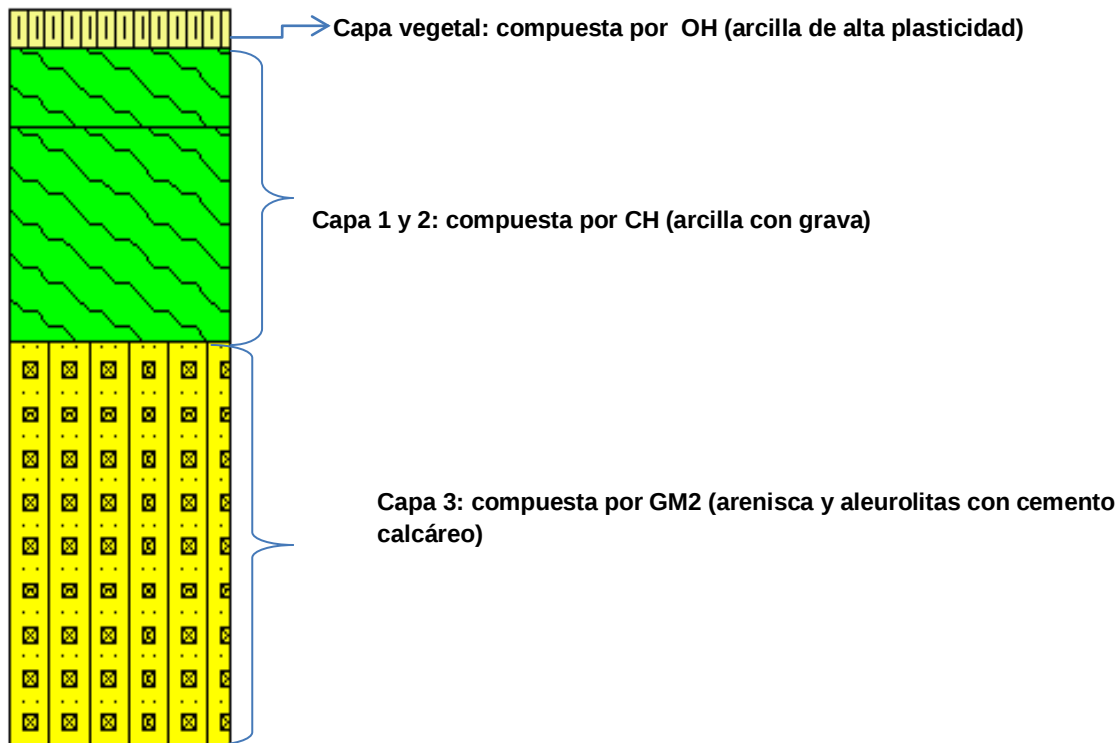


Figura 21: Columna litoestratigráfica esquemática del municipio El Salvador

Conclusiones parciales para el municipio El Salvador.

El Salvador se caracteriza por presentar suelos edad eoceno y oligoceno, estos suelos están clasificados como GM4 que son areniscas y aleurolitas con cemento calcáreo fuertemente meteorizadas, CL arcilla de baja plasticidad, SC que es una arena arcillosa con grava, ML que es limo y CH que es una arcilla con grava, enmarcado principalmente en las formaciones Maquey, San Luis, Charco Redondo y Yateras. La profundidad de los niveles freáticos varía entre 1m y en ocasiones hasta mayor de 10, siendo poco probable que en los casos donde esté por debajo de 10m ocurra licuefacción, por lo general el municipio en la mayoría de las áreas estudiadas no presenta características acordes para que ocurra el fenómeno, en general presenta suelos muy cohesivos, los resultados obtenidos arrojaron que en el municipio no existe peligro a la ocurrencia de licuefacción ante la ocurrencia de un sismo de magnitudes mayor e igual a 6.



Conclusiones

- ❖ A partir del estudio de las condiciones ingenieros geológicos los suelos en Baracoa se clasifican en SC, SM, SP y SW; en Yateras SC, GC y GM; en Niceto Pérez GM, SC y GC y en El Salvador GM, CL, SC, CH y ML.
- ❖ Los resultados obtenidos al calcular el factor de seguridad a partir de la ocurrencia de sismos de magnitudes mayores e iguales que 6 fueron en Baracoa de 18,191, Niceto Pérez de 6,391, El Salvador de 15,347 y Yateras 0,363.
- ❖ Se determinó que Yateras es el único municipio que presenta un sector susceptible a la licuefacción inducida por sismos de magnitudes iguales y mayores que 6, perteneciente a los sedimentos de la formación Maquey, siendo los suelos areno arcillosos los más favorables a que ocurra el fenómeno.



Recomendaciones

- ❖ Realizar la localización de las obras antiguas existentes y de las actuales con GPS para poder utilizar la información de los informes y calas en futuros trabajos de investigación como este.

- ❖ Realizar el estudio de vulnerabilidad en los municipios Baracoa, Yateras, Niceto Pérez y El Salvador de la provincia de Guantánamo.

- ❖ Incluir en los informes de la ENIA parámetros que permitan calcular el Factor de seguridad para la Licuefacción, un análisis integral de los suelos y propuestas de medida de mejoras del terreno.

- ❖ Al Organismo del Estado aplicar los resultados para planificar, decidir y proyectar un mejor ordenamiento territorial.

- ❖ Socializar la información mediante visitas a los diferentes centro de Gestión para la Reducción del Riesgo y Consejo Asamblea Municipal y Provincial.



Bibliografía

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.

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

CARRILLO. Licuación de suelos durante el sismo Pisco - Perú. (2007).

CARRILLO. Licuación de suelos durante un sismo de gran magnitud. (2007).

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

CHUY. Sismos Perceptibles en la Provincia de Santiago de Cuba. 1999

CHUY y OTROS. Sismicidad en Santiago de Cuba. Santiago de Cuba.2002

COLECTIVO DE AUTORES. Léxico Estratigráfico de Cuba. Instituto de Geología y Paleontología. 2013

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

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

DOMÍNGUEZ, M: "Exploración de explotación Cromo, cuerpo 1 y 2 del yacimiento, Amores en Baracoa. Guantánamo. Tesis de grado. ISMM. 1991.

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



FERNANDEZ, 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.

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

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.

GONZALEZ. "Estimativos de parámetros efectivos de resistencia con el SPT. X Jornadas geotécnicas de la ingeniería colombiana - SCI -SCG –Colombia. 1999

GUASCH, F. "Apreciación de la amenaza sísmica de Cuba". CENAI, 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 de Santiago de Cuba". Holguín. Tesis de Diploma. ISMMM. 2015.

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.

MANCEVO, V. "Construcción del edificio Socio – Administrativo del puerto de Boquerón". Informe Ingeniero Geológico.ENIA. Santiago de Cuba. 2009

MONTOYA, J. "Construcción de la oficina Sede de los Trabajadores Sociales". Informe Ingeniero Geológico.ENIA. Santiago de Cuba. 2005

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

MESA, R: “Evaluación del Riesgo Especifico por Deslizamiento en el municipio de Yateras, Guantánamo. Tesis de Maestría. ISMM 2007.

OBANDO, T. “Antología de los Efectos de la licuefacción en suelos sujetos asolicitaciones 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.

OBANDO, T. Estado actual del Conocimiento del proceso cíclico de licuefacción en suelos sujetos a sollicitaciones sísmicas. Ejemplos de Casos. Universidad Internacional de Andalucía UNÍA (Huelva, España).

OLIVA, MÁRQUEZ & MOREJÓN. Metodología integral para la evaluación de la vulnerabilidad sísmica de las construcciones en Cuba. Ejemplos de casos. CENAI. Santiago de Cuba. Cuba.

ORDAZ H. La susceptibilidad a la licuefacción en el emplazamiento de la ciudad de San Cristóbal, Cuba Occidental. Minería y Geología / v.29 n.2 / abril-junio / 2013 / p. 1-15. 2013.

PERUCCA, L.; 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

Provincia Guantánamo disponible en:
http://www.ecured.cu/Guant%C3%A1namo_%28provincia%29.

Riesgo Sísmico disponible en:
[http://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Riesgo_s%C3%adísmico&oldid=82160505](http://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Riesgo_s%C3%ADsmico&oldid=82160505)».
(s.f.). Recuperado el 5 de mayo de 2015, de wikipedia.



RODRIGUEZ, PRADO, S. "Esquema ingeniero geológico del valle de Guantánamo". Guantánamo. Tesis de Diploma. ISMM. 1981. 65p

ROSABAL. "Zonación preliminar de la licuefacción de los suelos en la región de Cuba Oriental". 2011.

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, CETIN, MOSS, & KAMMERER. "Recent advances in soil liquefaction engineering: a unified and consistent framework". California. 2003

STOEV, S. "Esquema de Guantánamo. Guantánamo". Tesis de Diploma. ISMM. 1967. 60p

SEED. Estudios de licuación sísmica. 1966

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.

TSIGE & GARCÍA. "Propuesta de clasificación geotécnica del "Efecto Sitio" (Amplificación Sísmica) de las formaciones geológicas de la Región de Murcia" Geogaceta, 40, 2006

VALVERDE, CHACÓN, VIDAL & IRIGARAY. "Susceptibilidad a licuefacción en la vega de Granada (España). 4 CNIS. GRANADA. 18-20 MAYO 2011.



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

YOUD, 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.

YOUD. Fenómenos Asociados a la licuación. 1992

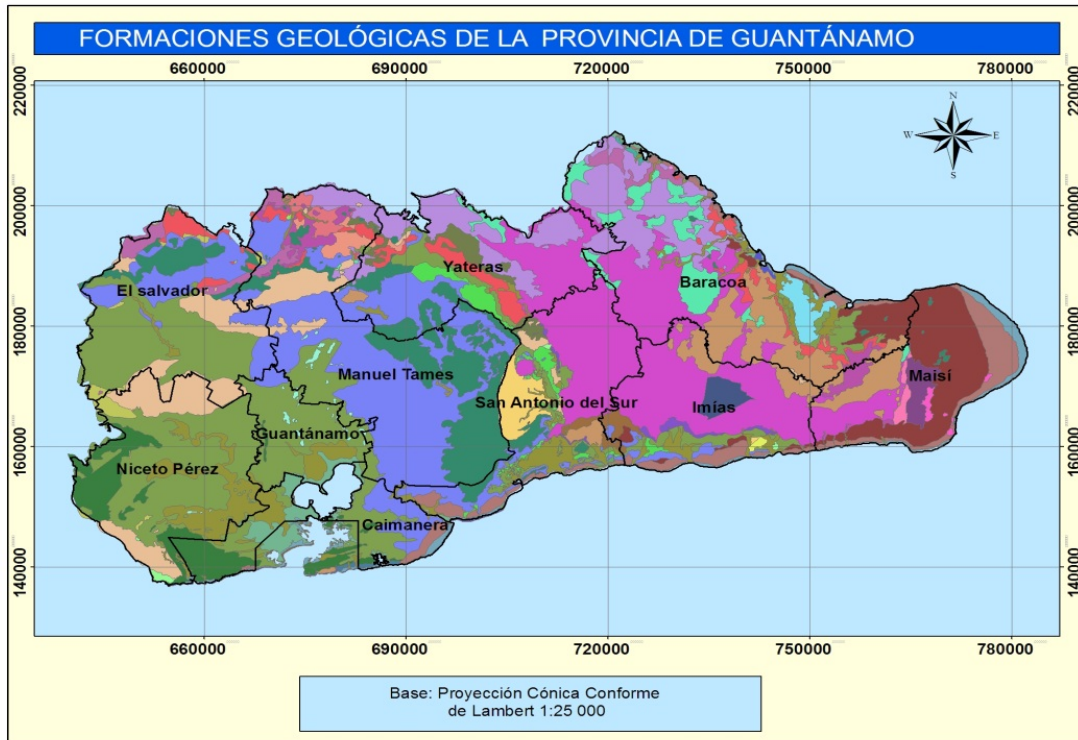
YOUD. Licuación de arena. 2001

YOUD & IDRIS. Metodologías para la determinación del potencial de licuación. 2001

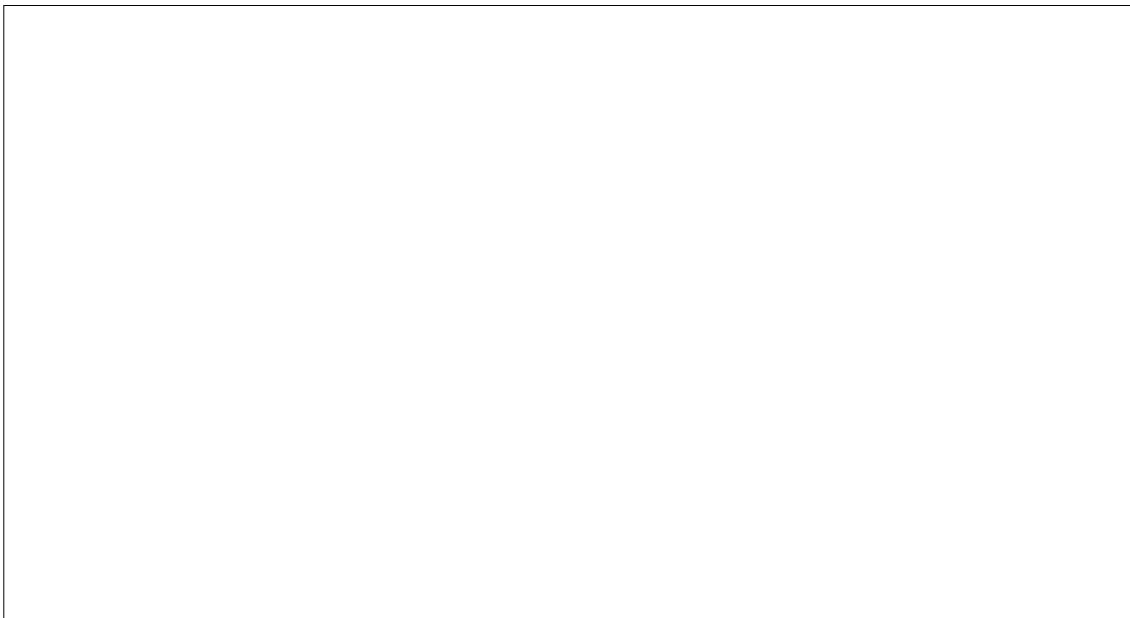


Anexos:

Anexo1



Esquema geológico las de la Provincia de Guantánamo.





obras Baracoa	CRR	Yd	H	(σ) encima n.f	Yf	H	(σ) debajo n.f	μ	(σ^*)	(σt)	rd	amax	CSR	FSL para mag 6	FSL para mag 7	FSL para mag 8
Edificio gran panel IV. Asentamiento Van- Van	1.32	15	0.27	4.05	19.2	10.06	193.152	100.6	92.552	96.602	0.923041	0.13	0.08	28.57	16.07	13.63
Muro de contención vial estadio Baracoa	1.32	14.48	0.07	1.0136	16.9	7.73	130.637	77.3	53.337	54.3506	0.9408655	0.13	0.08	28.71	16.15	13.70
Vivienda ALMEST. Parcela Cabacún.	1.60	15.91	0.03	0.4773	18.3	15.59	285.297	155.9	129.397	129.8743	0.8807365	0.13	0.07	37.80	21.26	18.04
Escuela primaria salvador Pascual	2.42	15.91	2.67	42.4797	18.3	10.63	194.529	106.3	88.229	130.7087	0.9186805	0.13	0.11	37.15	20.90	17.73
Puente Jamal y muro de contención	1.04	14.72	0.62	9.1264	18	14.54	261.72	145.4	116.32	125.4464	0.888769	0.13	0.08	22.71	12.77	10.84
Viviendas especiales	0.23	15.75	0.03	0.4725	19.4	15.19	294.686	151.9	142.786	143.2585	0.8837965	0.13	0.07	5.55	3.12	2.65



Anexo 3

obras Yateras	CRR	Yd	H	(σ) encima n.f	Yf	H	(σ) debajo n.f	μ	(σ^*)	(σ_t)	rd	amax	CSR	FSL para mag 6	FSL para mag 7	FSL para mag 8
Sala de fisioterapia y rehabilitación con fango.	0.70	16.14	3.25	52.455	19.29	0.25	4.8225	2.5	2.3225	54.7775	0.99	0.15	2.29	0.54	0.30	0.25
Muro de contencion del rio Yateras	1.97	20.24	5.3	107.272	23.29	5.3	123.437	53	70.437	177.709	0.95	0.15	0.23	14.73	8.28	7.03
Hospital Fausto Cremé.	0.70	16.14	0.94	15.1716	19.28	3.88	74.8064	38.8	36.0064	51.178	0.97	0.15	0.13	9.21	5.18	4.40



Anexo 4

obras Niceto Pérez	CRR	Yd	H	(σ) encima n.f	Yf	H	(σ) debajo n.f	μ	(σ^*)	(σ_t)	rd	amax	CSR	FSL para mag6	FSL para mag7	FSL para mag8
Escuela primaria José Martí Pérez	1.18	16.1	0.55	8.855	18.9	1.95	36.7575	19.5	17.2575	26.1125	0.9850825	0.285	0.27	7.54	4.24	3.59
Construcción de viviendas para médicos	3.23	18.14	1.27	23.0378	20.6	0.53	10.8968	5.3	5.5968	28.6346	0.9959455	0.285	0.94	6.03	3.39	2.88
Torre auto soportada de 42 m de altura	2.55	18.14	3.05	55.327	20.6	6.95	142.892	69.5	73.392	128.719	0.9468325	0.285	0.30	14.62	8.22	6.97



Anexo 5

Obras Salvador	El CRR	Yd	H	(σ) encima n.f	Yf	H	(σ) debajo n.f	μ	(σ^*)	(σ_t)	rd	amax	CSR	FSL para mag6	FSL para mag7	FSL para mag8
Policlínico Rafael Tiopis. Bayate	0.50	11.05	0.3	3.315	16.5	3	49.59	30	19.59	22.905	0.97705	0.18	0.13	6.61	3.71	3.15
Construcción de viviendas para Médicos en Buenos Aires.	2.46	16.15	0.3	4.845	19.73	10.5	207.165	105	102.165	107.01	0.919675	0.18	0.11	38.53	21.67	18.39

Anexo 6

obra	X	Y	nivel freático	capa vegetal	espesor (m)	Capa 1	espesor (m)	capa 2	espesor (m)	Capa 3	espesor (m)	capa 4	espesor (m)	capa 5	espesor (m)	capa 6	espesor (m)
Edificio gran panel IV. Asentamiento Van Van.	745750	187750	Varía entre 1.35 y 1.80 m	OH	0,4	CH	5	SC	0,40	PT y OH	4,93	SW y SC	5				
Muro de contención vial estadio Baracoa	744850	189150	Varía entre 0.90 y 2.30			SP	2,23	SW	5,50	GM2	2,30						
Finca Bioturista Sigüas Maraví. Baracoa. Restaurante.	738000	198500	Mayor de 1.30 m	OL	0,27	SC	0,84	SM	1,30								
Vivienda ALMEST. Parcela Cabacún.	745870	187097	Varía entre 0.90 y 1.25	OH	0,25	GC	0,97	CH	2	SC	1,15	PT y OH	2,27	OL	5,20	SP	5
Escuela primaria salvador Pascual	745620	187350	Varía entre 1.30 y 3.37 m	OH	0,10	GC	0,60	MH	3,80	PT y OH	4,50	SP con gravas	5				
Puente Jamal y muro de contención	750700	183020	Varía entre 1.80 a 2 m			SC y SM	1,38	CH	0,73	OH	1,47	SC	1,88	CH	2,88	GM2 y	8,20



Anexo 7

obra	X	Y	nivel freático	capa vegetal	espesor (m)	Capa 1	espesor (m)	capa 2	espesor (m)	Capa 3	espesor (m)	capa 4	espesor (m)	capa 5	espesor (m)	capa 6	espesor (m)
Edificio gran panel IV. Asentamiento Van Van.	745750	187750	Varía entre 1.35 y 1.80 m	OH	0,4	CH	5	SC	0,40	PT y OH	4,93	SW y SC	5				
Muro de contención vial estadio Baracoa	744850	189150	Varía entre 0.90 y 2.30			SP	2,23	SW	5,50	GM2	2,30						
Finca Bioturista Sigüas Maraví. Baracoa. Restaurante.	738000	198500	Mayor de 1.30 m	OL	0,27	SC	0,84	SM	1,30								
Vivienda ALMEST. Parcela Cabacún.	745870	187097	Varía entre 0.90 y 1.25	OH	0,25	GC	0,97	CH	2	SC	1,15	PT y OH	2,27	OL	5,20	SP	5
Escuela primaria salvador Pascual	745620	187350	Varía entre 1.30 y 3.37 m	OH	0,10	GC	0,60	MH	3,80	PT y OH	4,50	SP con gravas	5				
Puente Jamal y muro de contención	750700	183020	Varía entre 1.80 a 2 m			SC y SM	1,38	CH	0,73	OH	1,47	SC	1,88	CH	2,88	GM2	8,20



Anexo 8

obra	X	Y	nivel freático	capa vegetal	espesor (m)	Capa 1	espesor (m)	capa 2	espesor (m)	Capa 3	espesor (m)	capa 4	espesor (m)
20 Viviendas	658800	164200	Mayor de 3 m	OH	0,71	SC	0,56	GM4					
Escuela primaria José Martí Pérez	657285	163450	Mayor de 5 m	OH con restos de materiales de la construcción	0,32	arcilla con grava	0,6	SC	0,60	CL	1,95	GM3	2,50
Policlínico Niceto Pérez	657570	163125	5.10 m	OH	0,20	GM4	0,31	GC con arena de grano medio a grueso	0,50	GM y GC	1		
Construcción de viviendas para médicos	657400	163200	Mayor De 3.40 m	OH	0,13	CL con arena y fragmentos caliza	0,20	GM y GC y abundante CaCO3	1,50	GM4	0,90	GM4	1,80
Torre auto soportada de 42 m de altura	657415	163380	5.10 m	OH	0,20	CL	0,75	OH	0,60	GM4	1,40	GM3	10



Anexo 9

obra	X	Y	nivel freático	capa vegetal	espesor (m)	Capa 1	espesor (m)	capa 2	espesor (m)	Capa 3	espesor (m)	capa 4	espesor (m)
E.A.F.M. Arturo Lince. Combinado porcino Las cabras	652800	191700	Mayor de 10m	OH	0,63	relleno (CL)	1,68	CL	5	Caliza biógena (GM3)	>10		
Empresa de gases industriales Gasificadora Guantánamo	667850	171600	Varía entre 3.18 y 3.30m	OH	0,15	CH	0,99	GM4	3,10	GM3	2,30	GM2	10
Escuela primaria Hermanos Sánchez	667350	174880	Varía entre 3 y 3.22 m	OH	0,10	OH, con restos de carbón vegetal y vidrio	0,76	ML	0,52	GM4	0,87	GM3	10
Escuela primaria Floro Pérez	658482.9	177292.6	Mayor de 2.10 m	OH	0,10	CL	1	Lutitas calcáreas y areniscas de granos finos a medios	0,83	GM3	2,10		
Policlínico Rafael Tiopis. Bayate	673200	186880	2.70 m	OH	0,32	Contiene relleno, arcilla muy plástica	0,63	CH		GM2	3,30		
Escuela Primaria Carlos M. De Céspedes. Costa Rica.	648100	170530	Mayor de 5.50 m	OH	0,56	CH	0,58	GM4	0,78	GM3	1,75		
Construcción de viviendas Médicos	667400	174300	1.80 m	OH	0,10	SC	0,60	CL	0,80	GM4	0,80	GM3	10

