



Facultad: Geología y Minería

*Trabajo de diploma para optar por
el título De Ingeniero Geólogo*

*Título: Identificación de los escenarios
susceptibles a la licuefacción en la ciudad de
Manzanillo provincia Granma.*

Autor: Yilian de la Caridad Torres Turcàs

Tutor: MsC. Liuska Fernández Diéguez

MsC. Yexenia Viltres Milán.



DECLARACIÓN DE AUTORIDAD

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

Yilian Torres Turcás

MsC. Liuska Fernández Diéguez



Dedicatoria:

- Primero que todo a mi Dios que me ha dado la fuerza y la capacidad para llegar hasta aquí.
- A mi madre, que me ha apoyado en todo momento para lograr que este sueño se hiciera realidad, aunque una poca peleona, gracias por confiar en tu hija, por hacerme saber que en cada regaño voy por el buen camino, que está orgullosa del resultado de mi trabajo.
- A mi querido grupo universitario de Moa por darme fuerzas en los momentos difíciles de mi vida cuando pensé en algún momento que no podía continuar, siempre tenía un buen consejo que me animaba y me motivaba a seguir adelante con más fuerzas, los llevo en mi corazón.
- A mis abuelos Maida y Turcás, por darme fuerzas, por confiar en mí y ser mi ejemplo a seguir.
- A mí querido novio Milson por hacerme saber que la vida no se acaba que cuando uno se cae siempre se levanta para continuar y ser mejores personas y con las esperanzas que siempre van a traernos cosas buenas. Por enseñarme que el camino es duro, pero no se puede mirar para atrás solo hasta que se llegue a la meta.



Agradecimiento:

- Me siento muy agradecida con mi Dios porque esto es una meta cumplida.
- A mi querida tutora Liuska por estar siempre atenta a cada detalle para lograr la perfección en este trabajo. Por dedicarme parte de su tiempo y por haber confiado en mí. Gracias, muchísimas gracias.
- A nuestra Revolución, La Revolución de los humildes que soñó Martí y que Fidel cumplió.
- A mi madre Dania que siempre estuvo ahí al pendiente de cada paso en este proceso de mi formación.
- A todos aquellos profesores que tanto aportaron a mi formación académica y humana.
- A los profesores del departamento de Geología. Gracias a los conocimientos y la voluntad de muchos de ellos hoy puedo mostrar orgullosamente mi tesis de diploma.
- A mis compañeros de grupo, de todos aprendí algo y todos forman parte de mi familia, de verdad.
- A los demás, aunque no los menciono, son importantes porque siempre estarán en mi corazón.

A todos GRACIAS.



PENSAMIENTO:

"La vida es una obra de teatro que no permite ensayos...Por eso canta, ríe, llora y vive intensamente cada momento de tu vida antes que el telón baje y la obra termine sin aplausos"

Charles Chaplin.



RESUMEN

Los estudios de los suelos donde se encuentran las principales obras y las viviendas son de gran importancia para el ordenamiento territorial futuro, dada las experiencias de los efectos negativos ocurridos tras el sismo de Bayamo en 1551. La presente investigación se realizó dada la necesidad de conocer las condiciones ingeniero-geológicas de los suelos de la ciudad de Manzanillo de la provincia Granma con el objetivo de identificar los escenarios susceptibles a la licuefacción inducidos por terremotos fuertes, específicamente los estratos con mayor susceptibilidad a licuar dentro de las diferentes formaciones geológicas presentes en las áreas de estudio. Para cumplir con el objetivo propuesto se tomó como metodología la validación del sistema de indicadores propuestos por Fernández Diéguez en el año 2015 y la obtención de variables correspondientes a las propiedades físico-mecánicas, para ello se revisaron informes de la Empresa Nacional de Investigaciones aplicadas (ENIA) sede Holguín. Se determinó que el área está representada por suelos de tipo GC (Gravas arcillosas), las arenas arcillosas (SC), calizas(C) arcillosas o calcáreas, arcillas areno limosas de baja plasticidad (CI). Se obtuvo como resultado un mapa donde muestra que la formación Manzanillo en correspondencia con sus propiedades físico-mecánicas no cumplen las condiciones necesarias para la ocurrencia de la licuefacción.

ABSTRAC

The studies of the soils where the main works and dwellings are located are of great importance for the future territorial ordering, given the experiences of the negative effects that occurred after the Bayamo earthquake in 1551. The present investigation was carried out given the need to know the engineer-geological conditions of the soils of the urban area in the city of Manzanillo of the Granma Province with the objective of identifying the scenarios susceptible to liquefaction induced by strong earthquakes, specifically the strata with greater susceptibility to liquefy within the different formations geological features present in the study areas. In order to comply with the proposed objective, the validation of the system of indicators proposed by Fernández Diéguez in 2015 and the obtaining of variables corresponding to physical-mechanical properties were taken as a methodology, for which purpose reports from the National Applied Research Company were reviewed (ENIA) headquarters Holguin. It was determined that the area is represented by soils of type GC (clayey gravels), clayey sands (SC), limestones (C) either clayey or calcareous, silty arene clays of low plasticity (CI). The result was obtained a map showing that the Manzanillo formation in correspondence with its physical-mechanical properties do not meet the conditions necessary for the occurrence of liquefaction.

Tabla de contenido

RESUMEN	i
ABSTRAC	ii
INTRODUCCIÓN	1
MARCO TEÓRICO y ESTADO DEL ARTE:.....	3
Definiciones de licuefacción y suelos licuables.....	4
Evidencias históricas del fenómeno de licuefacción de suelos.....	6
Reportes históricos de terremotos fuertes y licuefacción de los suelos en Cuba	12
Investigaciones realizadas en Cuba.	13
Los sismos en Cuba como el elemento disparador de la licuefacción de suelos.	20
Principales categorías en las que se subdivide la licuefacción.....	21
Factores que condicionan el fenómeno de licuefacción según Ihsihara en 1990.	22
Evidencias superficiales más comunes de la ocurrencia de licuación Leyton (2011).....	23
Efectos de la licuefacción	24
Criterios de Susceptibilidad	25
Criterios geológicos:.....	25
Criterios basados en la composición del suelo:	25
Criterios basados en el estado del suelo:.....	26
Circunstancias en las que ocurre la licuefacción	26
Condición de un suelo para que sea licuable	26

Evaluación del potencial de licuefacción de suelos granulares sujetos a movimientos sísmicos.....	27
Métodos empíricos:.....	27
Métodos analíticos:	27
Métodos realizados para evaluar la resistencia de los suelos a la licuefacción.	28
Modelos Físicos	28
Técnicas empíricas:	28
Condiciones granulométricas para la ocurrencia de la licuefacción de los suelos según (Wang, 1979)	28
Procedimientos “ <i>in situ</i> ” para evaluar la capacidad de los suelos arenosos para resistir la licuación	29
CAPITULO I. CARACTERÍSTICAS FISICO-GEOGRAFICAS Y GEOLÓGICAS DE LA REGION DE ESTUDIO.....	32
1.1. Ubicación Geográfica.....	32
1.2. Clima.....	32
1.3. Desarrollo económico social	32
1.4. Geomorfología	32
1.5. Características hidrogeológicas.....	32
1.6. Geología regional	32
1.7. Características tectónicas del área de estudio.	32
Introducción	32
1.1 Ubicación Geográfica.....	32
1.2 Clima	33
1.3. Desarrollo económico social	34
1.4. Geomorfología	35

1.5. Características hidrogeológicas.....	36
1.6. Geología regional	41
1.7. Características tectónicas del área de estudio.	48
CAPÍTULO II. METODOLOGÍA PARA EL ESTUDIO DEL POTENCIAL DE LICUEFACCIÓN GENERADA POR SISMOS FUERTES EN LA CIUDAD DE MANZANILLO, PROVINCIA GRANMA.....	54
2.1 Etapas de la investigación.	54
2.2. Metodología aplicada para determinar los escenarios susceptibles a la licuefacción en las áreas de estudio.....	54
2.1.1 Primera etapa de la investigación.	55
2.1.2 Segunda etapa de la investigación.....	55
2.1.3 Tercera etapa de la investigación	55
2.2. Metodología aplicada para determinar los escenarios susceptibles a la licuefacción en las áreas de estudio.....	55
2.2.1 Análisis de las condiciones geológicas	56
2.2.2 Análisis del comportamiento de la Sismicidad en el área de estudio	56
2.2.3 Análisis del comportamiento del nivel freático en el área de estudio	57
2.2.4 Análisis de las condiciones ingeniero geológicas.....	57
2.2.5 Cálculo del factor de seguridad para la licuefacción (FSL)	59
CAPITULO III: EVALUACIÓN DEL POTENCIAL DE LICUEFACCIÓN EN LA CIUDAD DE MANZANILLO.....	68
3.1 Aplicación del sistema de indicadores aplicados a la investigación Introducción	68
3.2. Valoración de la susceptibilidad a la licuefacción de la zona urbana de la ciudad de Manzanillo	68



3.1. Criterios para la selección de escenarios susceptibles a la licuefacción. ...	68
3.2. Valoración general de los sistemas de indicadores aplicados a la investigación:	69
Análisis global de los resultados	79
CONCLUSIONES	82
RECOMENDACIONES	83
BIBLIOGRAFÍA	84
Anexos 1 Terremotos Históricos Reportados en Cuba .www.cenais.cu.....	87

INTRODUCCIÓN

Para el diseño o revisión del planeamiento territorial y urbano se precisa de estudios de riesgo de desastres. El peligro sísmico, debe ser minuciosamente estudiado, teniendo en cuenta el comportamiento del terreno ante los efectos destructivos del desastre; en este caso las sacudidas verticales y horizontales que inciden sobre las edificaciones y las obras de infraestructura en el territorio que no llegan con igual intensidad a cada sitio de análisis. No se concibe el desarrollo sin el correcto ordenamiento territorial donde se tenga en cuenta a la población, los bienes y los peligros a los que se exponen.

Los sismos o terremotos forman parte de los fenómenos naturales que más han preocupado a la humanidad a través de los siglos, pues a pesar de los incalculables avances de la ciencia aún no han podido disponer de un mecanismo predictivo capaz de alertarnos ante la ocurrencia de un terremoto y siguen ocurriendo destrucciones de grandes ciudades, innumerables pérdidas de vidas humanas y pérdidas en la economía de los países afectados. Dichos terremotos son fenómenos naturales de sacudida brusca y pasajera de la corteza terrestre producida por la liberación de energía acumulada en forma de ondas sísmicas.

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 por la actividad sísmica, este es un fenómeno poco estudiado en nuestro país. Por lo que constituye una necesidad el estudio de las condiciones geológicas,

geomorfológicas e ingeniero geológicas que favorecen su ocurrencia. 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.

Nuestro país no está exento de sufrir este fenómeno, ya que las experiencias derivadas de las catástrofes de Santiago de Cuba 1932 y Granma en 1951 nos convocan a no dejar de prestar atención a la sismicidad como una premisa de desastres. Tras el sismo del 18 de octubre de 1551 en Bayamo se reportaron las mayores afectaciones, varias personas fueron heridas. Los principales daños se extendieron hacia los asentamientos costeros del municipio Manzanillo.

Por este motivo la presente investigación está encaminada al estudio del fenómeno de licuefacción en la ciudad de Manzanillo provincia Granma.

Problema de la investigación: Escaso conocimiento de las condiciones ingeniero-geológicas de los suelos del municipio de Manzanillo para determinar si son licuables o no ante un sismo de gran magnitud.

Objeto de estudio: Los suelos de la ciudad de Manzanillo de la provincia Granma.

Campo de acción: El fenómeno de licuefacción de los suelos inducido por terremotos fuertes.

Objetivo general: Evaluar las condiciones ingeniero geológicas de los suelos de la ciudad de Manzanillo para conocer el potencial de licuefacción ante un sismo de gran magnitud e identificar los escenarios susceptibles.

Objetivos específicos:

- Caracterizar las condiciones ingeniero geológicas que presentan los suelos de la ciudad de Manzanillo.
- Aplicar un sistema de indicadores que permitan evaluar la licuefacción en el territorio a partir de las variables físico-mecánicas obtenidas.

- Definir la susceptibilidad a la licuefacción de la ciudad de Manzanillo a partir de la delimitación de las principales formaciones geológicas con condiciones para licuar.

Hipótesis: Si a partir de la evaluación de las condiciones ingeniero geológicas presentes en la ciudad de Manzanillo podemos caracterizar los suelos del sector urbano del municipio, entonces será posible evaluar la susceptibilidad a la licuefacción ante un sismo de gran magnitud e identificar los escenarios susceptibles a la licuefacción inducido por sismos de gran magnitud.

Novedad de la Investigación:

Se amplía el estudio de susceptibilidad a la licuefacción en la provincia Granma al realizarse estudios de carácter local en el territorio de Manzanillo.

MARCO TEÓRICO y ESTADO DEL ARTE:

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 (Sánchez, 2013).

La licuefacción debe su causa al incremento de los esfuerzos cortantes actuantes en el suelo o a la disminución de su resistencia por la acción de una sollicitación brusca en el suelo provocada por una sacudida de este ya sea natural o artificial.

Es más probable que la licuefacción ocurra 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. Durante el proceso en que actúa la fuerza exterior, por lo general 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 (Sánchez, 2013).

La licuefacción del suelo es uno de los temas más interesantes y polémicos que han sido tratados a lo largo de los años. Dicho fenómeno normalmente se presenta en los suelos granulares finos sueltos, en los que el espacio entre partículas individuales se va rellenando con agua. Como consecuencia de los poros cubiertos totalmente con agua, se ejerce una presión sobre las partículas del suelo circundante. Cuando un terremoto afecta al suelo, las partículas de la superficie tienden a agruparse hacia un estado compacto causando que el agua ejerza una fuerza de presión para empujar hacia afuera los espacios vacíos que estaban ocupados. Debido que el promedio de los movimientos se produce de manera rápida, así como el promedio por el cual el agua puede salir o escapar del suelo, la presión del agua en los espacios se incrementa tendiendo a empujar las partículas del suelo unas con otras. Debido a que dichas partículas no se encuentran en contacto unas con otras, la resistencia de los suelos decrece, produciéndose una falla dado el caso que el suelo no pueda resistir por más tiempo la carga impuesta Gonzales de Vallejo (2002).

Definiciones de licuefacción y suelos licuables

Rodríguez Pascua (1997). La licuefacción es la disrupción in situ del soporte mutuo entre granos, generalmente por una sacudida sísmica, en la que se produce la pérdida total o parcial de la resistencia de cizalla de los materiales afectados. En suelos sin cohesión, la transformación de un estado sólido a líquido es el resultado del aumento de la presión de los poros que disminuye el coeficiente de fricción durante un terremoto. El suelo completamente saturado, con arenas sin cohesión, generalmente limpias, que pueden incluir algo de gravas puede ser licuefaccionado durante la sacudida sísmica por la propagación de las ondas de cizalla.

González Vallejos en 2002 define que los suelos licuables son aquellos suelos con contenido areno limoso, en estado saturado que al experimentar esfuerzos

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

Colectivo de Autores (2003). 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.

Programa Nacional de Difusión y Divulgación de Ciencia y Tecnología “Un Recorrido por las Ciencias de la Vida y las Ciencias de la Tierra” (2000-2003): Consecuencia de los terremotos. Los suelos no consolidados, no cohesivos o fácilmente disgregables y saturados en agua, se separan, debido a las vibraciones del terremoto perdiendo su resistencia de manera temporal. El sedimento cae hacia abajo y el agua de saturación tiende a salir como una fuente surgente, comportándose como material licuado, cuyo resultado es la producción de un desplazamiento o falla del terreno.

Schmidt, R. (2005). Efecto secundario durante terremotos. Se refiere a sedimentos pocos o no consolidados y saturados de agua. Los depósitos en la superficie o en un nivel cercano de la superficie pueden perder su resistencia causados por el movimiento de la tierra. Cuando ocurre debajo de edificios u otras estructuras de construcción pueden causar daños graves.

Tanasijevic (2011). Transformación del material granular del estado sólido al licuado, como la consecuencia del incremento de las presiones de poro y de la reducción de presiones efectivas.

Colectivo de Autores (2012). 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.

Rodríguez, Audemard, & Rodríguez (2012). 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.

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 descritos 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 horas. se produjo en la población de Talavera del Esteco (provincia de Salta), un violento sismo de magnitud 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 horas. 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 "hubo 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 horas. se produjo un terremoto de Magnitud 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" (Lavalle) 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.

Licuación 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 se tomó 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 terremotos fuertes y 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. 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).

Terremoto del 18 de octubre de 1551 ubicado en Bayamo, los reportes históricos argumentan la ocurrencia de la licuefacción Cotilla & Córdoba (2010); (tomado de Reinoso, D, 2016) basados en datos de archivo general de Indias, declaran su aparición en la localidad de Cauto Embarcadero, en las cercanías del río Cauto, identificado como el río de mayor extensión de Cuba, ubicado en la provincia Granma y su desembocadura la realiza en el Golfo del Guacanayabo. Los reportes históricos deben ser considerados como un área potencial de licuefacción para futuros terremotos.

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

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

El terremoto en Santiago de Cuba ocurrido 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). Otro hecho significativo fue 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), En la figura 3 se muestra la licuefacción de los suelos en calle La Alameda, Santiago de Cuba.



Figura 3. Licuefacción de los suelos en calle La Alameda, en Santiago de Cuba. Terremoto del 3 de febrero de 1932. Tomado de Chuy (2002).

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

Investigaciones realizadas en Cuba.

Nuestro país no ha estado exento la ocurrencia de licuefacción, ya que existen rocas depositadas en ambientes sedimentarios propicios para que se manifieste este fenómeno por sollicitación sísmica en cercanía de los grandes sistemas de fallas activas que cruzan la región oriental de Cuba, donde se ubican ciudades de gran importancia: el fenómeno de licuefacción en épocas pasadas causó grandes daños en algunas poblaciones, ejemplo de esto encontramos la ciudad de

Santiago de Cuba 1932 y la provincia Bayamo 1947. Para corroborar la posible ocurrencia de este fenómeno en la región oriental de Cuba se realizaron investigaciones como la tesis de maestría de Bárbara Fernández, en el año 2000 con el título “Posibilidad de ocurrencia del fenómeno de licuefacción en la cuenca de Santiago de Cuba por terremotos fuertes”, donde el autor hace un mapa esquemático pronóstico de ocurrencia del fenómeno de licuefacción en Santiago de Cuba por terremotos fuertes. En la investigación utiliza por primera vez la combinación de factores importantes como la geología, geomorfología, sísmica y la información ingeniero geológica de forma automatizada. En esta investigación se hace una suposición conjugando factores como la geología, geomorfología y el nivel freático.

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

Tipología y propiedades de los suelos

Profundidad del nivel freático

Topografía del terreno

Magnitud y distancia de los terremotos.

La cuenca de Santiago de Cuba es considerada como licuable en el sector que corresponde a los sedimentos cuaternarios los que poseen un espesor promedio de 10 m García et. 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 en el 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 se tomaron de acuerdo con la aplicación del criterio de Brandes (2003), la ciudad de San Cristóbal se emplaza mayormente sobre sedimentos no susceptibles a licuar (93 % de la superficie), los sedimentos medianamente susceptibles cubren el 6 % del área y los susceptibles apenas el 1 %. De forma general, solo en pequeños sectores coincidieron las dos condiciones (límite líquido y fracción de arcilla) para catalogarlos como suelos susceptibles. En estos sectores la columna de suelos está conformada, predominante, por arenas, formando estratos de hasta dos metros de espesor, intercalados con lentes de arcilla de 1,5 m. Ligeramente más propagados espacialmente se encuentran los suelos medianamente susceptibles. Estos coinciden aproximadamente con las terrazas de inundación del río San Cristóbal, en el extremo noreste del área, aunque también se identificaron en algunos sectores dentro de la formación 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 Guillermón Moncada del municipio de Santiago de Cuba”, en este trabajo se hace evaluación de las condiciones

ingeniero geológicas y las particularidades sísmicas del Consejo Popular. Se utilizaron un conjunto de métodos que resolvieran la necesidad de la investigación como el cálculo del factor de seguridad corregido, la determinación de intensidades máximas que se pueden obtener a partir de magnitudes sísmicas que provoquen licuefacción en el área de estudio. Se obtuvo como resultado un mapa de susceptibilidad a la licuefacción en el área de estudio donde pudimos apreciar que desde el punto de vista de clasificación de suelos que los mismos varían espacialmente de forma aleatoria 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 mayores al 30 %, densidades secas menores $13,50 \text{ kN/m}^3$, con pesos específicos que oscilan en el rango de $(26,60 \text{ a } 27,00) \text{ kN/m}^3$ y resistencia a la penetración dinámica de 4 a 6 golpes por cada 30 cm de penetración (SPT). 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.

Para la evaluación del peligro sísmico se considera que las principales afectaciones están relacionadas con las fallas activas, constituyendo zonas débiles en superficie donde se producen incrementos de la intensidad sísmica, y donde también se pueden producir movimientos diferenciales por constituir límites de bloques con diferente dinámica, así como por servir de guía para ondas desde el foco sísmico o hipocentro; en ellas el potencial de daños ante los terremotos puede ser intensificado

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

En el trabajo de diploma titulado “Determinación de escenarios susceptibles a la licuefacción inducido por terremotos de gran magnitud en los municipios Baracoa, Yateras, El Salvador y Niceto Pérez de la provincia de Guantánamo por Reinoso-Mercanfety (2016) se utilizaron un conjunto de métodos que resolvieran la necesidad de la investigación, como la validación de los resultados el cálculo del

factor de seguridad corregido y la determinación de intensidades máximas que se pueden obtener a partir de magnitudes sísmicas que provoquen licuefacción en el área de estudio. Se obtuvo como resultado la delimitación de escenarios susceptibles a la licuefacción en el municipio de Yateras para sismo de magnitudes mayores que 6.

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

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

encuentra el mayor asentamiento poblacional y el material de relleno existente se comporta como un suelo tipo arena arcillosa y arcilla arenosa con grava.

Otro trabajo titulado “Delimitación de escenarios susceptibles a la licuefacción inducidos por sismos de gran magnitud en los municipios de San Luis, Julio Antonio Mella y Palma Soriano de la provincia Santiago de Cuba”, por Bauta-Torres (2017), dando cumplimiento a sus objetivos específicos los cuales eran la caracterización de las condiciones ingeniero geológicas de los suelos de los municipios antes mencionados, la aplicación de un sistema de indicadores geotécnicos y sismológicos que permitieron determinar escenarios licuables y delimitar estratos susceptibles a la licuefacción de los suelos. Obteniendo como resultado final la aplicación de un sistema de indicadores a partir de conjugar factores como: geología, sismicidad, características hidrogeológicas, condiciones ingeniero-geológicas y el cálculo del factor de seguridad para la licuefacción que permitió evaluar el potencial de licuefacción en los escenarios propuestos. Los resultados indicaron que el municipio Julio A. Mella es el más propenso a la ocurrencia de licuefacción.

El trabajo de diploma titulado Delimitación de escenarios susceptibles a la licuefacción inducido por terremotos de gran magnitud en el municipio Santiago de Cuba, por Lavañino -Fleita (2017), responde a la necesidad de evaluar las condiciones ingeniero-geológicas del municipio: Santiago de Cuba para delimitar los escenarios susceptibles a la licuefacción, utilizando las propiedades físico-químicas, la caracterización geológica del área de estudio y realizando el cálculo del factor de seguridad pudo obtener como resultado final que los suelos más susceptibles dentro del municipio Santiago de Cuba, son los: limos de baja plasticidad (ML) y las arcillas de baja plasticidad (CL), encontrándose sobre sedimentos pertenecientes al grupo El Cobre y la formación La Cruz, ubicados cerca de la Bahía.

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

La falla Oriente y la falla Norte de la Española constituyen las principales fallas activas de primer orden donde pueden ocurrir sismos fuertes que afectan el territorio oriental de Cuba. Con estas estructuras se relaciona la principal actividad sísmica registrada en esta región, tanto en magnitud como en frecuencia. La figura 4 ilustra la sismicidad registrada instrumentalmente por tres o más estaciones para la región oriental de Cuba, desde el año 1967 hasta agosto de 2014.

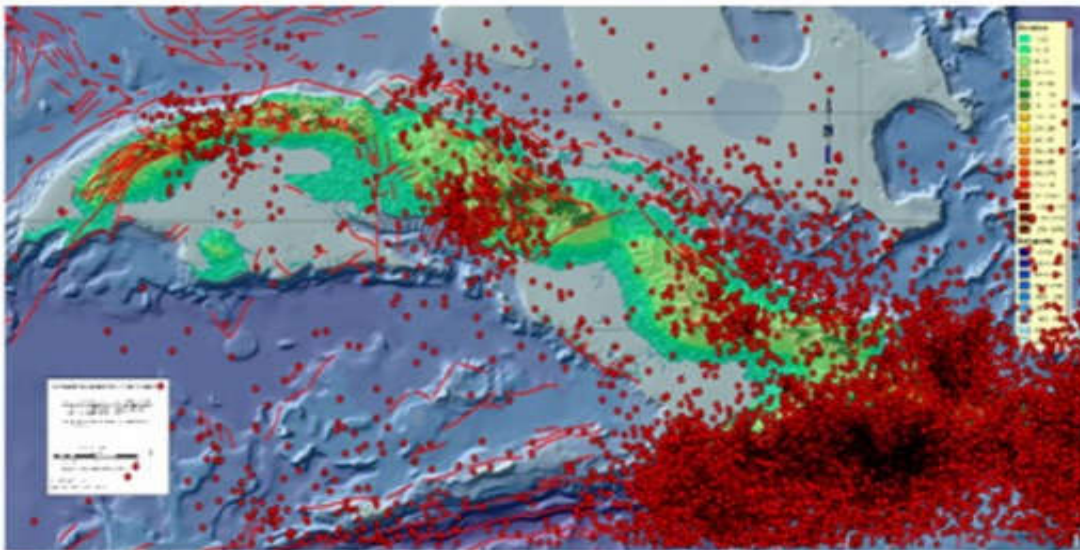


Figura 4. Sismicidad registrada instrumentalmente por tres o más estaciones para la región oriental de Cuba, desde el año 1967 hasta agosto de 2014.

Para esta parte del país se ha establecido un ciclo sísmico de terremotos fuertes de entre 80 y 100 años, aproximadamente; esto significa que un sismo fuerte en esta región puede ocurrir en cualquier momento, debido a la energía acumulada desde los últimos sismos ocurridos en la primera mitad del siglo XX Guasch & Oliva (2014).

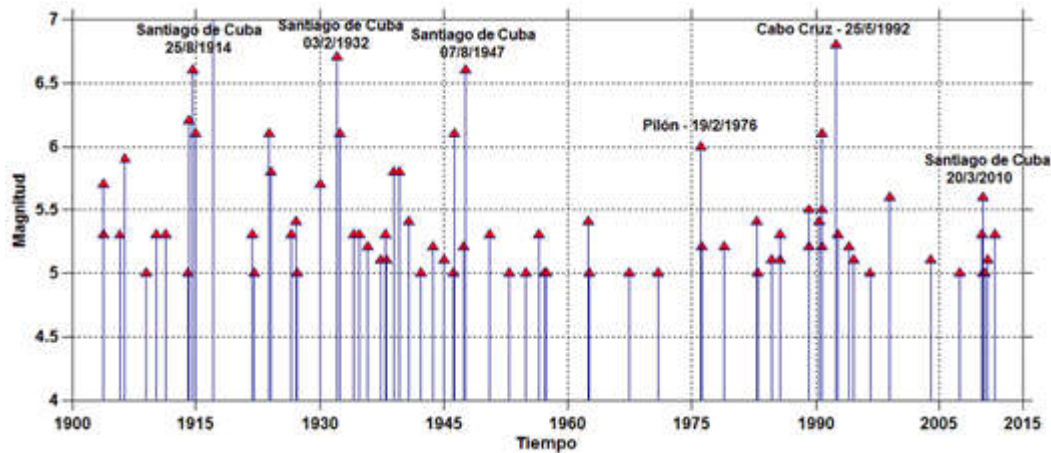


Figura 5. Terremotos de magnitud mayor de 5 reportados en la región suroriental de Cuba desde 1900. Fuente: CENAIS.

Principales categorías en las que se subdivide la licuefacción.

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

Movilidad Cíclica: La Movilidad Cíclica es un fenómeno de licuación provocado por una carga cíclica, ocurre en depósitos de suelo con esfuerzos de corte estáticos menores que la resistencia del suelo. Las deformaciones debido a la movilidad cíclica se incrementan porque los esfuerzos estáticos y dinámicos subsisten durante un terremoto. El desplazamiento lateral, es un resultado común de la movilidad cíclica,

puede ocurrir sobre terrenos suavemente inclinados y en terrenos llanos cercados por ríos y lagunas. (Elgamal, 2013)

Factores que condicionan el fenómeno de licuefacción según Ihsihara en 1990.

- **Origen del suelo.** Los suelos depositados por procesos fluviales, litorales y eólicos se sedimentan fácilmente y sus granos tienen poca probabilidad de compactarse, de modo que se licuarán con facilidad. Los depósitos glaciales, generalmente, ya son bastante densos y tienen menor probabilidad de licuarse. Suelos compuestos por roca no son en absoluto licuables.
- **Distribución del tamaño de los granos:** La arena uniformemente graduada, de grano muy grueso a medio tiene mayor probabilidad de licuarse, mientras que las arenas limosas finas y las gravas lo hacen bajo cargas cíclicas muy severas.
- **Profundidad de las aguas subterráneas:** Mientras más cerca de la superficie se encuentre el nivel de las aguas subterráneas (nivel freático), mayor será la probabilidad de que ocurra licuefacción.
- **Edad del depósito:** Los suelos jóvenes (menos de 3.000 años) son débiles y no cohesivos, de modo que tienen mayor probabilidad de licuarse comparado con aquellos más antiguos donde han actuado procesos de compactación y cementación natural. Dichos procesos incrementan su resistencia.
- **Amplitud y duración de la vibración del terreno:** La licuefacción de suelos bajo condiciones de tensión provocadas por un terremoto aumenta con la magnitud y la duración del sismo. Por esta razón, sismos pequeños licuarán únicamente los suelos más próximos al epicentro, mientras que ante un sismo de magnitud mayor será posible reconocer licuefacción a distancias muy grandes. En el caso

del sismo del 27 febrero de 2010 se observó licuefacción hasta al menos 400 km de distancia del epicentro (Valparaíso).

- **Peso del recubrimiento y profundidad del suelo:** Las tensiones entre partículas aumentan a medida que aumenta la presión del recubrimiento (a mayor profundidad). Mientras mayor sea dicha tensión menor será la probabilidad que ocurra licuefacción. Por lo general, la licuefacción ocurre a profundidades menores de 9 m y, rara vez, a mayores de 15. Alfaro (2011)

Causas principales a las que puede atribuirse la pérdida de la resistencia al esfuerzo cortante

- Incremento de los esfuerzos cortantes actuantes y aumento correspondiente de presión de poro.
- Desarrollo rápido de elevadas presiones en el agua intersticial, quizás como consecuencia de un sismo, una explosión, etc. Esta segunda causa se asocia a un colapso estructural rápido del suelo cuyos vacíos, saturados de agua, tienden a reducirse, desarrollándose presiones en aquella. Elgamal (2013)

Evidencias superficiales más comunes de la ocurrencia de licuación Leyton (2011).

- Volcanes de arena
- Las grietas en el terreno.
- Las pérdidas de capacidad portante.
- Los movimientos laterales.
- Las oscilaciones horizontales del terreno.
- Las fallas de taludes por flujo del terreno.

Efectos de la licuefacción

El fenómeno de licuefacción se manifiesta en la superficie del terreno por la formación de grietas, hundimientos de terreno, asentamientos diferenciales de estructuras, “golpes de agua” (surgimiento de agua) y volcanes de arena. Los dos últimos son producto del súbito aumento de la presión de agua de poros ocasionada por la vibración, forzando a que este fluido fluya rápidamente a la superficie. Si el flujo asciende lo suficientemente rápido se generan “golpes de agua”. Al mismo tiempo, el agua ascendente puede transportar partículas de arena hasta la superficie donde son depositadas formando montículos de arena, a los que por analogía se les denomina “volcanes de arena” Obando (2009).

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

- **Flujos de tierra:** Los materiales del suelo se desplazan rápidamente cuesta abajo en un estado licuado, a veces causando coladas de barro o avalanchas.
- **Propagación lateral:** Tipo de remoción en masa en que se produce desplazamiento limitado de las capas superficiales del suelo a favor de pendientes suaves o hacia superficies libres, como, por ejemplo, en márgenes de ríos y taludes de terrazas fluviales. En este tipo de desplazamientos, a menudo ocurre que las capas sub-superficiales están revestidas de cubiertas antrópicas, como por ejemplo asfaltos. Cuando las capas más profundas se licuan, las capas superficiales antrópicas, generalmente, se mueven lateralmente en bloques, tanto durante como después del sismo, provocando una deformación permanente del suelo y ruptura de las cubiertas.

- Flotación: Objetos enterrados en el suelo bajo licuación son desplazados. Es común que tanques, buzones o tuberías de alcantarillado ascienden a través del suelo y floten en la superficie.
- Pérdida de resistencia de soporte: Reducción de la capacidad de soporte de los cimientos debido al debilitamiento del material del suelo subyacente o colindante. A menudo provocan que las estructuras se hundan o dañen Obando (2009).

Criterios de Susceptibilidad

No todos los suelos son susceptibles de presentar licuefacción, así que el primer paso en el desarrollo de una evaluación de riesgo de licuefacción es la determinación de la susceptibilidad de licuefacción. La susceptibilidad de licuefacción de un suelo puede ser evaluada usando criterios históricos, geológicos, basados en su composición o según su estado:

Criterios históricos: Se ha observado que la licuefacción ocurre frecuentemente en los mismos lugares cuando las condiciones del sitio se mantienen constantes, es por esto que la evidencia de la ocurrencia histórica de licuefacción, observada en forma de paleo licuefacción, puede ser utilizada como prueba de susceptibilidad de licuefacción, en un determinado lugar.

Criterios geológicos: Las condiciones geológicas también pueden indicar susceptibilidad de licuefacción, por ejemplo, los suelos de depósitos fluviales y eólicos, cuando se encuentran saturados, tienen una alta probabilidad de ser susceptibles de presentar licuefacción. También se ha observado licuefacción en depósitos de abanicos aluviales, playas y estuarios, pero no de manera tan evidente como en los casos anteriores. Otro criterio geológico es la edad del depósito, en general los depósitos de suelo jóvenes son más susceptibles de licuefacción que los depósitos más antiguos.

Criterios basados en la composición del suelo: La composición física de un suelo juega un importante papel en la determinación de su susceptibilidad de

licuefacción. Las arenas uniformemente gradadas y limpias, compuestas principalmente de partículas redondeadas son intrínsecamente más susceptibles, mientras que los suelos bien gradados y los suelos con partículas angulares son menos susceptibles. La presencia de finos, particularmente finos plásticos ($IP > 10$), tiende a disminuir la susceptibilidad de licuefacción.

Criterios basados en el estado del suelo: El potencial de licuefacción de un suelo también depende de su estado, como las tensiones efectivas a las que está sometido y su densidad in situ, ya que la tendencia de un terreno a densificarse, bajo condiciones de carga cíclicas, depende de su densidad y de las tensiones efectivas. Los suelos sueltos son bastante más susceptibles de licuefacción que los suelos densos y, para una densidad dada, los suelos bajo tensiones de confinamiento efectivas altas son más susceptible que los suelos bajo tensiones de confinamiento efectivas bajas Kramer & Stewart (2004).

Circunstancias en las que ocurre la licuefacción

- Sismos con magnitud igual o superior a 5.5 con aceleraciones superiores o iguales a 0.2g
- Bajo grado de compactación, es decir N menores de 10 para profundidades menores de 10 m y N menores de 20 para profundidades mayores de 10 metros.
- 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 Obando (2009).

Condición de un suelo para que sea licuable

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



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

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

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

Evaluación del potencial de licuefacción de suelos granulares sujetos a movimientos sísmicos

Estos métodos necesitan definir el nivel de aceleración del terreno como prerrequisito para evaluar el potencial de licuefacción. A menudo este nivel se establece a partir de relaciones entre la magnitud del sismo, la distancia al epicentro y la aceleración pico.

Métodos empíricos: Basado en observaciones in situ del comportamiento de depósitos tipo arena durante movimientos sísmicos anteriores y correlaciones entre predios que no se han licuado, apoyados por algunos ensayos simples de laboratorio y densidad relativa del número de golpes de ensayos SPT.

Métodos analíticos: Basados en la determinación en laboratorio de las características de resistencia a la licuefacción de muestras no alteradas y el uso de análisis de respuestas dinámica del predio para determinar la magnitud de las tensiones de corte inducidas por los movimientos sísmicos. El análisis del potencial de licuefacción en este estudio 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; lo cual motivó a un análisis de microzonificación sísmica del área, a fin de obtener un mejor estimado

de este parámetro. Como resultado de este análisis se espera definir los estratos que son potencialmente licuables. (Moya Fernández, 2009)

Métodos realizados para evaluar la resistencia de los suelos a la licuefacción

Modelos Físicos: Estos métodos requieren del uso de centrifugas o tablas vibratoras para simular la carga sísmica bajo condiciones de contorno bien definidas. El suelo utilizado en el modelo es re moldeado para representar diferentes densidades y condiciones geométricas. A causa de las dificultades en conseguir un modelo con las mismas condiciones del sitio, los modelos físicos rara vez se utilizan para estudiar la resistencia a la licuación de un sitio específico. Sin embargo, los modelos físicos son valiosos para analizar y entender el comportamiento generalizado del suelo y para evaluar la validez de modelos constitutivos bajo condiciones de contorno bien definidas, como se indica en los comentarios relativos a los métodos analíticos.

Técnicas empíricas: Entre ellas, uno de mayor difusión y aplicación, el Procedimiento Simplificado, en que se calculan dos variables sísmicas primarias tales como: a) la excitación sísmica de la capa de suelo, expresada en términos de la relación de esfuerzos cíclicos promedios ($CSR = t_{pro} / s'_{vo}$); y b) la capacidad de la capa de suelo para resistir la licuación, en términos de la relación de resistencia a la licuefacción. Para determinar la resistencia a la licuación de los suelos arenosos, la relación CSR se compara con la relación CRR. (Obando, 2009)

Condiciones granulométricas para la ocurrencia de la licuefacción de los suelos según (Wang, 1979)

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

Procedimientos “*in situ*” para evaluar la capacidad de los suelos arenosos para resistir la licuación

- Penetración estándar (SPT)
- Penetración con cono (CPT)
- Velocidad de ondas de corte (V_s)
- Penetración Becker en gravas (BPT)

Métodos de potencial de licuefacción según Kishida (1969) y Ohsaki (1970)

Estas técnicas están basadas en el número de golpes suministrados al terreno mediante ensayos tipo SPT, cuyos resultados son empleados en el análisis de las condiciones de los suelos ante sollicitaciones sísmicas, capaces de generar la licuación del terreno, tal y como ocurrió en el año 1964 en la Ciudad de Niigata (Japón).

Kishida propone que para la ocurrencia de licuación del suelo ante sismos de magnitud $M \geq 7$ es requerido el cumplimiento de las siguientes condiciones:

- a) El nivel freático está cerca de la superficie.
- b) El espesor del estrato de suelo no licuable, arriba del licuable, es menor que 8 m.
- c) La compacidad relativa (C_r) es menor que el 75 %.

Mientras que Ohsaki considera que los suelos se licuan bajo las siguientes

Condiciones:

- a) El nivel freático está cerca de la superficie.
- b) Las características granulométricas satisfacen las siguientes relaciones:

2 mm < D 60 < 0,2 mm D 10 < 0,1 mm Siendo D 60 y D 10 los tamaños efectivos que dejan pasar, respectivamente, el 60 y el 10 % en peso, de las partículas.

- c) El número de golpes en la prueba de penetración estándar (NSPT) es menor que dos veces la profundidad z expresada en metros.

Método de Seed et. al. (1982)

Una de las numerosas relaciones matemáticas resultante de reiterados ensayos de campo conocida fue propuesta por el científico Seed en el año 1983. Hoy día, esta expresión numérica es muy usada para averiguar las condiciones físicas del subsuelo. Este algoritmo está dado por el siguiente modelo cuantitativo:

$$V_s \text{ (m/seg)} = 56 (N)^{1/2}$$

Dónde:

V s: Velocidad de propagación de ondas de corte

N: Número de golpes suministrados al terreno evaluado. (SEED & IDRIS, 1982)

Para sismos con $M = 8,5$, no se producirá licuación si la V_s , en los 15 m superiores, supera los 350 m/seg. Esto coincide con lo establecido en otras investigaciones, según las cuales las arenas del Holoceno, con valores típicos de V_s entre 200 y 225 m/seg, son más susceptibles de licuarse que las del Pleistoceno, con V_s mayor que 325 a 350 m/seg Henríquez, C. (2007).

Capítulo I

CAPITULO I. CARACTERÍSTICAS FISICO-GEOGRAFICAS Y GEOLÓGICAS DE LA REGION DE ESTUDIO.

Introducción

1.1. Ubicación Geográfica.

1.2. Clima

1.3. Desarrollo económico social

1.4. Geomorfología

1.5. Características hidrogeológicas

1.6. Geología regional

1.7. Características tectónicas del área de estudio.

Introducción

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

1.1 Ubicación Geográfica.

La ciudad de Manzanillo, se localiza al oeste de la provincia Granma. Los límites de la zona se establecen entre las coordenadas $X_1=465170$, $Y_1= 173000$ y las coordenadas $X_2=489000$ y $Y_2=189000$ en el sistema de coordenadas de Lambert (Cuba Sur).

Para lograr una continuación de los límites en superficie se amplió la zona de estudio entre las coordenadas $X_1=451700$, $Y_1=154405$ y las coordenadas $X_2=491800$ y $Y_2=192400$.



Figura 6. Esquema de ubicación geográfica de la zona urbana de la ciudad de Manzanillo, provincia Granma.

1.2 Clima

El clima de la región es tropical húmedo y al igual que el resto del país, está sometida a la acción de los vientos alisios del noroeste en el invierno y del este-noreste en verano. De acuerdo a la distribución de las precipitaciones atmosféricas se determinan en el año dos períodos, uno seco y otro lluvioso, el primero se extiende de noviembre a abril y el segundo de mayo a octubre.

Según los datos registrado por el pluviómetro N° 127 Cayo Redondo, en el período comprendido entre 2000 al 2007 se registró que el año más lluvioso fue el 2007, con un total de 1611.3 mm, siendo los meses de mayores precipitaciones promedios; mayo 184.3mm, agosto 234.1 mm y octubre con 185.2 mm; mientras que el año más seco del período analizado fue el 2000 con 942,0 mm.

También para estos años la evaporación de acuerdo a la Estación Climática de Paso Malo, los valores máximos coinciden con el verano que se caracteriza por ser muy intenso en la región, encontrándose en el orden de 2006,4 mm, mientras que la humedad relativa no presenta variaciones significativas oscilando entre

(78-81%). Con respecto a la temperatura promedio anual presenta poca variación, en el rango de 25,6 a 26.5 °C, siendo julio y agosto los meses más calurosos y diciembre - enero los más fríos.

Por su variedad y repercusión el clima conforma un factor geográfico notable, la zona de investigación recibe gran cantidad de calor, con radiación media diaria de 6 MJ.m⁻², que decrece hacia las alturas. De esta forma la temperatura del aire resulta muy elevada en las planicies con temperatura media anual es de 25.3 grados Días (2013).

1.3. Desarrollo económico social

La vegetación es escasa, predomina el empleo de la tierra para el cultivo de arroz. Las tierras no cultivadas están cubiertas de maleza espesa donde se destaca el marabú, que alcanza grandes áreas de extensión. Hacia las estribaciones de la Sierra Maestra se desarrollan los bosques.

La región depende fundamentalmente del cultivo del arroz y la pesca. Existen grandes talleres de pailerías y astilleros. El molino de arroz es la industria más cercana a la zona de estudio. Por este desarrollo arrocero, es el cultivo de arroz el principal consumidor de agua de la zona, que se abastece fundamentalmente de las aguas superficiales por el sistema de canales construido para el mismo.

El poblado de Cayo Redondo está a una distancia aproximada de 5 Km de Manzanillo y su comunicación es a través de la carretera Bayamo – Manzanillo, en buen estado constructivo, también existe una red de terraplenes y caminos en condiciones regulares, que permiten la circulación normal en época de seca, no así en época de lluvia donde debe usarse la doble tracción. También existe la comunicación por el ferrocarril Bayamo-Manzanillo. Existen los servicios de correos, telefonía nacional y otros servicios de comunicación pertenecientes a diferentes organismos Días (2013).

1.4. Geomorfología

Según la clasificación geomorfológica de Spiridonov existen siete niveles hipsométricos donde se puede observar de norte a sur: (Ver figura 7)

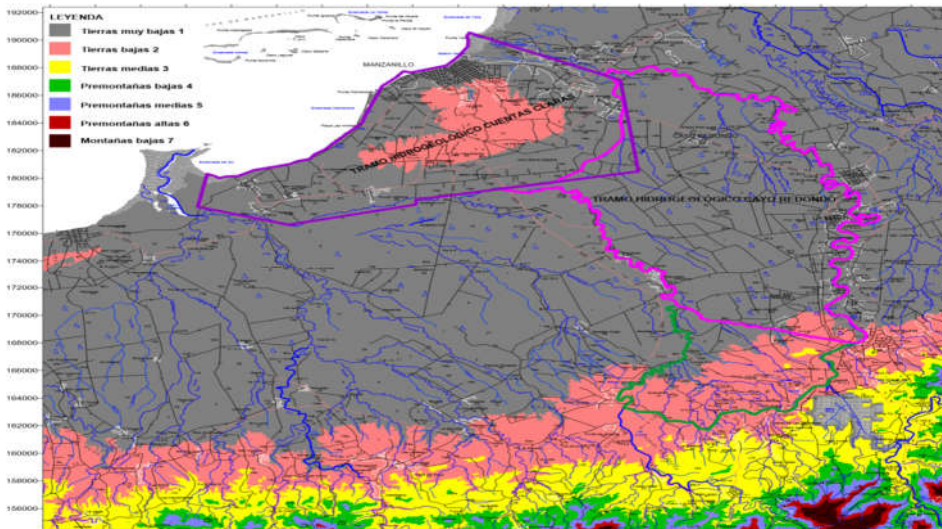


Figura 7. Esquema geomorfológico según la clasificación de Spiridonov por niveles hipsométricos y disección vertical. (Cordovez Perianes J. M, 2009, 2010 y 2011) Tomado de Días, 2013.

1. Tierras muy bajas, ubicadas al norte del área de estudio, con la excepción de las alturas de Manzanillo y Campechuela, que forma una llanura fluvio-marina producto de reiteradas transgresiones y regresiones desde el Eoceno superior y que tienen cotas entre 0 y 50 m. Además de los sedimentos marinos, en la cuenca se han depositado sedimentos producto de la erosión fluvial ocurrida en el cuaternario.
2. Tierras bajas, con cotas entre 50 a 100 m, forman las colinas entre las Tierras muy bajas, donde se encuentran las elevaciones carbonatadas del Mioceno, hacia el norte forman cúpulas o braquianticlinales y hacia el sur sus cuestas de bajo ángulo.
3. Tierras medias, con cotas entre 100 y 200 m, constituyen una franja de hasta más de 5 km de ancho antes de dar paso a las premontañas bajas, con

dirección oeste-suroeste al este-noreste. En estas elevaciones pueden aflorar aún rocas miocénicas carbonatadas y también calizas de la parte superior del Grupo El Cobre.

4. Premontañas bajas, con cotas entre 200 a 300 m, ubicadas en el borde sur de la zona de estudio, tienen forma de cuestras con ángulo más pronunciado de hasta 25° hacia el noroeste y donde pueden aflorar las rocas carbonatadas de la parte superior del Grupo El Cobre y rocas volcánicas de este que la subyacen.
5. Premontañas medias, con cotas entre 300 a 400 m, constituyen cuestras abruptas con ángulos de hasta 35° de pendiente y donde afloran rocas vulcanógenas y efusivo sedimentarias del Grupo El Cobre.
6. Premontañas altas, con cotas entre 400 a 500 m y pendientes de hasta 45° , donde predominan rocas vulcanógenas y algunos cuerpos intrusivos.
7. Montañas altas, con cotas mayores de 500 m y pendientes de más de 45° , donde predominan cuerpos intrusivos granodioríticos Días (2013).

Por lo general la disección horizontal es alta sobre todo en la zona de la llanura del Cauto. La presencia de rocas arcillosas en la superficie ha propiciado que las aguas superficiales esculpan una red de drenaje por lo general de tipo dendrítica. En algunas zonas con configuración ovalada bordeadas por zonas de alta disección horizontal se encuentran zonas de baja disección horizontal lo cual está dado por la presencia de facies más arenosas, ya sea de tipo marino o sedimentos aluviales de granulometría más gruesa.

El análisis de la red de drenaje permitió discriminar tres zonas principales dendrítica, paralela o subparalela y radial Días (2013).

1.5. Características hidrogeológicas

En la provincia existen dos grandes cuencas hidrogeológicas, Manzanillo - Cabo Cruz (GM) y Cauto (GC) que a su vez están divididas en subcuencas y tramos hidrogeológicos (Figura 8).

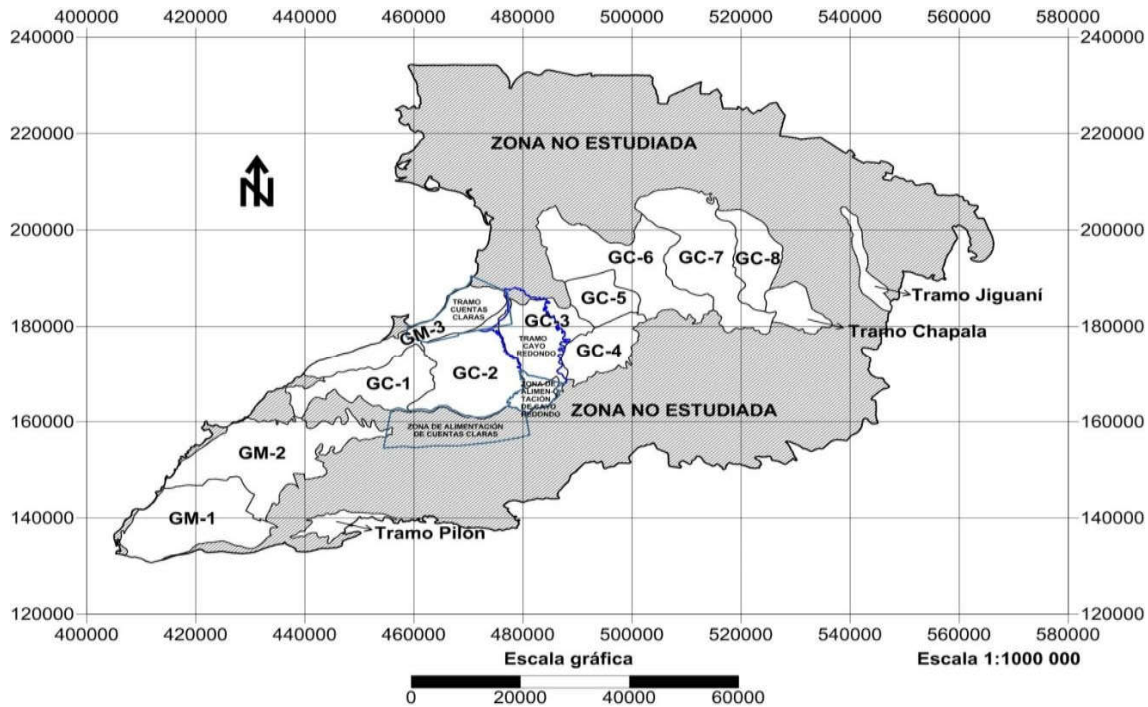


Figura 8. Subcuencas y tramos hidrogeológicos en la provincia Granma Días (2013).

Los principales ríos son: Yara, Gua, Jibacoa, Ojo de Agua e Hicotea. Por encontrarse el área estudiada dentro del interfluvio de los ríos Yara y Jibacoa, son los más importantes para esta investigación. También se desarrollan varios arroyos y canales de riego pertenecientes a los cultivos de arroz que atraviesan el área.

Los ríos corren de sur a norte con excepción del Jibacoa que en un gran tramo en la cercanía de Manzanillo hace un giro en ángulo casi recto (87°) y corre en dirección E-O; lo cual evidencia la presencia de la Falla Jibacoa.

El río Yara, al cortar los sedimentos cuaternarios (en la llanura del Cauto) describe una trayectoria sinuosa lo que evidencia su período senil, que contrasta con la zona más al centro y oeste donde los ríos tienen un trazado más recto con valores de disección vertical mayor. Este cuadro es propio de zonas donde existen movimientos tectónicos de tipo vertical que han reactivado los procesos erosivos en los cauces y el rejuvenecimiento de la red de drenaje.

Los ríos Jibacoa y Yara corren describiendo sus cauces formas semicirculares, lo que evidencia la presencia de estructuras de bajo ángulo de buzamiento, lo cual rompe con el cuadro estructural principal dado por la presencia de estructuras de tipo vertical (fallas normales).

Los Complejos Acuíferos reconocidos para la Región de estudio son:

- Complejo acuífero de las rocas vulcanógenas sedimentarias del Paleoceno – Eoceno Indiferenciado (P_{1-2}).
- Complejo acuífero de los depósitos carbonatados del Eoceno Medio Indiferenciado (P_2^2).
- Complejo acuífero de los depósitos terrígenos del Eoceno Medio Superior (P_2^{2-3a}).
- Complejo acuífero de los depósitos terrígenos del Mioceno (N_1).
- Complejo acuífero de los depósitos carbonatados de la Formación Manzanillo ($N_1^3-N_2$).
- Complejo acuífero de los depósitos fluvio-marinos y aluviales del cuaternario ($m+alQ_4$).

Dentro de la región a los efectos de la presente investigación, es muy importante el complejo acuífero que a continuación se describe:

Complejo acuífero de los depósitos fluvio-marinos y aluviales del cuaternario (Q).

Representado en su mayor parte por la Fm. Cauto y los depósitos aluviales más recientes, es el principal y más extendido de la región y del área. Lo forman rocas tales como areniscas calcáreas poco cementadas, intercalaciones de arenas de diferentes granulometrías, arenas arcillosas con intercalaciones de gravas y guijarros, explicándose esto por el hundimiento del Valle del río Cauto, que trajo

por consecuencia la acumulación de sedimentos arcillosos marinos, arenas y gravas fluviales.

Las rocas acuíferas están cubiertas en su mayor parte por capas arcillo-arenosas que en ocasiones transicionan a arenas arcillosas.

La principal zona de alimentación de este complejo es de la parte premontañosa y algunos de los principales ríos que lo atraviesan, mientras que la descarga se produce hacia el Golfo de Guacanayabo en las zonas pantanosas fundamentalmente, aunque de forma local, hacia algunos ríos como el Yara cuando gira hacia el noroeste y este, al norte de Cayo Redondo. El coeficiente de filtración varía en dependencia de la composición litológica.

La cantidad y calidad del agua subterránea existente, está determinada por las diferentes facies geológicas, el relieve y el clima fundamentalmente. En la tabla 1, se caracterizan las aguas subterráneas por subcuencas y tramos hidrogeológicos Días (2013).

Tabla 1. Caracterización de la Subcuencas y Tramos (Diaz 2013).

Subcuencas/ Tramos (T)	Recursos Potenciales (Hm ³ /Año)	Mineralización			Recursos explotables (Hm ³ /Año)
		<1	1-2	>2	
GC-1	31,0	18,4	5,6	7,0	18,4
GC-2	11,6	10,0	0,2	1,4	9,2
GC-3	83,0	68,0	15,2	-	68,0
GC-4	21,5	9,9	11,4	0,2	9,9

GC-5	60,5	29,6	27,2	3,7	29,6
GC-6	64,9	3,7	57,0	4,2	3,7
GC-7	147,0	76,0	51,0	20,0	76,0
GC-8	11,1	1,8	3,5	5,8	1,7
Total Cauto	430,6	217,4	171,1	42,3	216,5
T. Jiguaní.	6,6	0,4	(1-4.4, 15) 6.2	-	0,4
T. Pilon.	Zona I 2,0 Zona II 0,78	2,78	-	-	2,78
T. Chapala.	19,8	15,9	-	-	15,9
Total Provincia.	502,0	268,0	184,0	-	262,0

Los mapas de profundidad de yacencia del agua subterráneas dan valores para época de lluvia muy cercanos a la superficie entre 0.40 y 8.26 m con promedio para el área de 2.39 m, mientras que en época de seca las profundidades del agua subterránea oscila entre 0.45 m y 9.63 m con media de 3.82 m, lo que indica que no hay diferencias entre una época y otra favorecido por el riego permanente del arroz, a través de los canales y parcelas, que mantiene en toda su extensión al territorio anegado en agua durante casi todo el año; solamente en época de cosecha se desecan las parcelas, aunque los canales continúan inundados.

La zona hidrogeológica estudiada es muy compleja, pues existen acuíferos con variadas conductividades hidráulicas, espesor y otras propiedades acuíferas.

En el mapa de hidroisohipsas para época de lluvia, se observa la tendencia del flujo de las aguas subterráneas con dirección de sur a norte y dirigidas hacia el río Yara o subparalelas a este, lo que indica que en periodo lluvioso el acuífero se alimenta a partir de la cota de los 32 metros por el río y producto a la infiltración de los canales y la lámina de agua existentes en los campos de arroz en un porcentaje nada despreciable (9 %). Las cotas de los niveles van desde 16.1 a 43.1 m con un promedio de 29.5 m. El gradiente hidráulico está entre 0.0010 y 0.0064 con una media de 0.0024.

En el mapa de hidroisohipsas para época de seca, se observa también la tendencia del flujo de las aguas subterráneas con dirección de sur a norte, aunque haciendo un giro hacia el centro del área acercándose al campo de pozos, pero retomando luego su rumbo al norte, el flujo se pronuncia más en dirección al río Yara pasando de subparalelo a oblicuo, buscando su intersección, lo que reafirma que en esta época del año al continuar los canales y campos de arroz anegados, se mantiene la alimentación del acuífero por el río. Las cotas de los niveles están entre 3.25 y 43 m con un promedio de 22.42 m. El gradiente hidráulico está entre 0.00046 y 0.0493 con un promedio de 0.0027 Días (2013).

1.6. Geología regional

El área de estudio pertenece a la cuenca originada por los procesos acaecidos hacia el límite del Eoceno Inferior-Eoceno Medio donde produjeron cambios paleogeográficos muy importantes en el Caribe noroccidental; el arco de islas volcánicas Sierra Maestra que comenzó a desarrollarse a partir del Paleoceno Superior, se extinguió paulatinamente hasta que cesó el proceso de subducción a inicios del Eoceno Medio. El medio ambiente marino dominante durante la existencia del arco de islas fue profundo tipo batial-abisal excepto en la zona del arco axial (Sierra Maestra) en donde predominaron las profundidades neríticas. Sobre los restos del arco de islas volcánicas Sierra Maestra se desarrolló una

extensa cuenca, donde se acumularon facies carbonatadas, algunas en medios arrecifales y otras en medios marinos profundos, esta cuenca se localizaba en el margen pasivo de la plataforma Cuba-Bahamas y tuvo una existencia efímera, limitada a la porción inferior del Eoceno Medio. En este intervalo de tiempo el proceso de extensión de la cuenca de Yucatán dio lugar a la cuenca Cauto-Nipe. Durante el Eoceno Inferior en esta estructura se desarrolla un proceso de expansión que constituyó un límite entre la placa Caribe y la Placa Norteamericana. El cese de la actividad volcánica en el Eoceno Inferior Tardío contribuyó al aumento de la diversidad en el medio marino, lo que se refleja especialmente a partir del Eoceno Medio en las Formaciones Charco Redondo y Puerto Boniato que afloran en la zona de estudio Días (2013).

Las Formaciones relacionadas con el límite Eoceno Inferior- Eoceno Medio que afloran en la zona son:

ROCAS DEL BASAMENTO

Grupo El Cobre: Edad Paleoceno Superior a Eoceno Medio.

La parte alta del Grupo el Cobre se caracteriza por la presencia de conglomerados vulcanomícticos-tobáceos intercalados con areniscas y lutitas de color crema y verdosas; de granulometría gruesa a fina con buena estratificación planar paralela, fina, gradual, contorsionada. En esta secuencia aumenta el contenido de carbonatos hacia la parte alta, donde van predominando calizas biodetríticas y calizas tufíticas pasando gradualmente a la Formación Puerto Boniato o a la Formación Charco Redondo que sobreyacen al Grupo El Cobre Lewis & Sracsek en 1955. El Grupo El Cobre se caracteriza por presentar frecuentes y complejas relaciones faciales tanto laterales como verticales Colectivo de autores (2013).

Formación Charco Redondo: Edad Eoceno Medio (parte baja).

La Formación Charco Redondo se compone de litofacies de calizas arrecifales con abundante fauna bentónica. Las calizas son compactas órgano- detríticas,

fosilíferas, de color variable. En la parte inferior del corte, son frecuentes las brechas. En esta parte predomina la estratificación gruesa, mientras que en la superior predomina la estratificación fina. Lateralmente hacia el noreste y fuera de la zona de estudio se correlaciona con la Fm. Puerto Boniato formada por calizas con estratificación más fina y formadas en un ambiente nerítico profundo Colectivo de autores (2013).

Rocas De La Cobertura

Las rocas y estructuras del neoaútóctono cubano se formaron después de la consolidación del substrato plegado, es decir, a partir del Eoceno Superior. Durante esta etapa y hasta el presente, dominan los movimientos verticales oscilatorios, que dieron lugar a la formación de una estructura de bloques distintamente elevados; no obstante, algunas fallas siniestras de rumbo NE-SO y E-O estuvieron activas. En estas condiciones se forman algunos bloques positivos con tendencia al levantamiento donde apenas se depositaron sedimentos de este intervalo; otros mantuvieron una tendencia al hundimiento y entre sus límites se conservan espesores potentes de sedimentos del Eoceno Superior al Reciente. Con una altitud intermedia se encuentran una serie de bloques, donde los espesores de sedimentos no superan los cientos de metros.

Los sedimentos de esta edad presentan en general muy pocas deformaciones. Esto se debió al predominio de los movimientos oscilatorios verticales. Las direcciones principales de las fallas son mayormente heredadas de rumbos ya existentes en el basamento Días (2013).

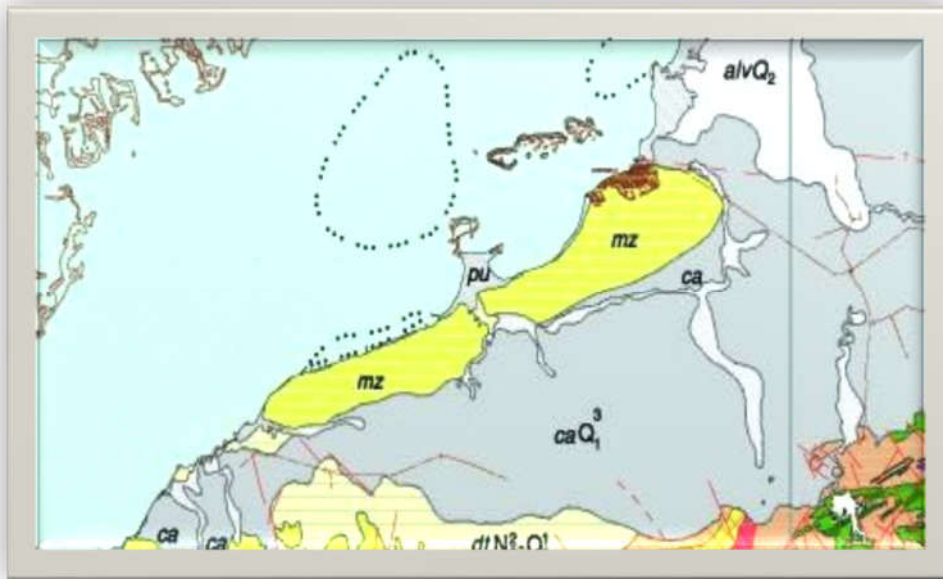










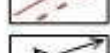



Figura 9. Esquema de formaciones geológicas del IGP 1:100 000 (2011)

LEYENDA

-  Depósitos Palustres (pal Q2). Cieno con arenas y limos
-  Depósitos aluviales (al Q2). Arenas y gravas
-  Formación Cauto (ca Q1). Arcillas, arenas, limos y gravas
-  Formación Dátí (dt N - N). Conglomerados
-  Formación Manzanillo (mz N - N). Arcillas
-  Formación Manzanillo (mz N - N). Margas
-  Formación Manzanillo (mz N - N). Calizas biódetriticas
-  Formación Charco Redondo (chr P). Calizas recristalizadas
-  Grupo El Cobre (ec P - P). Tobas, andesitas y basaltos
-  Fallas comprobadas y supuestas.
-  Eje de un anticlinal.
-  Eje de un sinclinal.

En estos sedimentos se pueden reconocer varios ciclos sedimentarios o estadios de transformación de la paleogeografía. Cada ciclo comenzó con una trasgresión y consecuente predominio de sedimentos clásticos, que hacia arriba se transforman en rocas carbonatadas de aguas someras y concluyen con una regresión rápida y emersión.

Durante el desarrollo de estas secuencias, se redujo la extensión de las cuencas marinas hasta la casi total emersión del territorio cubano en el Holoceno. En la figura 9 se observa bordeando a la Cuenca Hidrográfica del Cauto las Formaciones Oligoceno-Cuaternarias Colectivo de autores (2013).

Fm. Pedernales: Edad Oligoceno Superior.

Calizas brechosas masivas o de estratificación muy gruesa. Hacia el techo de la formación se intercalan parabrechas de matriz margosa. Pudiera considerarse como la parte basal de la Formación Camazán Colectivo de autores (2013).

Fm. Camazán: Edad Oligoceno Superior- Mioceno.

Propagada en la cuenca de Nipe y en parte sur oriental de la cuenca Cauto. Yace concordantemente sobre la Formación Pedernales y discordantemente sobre la Fm. Sabaneta. Representada por calizas coralinas algáceas (biolititas), calizas biodetríticas a veces arcillosas, calcarenitas, calciruditas, con intercalaciones de margas que en ocasiones pueden presentar fragmentos de calizas. Estas rocas presentan coloraciones variadas desde el amarillo, amarillo-crema, carmelita a gris.

En el borde de la cuenca, desde la zona central en dirección al sur de Las Tunas aparecen las rocas de Oligoceno Superior- Mioceno Medio parte alta Colectivo de autores (2013).

Formación Paso Real: Edad Oligoceno Superior- Mioceno Medio parte alta.



En esta formación son característicos en ella los cambios litológicos abruptos tanto vertical como lateralmente. Predominan las alternancias de calizas y margas. Las calizas son arcillosas, biodetríticas arcillosas y más subordinadamente calizas biohémicas, calizas dolomitizadas, dolomitas y calcarenitas. Las calizas arcillosas por desagregación originan pseudos conglomerados calcáreos de matriz margoso-arenácea. En general son masivas. Las margas, al igual que las calizas son fosilíferas. Aparecen intercalaciones de areniscas y lutitas calcáreas y arcillas pueden contener algunos horizontes pirita, yeso, halita y lignito Colectivo de autores (2013).

Fm. Manzanillo: Edad Mioceno Superior-Plioceno (parte baja).

Aflora en la zona y en el área de estudio del Sector de Cuentas Claras. Se distribuye en forma de faja bordeando el golfo de Guacanayabo, entre la Ciudad de Manzanillo al norte y Río Limones al sur, en la región de Niquero. Se acumula hacia el sur en la zona de premontaña de la Sierra Maestra y penetra en profundidad en el Valle del Río Cauto formando un braquisinclinal con eje asimétrico, de pendientes abruptas hacia el norte, donde esta estructura tiene su continuidad con el braquianticlinal de Manzanillo-Campechuela, limitado por la falla Jibacoa. Está compuesta fundamentalmente por una alternancia de calizas biodetríticas arcillosas de granulometría variada, a veces gravas y arenas derivadas de vulcanitas, margas, margas limosas y arenáceas, lutitas calcáreas y más subordinadamente calcarenitas y calciruditas con distintos tamaños de granos, predominando los finos e intercalaciones de arcillas esmectíticas, arcillas calcáreas y arcillas limosas a veces yesíferas. Igualmente, subordinadas aparecen calizas biohémicas, calizas detríticas, calizas micríticas y calizas dolomíticas. La secuencia es muy fosilífera. La coloración es variable: crema y amarillento con localidades rosácea y anaranjada para los horizontes carbonáticos y gris o gris verdoso para los terrígenos Colectivo de autores (2013).

Formación Dátil: Edad Plioceno Superior- Pleistoceno basal, de acuerdo a su posición estratigráfica. Aflora sólo al sur de la zona de estudio en forma de

parches, discordante sobre las secuencias más antiguas como las formaciones Manzanillo, Puerto Boniato y El Cobre y por debajo de la secuencia fluviomarina de la Fm. Cauto. Está formada por fanglomerados polimícticos masivos, poco rodados y seleccionados, débilmente cementados y de color rojizo abigarrado que son productos de depósitos proluvio - deluviales. El espesor, según datos de pozos es de 34 m Colectivo de autores (2013).

Formación Cauto: Edad Pleistoceno, por su posición estratigráfica. Formación fluviomarina, formada por arcillas, limos, arenas, gravas polimícticas y conglomerados polimícticos, con estratificación horizontal y cruzada de coloración abigarrada. Yace discordantemente sobre las formaciones Dátil, Manzanillo y El Cobre, es cubierto concordantemente por los sedimentos aluviales y se depositó en un medio fluviomarino, predominando el ambiente fluvial, aunque el marino debe haber sido mayor durante las transgresiones del Plioceno y del Cuaternario. Su espesor puede alcanzar hasta 25 m según el léxico, pero las perforaciones realizadas por la presente investigación dan 80, 90 y hasta más de 100 m Colectivo de autores (2013).

Sedimentos Aluviales: Están formados por los abanicos fluviales generados por la erosión de los principales ríos presentes en la zona de estudio. El corte longitudinal de estos ríos evidencia que la alta energía obtenida en las zonas altas de la Sierra Maestra les confiere a estos la posibilidad de transportar gran cantidad de sedimentos. Al llegar al llano esta energía disminuye y gran parte de los materiales transportados son depositados generando los abanicos fluviales. Al este de la zona de estudio es de esperar la mayor potencia de estos sedimentos toda vez que la red de drenaje forma meandros lo que evidencia la baja velocidad de la corriente. Los sedimentos más finos se deben encontrar alejados de los cauces principales y los más gruesos en las terrazas aluviales y en el pie de monte próximo a las elevaciones de la Sierra Maestra. Este cuadro se hace más complejo debido a la superposición lateral de los abanicos fluviales y a la reactivación (debido a movimientos neotónicos) de los procesos de erosión-

deposición los que influye en la generación de ciclos de deposición con una estratificación en ocasiones errática y en otros invertida Colectivo de autores (2013).

1.7. Características tectónicas del área de estudio.

De acuerdo a las características de los complejos rocosos y su estructura, la región se encuentra en un estadio de desarrollo neoplatafórmico. Sobreyacen discordantemente al Grupo El Cobre las Formaciones del Plioceno al Cuaternario: Dátil, Manzanillo, Pilón y Cauto. La región está afectada por la Falla cortical Cauto Sur del Terreno Cauto-Nipe. Se conocen trabajos geofísicos regionales que señalan la presencia de una falla regional bajo los sedimentos de la cuenca del cauto. Escobar Pérez, Eric M et al, en 2009 (tomado de Días 2013).

Las rocas del basamento plegado están intensamente agrietadas y falladas, aumentando el grado de fracturación al aumentar la edad de las secuencias, al superponérseles a los eventos tectónicos antiguos, otros más jóvenes. Este es caso del paquete rocoso carbonatado de la parte alta del Grupo El Cobre, que pudiera estar en comunicación por la fracturación tectónica con formaciones más jóvenes del Mioceno.

La cobertura está menos perturbada, aunque se observan sistemas de grietas y fallas que afectan a las rocas carbonatadas miocénicas de la Fm. Manzanillo y aunque no se ven en los depósitos de la Fm. Cauto por ser por lo menos su parte más joven y superior muy deleznable y predominantemente arcillosa, lo que provoca que los desplazamientos recientes del sistema de fallas activas Guacanayabo-Nipe (Cauto Norte y Cauto Sur) se oculten al enmascararse la zona de falla. En la zona se interpretan estructuras en forma de braquipliegues del fundamento profundo que deben afectar a las secuencias precuaternarias, tomando estas últimas solamente la forma del basamento sobre la que se depositaron. Estas estructuras plicativas deben haber provocado en las rocas más duras y frágiles como son las calizas de las formaciones Manzanillo y Cabo Cruz fracturas de dirección predominante noroeste, que, si bien no son fracturas

profundas, si afectan a todo este conjunto carbonatado, aumentando sus propiedades de filtración y trasmisividad de agua.

Las tendencias estructurales de la región de estudio están asociadas con la generación de la zona de extensión de la cuenca de Bartlett, que dio fin al proceso de subducción en el Eoceno inferior tardío y generó la fosa homónima; generando un campo de tensiones que modeló el relieve del basamento de la cuenca Cauto-Nipe donde se sustituye la sedimentación de los materiales piroclásticos por los de origen marino; comenzando con los del tipo de mares profundos y culminando con los de mares someros. El continuo proceso de levantamiento desde el Mioceno hasta la actualidad ha estado representado desde el punto de vista estructural por numerosos episodios neotectónicos Días (2013).

Los principales eventos estructurales ocurridos en la zona de estudio son:

1. A finales del Eoceno Inferior Tardío ocurrió la extinción del arco de islas volcánicas Sierra Maestra. La actividad volcánica fue muy esporádica hasta extinguirse, dando lugar a la formación de una extensa cuenca marina que formaba parte del margen pasivo de la Plataforma Bahamas-Cuba. En la cuenca Cauto-Nipe comienza a predominar la sedimentación calcárea en condiciones de aguas profundas y someras con un relieve submarino muy complejo en un marco de un proceso de subsidencia generalizada.
2. A inicios del Eoceno medio se produjo el proceso de extensión de la cuenca de pullapart de Bartlett. El límite entre placas de tipo transcurrente pasó a ser de transcurrencia y extensión, originándose la fosa Oriente de modo progresivo. El incremento de la compresión por efecto de las fuerzas laterales generadas por el crecimiento y expansión de la corteza oceánica que condujo a la actual fosa de Bartlett dio lugar a una etapa de intensa deformación con un proceso de levantamiento generalizado; durante un breve intervalo de tiempo se produjeron deformaciones relativamente intensas que generaron pliegues continuos.



3. A partir del Eoceno Superior hasta el presente, predominan los movimientos verticales oscilatorios, que dieron lugar a la formación de una estructura de bloques distintamente elevados; no obstante, algunas fallas siniestras de rumbo NE-SO y E-O estuvieron activas. Un tercer sistema de fallas, de dirección predominante EO, parece estar genéticamente asociado con los esfuerzos NE-SO y corresponder a una reactivación del sistema preexistente

Parece evidente la reactivación periódica (Eventos neotectónicos) de los diferentes sistemas de fallas manifestada en los análisis morfométricos a partir de las diferencias de isobasitas de distintos órdenes.

Las estructuras menores (fracturas y lineamientos) siguen en general el rumbo de las estructuras mayores (con algunas variaciones locales) y forman en ocasiones nudos de fallas. Normalmente presentan buzamientos muy cercanos a la vertical. Aunque fueron detectadas zonas de debilidad con bajo ángulo de buzamiento posiblemente relacionadas con zonas de fallas gravitacionales o la presencia de zonas plegadas.

Las formaciones del intervalo Oligoceno - Mioceno, que forman parte de este conjunto, se encuentran suavemente plegadas con al menos dos generaciones de pliegues superpuestos: la primera generación, de pliegues continuos muy abiertos originados en el Oligoceno y parte baja del Mioceno y una segunda generación de pliegues discontinuos del Mioceno Superior en adelante. Este conjunto está cortado por sistemas de fallas verticales de desplazamiento por el buzamiento correspondientes a los sistemas Cauto-Nipe y otro oblicuo a este.

Específicamente la tectónica de la zona pertenece al intervalo Oligoceno Mioceno por ser el de mayor interés para la búsqueda de aguas subterráneas en Manzanillo.

En el mapa geológico regional, se observa una gran estructura de tipo sinclinal con eje de dirección NE-SO, presentado el flanco sur (zona de las premontañas de la Sierra Maestra) más levantado que el flanco norte (Manzanillo). Esta cuenca ha sido rellenada por las formaciones Miocénicas y Cuaternarias. Entre las

formaciones del intervalo Neógeno Medio-Superior al Cuaternario son frecuentes las disconformidades que pueden ser extensas y locales. Hacia el norte, estas formaciones geológicas miocénicas están por debajo de la Fm. Cauto en Bayamo y se acuñan más al norte hacia Holguín, indicando un levantamiento del eje sinclinal en esa dirección, donde las formaciones miocénicas desaparecen al noreste de la zona al ser erosionado por este levantamiento basculante.

La cuenca presente en la zona investigada está cortada por cuatro sistemas de fallas principales:

- Fallas Noreste-Suroeste del sistema Cauto Nipe.
- Fallas Noroeste-Sureste.
- Fallas Norte- Sur.
- Fallas Este-Oeste.

Las fallas del sistema Norte –Sur y Este- Oeste son las más recientes ya que cortan al resto de los sistemas, dividiendo al territorio en ocho bloques principales. Este cuadro tectónico fue interpretado por Cordovez Pedrianes J. M. 2009, 2010 y 2011 como bloques tectónicos que afectan el área de estudio (Figura 11):

- Bloque IV: Se ubica al SE del área, limitado por el norte por la falla Paso Malo y por el oeste por la falla San Fernando-Palmarito.
- Bloque V: Limitado por el sur por la falla Paso Malo, por el oeste por la falla San Fernando-Palmarito y por el norte por la falla San Fernando- La Jagua. En este bloque se ubica el Sector Cayo Redondo.
- Bloque VI: Al NE de la zona de estudio, limitado por el sur por la falla San Fernando- La Jagua
- Bloque VII: Bloque Manzanillo: Limitado por el sur por la falla Jibacoa por el este por la falla San Fernando- La Jagua y por el suroeste por la falla Hondo. En este bloque se ubica el Sector Cuentas Claras.

- Bloque VIII: En la zona centro norte. Limitado por las fallas Hondo, Jibacoa y San Fernando- La Jagua por el sur, norte, y este respectivamente.

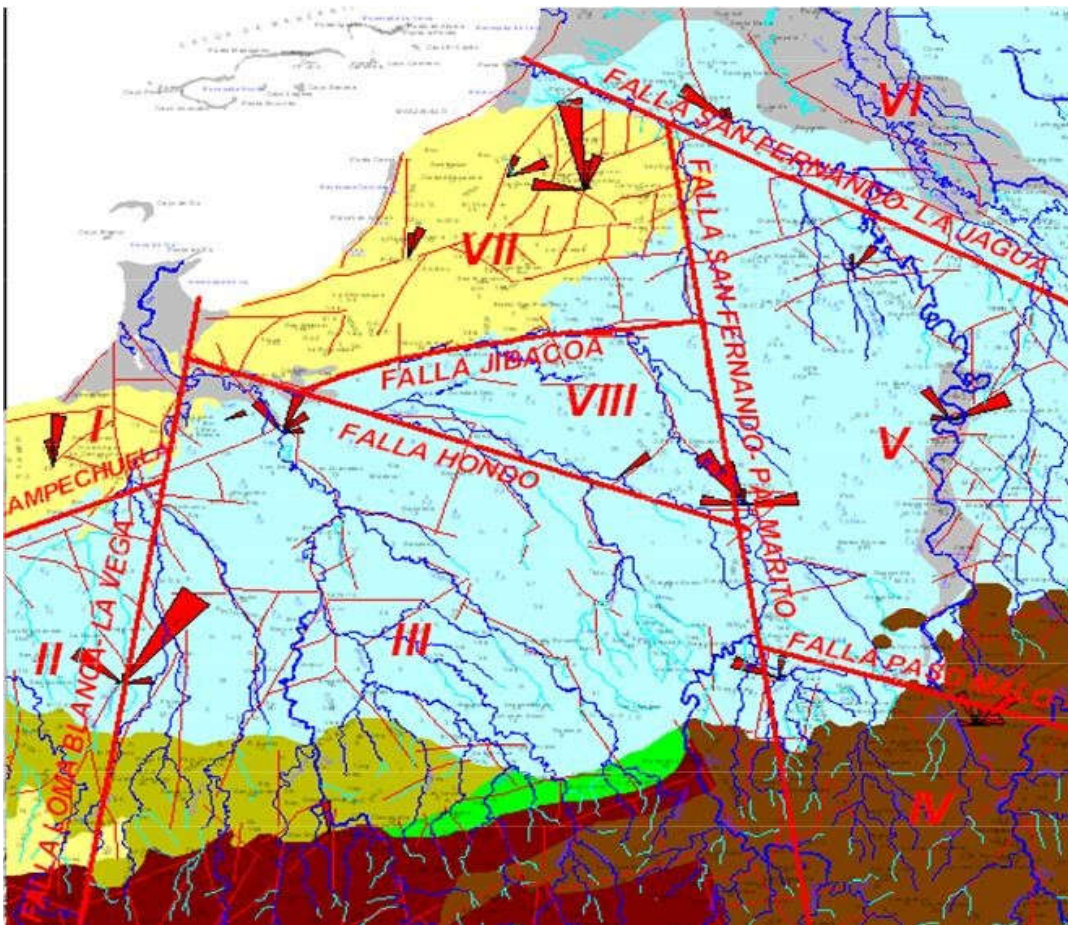


Figura 10. Esquema tectónico de la zona de estudio. Cordovez Perianes J. M, 2009, 2010 y 2011 (tomado de Días, 2013).

Capítulo II

CAPÍTULO II. METODOLOGÍA PARA EL ESTUDIO DEL POTENCIAL DE LICUEFACCIÓN GENERADA POR SISMOS FUERTES EN LA CIUDAD DE MANZANILLO, PROVINCIA GRANMA.

2.1 Etapas de la investigación.

2.2. Metodología aplicada para determinar los escenarios susceptibles a la licuefacción en las áreas de estudio.

2.1 Etapas de la investigación.

En este capítulo, se da a conocer la metodología que nos permitirá estudiar el potencial de licuefacción en el área referenciada, tomando en consideración las condiciones ingeniero geológicas y la sismicidad del área.

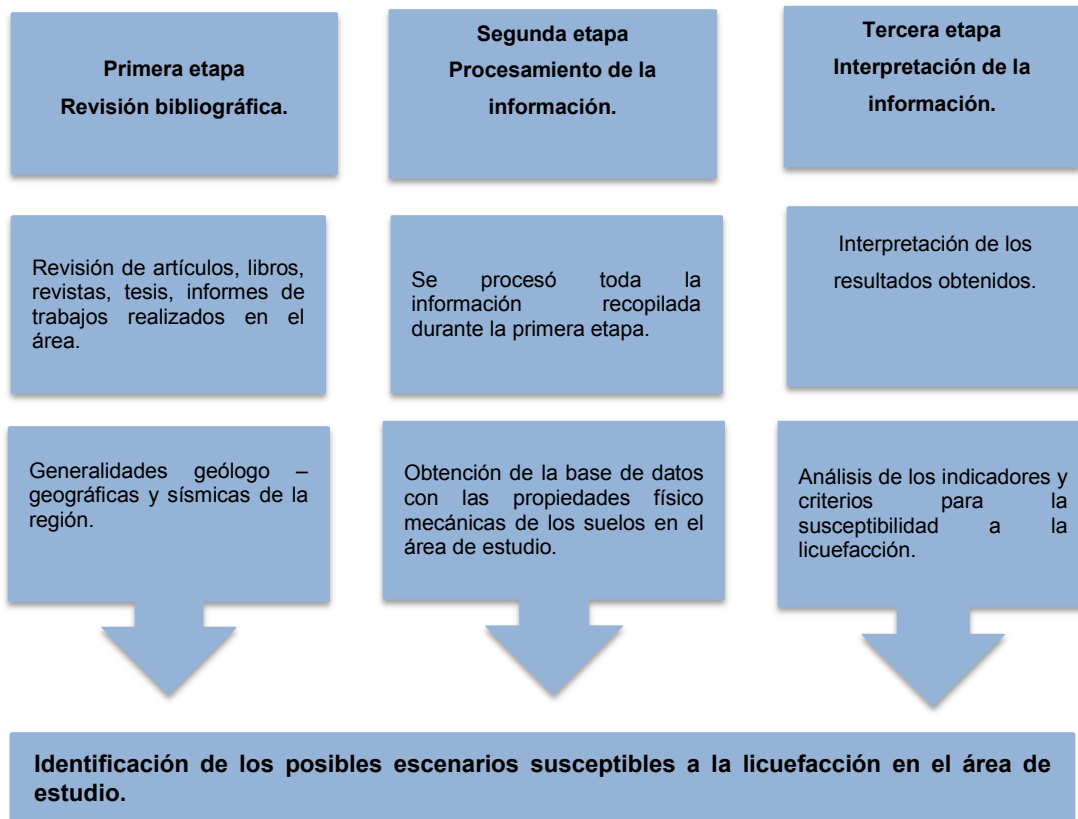


Figura 11. Organigrama de la metodología de la investigación.

2.1.1 Primera etapa de la investigación.

En esta primera etapa se pudo recopilar toda la información a la que tuvo acceso acerca del tema estudiado, esto lo pude lograr haciendo uso de las diferentes tesis de maestría, artículos de internet, así como los informes de los resultados de las diferentes obras hecha por la Unidad de investigaciones para la construcción (INVESCONS) perteneciente a la Empresa Nacional de Investigaciones Aplicadas (ENIA) sede en la provincia Holguín. Se obtuvo en un marco más amplio información acerca de las características físico geográficas de las áreas de estudio y la geología de las mismas.

2.1.2 Segunda etapa de la investigación

En la segunda etapa la investigación fue dividida en dos direcciones principales, una primera donde se realizó la recopilación de la información y se confeccionó la base de datos en Excel para en una segunda etapa realizar el procesamiento de la información de las variables obtenidas de los informes ingeniero geológicos. Es necesario apuntar que estas calas fueron realizadas años atrás por lo que no se verificaron en el campo lo cual no impidió que la información obtenida fuera correctamente interpretada.

2.1.3 Tercera etapa de la investigación

En esta etapa se interpretó la información obtenida donde se llevó a cabo el sistema de indicadores propuestos por Fernández Diéguez en 2015 para el estudio de la susceptibilidad a la licuefacción de los suelos en el área de estudio y como resultado final se evaluaron las condiciones ingeniero geológicas y se delimitaron las zonas susceptibles al fenómeno.

2.2. Metodología aplicada para determinar los escenarios susceptibles a la licuefacción en las áreas de estudio.

En la investigación se utilizarán los métodos basados en el comportamiento de los suelos observado en terremotos anteriores: se realizarán correlaciones de algunas características de los suelos obtenidas mediante pruebas de campo, y/o ensayos simples de laboratorio.

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 & Idriss, 1971, 1982); (Wang, 1979); (Youd, 1998); (Shadanet, 1999); (González de Vallejo, 2002) ;(Kramer& Stewart, 2004) entre otros, y requisitos obtenidos de la revisión de análisis de casos, donde se propuso 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 revisión de las metodologías de los autores antes mencionados, se elaboró una propuesta que permite cuantificar el fenómeno, a partir de todo lo antes expuesto se propone analizar las condiciones siguientes:

2.2.1 Análisis de las 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 8 m. Para la selección de los sectores se hace una búsqueda en el mapa geológico y se seleccionan las formaciones pertenecientes al cuaternario que están representadas por el color amarillo en sus diferentes variantes Fernández Diéguez (2015).

2.2.2 Análisis del comportamiento de la Sismicidad en el área de estudio

Se analiza la cercanía del Área de estudio con una zona generadora de sismos fuertes o de magnitud mayor de 5,5 y las aceleraciones de las partículas lleguen a ser iguales o superior $0,2g/cm^2$.

Para llegar a las conclusiones de este indicador se revisó la norma para construcciones sismo resistente, requisitos básicos para el diseño y construcción. Dentro de esta se revisó el capítulo 4 donde se describen las zonas sísmicas del territorio nacional y se tomó la descripción de los municipios en estudio 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 de Fernández-Diéguez en 2015.

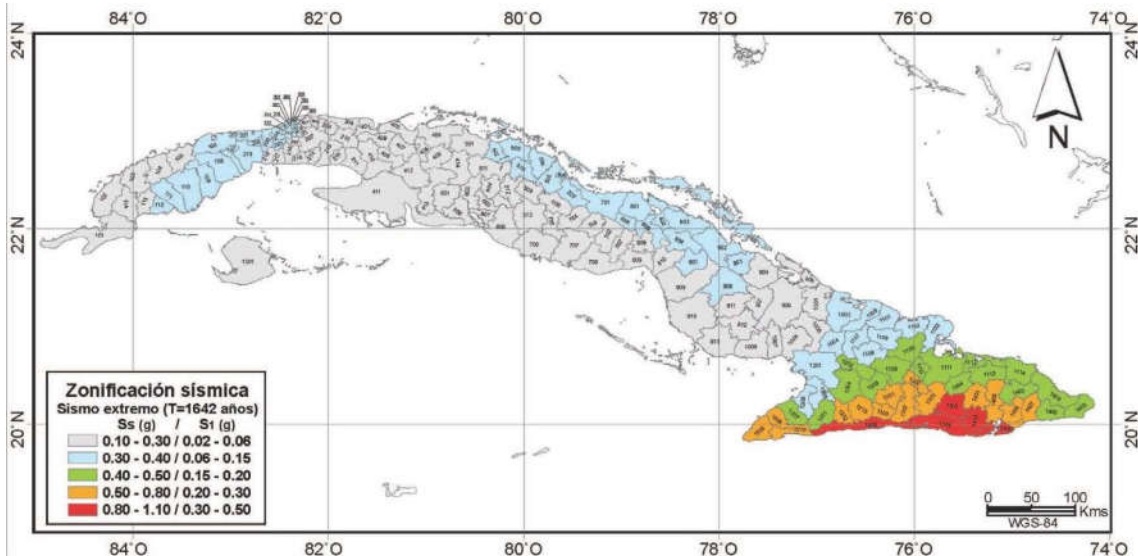


Figura 12 Mapa de zonificación sísmica para la República de Cuba Norma cubana 46 (2013).

2.2.3 Análisis del comportamiento del nivel freático en el área de estudio

Otra de las condiciones necesarias para que tenga lugar este modo de comportamiento del suelo es la posición del nivel freático cerca de superficie. 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. Para que los suelos granulares experimenten el fenómeno de licuación este debe estar ubicado por debajo el nivel freático, lo cual le confiere la condición de ser un sedimento saturado.

2.2.4 Análisis de las condiciones ingeniero geológicas

Los suelos más susceptibles a la licuefacción son aquellos formados por depósitos jóvenes 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. Estos depósitos por lo general se presentan en los lechos, ríos, playas, dunas y áreas

donde se han acumulado arenas y sedimentos arrastrados por el viento y/o cursos de agua.

Entre los datos obtenidos de los informes geológicos facilitados por la Empresa Nacional de Investigaciones Aplicadas (E.N.I.A) Holguín, se trabajó con los parámetros necesarios para que un suelo sea licuable tales como (Límite Líquido, Límite Plástico, Índice de Plasticidad, humedad natural, densidad húmeda y densidad seca, por ciento de partículas finas, por ciento de gravas, saturación y compactación del suelo a partir del N de SPT) con lo cual se confeccionó una base de datos usando la herramienta hoja de cálculo Excel, del paquete Office.

Se tuvo en cuenta:

- Por ciento de partículas finas ≤ 15
- Límite Líquido $\leq 35 \%$
- Forma de las partículas. Principalmente redondas
- N de SPT < 20 golpes
- Compacidad relativa (Cr) $< 75\%$

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

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

2.2.5 Cálculo del factor de seguridad para la licuefacción (FSL)

El FSL se calcula a partir de 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.

- La relación de esfuerzo cíclico (CSR) y la relación de la resistencia cíclica (CRR)

Para evaluar la resistencia por licuación de suelo es necesario calcular dos variables:

1. La demanda sísmica que se espera en las capas de suelo durante un sismo de diseño, expresada en términos de resistencia CSR (cyclic stress ratio).
2. La resistencia de suelo para oponerse a la licuación, expresado con CRR (*cyclic resistance ratio*) Fernández Diéguez (2015).

- **Coeficiente de esfuerzo cíclico (CSR)**

Es un principio generalmente aceptado que el potencial de licuefacción de estratos arenosos puede evaluarse utilizando correlaciones entre datos de resistencia a la penetración, tales como ensayos de penetración estándar (SPT) y ensayos de penetración con cono (CPT) y la resistencia cíclica del material movilizado durante una fuerte de excitación vibratoria. 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 (ζ_{avg}) actuante en un estrato, normalizado por el esfuerzo efectivo de sobrecarga (σ'_{vo}). En la mayoría de las técnicas empíricas, el valor promedio de la relación de esfuerzos cortantes cíclicos (CSR) inducidos por el sismo se obtiene de los análisis de la respuesta dinámica del subsuelo.

- **Coeficiente de resistencia cíclica (CRR)**

Para ello, Seed y Idriss (1971), Tokimatsu y Yoshimi (1983), Liao y Whitman (1989), entre otros investigadores, han elaborado, a partir de datos obtenidos en campo mediante ensayos de penetración estándar (SPT, por sus siglas en inglés), 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 en las fórmulas.

Evaluación de CSR

Seed e Idriss (1971) formulan la ecuación para el cálculo de la relación de esfuerzos cíclicos (CSR, cyclic stress ratio):

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

a_{max} = máxima aceleración de la superficie de suelo generada por un sismo de diseño,

g = aceleración de gravedad,

(σ_{vo}) = esfuerzo normal vertical total, referido a la superficie de suelo

(σ'_{vo}) = esfuerzo normal vertical efectivo, referido a la superficie de suelo,

r_d = coeficiente de reducción de esfuerzos, 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 radio:

z = profundidad por debajo de la superficie de suelo, m ,

Para $z \leq 9.15 m$,

$$r_d := 1.0 - 0.00765 \cdot z \quad (1a)$$

Para $9.15m < z \leq 23m$

$$r_d := 1.174 - 0.0267z \quad (1b)$$

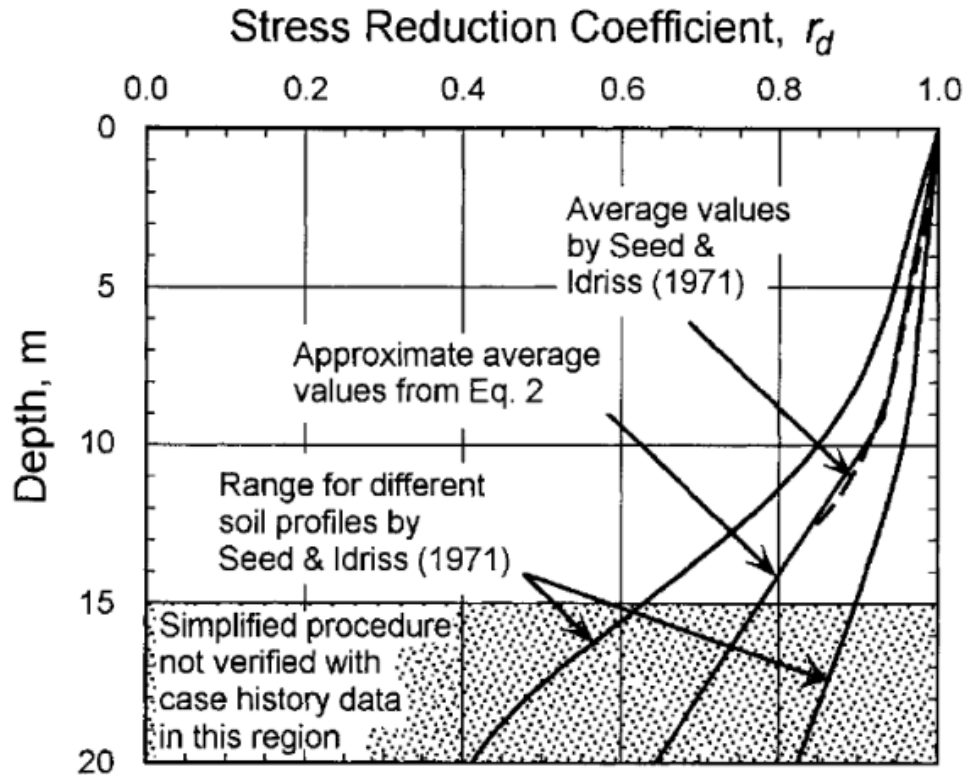


Figura 13 Las curvas de relación de radio y profundidad, desarrolladas por Seed e Idriss en 1971 (tomado de Bauta 2017).

A partir de las propiedades físico-mecánicas de los suelos y rocas se calcula el CSR y se plotean 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 11 y se comprueba si es un estrato licuable o no.

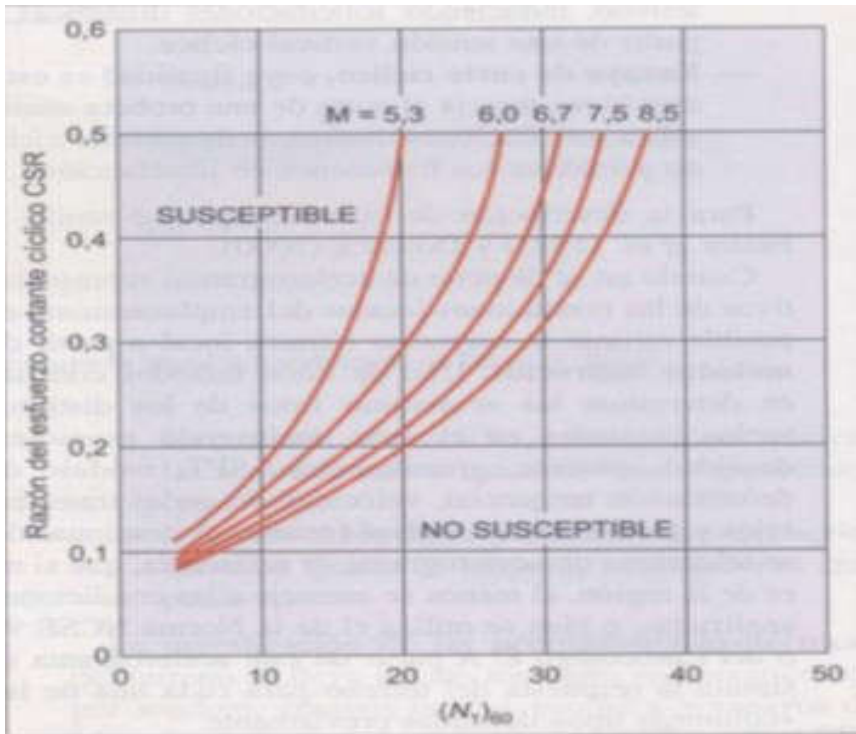


Figura 2. Susceptibilidad de licuefacción de un suelo en función de $(N_1)_{60}$ y la razón del esfuerzo cortante cíclico CSR (González, 2002) tomado de Bauta, 2017

Evaluación de 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.

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

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

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

$N_1 = N \times C_N$

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

Dónde:

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

v = tensión efectiva vertical en atmósferas

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

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

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

Tabla 2.1: Correcciones a SPT Skempton (1986).

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

Prueba de SPT: El criterio de evaluación de la resistencia por licuación basada en SPT es confiable, ya que se lleva aplicando alargo de varios decenios. Estos criterios involucran la gráfica de la relación de CSR con $(N1)_{60}$. El $(N1)_{60}$ representa el número de golpes normalizado al esfuerzo vertical de 100kPa y a la energía del martillo con eficiencia de 60%.

La influencia del contenido de finos

Seed (1985) observa el incremento en CRR en función de incremento de finos. No es claro si esto se debe al incremento de la resistencia a licuación o al decremento de la resistencia a la penetración. Basados en los datos empíricos disponibles, Seed et al., desarrollaron curvas de CRR para varios contenidos de finos. La plasticidad de suelo, todavía, no se había investigado. Por lo tanto, las correcciones basadas en la cantidad de finos deben usarse con precaución Tanasijevic (2011).

FC = contenido de finos,

Para $FC \leq 5\%$

$$\alpha = 0 \quad (5a)$$

Para $5\% < FC < 35\%$

$$\alpha := e^{\left(1.76 - \left(\frac{190}{FC^2}\right)\right)} \quad (5b)$$

Para $FC \geq 35\%$

$$\alpha = 5.0 \quad (5c)$$

Para $FC \leq 5\%$

$$\beta = 1.0 \quad (6a)$$

Para $5\% < FC < 35\%$

$$\beta := \left(0.99 + \left(\frac{FC^2}{1000}\right)\right) \quad (6b)$$

Para $FC \geq 35\%$

$$\beta = 1.2 \quad (6c)$$

$$N_{160cs} = (N_d)_{60cs}$$

$$N_{160cs} := \alpha + \beta \cdot N_{160} \quad (7)$$

- **Cálculo del factor de seguridad corregido:**

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

Dónde:

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

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

M_w: 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

Capítulo III

CAPITULO III: EVALUACIÓN DEL POTENCIAL DE LICUEFACCIÓN EN LA CIUDAD DE MANZANILLO

3.1 Aplicación del sistema de indicadores aplicados a la investigación

Introducción

3.2. Valoración de la susceptibilidad a la licuefacción de la zona urbana de la ciudad de Manzanillo

Introducción

En este capítulo se validarán los indicadores propuestos para determinar si los escenarios propuestos son licuables o no ante un sismo de gran magnitud.

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. 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, aunque no existen reportes de ocurrencia del fenómeno de licuefacción en el municipio Manzanillo, si aparecen reportes de daños a las construcciones tras el sismo de Bayamo 1551.

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, en algunos de los escenarios propuestos están cerca de depósitos fluviales y deltaicos, pero en el área de estudio, hay pequeña representación de depósitos de abanicos aluviales, playas y estuarios, aunque estos no son tan susceptibles. Los

suelos de los escenarios propuestos se encuentran semisaturados dado la profundidad del nivel freático.

Se analizó, además, la edad del depósito. El área de estudio pertenece casi en su totalidad a la formación Manzanillo del Mioceno lo que no favorece a la ocurrencia de la licuefacción.

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. En el área de estudio no contamos con estas características lo que nos indica que hay poca probabilidad para la ocurrencia del fenómeno de licuefacción.

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.

Respondiendo a los parámetros que se muestran en la tabla 3.1 utilizamos perforación a percusión para la hincada de muestreador cuchara SPT (Penetración dinámica). Penetración estática del muestreador Shelbys (Presión hidráulica). Los diámetros utilizados son: 73, 89 y 108 mm Martillo 300 libras. Caída del martillo 18 pulgadas con Varillas 0.40, 1.50 y 3.00 m. Muestreadores: Shelbys, Obsterberg, Denison. Muestras de cuchara, porta testigos doble tubo rígido y porta testigo simple.

3.2. Valoración general de los sistemas de indicadores aplicados a la investigación:

- **Condiciones geológicas:** Se tomó en consideración las formaciones presentes en el territorio con sus respectivas litologías y sus características, lo que nos brindó información de cómo se manifiestan



localmente, se hizo énfasis en aspectos como: edad de la formación, grado de intemperismo, así como el origen de los suelos.

La formación Manzanillo de forma general es la que predomina en la región, es de Edad Mioceno Superior-Plioceno parte baja.

Aflora en la zona y en el Sector de Cuentas Claras. Se distribuye en forma de faja bordeando el Golfo de Guacanayabo, entre la Ciudad de Manzanillo al norte y río Limones al sur. Se acumula hacia el sur en la zona de premontaña de la Sierra Maestra y penetra en profundidad en el valle del Río Cauto formando un braquisinclinal con eje asimétrico, de pendientes abruptas hacia el norte, donde esta estructura tiene su continuidad con el braquianticlinal de Manzanillo-Campechuela, limitado por la falla Jibacoa. Está compuesta fundamentalmente por una alternancia de calizas biodetríticas arcillosas de granulometría variada, a veces gravas y arenas derivadas de vulcanitas, margas, margas limosas y arenáceas, lutitas calcáreas y más subordinadamente calcarenitas y calciruditas con distintos tamaños de granos, predominando los finos e intercalaciones de arcillas esmectíticas, arcillas calcáreas y arcillas limosas a veces yesíferas. Igualmente, subordinadas aparecen calizas biohémicas, calizas detríticas, calizas micríticas y calizas dolomíticas. La secuencia es muy fosilífera. La coloración es variable: crema y amarillento con localidades rosácea y anaranjada para los horizontes carbonáticos y gris o gris verdoso para los terrígenos. Las condiciones geológicas de esta formación no son favorables para la ocurrencia de la licuefacción, los suelos estudiados son compactos y densos.

- **Sismicidad:** Se trabajó con la norma NC 46 del 2013, plasmando en la investigación la zona sísmica a la que pertenece el área de estudio y la descripción de acuerdo al riesgo sísmico que esta presenta. Se mencionan algunas particularidades en la tectónica regional y de dicho territorio.

Según la norma el municipio Manzanillo se encuentra dentro de la zona sísmica dos, la cual se describe como riesgo sísmico bajo que puede ocasionar daños en las construcciones debiéndose tomar medidas sismo resistentes 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 del factor de seguridad estarán entre 0.30-0.40g para períodos cortos S_s y entre 0.060.15 (g) para períodos largos S_1 . Tales consideraciones establecidas en la norma antes mencionada se tomaron en cuenta para la presente investigación Oficina Nacional de Normalización (2013).

Se debe prestar atención a la sismicidad de la zona de estudio, al analizar las evidencias históricas existen reportes de daños considerables en Manzanillo tras el conocido como sismo de Bayamo en 1551. En estos momentos el fondo habitacional es mayor y las construcciones son antiguas o no responden del todo a las normas sismorresistentes lo que las convierte en vulnerables ante sismos fuertes. Además, en estos años se cierra un ciclo de sismos de gran magnitud.

- **Características Hidrogeológicas:** Se tuvo en cuenta los promedios entre los que oscila la estabilización del nivel freático en todo territorio, así como los suelos en los que se encuentran, además se hace referencia en algunos casos a variables tales como coeficiente de permeabilidad del suelo, capacidad acuífera e hinchamiento del suelo.

De la realización de las distintas pruebas hidrogeológicas se obtuvieron arcillas muy plásticas (CH) de color parduzco que actúan como un acuitardo superior, aunque pueden contener pequeños lentes areno-limosos y algunas gravas. Hidrogeológicamente las conductividades hidráulicas son muy bajas, con valores de coeficiente de permeabilidad entre $(1 \times 10^{-5}$ a $1 \times 10^{-7})$ cm/s y menores, sin embargo, por su extensión considerable y



potencia, pueden ceder un volumen considerable de agua al acuífero, teniendo en cuenta que encima de ella se encuentran canales de riego y parcelas anegadas todo el año. La parte superior (1 a 2.5 m) se encuentra alterada por la actividad humana agrícola con alto contenido de materia orgánica. Debe tenerse en cuenta que, aunque constituyen un excelente filtro natural para la contaminación química y bacteriológica, una sobreexplotación excesiva del acuífero sin que se modele matemáticamente este proceso, puede acelerar la migración de los elementos químicos aplicados a los cultivos del arroz hacia el acuífero. En la provincia existen dos grandes cuencas hidrogeológicas, Manzanillo - Cabo Cruz (GM) y Cauto (GC) que a su vez están divididas en subcuencas y tramos hidrogeológicos. El área de estudio pertenece a la cuenca hidrogeológica GM-3. En general los valores promedios del nivel freático obtenidos en las investigaciones consultadas y en otros casos recurriendo a herramientas tales como el mapa hidrogeológico de Cuba fluctúa entre 0.40 y 8 m, dicha profundidad está enmarcada entre las probables para que ocurra licuefacción.

- **Condiciones ingeniero-geológicas:** Se confeccionó una base de datos en formato Libro Excel donde se recogen los valores correspondientes a propiedades físico mecánica de los suelos tales como: Límite Líquido (LL), Límite plástico (LP), Índice de plasticidad (IP), % de humedad natural (W_n), densidad húmeda (Y_f), densidad seca (Y_d), % de saturación (S), Compresibilidad (C), Número de Golpes (N_{spt}), % finos, % grava, % arena.

De un total de 146 informes consultados pertenecientes a investigaciones llevadas a cabo por la ENIA Holguín, se escogieron 24 para realizar la interpretación y procesamiento de la información contable, los restantes se encontraban deteriorados y carecían de variables correspondientes a varias propiedades físico mecánicas de los suelos.

Tabla 3.1: Clasificación geotécnica del suelo del municipio Manzanillo.

Obras	N de SPT	LL	Fi nos	Ar en a	Wn	PEH	PES	C	Nive l Freá tico	Prof undi dad	Descri pción	Forma ción y Edad	Licua ble
Edificio Manzanillo	RC	37	37	18	17.8	-	-	-	0.4 0.47	5m	CL	Manza nillo-Mioce no	No
Laguna oxidación Residual Porcino	RC	40	79	10	18.4	-	-	-	NC	-	-	Manza nillo-Mioce no	No
Edificio Multifamiliar Inglaterra	RC	37 30 63	76 37 33	21 22 34	21.9 13.6 28.5	20 20.5 19.3	16.4 18 15	25 20 32	0.96	-	CI GC SC	Manz anillo-Mioce no	No
Ampliación del Hospital Celia Sánchez	RC	29 NP 45	65 82 53	26 17 20	146 25 101	18.5 19.1 21.7	16.1 15.3 19.7	26 2 42	NC	6m	CL ML CL	Manza nillo-Mioce no	No
Fábrica de bloques y desgarradero de áridos	48.56	60 30 34	80 30 60	10 30 25	27.5 12.9 16	18.7 20.6 19.5	14.7 18.2 16.6	49 15 33	NC	5m	CH GC CL	Manza nillo-Mioce no	No
Vivienda para médicos Camilo Cienfuegos	39.9	NP 49	38 69	41 19	13.7 23.6 4.9	19.8 19.4 24.7	17.4 15.6 23.5	20 60	2.41	5m	SM CL	Manza nillo-Mioce no	No
Policlínico 1 Manzanillo	-	47 49 66	54 62 96	23 9 0	9.7 17.3 28.8	19.7 19.2 19	18 16.4 14.8	60 47 60	NC	-	CL	Manza nillo-Mioce no	No
Vivienda para	56.1	61	62	25	51.5	15.7	10.4	14	0.8	4.90	CH	Manza	No

médicos 1ra etapa		32 32	47 41	46 35	22.7 21.6	18.9 18.8	15.4 15.5	6 6			SC SC	nillo-Mioce no	
Ampliación del policlínico 1	19	34	59	37	23	19.6	15.9	35	1.29	4 5.6	CL	Manza nillo-Mioce no	No
Sala de rehabilitación- Policlínico 2	RC	24 64	15 78	27 18	14 25	20.1 16.2	17.6 13	40 60	-	4.5	CL	Manza nillo-Mioce no	No
Círculo Infantil Manzanillo	34 33	55 32.2	-	-	22.5 16	-	-	-	8.4	10m	Arcilla Plástica con arena AM	Manza nillo-Mioce no	No
Instituto Superior Pedagógico	RC	29.9 47.6 37.8	-	-	17.9 20.3 16.9	-	-	-	NC	-	Arcilla calcárea Arcilla con arena Marga arcillosa	Manza nillo-Mioce no	No
Seminternado 300 alumnos	RC	NP	-	-	20.1	-	-	-	-	-	-	Manza nillo-Mioce no	No
Politécnico de la salud	39.25	31.6 56.7	42 29	29 33	22.4 11.2 17.3	-	-	-	NC	30m	Caliza Marga arcillosa	Manza nillo-Mioce no	No
Facultad de Ciencias Médicas	15 34 49	NP NP NP	29 38	40 24	19 17 14	-	-	-	4.8	10m	Caliza Caliza ML	Manza nillo-Mioce no	No
Hogar de impedidos	25 40	66 Np	-	-	26 14	-	-	-	-	20m	Arena arcillo	Manza nillo-	No

físicos		41.4			15						sa Caliza Arcilla margosa	Mioce no	
Hotel Manzanillo	36	45	-	-	36 21 17.6	-	-	-	NC	12m	MA Caliza	Manza nillo- Mioce no	No
Línea de Fundición Fábrica Manuel Fajardo	26	39	81	13	35	17.5	13	-	0.80 0.95	10m	CL	Manza nillo- Mioce no	No
Aeropuerto Manzanillo	RC	27	48	32	14.4	21.4	18.4	-	NC	-	SC	Manza nillo- Mioce no	No
4Silos para el almacenamien to de granos, molinos Julio Zenoon	27	91 36	92 57	7 32	68 20.5	15.4 20.2	9.2 16.7	6	1 1.9	8m	CH CL	Manza nillo- Mioce no	No
Edificio Estación Meteorológica Manzanillo	34 33	55 32.2	-	-	22.5 16	-	-	-	-	10m	CL Arcilla margosa	Manza nillo- Mioce no Y Jutía	No
Proyecto Técnico Ejecutivo Torre Estación Microondas	RC	37 64	23 39	36 18	24 24	19.5 19.7	15.9 16	20	NC	-	SM CM	Manza nillo- Mioce no	No
Hogar de Ancianos	29	30.3 45.6	28	44	17.9	19.6	1.63	0.	-	8m	Arcilla margosa Arcilla margosa	Manza nillo- Mioce no	No

De acuerdo a la investigación realizada en el área de estudio perteneciente a la ciudad de Manzanillo podemos concluir que a pesar de que en la región están presentes formaciones como son: Cauto, Dáctil, Charco Redondo, Jutía y Manzanillo. Los suelos presentes en el área de estudio corresponden a la formación Manzanillo del Mioceno Superior Plioceno (parte baja). Aquí podemos encontrar arcillas de baja Plasticidad (CL), Gravas arcillosas (GC), las arenas limosas (SM) y arenas arcillosas (SC), calizas arcillosas y calcáreas(C). Aunque estos suelos presentan valores en su mayoría de Límite Líquido (LL entre 37 y 66) y por ciento de granos finos (30-96) algo elevados según las condiciones de Wang (1979) y Seed and Idriss (1982), donde se encontró el nivel freático, este oscila entre 0.40 y 8m. En casi todas las obras las muestras que se tomaron presentaron 100% de recuperación lo que nos da la idea de que en la región hay predominio de material arcilloso que es mucho más compacto, además las arcillas presentes son saturadas y la cohesión casi en su totalidad presenta valores que van de (2-40) valores muy bajos. Nos encontramos en una zona sísmica #2 con un riesgo sísmico bajo, por lo que estas condiciones no son propias para que ocurra la licuefacción, aunque hay que considerar el hecho de que en otras zonas pertenecientes a la misma región si pudiera existir este fenómeno y esto se debe tomar en cuenta en la realización de otros estudios.

A continuación, se brinda una serie de columnas litoestratigráficas con la correlación existente entre los sedimentos más representativos correspondiente al área de estudio.

Columna Litoestratigráfica, ciudad de Manzanillo, Granma.

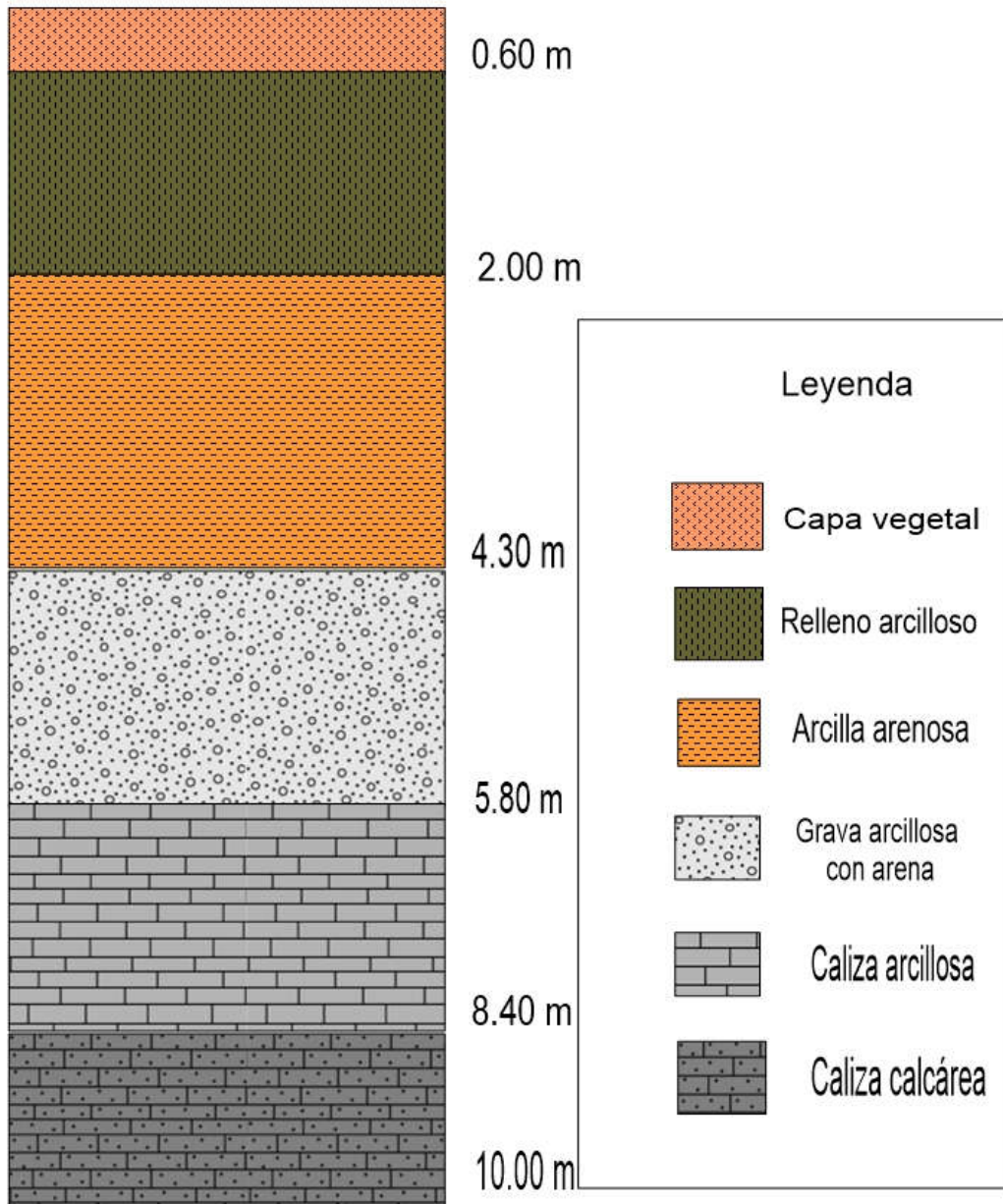


Figura 15. Columna litoestratigráfica esquemática del municipio Manzanillo

Columna litoestratigáfica de la formación Manzanillo en el área de estudio.

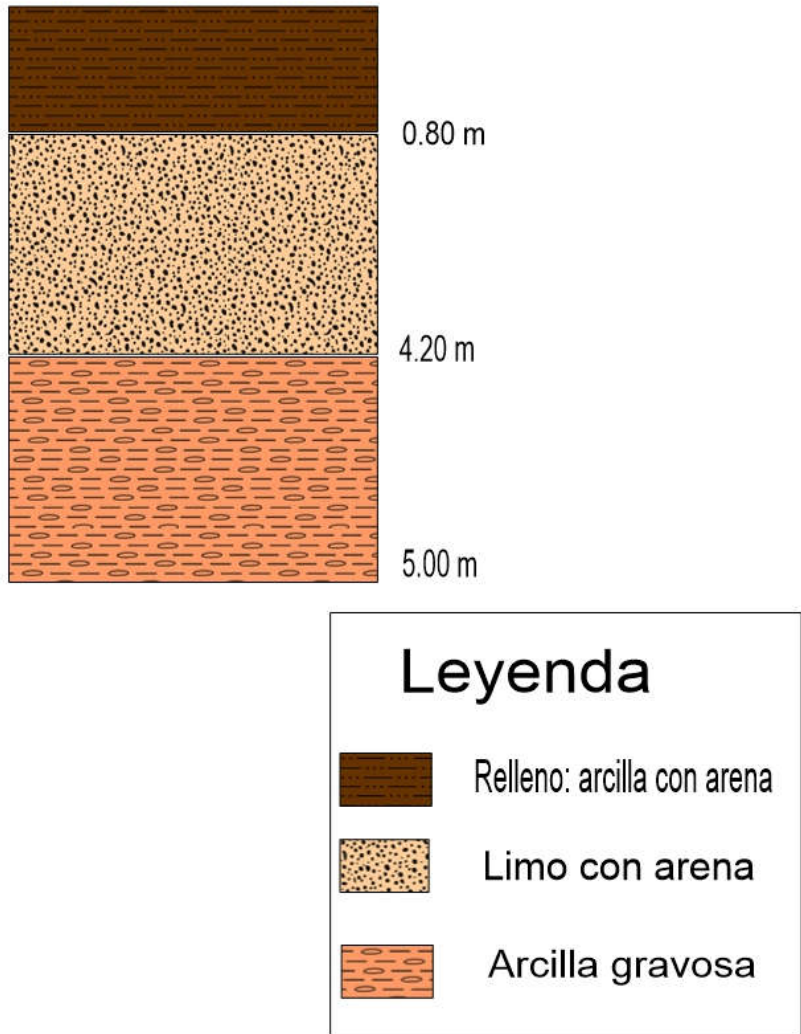


Figura 16. Columna litoestratigráfica esquemática del municipio Manzanillo.

No se realizó el cálculo del factor de seguridad ya que las propiedades físico-mecánicas de cada una de las obras nos dieron la información necesaria para determinar el potencial de licuefacción. No se obtuvieron estratos licuables en la ciudad de Manzanillo.

Análisis global de los resultados

El municipio Manzanillo, provincia Granma, desde el punto de vista geológico se encuentra ubicado dentro de la Cuenca del Cauto. Las principales formaciones que podemos encontrar en la región son: Formación Cauto, Formación Dáctil, Formación Manzanillo, Formación Charco Redondo, aunque también contamos con la presencia de depósitos palustres y aluviales, aunque la zona urbana se encuentra emplazada sobre calizas biotécnicas de la formación Manzanillo.

El nivel freático es muy variable dependiendo en gran medida de la época del año en que se encuentre, siendo menor en los periodos de sequía y mayor en épocas de lluvia; además de la influencia del relieve y del coeficiente de infiltración. Según los informes ingenieros geológicos revisados este alcanza en ocasiones niveles de 0.4 a 8.00m.

Este municipio se encuentra próximo a la zona activa Cauto Nipe donde han ocurrido innumerables sismos con epicentros en el área de la propia ciudad o muy cercanas a ellas, provocando daños a las estructuras, etc.

Según el mapa de zonificación sísmica propuesto para Cuba en la Norma Cubana para la construcción de obras sismorresistentes; este municipio se encuentra en la zona 2, de riesgo sísmico bajo, 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.

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



Trabajo de Diploma

donde se encuentran los sedimentos más recientes, en suelos con alto grado de saturación y baja compactación, localizados al noroeste. No se descarta que ante la ocurrencia de un terremoto que exceda los 7.5 grados ocurra el fenómeno en algunas áreas no identificadas en este estudio dado que los datos son puntuales para la zona urbana y todos se ubican en calizas biotécnicas de la formación Manzanillo o sobre arenas calcáreas de gran consistencia.

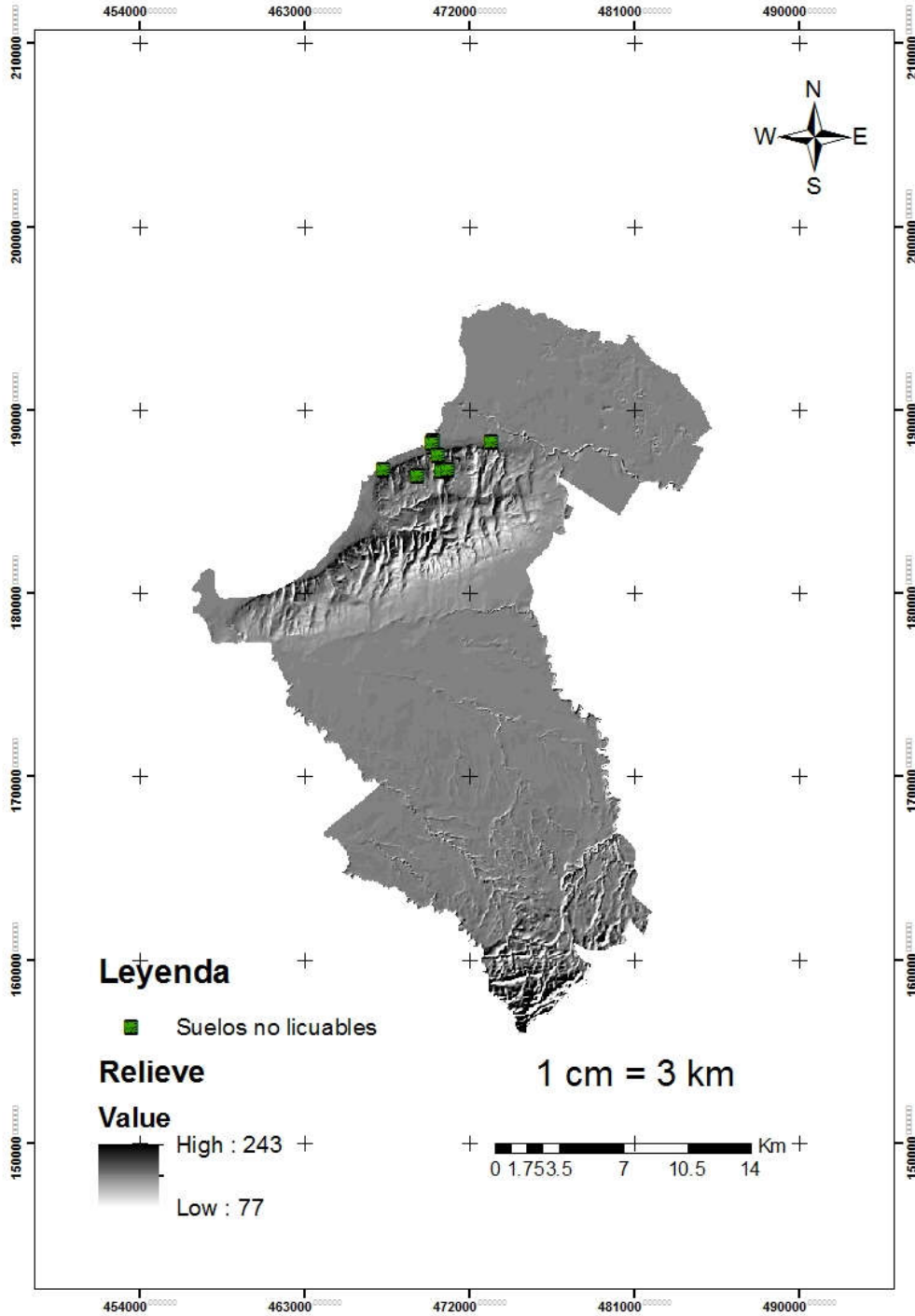


Figura 17. Esquema de ubicación de los puntos de muestreo de suelos no licuables en la zona urbana del municipio Manzanillo provincia Granma.

CONCLUSIONES

- Las condiciones ingeniero geológicas de los suelos estudiados de la ciudad del municipio Manzanillo, en sentido general no son favorables para que ocurra la licuefacción dado que los valores son diferentes a los establecidos para la ocurrencia de este fenómeno; el nivel freático es alto, poca saturación, alto grado de compactación, alta concentración de partículas finas y el límite líquido es mayor de 35.
- Se aplicó un sistema de indicadores donde se analizó la geología, sismicidad, profundidad del nivel freático y las condiciones ingeniero geológicas dando como resultado que los estratos en el área son arcillas de baja plasticidad (CL), gravas arcillosas (GC), las arenas limosas (SM) y arenas arcillosas (SC), calizas arcillosas y calcáreas (C) de la formación Manzanillo de edad Mioceno Superior-Plioceno (parte baja) no son proclives a la ocurrencia de la licuación.
- La susceptibilidad a la licuefacción de los suelos de la ciudad de Manzanillo es baja, no presenta sectores susceptibles a la ocurrencia del fenómeno inducido por sismos fuertes dado que se enmarcan sobre la formación Manzanillo.

RECOMENDACIONES

- Socializar los resultados de la investigación con el propósito de que las Comunidades y establecimientos estatales conozcan acerca del tema, para lograr una mejor proyección de ordenamiento territorial.
- 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 centros de Gestión para la Reducción del Riesgo y Consejo Asamblea Municipal y Provincial.

BIBLIOGRAFÍA

Autores, C.D. Léxico estratigráfico de Cuba. En MINAS, I.D.G.Y.P.S.G.D.C.M.D.E.Y., 2013, vol. 3.

Alfaro, F. A. (2011). Comparación entre la metodología para evaluar el potencial de riesgo de licuefacción y los catastros realizados luego del terremoto del 2010 en Concepción. Proyecto de grado en opción al título de Ingeniero Civil.

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

Bauta Torres, (2017) Identificación de escenarios susceptibles a la licuefacción inducidos por sismos de gran magnitud en los municipios de San Luis, Julio Antonio Mella y Palma Soriano de la provincia Santiago de Cuba. Tesis de diploma. ISMM.

CENAI. (2013). Terremotos registrados por el Servicio Sismológico Nacional de Cuba.

Chuy. R (1999). Sismos Perceptibles en la Provincia de Santiago de Cuba, Minería y Geología, ISSN 0258 5979.

Chuy, R. (2010) Modelo del peligro sísmico de la provincia de Santiago de Cuba. Archivos CENAI. Santiago de Cuba.

Cotilla. (1999). Apuntes necesarios acerca de los acontecimientos sísmicos en Cuba.

Colectivo de Autores de la Sección de Sismología, Vulcanología y Exploración Geofísica, Geología. 2003. San Pedro, Costa Rica.

Días-Justy (2013). Caracterización Hidrogeológica de la sub-cuenca GC-3 del tramo Cayo Redondo, con fines de abasto de agua potable a la ciudad de Manzanillo y sus alrededores. Tesis de diploma. ISMM.

Ecured. (2017). Obtenido de www.ecured.cu

Fernández Diéguez, (2015). Licuefacción de los suelos generada por sismos de gran magnitud. Casos de estudio Caimanera y Santiago de Cuba. Moa. Tesis de maestría, ISMM.

González, L. (2002). Ingeniería Geológica. Pearson education.

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

Herrera Delfín, I. (2015). Delimitación de escenarios susceptibles a la licuefacción inducido por terremotos de gran magnitud en el consejo popular Guillermon Moncada del municipio de Santiago de Cuba. Tesis de diploma. ISMM. Moa.

Kramer, & Stewart. (2004). J. Geotechnical Aspects of Seismic Hazards. Londres.

Leyton. (2011). Geología Superficial, frecuencias predominantes de suelos y observaciones de licuefacción en Curicó tras el terremoto de Maule 2010. Chile: Tesis de Diploma.

Meliton González de Solar (1936) en Revista de la Junta de Estudios Históricos de Mendoza.

Obando. (2009). Estado actual del Conocimiento del proceso cíclico de licuefacción en suelos sujetos a sollicitaciones sísmicas. Ejemplos de Casos.

Obando. (2009). Metodología y técnicas para la cuantificación del potencial de licuación en suelos sujetos a sollicitaciones dinámicas. Ejemplo de casos.

Oficina Nacional de Normalización, C. (2013). Proyecto de norma NC 46 de 2013 de Construcciones sismo resistentes. Requisitos básicos para el diseño y construcción.

OVSICORI-UNA (octubre, 2003) "Mapa de Susceptibilidad de Licuefacción para la Península de Nicoya, Guanacaste, Costa Rica.

Parellada Reyes, O. (2016). Delimitación de escenarios susceptibles a la licuefacción inducidos por terremotos de gran magnitud en la zona sur de la provincia Guantánamo. Tesis de diploma. Moa.

Perucca, I.; 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

Mercanfety, (2016). Delimitación de escenarios susceptibles a la licuefacción inducidos por terremotos de gran magnitud en los municipios Baracoa, Yateras, El Salvador, Niceto Pérez de la Provincia Guantánamo. Tesis de diploma. Moa.

Rosabal. (2011). Zonación preliminar de la licuefacción de los suelos en la región de Cuba Oriental. Tesis de diploma. Moa

Rodríguez, Audemard, & Rodríguez, 2012. Departamento de Ciencias de la Tierra, Fundación Venezolana de Investigaciones sismológicas.

Sánchez, N. L. (2013). Licuefacción de suelos. Venezuela.

Seed, & Idriss. (1982). Ground motions and soils liquefaction during Earthquakes.

Seed, B., and Idriss, M. “A Simplified procedure for evaluating soil liquefaction potential”, Journal of soil Mechanics and Foundation Engineering Division, ASCE, 1971. 97, SM9, 1249- 1273.

Universidad Nacional Autónoma de México, (2012). Determinación del potencial de licuación con el método de microtremores.

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

Anexos 1 Terremotos Históricos Reportados en Cuba .www.cenais.cu

AÑO	MES	DÍA	HORA	Lat. N.	Lon. W.	Ms	H	I	LOCALIDAD
1551	OCT	18	-	(20.40)	(76.60)	(5.8)	(15)	8.0	BAYAMO
1578	AGO		-	(19.90)	(76.00)	(6.8)	(30)	8.0	SANTIAGO DE CUBA
1580			-	(19.90)	(76.00)	(5.8)	(30)	7.0	SANTIAGO DE CUBA
1624	OCT		-	(20.40)	(76.00)	(5.2)	(15)	7.0	BAYAMO
1675	FEB	11	-	(19.90)	(76.00)	(5.8)	(30)	7.0	SANTIAGO DE CUBA
1678	FEB	11	14:59	(19.90)	(76.00)	(6.8)	(30)	8.0	SANTIAGO DE CUBA
1682			-	(19.90)	(76.00)	(5.8)	(30)	7.0	SANTIAGO DE CUBA
1752	OCT		-	(19.90)	(76.00)	(5.8)	(30)	7.0	SANTIAGO DE CUBA
1760	JUL	11	-	(19.90)	(76.00)	(6.8)	(30)	8.0	SANTIAGO DE CUBA
1766	JUN	12	05:14	(19.80)	(76.10)	(7.6)	(35)	9.0	SANTIAGO DE CUBA
1775	FEB	11	-	(19.90)	(76.00)	(5.8)	(30)	7.0	SANTIAGO DE CUBA
1826	SEP	18	09:29	(19.90)	(76.00)	(5.8)	(30)	7.0	SANTIAGO DE CUBA
1842	JUL	07	-	(19.90)	(76.00)	(6.0)	(30)	7.0	SANTIAGO DE CUBA
1852	AGO	20	14:05	(19.77)	(75.35)	(7.3)	(30)	9.0	SANTIAGO DE CUBA
1852	NOV	26	08:44	(19.50)	(76.25)	(7.0)	(35)	8.0	SANTIAGO DE CUBA
1858	ENE	28	22:04	(19.90)	(76.00)	(6.5)	(30)	7.0	SANTIAGO DE CUBA
1880	ENE	23	04:39	(22.70)	(83.00)	(6.0)	(15)	8.0	SAN CRISTOBAL
1903	SEP	22	08:09	(19.90)	(76.00)	(5.7)	(30)	7.0	SANTIAGO DE CUBA
1906	JUN	22	07:09	(19.65)	(76.25)	(6.2)	(30)	7.0	SANTIAGO DE CUBA
1914	FEB	28	05:19	(21.22)	(76.17)	(6.2)	(32)	7.0	GIBARA
1914	DIC	25	05:19	(19.45)	(76.30)	(6.7)	(30)	7.0	SANTIAGO DE CUBA
1926	AGO	03	11:30	(20.30)	(77.10)	(5.4)	(15)	7.0	MANZANILLO
1930	ENE	17	12:00	(19.90)	(76.00)	(5.8)	(25)	7.0	SANTIAGO DE CUBA
1932	FEB	03	06:15	19.80	75.80	6.75	-	8.0	SANTIAGO DE CUBA
1939	AGO	15	03:52	22.50	79.25	5.6	-	7.0	REMEDIOS- CAIBARIEN
1947	AGO	07	00:40	19.90	75.30	6.75	50	7.0	SANTIAGO DE CUBA
1976	FEB	19	13:59	19.87	76.87	5.7	15	8.0	PILON
1992	MAY	25	16:55	19.62	77.70	7.0	30	7.0	CABO CRUZ