



Facultad Geología y Minas
Departamento de Geología

Trabajo de Diploma

En opción al Título de

Ingeniero Geólogo

**Título: Modelo geotécnico 3D del suelo susceptible a la
licuefacción, en la zona central de Caimanera, Guantánamo.**

Autor: Katerin Carcassés Álvarez

Tutores: Ms.C Liuska Fernández Diéguez

Ms.C Yorgenis Maceo Rustán

Ms.C Jose Luis Urra Abraira

Moa, 2019

Agradecimientos

1. Doy gracias a Dios porque en medio de las dificultades ha sido fiel conmigo y me ha dado las fuerzas que necesito para continuar.
2. A mi madre Ramona Álvarez García que se ha esforzado desde que nací y me ha educado con todo el amor del mundo, a la cual agradezco infinitamente sus desvelos y preocupaciones en cada detalle para hacer que siempre haya una sonrisa en mis labios.
3. A mi hermano precioso Oscar Carcassés Álvarez que en muchas ocasiones ha sido el motor impulsor, influenciando mi vida con palabras de ánimo.
4. A mi padre Oscar Carcassés Toirac por sentirse orgulloso de mí.
5. A mi novio Deynier Montero Góngora y a sus padres Margiolis Góngora y Denny montero por su apoyo incondicional.
6. A mis tutores Liuska Fernández Diéguez, Yorgenis Maceo Rustán, José Urra, por todo el tiempo que me dedicaron.
7. A todos mis compañeros de aula, ¡chicos ustedes saben que los amo!, Roxy, Lia, Anita, Sixta, entre otros; ha sido un verdadero lujo compartir con ustedes estos cinco años.
8. A mis amigas y amigos: Ivis, Alina, Marlis, Leticia, Cary, Adriana, Marquia, ,Magda ,Ariel Mosqueda; que han sido excelentes consejeras y consejeros, aportando mucho para que este sueño se haga realidad.
9. A toda mi familia palmera en especial a mi tía Elvita y a mi tío German.
10. A toda mi familia habanera por acogerme desde pequeña y darme tanto amor, mi tía Deysi, mi tío Luis, mi prima Nany, Gallega y Luisito.
11. A Sorlenis y Ayme por recibirme en sus casas durante el desarrollo de la tesis.
12. A mis profesores principalmente José Nicolás y Rafael Guardado Iacaba, gracias por sus aportes a mi formación como geóloga.

Pensamientos

“Así que no depende del que quiere, ni del que corre, sino de Dios que tiene misericordia.”

Romanos 9: 16

“La suerte se echa en el regazo; Mas de Jehová es la decisión de ella.

..

Proverbios 16:33

Resumen

Los modelos son muy utilizados en todas las ciencias para simplificar los problemas más complejos de la realidad, permiten una representación del comportamiento de un sistema y adquieren una gran relevancia en la Ingeniería Geológica.

El modelo geológico conceptual resulta de gran utilidad para los proyectos desarrollados sobre el terreno. Los modelos geotécnicos han evolucionado paralelamente a las técnicas asistidas por computadoras, desde los modelos en 2D hasta 3D. La correcta modelación de las propiedades físico-mecánicas contribuye a obtener una representación de las características del objeto geológico.

La baja disponibilidad de suelos en la ciudad de Caimanera, provincia de Guantánamo apropiados para la construcción ha obligado a la utilización de las áreas de pantano para el desarrollo urbano, mediante el uso de materiales de relleno con bajos espesores. La ejecución de construcciones sobre áreas de pantano y suelos de baja plasticidad contribuye al aumento de riesgo por licuefacción.

El modelo 3D obtenido permitió la distribución espacial orientativa de las variables (límite líquido, humedad natural, número de golpes del ensayo de penetración estándar, porcentaje de fino del suelo y el índice de plasticidad) que inciden en la susceptibilidad de los suelos de la zona central de Caimanera.

Los resultados del modelo 3D, indican que los suelos representados por arcillas compresibles, arcilla limosa, lutita calcárea y cieno orgánico presentan una alta susceptibilidad a la licuefacción; y que las arcillas compresibles localizadas en la Sede Universitaria presentan la mayor susceptibilidad a la licuación, teniendo en cuenta los contenidos de finos relativamente bajos (14 %).

Abstract

The models are widely used in all sciences to simplify the most complex problems of reality, allow a representation of the performance of a system and acquire great relevance in Geological Engineering.

The conceptual geological model is very useful for projects developed in the field. Geotechnical models have evolved in parallel with computer-aided techniques, from 2D models to 3D. The correct modeling of the physical-mechanical properties helps to obtain a representation of the characteristics of the geological object.

The low availability of soils in the city of Caimanera, Guantánamo province appropriate for construction has forced the use of swamp areas for urban development, through the use of filling materials with low thickness. The execution of constructions on swamp areas and low plasticity soils contributes to the increase of liquefaction risk.

The 3D model obtained allowed to orientate spatial distribution of variables (liquid limit, natural moisture, number of stroke of the standard penetration test, percentage of fine soil and the plasticity index) that affect the susceptibility of the soils of the Central area in Caimanera.

The results of the 3D model indicate that the soils to be represented by compressible clay, silty clay, calcareous shale and organic slime have a high susceptibility to liquefaction; and that the compressible clays located at the University Headquarters present the highest susceptibility to liquefaction, taking into account the relatively low fine grains content (14%).

Contenido

Introducción.....	7
CAPÍTULO 1. MARCO TEÓRICO CONCEPTUAL SOBRE LA MODELACIÓN GEOLÓGICA	11
Introducción.....	11
1.1 Antecedentes sobre la modelación geológica en yacimientos minerales.	11
1.2.1 Modelación geológica en yacimientos minerales	12
1.2.2 Modelación en la gestión de riesgo urbano y contribución a la zonación sísmica 14	
1.2 Rasgos físico-geográficos y geológicos de la región de estudio.	14
1.3 Geología regional y local	15
1.4 Geomorfología regional	18
1.5 Características hidrogeológicas	19
1.6 Características ingeniero – geológicas de la región	20
CAPÍTULO 2. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN	22
Introducción.....	22
2.1 Búsqueda y análisis de bibliografía	22
2.2 Conceptos generales sobre el fenómeno de licuefacción	23
2.3 Límites de parámetros geotécnicos utilizados en el análisis de licuefacción	24
2.4 Variables geotécnicas a modelar	24
2.5 Método de Inverso de una Potencia de la Distancia.....	26
CAPÍTULO 3: MODELACIÓN 3D DE LOS PARÁMETROS GEOTÉCNICOS EN LA ZONA CENTRAL DE CAIMANERA	28
Introducción.....	28
3.1 Caracterización general de los suelos de la zona central.....	28
3.2 Obtención del modelo 3D de los parámetros geotécnicos	30
3.2.1 Procesamiento de la base de datos en Gemcom.	30
3.2.2 Creación de los perfiles de representación de los pozos de perforación.	32
3.3 Determinación de la susceptibilidad del suelo a la licuefacción según el criterio chino, a partir del modelo 3D de los parámetros geotécnicos.	35
CONCLUSIONES.....	47
RECOMENDACIONES	48
BIBLIOGRAFÍA	49

Introducción

Los modelos son muy utilizados en todas las ciencias para simplificar los problemas más complejos de la realidad, permiten una representación del comportamiento de un sistema y adquieren una gran relevancia en la Ingeniería Geológica.

Dentro de esta disciplina se pueden diferenciar tres tipos básicos de modelos que son: el modelo geológico, que representa la distribución espacial de los materiales, accidentes tectónicos, características hidrológicas, geomorfológicas etc.; el modelo geomecánico, en el cual se diferencian las características geotécnicas e hidrogeológicas de los materiales; y el modelo geotécnico de comportamiento, que representa la respuesta del terreno durante y después de la construcción de las obras de ingeniería que afectan a la zona de estudio (González de Vallejo, Ferrer, Ortuño, & Oteo, 2002).

El primer paso en la elaboración de un modelo geológico es caracterizar correctamente el lugar y definir unidades geológicas con comportamiento similar. A través de esta información los ingenieros geólogos o geotécnicos pueden desarrollar un modelo geológico conceptual que resulte de gran utilidad para los proyectos desarrollados sobre el mismo terreno (Fookes, 1997).

La simplificación de los modelos geólogo-geotécnicos (MGG) puede estar dirigida a la omisión de detalles, en función del interés de la investigación u originada por desconocimiento del objeto estudiado.

Los MGG han evolucionado paralelamente a las técnicas asistidas por computadoras, desde los modelos en dos dimensiones (2D) hasta los actuales modelos tridimensionales (3D), pero en todos los casos han tenido como propósito representar espacialmente las unidades básicas de información geotécnicas (UBIG) (Ordaz, 2017).

Los MGG tienen un amplio rango de aplicaciones. La aplicación inmediata consiste en la identificación de las características litológicas, geomorfológicas y estructurales del objeto de estudio. Éstas permiten inferir las características del medio por donde

eventualmente circularía el agua subterránea y se puede determinar la predisposición o susceptibilidad del medio a la ocurrencia de procesos geológicos generadores de peligros geotécnicos, cuyos métodos de predicción siempre llevan implícito la variable litología (Ordaz, 2017).

Los modelos geológico-geotécnicos permiten al ingeniero comprender las condiciones existentes en un determinado lugar, además de identificar los principales problemas geotécnicos y hacer más objetiva la estimación de las propiedades del suelo.

La correcta modelación de las propiedades físico-mecánicas contribuye a obtener una representación de las características del objeto geológico. La geometría de la unidad básica de información es empleada como límite virtual para la estimación de la propiedad de interés (Rienzo, Oreste & Pelizza 2008; Ordaz 2013; Chinthaka 2015).

Con esta aplicación se logra reducir considerablemente las incompatibilidades entre la interpretación cuantitativa, concebidas en función de un parámetro geotécnico y la realidad del medio físico.

En Cuba, los estudios de este tipo están encaminados a realizar modelos que permitan la visualización del comportamiento de los suelos, sobre todo en zonas de vulnerables o riesgo a fenómenos geológicos.

El presente caso de estudio se ubica en ciudad de Caimanera, provincia de Guantánamo, donde se encuentra la zona activa sismo generadora Bartlett-Caimán. La baja disponibilidad de suelos apropiados para la construcción ha obligado a la utilización de las áreas de pantano para el desarrollo urbano, mediante el uso de materiales de relleno con bajos espesores.

La geología superficial de las áreas urbanas influye en gran medida en el nivel de las sacudidas sísmicas, existiendo una marcada relación entre las propiedades geotécnicas de los suelos y su susceptibilidad sísmica. Según Youd & Perkins (1978), los materiales no consolidados suelen ser los responsables de importantes

modificaciones en la amplitud de las sacudidas sísmicas y de efectos inducidos como la licuefacción.

La Empresa Nacional de Investigaciones Aplicadas (ENIA) de la provincia Santiago de Cuba, ejecutó en Caimanera los estudios geotécnicos en los sectores planificados para la construcción. A través de la realización de calas se identificaron siete tipos de suelos (SC: Arena arcillosa, CL: Arcilla de baja plasticidad, SM: Arena limosa, OL: Orgánico de baja plasticidad, GC: Grava arcillosa, GP: Grava limpia mal graduada, CH: Arcilla de alta plasticidad)

La ejecución de construcciones sobre áreas de pantano y suelos de baja plasticidad contribuye al aumento de riesgo por licuefacción. Entre los parámetros geotécnicos vinculados a la susceptibilidad de la licuefacción se encuentran: número de golpes del ensayo de penetración estándar (N-SPT), índice de plasticidad (IP), contenido natural de agua (W), porcentaje de finos (CF) y límite líquido (LL).

Los parámetros citados han sido utilizados, en mayor o menor medida, en los estudios de licuefacción en Cuba de (Fernández, 2015) y (Bandera, 2015). Estos trabajos se han orientado a la delimitación de las zonas vulnerables a la licuefacción, sin considerar el comportamiento espacial 3D de cada uno.

Tomando como punto de partida esta necesidad, en este trabajo se proyecta realizar la modelación 3D de los parámetros geotécnicos que permiten caracterizar los suelos susceptibles a la licuefacción.

Problema científico: Insuficiente conocimiento de la distribución espacial 3D de los parámetros geotécnicos del suelo susceptible a la licuefacción.

Objetivo general: Elaborar un modelo geotécnico 3D de los suelos susceptibles a la licuefacción en la zona central de Caimanera, provincia Guantánamo.

Hipótesis: Si se elabora un modelo 3D de la distribución espacial de los parámetros geotécnicos, entonces se podrá conocer los suelos susceptibles a la licuefacción en la zona central de Caimanera, provincia Guantánamo.

Objetivos específicos:

- Caracterizar los suelos de la zona central de Caimanera
- Obtener el modelo 3D de los parámetros geotécnicos
- Determinar la susceptibilidad del suelo a la licuefacción, según el criterio chino a partir del modelo 3D de los parámetros geotécnicos.

Objeto de estudio: Suelos susceptibles a la licuefacción.

Campo de acción: Distribución espacial de los parámetros geotécnicos.

CAPÍTULO 1. MARCO TEÓRICO CONCEPTUAL SOBRE LA MODELACIÓN GEOLÓGICA

Introducción

Los modelos geológicos se elaboran a partir de la recopilación de datos ya existentes y/o de adquisición de nuevos datos provenientes del trabajo de campo, sondeos y análisis de muestras, etc. Los datos recopilados se homogeneizan y se ordenan en sistemas de información o bases de datos (Martínez & Pérez, 2000). El análisis de esta información permite generar modelos geológicos utilizando para ello softwares informáticos, que son simplemente una herramienta que permite modelar de forma integral y eficiente.

La posibilidad de tener un modelo geológico del área de estudio brinda numerosas ventajas sobre la construcción de perfiles geológicos que muestran la interpretación bidimensional destacada, puesto que, el modelaje geológico permite tener una visualización en tres dimensiones del comportamiento de la variable analizada.

Un modelo geológico permite generar perfiles ilimitados en múltiples direcciones en cuestiones de minutos; facilitando una respuesta sumamente rápida a las necesidades en cualquier momento; sin importar la complejidad geológica del área de estudio.

1.1 Antecedentes sobre la modelación geológica en yacimientos minerales.

La modelación geológica es para muchos una concepción nueva, porque ha florecido mayoritariamente a partir de la década de los setenta, con el desarrollo de los métodos geoestadísticos y la aparición de nuevas técnicas informáticas. Pero la modelación geológica viene de mucho más atrás, cuando el geólogo no contaba con métodos computacionales y usaba solo pluma y papel para representar el objeto en cuestión; usando para su creación la información de pozos de perforación o las técnicas geofísicas (Matos, 2016).

1.2.1 Modelación geológica en yacimientos minerales

A pesar de que existen muchos criterios de lo que es la modelación de yacimientos, con todas sus concepciones y particularidades (M. David, 1984; Chica Olmo, 1989, etc.), ésta se ha convertido en una herramienta indispensable para la exploración y explotación de los yacimientos minerales. En la década del sesenta, con el desarrollo de los métodos geoestadísticos y la aparición de nuevas técnicas de cálculo de reservas, posibilitadas por los avances en la informática, comenzó a crecer el embrión de la modelación como herramienta para todas las etapas de cualquier proyecto minero y se unieron las concepciones existentes para dar lugar a las que se utilizan en la actualidad. De forma general se desarrollaron concepciones por separado de lo que es la modelación, fundamentalmente encaminadas a la exploración y explotación de los yacimientos.

La modelación de yacimientos minerales surge en los años de la década de 1970 hasta su definitiva implantación con los trabajos básicos del Servicio Geológico de los Estados Unidos a partir del 1983 y posteriormente su continuidad por el Servicio Geológico de Columbia Británica en Canadá. Les siguieron otros países hasta el surgimiento del Programa de Modelación de Yacimientos auspiciado por la Unión Internacional de Ciencias Geológicas -IUGS en el año 1984.

La modelación tiene como cuna las principales potencias mineras y económicas del mundo, países como, Francia y Canadá acogieron en sus centros de investigación a los así nombrados “padres de la geoestadística”, entre los que se destacan, (David, 1977; Matheron, 1963; Matheron, 1971) y otros.

Para la evaluación y estimación de los recursos se han desarrollado varios métodos de modelación: el descrito por (Kilby, 1995) y (Grunsky, 1995) quienes se basaron en la Metodología de Evaluación de las Tres Partes y el Modelo Clásico de Bloques planteado por Lerchs Grossmann en 1964, llevado a cabo en 1982 por Peter Stokes que fue el primero en presentar el primer modelo computarizado.

Hoy los países ya mencionados precursores de la modelación y dueños de la tecnología necesaria para ejecutarla son los que llevan la cabecera en su aplicación.

Con el fortalecimiento de las relaciones de inversiones mineras extranjeras se han multiplicado en el tercer mundo, transfiriendo de esta manera parte de las tecnologías y el conocimiento científico. Cuba tiene una situación similar a la del resto del tercer mundo. Solo con carácter muy localizado se realizan investigaciones en este campo, relacionadas con los trabajos de exploración y explotación de importantes materias prima.

En la actualidad se comienzan a dar los primeros pasos en la aplicación eficiente, y organizada a niveles empresariales, de estas técnicas que ya se ha implementado en la minería. Este es el caso de los trabajos de modelación de yacimientos lateríticos por parte de las Empresas "Pedro Sotto Alba", "Comandante Ernesto Che Guevara" y la "Empresa de Proyectos del Níquel (CEPRONIQUEL)" en Moa (Matos, 2016).

Matos (2016) presenta un modelo geométrico del yacimiento de cromita podiforme "Victoria II" que favorece la optimización de los recursos a minar, para una mejor planificación de la minería en el yacimiento, permitiendo detallar la situación geólogo-estructural en que se enmarca.

Johnson (2009) estableció un modelo de recursos por bloques del sector III del yacimiento ferroniquelífero Cantarrana del municipio Moa, que representa la distribución espacial de los elementos Ni, Fe y Co en porcentos, con el objetivo de desarrollar el modelo de reservas de dicho sector.

El estudio realizado por Urra (2015) muestra que los mayores contenidos útiles de níquel ($> 1,21 \%$) se localizan en las cotas inferiores a 156 m y los de cobalto ($> 0,120 \%$), en las cotas inferiores a 138 m, lo que favorece la estimación de los recursos minerales y el incremento de las reservas geológicas. Los planos geoquímicos obtenidos a partir del modelo 3D para cada banco permitieron orientar el control geológico de la explotación.

Maceo (2018) introduce el uso de las técnicas de modelación geoestadística en combinación con los métodos geofísicos en la creación de un modelo tridimensional (3D) que permite caracterizar la distribución espacial de los fragmentos de rocas

flotantes en la corteza laterítica a través de los radargramas de geofísica de GPR en un sector del yacimiento Camarioca.

Estévez (2000) expone los principales resultados de la modelación 3D de cuerpos minerales y estimación de los recursos del yacimiento Júcaro, Pinar del Río, el modelo tuvo en cuenta la reevaluación de los recursos, considerando la variabilidad espacial de la mineralización y la conjugación de la información geológica existente con los datos de perforación y laboreos.

El modelo geológico del depósito facilitó una buena representación 3D de la morfología de la zona mineralizada, lo cual permitió la estimación del recurso para su posterior delimitación a través del control geológico.

1.2.2 Modelación en la gestión de riesgo urbano y contribución a la zonación sísmica

En la investigación realizada por (Ordaz, Estévez, Hernández, & Chuy, 2014) se propone un procedimiento para la estimación y modelación de los principales parámetros geotécnicos que inciden en la zonación sísmica. La aplicación de esta metodología en la ciudad de San Cristóbal reveló valores bajos de densidad natural, lo que sugiere condiciones desfavorables de respuestas de los suelos frente a sismos.

Ordaz (2017), muestra un modelo geológico-geotécnico en tres dimensiones para la ciudad de Pinar del Río, el cual se utiliza como base para predecir los fenómenos geotécnicos que pueden ocurrir en el subsuelo del entorno urbano, que afectan la infraestructura de la ciudad. Finalmente se concluye que la confección del mismo ayudará notablemente a la toma de decisiones en la planificación urbana.

La profundidad de investigación es un elemento importante en la modelación de las propiedades físico-mecánicas, con incidencia en la zonación sísmica local.

1.2 Rasgos físico-geográficos y geológicos de la región de estudio.

Caimanera es uno de los 10 municipios que componen la actual provincia de Guantánamo, se encuentra ubicada a 17 km del mismo, limitando al norte con él y

con el municipio Manuel Tamez, al este con el municipio de San Antonio del sur, al sur con el Mar Caribe y al oeste con el municipio de Niceto Pérez. Al estar ubicada en la franja costera del sur de Cuba forma parte del llamado semidesierto cubano. Presenta suelos aluviales de arcillas sobre calizas y areniscas. El litoral está rodeado de un área cenagosa y manglares que han ido desapareciendo con el paso del tiempo (Fernández, 2015). (Véase Figura 1)

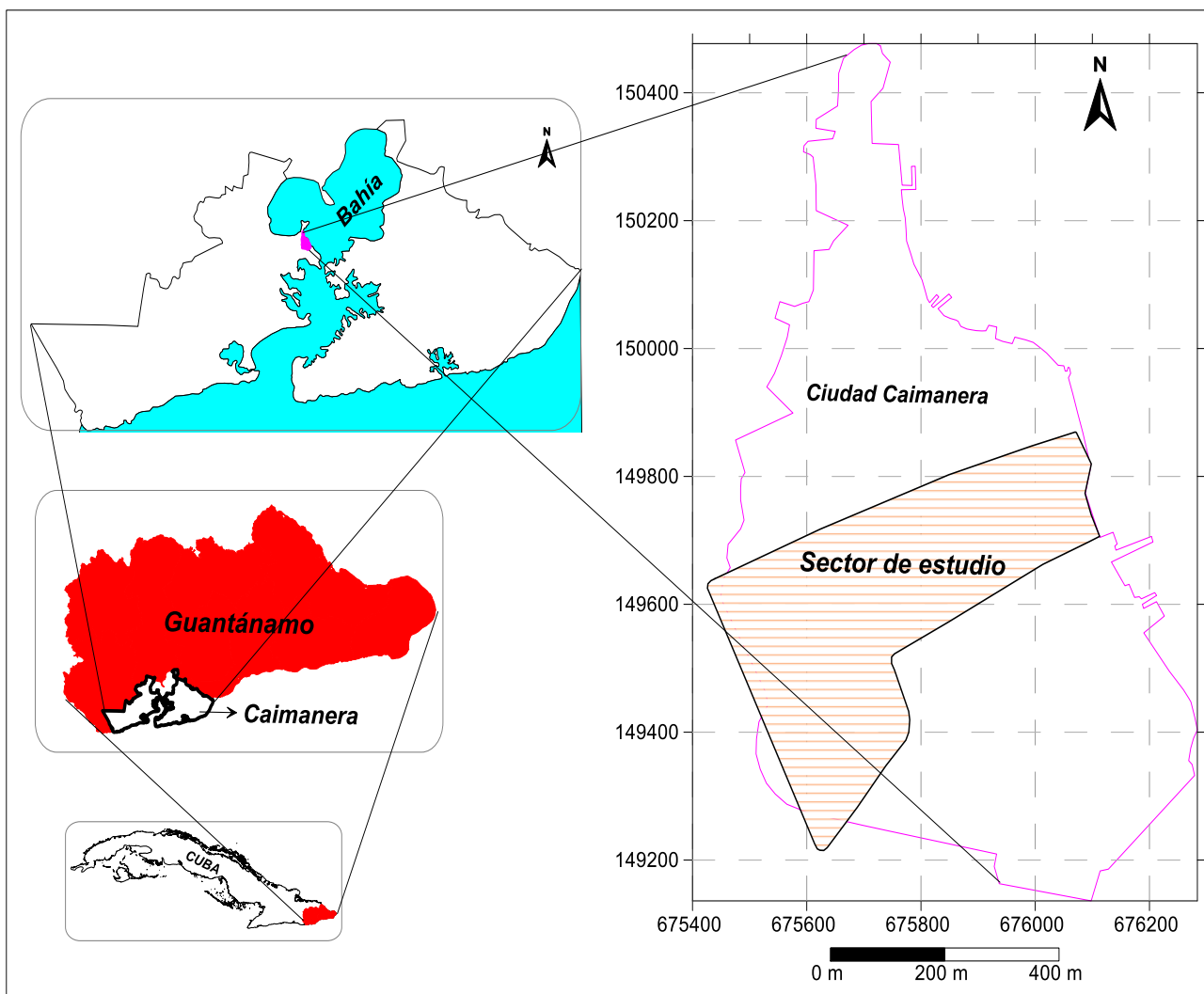


Figura 1: Mapa de ubicación geográfica del municipio Caimanera. Elaboración propia.

1.3 Geología regional y local

El municipio Caimanera se encuentra en el delta del río Guantánamo, está representado por las formaciones que aparecen en la Figura 2.

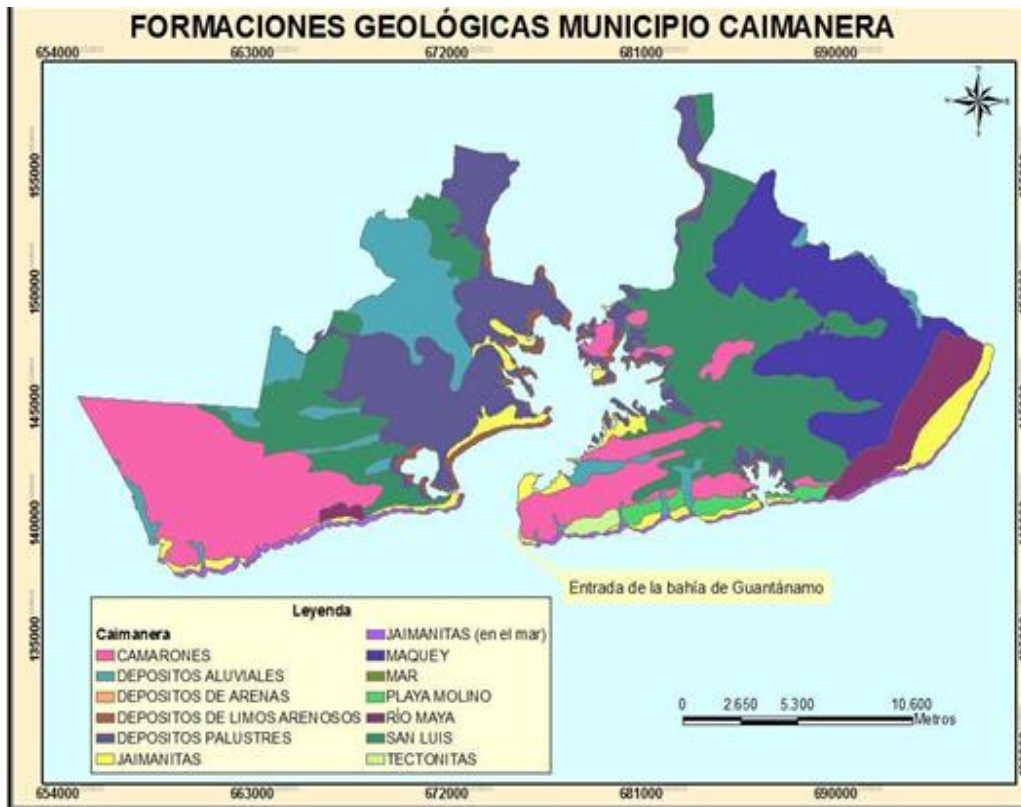


Figura 2: Formaciones geológicas del municipio Caimanera.

Formación Camarones: está constituida por conglomerados polimícticos, de cantos subredondeados y redondeados, y areniscas polimétricas, de grano grueso. La matriz del conglomerado es de composición arenosa y polimíctica. Estas litologías gruesas transicionan hasta areniscas de grano medio, pero mantienen su composición.

Formación Jaimanitas: calizas biodetríticas masivas, generalmente carsificadas, muy fosilíferas, con contenido principalmente de conchas bien preservadas, corales de especies actuales y, ocasionalmente, biohermos. Los bolsones cársicos se encuentran en ocasiones rellenos por una fina mezcla carbonatico-arcillosa-ferruginosa, de color rojo ladrillo. Pasan a biocalcarenitas, de granulometría y estratificación variables o masivas. En mayor o menor cantidad, contienen fragmentos de sedimentos terrígenos, que incluyen calizas preexistentes. Es frecuente encontrar variaciones litofaciales y biofaciales. En general, la cementación es variable y en su superficie presenta un casquete recristalizado de evaporita y caliche combinados, de 1 a 2 m de espesor, por debajo del cual, en ocasiones, la

roca aparece desintegrada, convertida en un material terroso. La coloración predominante es blancuzca, rosácea o amarillenta.

Formación Maquey: alternancia de areniscas, limolitas y arcillas calcáreas de color gris y margas de color blanco a crema, que contienen intercalaciones de espesor variable de calizas biodetríticas, arenáceas y gravelíticas de colores blanco amarillo y crema, ocasionalmente amarillo grisáceo. La estratificación es fina a media, menos frecuentemente gruesa o masiva. Algunos horizontes, particularmente de limolitas y calizas biodetríticas, son fosilíferos, en los que abundan grandes lepidocyclinas. Otros horizontes contienen yeso, lignito y restos vegetales lignitizados.

Formación Rio Maya: calizas biohémicas algáceas, coralinas y micríticas, muy duras, de matriz micrítica, frecuentemente aporcelanadas. Contiene corales en posición de crecimiento y fragmentarios, así como, subordinadamente, moldes y valvas de moluscos, todos recrystalizados, entre los que hay abundancia del coral *Acropora prolifera*. Las calizas se encuentran frecuentemente dolomitizadas. El contenido de arcilla es muy variable. Hay abundantes clastos de material terrígeno, provenientes de las rocas de las zonas vecinas emergidas; su granulometría varía entre arenas y cantos. En ocasiones existen intercalaciones de conglomerados polimícticos de granulometría variable y cemento calcáreo. El color es blanco, amarillento, rosado o grisáceo.

Formación San Luis: está compuesta por una secuencia terrígena flyschoides, finamente estratificada, de rocas clásticas y terrígeno-carbonatadas, de granulometría variada desde arcillas hasta conglomerados. También contiene areniscas polimícticas de grano medio a fino, de color gris, que en ocasiones aparecen en capas gruesas; limolitas de color marrón-pardusco; limolitas calcáreas de color crema; lutitas calcáreas de color marrón, masivas; calizas micríticas arcillosas, de color beige; calizas biodetríticas, con abundantes foraminíferos bentónicos grandes; margas de color crema-blanquecino, que pueden pasar lateralmente a calizas. Las calizas presentan aspecto masivo, son laminadas y, en ocasiones, deleznales, con predominio de colores pardo y crema; están

constituidas por calcita cripto a microcristalina, con contenido de material arcilloso y de óxidos e hidróxidos de hierro. En algunos casos incluyen formas bentónicas, indicadoras de aguas someras de la zona sublitoral; en otras ocasiones sólo contienen formas planctónicas indicadoras de ambientes profundos. Esto último se aprecia principalmente hacia la parte más oriental del territorio. Asimismo, en las calizas se aprecian granos de plagioclasas, cuarzo, metálico, clorita y rocas efusivas.

Las secuencias terrígenas están constituidas por areniscas de grano fino y grueso, que transicionan a areniscas calcáreas por el aumento de material carbonatado. Éste se encuentra representado por fragmentos de calizas, de organismos y por un cemento del tipo de contacto, de calcita, generalmente recrystalizada. El material terrígeno es muy variado, caracterizado por rocas efusivas básicas, medias y ácidas, rocas intrusivas, rocas arcillosas y granos de plagioclasas de diferente composición, clinopiroxenos, cuarzo y granos de metálico. Los organismos presentes son fragmentos de algas, foraminíferos planctónicos y bentónicos, raramente silíceos, y aisladamente se observan algunos formados por minerales fosfáticos. El cemento de estas rocas es de calcita, material criptocristalino no definido y zeolitas (Rodríguez & Machín, 2013) .

1.4 Geomorfología regional

La provincia está formada por dos grandes regiones naturales: el Valle de Guantánamo, con relieve llano y una extensa Bahía de Bolsa catalogada como la tercera en superficie a nivel mundial. Presenta importantes ríos que conforman la tercera cuenca hidrográfica priorizada a nivel nacional, llamada Guantánamo – Guaso, donde se concentra el 80 % de la población del territorio.

La zona de estudio presenta un relieve bastante llano, con alturas o restos de montañas, que alcanzan cotas de 25 metros sobre el nivel del mar (s.n.m.), en algunos lugares llegan hasta los 40 m. Su relieve suave y ondulado está formado por llanuras marinas cenagosas y algunas zonas pre montañosas. El área que ocupa el poblado cabecero y sus alrededores es sumamente baja, con valores hasta 1 metro sobre el nivel del mar. (Fernández, 2015).

1.5 Características hidrogeológicas

La estructura del complejo acuífero al que pertenece la zona (Cuaternario Superior y Actual) tiene una potencia predominante que varía de 5-15 m y dirigiéndose al sur, hacia el mar se incrementa hasta 25 m.

Los valores del nivel freático (ver Figura 3) fluctúan desde 0,5 m de profundidad (hacia la bahía) hasta 3 m en casos aislados, lo que indica que hay poca variación tal como se afirma en (Vidal, 2010).

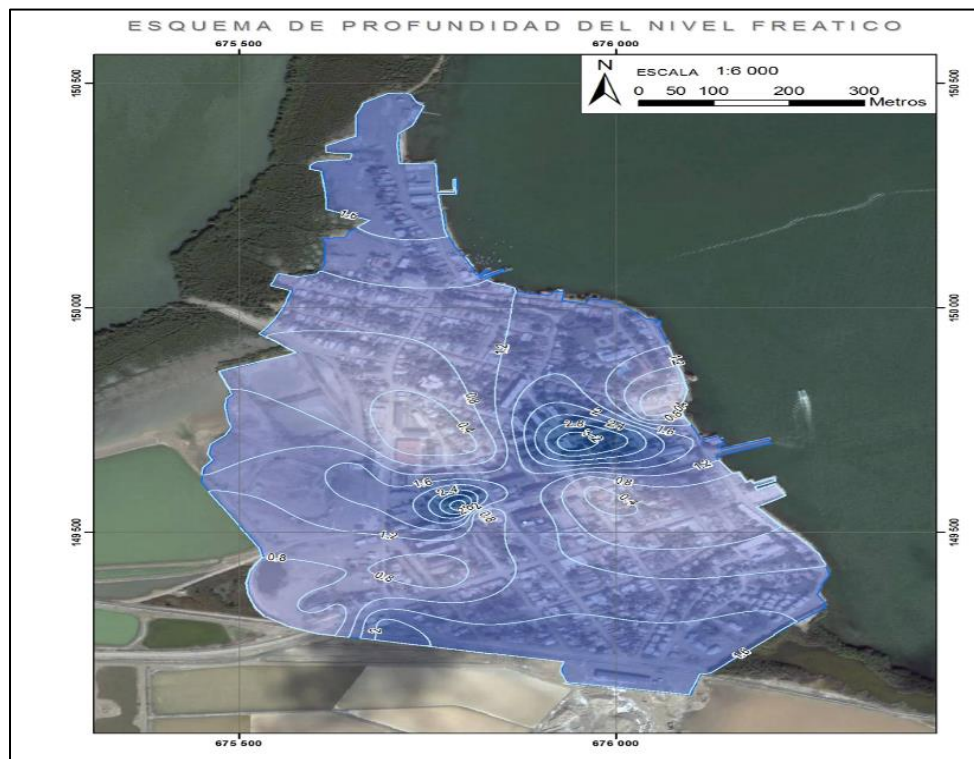


Figura 3: Esquema de profundidad del nivel freático en el municipio Caimanera, provincia Guantánamo (Fernández, 2015).

Generalmente por las particularidades hidráulicas de este complejo acuífero predominan las aguas subterráneas freáticas. Por lo que se está en presencia de rocas saturadas y semisaturadas, que provoca un incremento de la amplificación de las ondas sísmicas y una disminución en la velocidad de propagación de las ondas sísmicas, así como los daños a las obras.

1.6 Características ingeniero – geológicas de la región

Dentro de los límites del territorio estudiado se distinguen dos capas: la primera capa está representada por los sedimentos actuales marinos (aQIV), están desarrollados a lo largo de la línea litoral, hasta la cota absoluta actual de 2 m, están representados por arcillas cienosas y cienos, presentan gran cantidad de restos orgánicos, su espesor es de 1.0-1.5 m, yacen principalmente sobre los sedimentos aluviales marinos. La segunda capa corresponde a los sedimentos aluviales marinos (am Q III), están extendidos en el área hasta las cotas absolutas actuales de 20 a 25 m. Se encuentran en el valle llano litoral- marino, en el curso inferior de los ríos. Yacen sobre la superficie accidentada horadada de las rocas de la Formación San Luis. Están representados por arcillas pesadas y limosas, laminares, a veces con intercalaciones de cienos, en la parte baja del perfil a menudo son arenosas, con intercalaciones de gravas, arenas, guijarros en el agregado arcilloso, en los sedimentos se encuentran restos de conchas, la potencia puede llegar en algunos lugares entre 4-6 m (Plá & Arencivia, 2005).

Sismicidad

Los fenómenos sísmicos registrados en el territorio indican diferencias en los valores de velocidades de ondas longitudinales y transversales. Mientras más densos son los suelos la velocidad de propagación de las ondas sísmicas será mayor. La multiplicación de la velocidad de propagación y la densidad da como resultado la rigidez sísmica, la que varía en dependencia del tipo de suelo. En las gravas hay valores altos de rigidez sísmica, sin embargo, en suelos arcillosos los valores son pequeños lo que quiere decir que el movimiento del suelo en estos casos será mayor.

Sismicidad – Licuación: Caimanera está ubicada en una zona sísmicamente activa, varios sismos han tenido lugar en el territorio. El terremoto de Haití del 12 de enero del 2010 generó grandes percepciones negativas en la población. Luego el sábado 20 de marzo a las 2h y 38 min, ocurrió un evento ubicado en Baconao de Magnitud 5.6 que generó intensidades de VI grados en Santiago de Cuba, Guantánamo y Caimanera. En la zona de estudio, desde 1987 se reportan efectos

de sitio que han generado los asentamientos diferenciales de los edificios Gran Panel Soviéticos GPS IV, incluso uno de ellos fue demolido y otro se redujo a 2 niveles (Bandera, 2015).

Antecedentes de la investigación del área de estudio

Fernández (2015) realizó un estudio de la susceptibilidad a la licuefacción como fenómeno geológico inducido a partir del estudio de los suelos donde analiza su comportamiento como líquidos ante terremotos fuertes, teniendo en cuenta que la parte sur de Cuba es la zona de mayor sismicidad asociada a la interacción de la Placa norteamericana y micro placa de Gonave. La investigación estuvo dada por la necesidad de evaluar las condiciones ingeniero geológicas de los suelos del municipio Caimanera, provincia Guantánamo, para predecir de forma efectiva si son licuables ante un sismo de gran intensidad. Se llevó a cabo mediante un procedimiento que permite 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 las menos licuables.

Contreras (2018) evaluó la respuesta local del suelo y su correlación con las condiciones ingeniero geológicas, de forma tal que se pueda microzonificar la peligrosidad sísmica en el sector urbano del municipio Caimanera. El estudio se llevó a cabo mediante un sistema de indicadores que resumen las características más influyentes en la respuesta del suelo; como: geología, sismicidad, geomorfología, profundidad del nivel freático y condiciones ingeniero-geológicas. El resultado obtenido es un esquema que ilustra tres zonas: Norte, Central y Sur; siendo la de mayor peligro la Zona Central, esta está compuesta por suelos blandos, poco compactos, de baja resistencia, saturados, compresibles, de abundante materia orgánica.

CAPÍTULO 2. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

Introducción

En este capítulo se expondrá la metodología aplicada en la investigación realizada para la modelación en el sector urbano del municipio Caimanera, provincia Guantánamo. Para facilitar el trabajo este se dividió en tres etapas, cada una con sus propias características, pero todas con la misma importancia como se puede observar en la Figura 4.

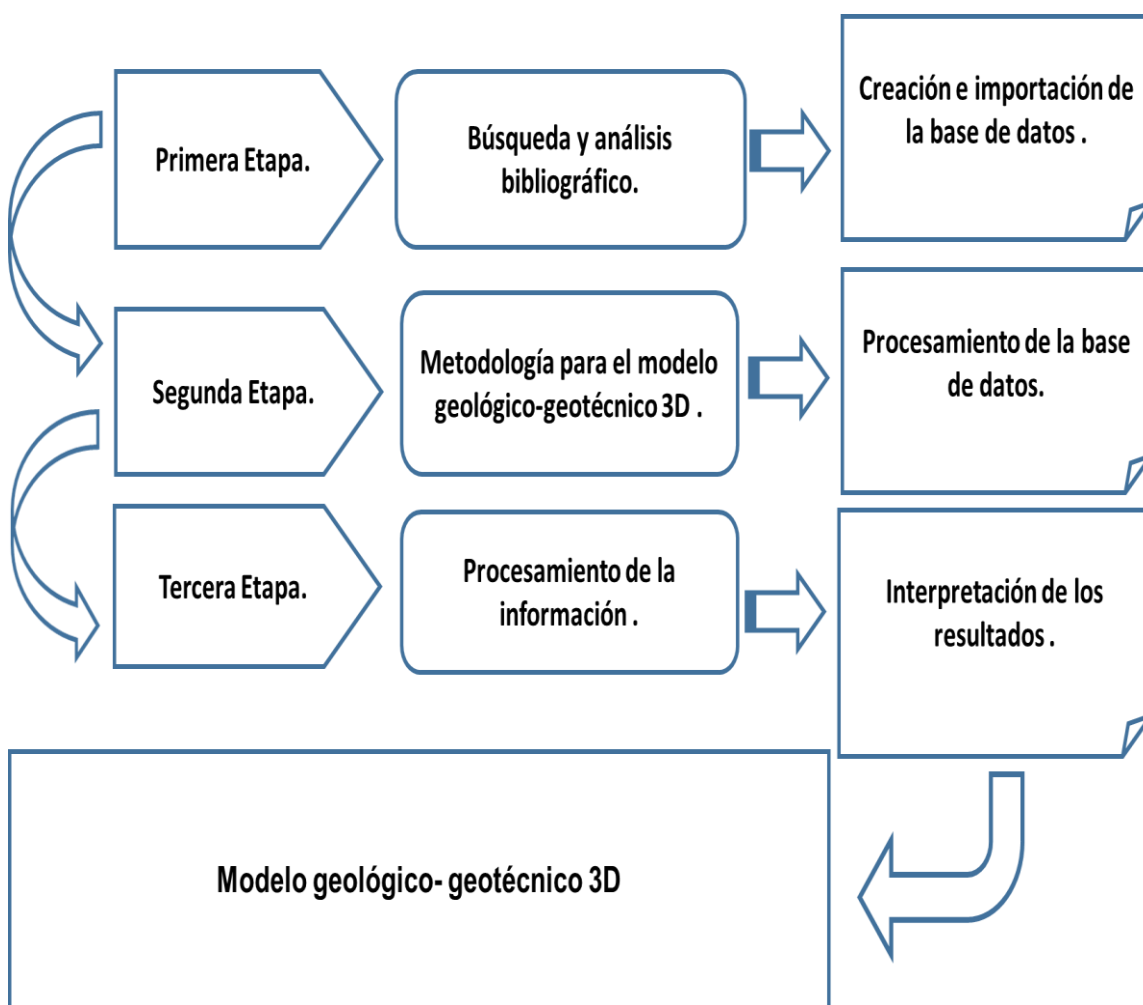


Figura 4: Flujograma de las etapas que comprenden la metodología de la investigación.

2.1 Búsqueda y análisis de bibliografía

En esta etapa se realiza una búsqueda bibliográfica mediante la revisión de una serie de artículos científicos, trabajos de diploma, tesis de maestría, informes

ingeniero geológicos de obras ingenieriles ubicados en los archivos de la Empresa Nacional de Investigaciones Aplicadas (ENIA) en Santiago de Cuba, además de revisar artículos de internet, libros y todo tipo de documento sobre el tema a desarrollar. Se elaboró el diseño de la investigación definiendo el problema y la metodología a emplear para solucionarlo, se concibió el marco teórico conceptual y el estado del arte del tema en cuestión. En un segundo momento se analizaron las metodologías utilizadas para la modelación derivada de la información revisada, determinando la distribución de los suelos con propiedades físico-mecánicas que lo hacen licuables, dando respuesta al objetivo de la investigación y constituyendo una herramienta de rigor, fundamentalmente aplicable a la solución de fenómenos geotécnicos en el municipio.

2.2 Conceptos generales sobre el fenómeno de licuefacción

La licuefacción se produce cuando determinados tipos de suelos afectados por terremotos desarrollan elevadas presiones intersticiales de forma rápida (sin drenaje), dando lugar a una pérdida de la resistencia al corte y a la rotura del suelo, que se comporta como si fuera un líquido. Este fenómeno provoca el fallo de cimentaciones, roturas de taludes y deslizamientos. Los suelos susceptibles a perder gran parte de su resistencia ante sollicitaciones dinámicas son las arenas finas y flojas, así como las arenas y limos mal graduados.

De acuerdo con la observación de zonas afectadas por licuefacción, ésta tiene lugar en las siguientes circunstancias:

- Terremoto de magnitud igual o superior a 5.5, con aceleraciones superiores o iguales a 0.2 g.
- Por debajo de 15 m de profundidad no se han observado licuefacciones.
- En la mayoría de los casos donde se han observado licuefacciones el nivel freático estaba a poca profundidad, (0-3m) por debajo de 9 m la susceptibilidad de licuefacción es muy baja.

Hay un umbral de intensidad mínima del terremoto para que puedan producirse fenómenos de licuefacción. En suelos de alta susceptibilidad, este umbral de

intensidad es de VI en la escala Modificada de Mercali, o magnitudes superiores a 5,5 (Fernández, 2015).

Criterios geológicos: los suelos de depósitos fluviales y eólicos, cuando se encuentran saturados, tienen una alta probabilidad de ser susceptibles de presentar licuefacción.

Criterios basados en el estado del suelo: Los suelos sueltos son 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 (Fernández, 2015) .

2.3 Límites de parámetros geotécnicos utilizados en el análisis de licuefacción

Para que los suelos de grano fino licuen se deben cumplir ciertas condiciones granulométricas propuestas por Wang en 1979. Estas son:

- Porcentaje de finos de 0,005 mm < 15 %
- Límite líquido, LL < 35 %
- Natural contenido de agua > 0,9 LL
- 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 %, LL < 35, W/LI > 0,9. A este criterio se le conoció como criterio chino (Fernández, 2015).

2.4 Variables geotécnicas a modelar

Los aspectos de las variables geotécnicas a tener en cuenta para el modelo fueron tomados de (González de Vallejo, Ferrer, Ortuño, & Oteo, 2002).

Humedad natural del suelo (W): es la relación entre el peso del agua que contiene la muestra y el peso de sus sólidos, a determinar por secado en estufa. Suele variar entre 5-8 % en suelos granulares (arenas y gravas) y entre 60-70 % en suelos

arcillosos, aunque en algunos suelos orgánicos alcanza valores de 300-400 %.

La humedad (W) de un suelo se mide en el laboratorio al comparar el peso de una muestra antes y después de ser sometida a secado en una estufa de desecación a 102 °C durante 24 horas en el caso de que no sea arcillosa y 48 si lo fuese. La humedad se define como la relación entre el peso de agua (pérdida de peso por desecación) y el peso de la muestra seca, y se expresa en valor unitario o en porcentaje. Se trata de un valor medido en el laboratorio generalmente sobre muestras alteradas, es decir, modificadas respecto a las condiciones que presentaba en su punto de extracción en el terreno ("in situ"), que indica la retención de humedad en equilibrio higroscópico relacionada con las características del suelo en cuanto a presencia de partículas de limo y arcilla como principales contribuyentes a la humedad del agregado.

Índice de plasticidad ($I_p = W_L - W_p$); representa el intervalo de humedades para pasar del estado semisólido al semilíquido. Se refiere a la capacidad del suelo para experimentar deformaciones sin la aparición de grietas superficiales.

A partir de diversos estudios prácticos, Casagrande (1932) definió que los suelos con $W_L > 50$ son de «alta plasticidad» (admiten mucha agua, pueden experimentar deformaciones plásticas grandes, etc.); por debajo de este valor los suelos se consideran de «baja plasticidad».

Límite líquido: Es el menor contenido de agua para el cual un suelo pasa del estado plástico al líquido (viceversa). Se determina amasando bien el suelo seco (previamente disgregado con maza) con bastante agua y extendiendo la masa sobre un molde denominado Cuchara de Casagrande. Se abre en el centro de la masa extendida, un surco con un acanalador, formando un canal de unos 2 mm de ancho en su parte baja. El molde se coloca sobre una base y se somete a golpes controlados. El límite líquido es la humedad de la muestra cuando al dar 25 golpes se cierra el canal a unos 12 mm. Como es difícil conseguir esta condición, se determina la humedad por interpolación, a partir de dos muestras, en las que debe conseguirse el cierre de 12 mm con más y menos golpes que 25.

Límite plástico: Es el menor contenido de agua para el cual un suelo pasa del estado plástico al semisólido (semiplástico). Se determina amasando suelo seco con poca agua y formando elipsoides, arrollándolos con la palma de la mano sobre una superficie lisa, hasta llegar un diámetro de unos 3 mm y una longitud de 25-30 mm. Si en ese momento los elipsoides se cuarteán en fracciones de unos 6 mm, su humedad es la del límite plástico (que se determina secando en la estufa varios elipsoides en análogas condiciones). Si no se cuarteán se vuelven a formar elipsoides para que pierdan humedad y lleguen a cuartearse.

Número de golpes del ensayo de penetración estándar (NG-SPT). El ensayo de penetración estándar o SPT (del inglés Standard Penetration Test) es un tipo de prueba de penetración dinámica que se realiza en el fondo de la perforación, empleada para ensayar terrenos en los que se quiere realizar un reconocimiento geotécnico.

En este caso de estudio se utilizó $N_{160} = (N_1) 60$: El número de golpes de la prueba SPT normalizada a un esfuerzo geostático de 100 kPa y a la energía del martillo de 60 %

Licuefacción de los suelos: es el proceso de pérdida de resistencia de ciertos tipos de suelos, que están saturados en agua y cuando son sometidos a la sacudida de un terremoto fluyen como un líquido a causa de un aumento de la presión.

2.5 Método de Inverso de una Potencia de la Distancia

El método del Inverso de la Potencia consiste en una media ponderada de los valores conocidos donde los factores de ponderación son los inversos de potencias de las distancias entre cada punto conocido y el punto donde se estima.

El método se basa en una combinación lineal dada por: $Z^*(x) = \sum \lambda_i Z(x_i)$

En la que λ_i son los pesos proporcionales a la distancia euclidiana entre las localizaciones muestreadas y la que se desea estimar, éstos pesos son calculados por: $\lambda_i = (1/d_{oi}) / \sum 1/d_{oj}$

dónde: d_{oi} es la distancia entre la localización a estimar y la localización de la muestra i .

Generalizando se obtiene:

$$Z^*(x) = [\sum_{i=1,n} 1/d_{oi} Z(x_i)] / \sum_{i=1,n} 1/d_{oj}$$

Se pueden obtener distintos estimadores si se escribe la ecuación anterior como:

$$Z^*(x) = [\sum_{i=1,n} (1/d_{oi})^\omega Z(x_i)] / \sum_{i=1,n} (1/d_{oj})^\omega$$

Dónde: ω es la potencia y puede incorporar diferentes valores.

Esta técnica matemática utiliza directamente los valores muestreados para la estimación y refiere pesos de acuerdo a la distancia euclidiana entre los datos, sin tener en cuenta un análisis de variabilidad de la información disponible.

La influencia del valor de una muestra sobre un punto o bloque a estimar decrece cuando esta se aleja de dicho punto, lo que induce que se les asigne mayor peso (λ_i) a los valores de las muestras más próximas y menor peso (λ_i) a las más alejadas del punto de estimación.

En la ecuación queda claro que a la medida que aumente el valor de la potencia (ω) disminuye la influencia de los valores de las muestras más alejadas, en esa misma medida aumenta la de las más próximas. Con el incremento de la potencia (ω), la interpolación de las leyes entre dos puntos pasa del principio de los cambios graduales al principio de los vecinos más cercanos; en cambio, cuando el exponente (ω) es cero el método del inverso de la distancia se reduce a una media aritmética dentro de la vecindad de búsqueda, o sea, a todas las muestras se le asigna un mismo peso independientemente de la distancia que la separa del punto a estimar.

CAPÍTULO 3: MODELACIÓN 3D DE LOS PARÁMETROS GEOTÉCNICOS EN LA ZONA CENTRAL DE CAIMANERA

Introducción

En este capítulo se presenta el modelo 3D de los parámetros geotécnicos que permitió conocer la distribución espacial del suelo susceptible a la licuefacción.

En la estructura geológica del área, están desarrollados los sedimentos del Pleistoceno Actual, (mQ IV). Estos sedimentos se extienden a lo largo de la línea litoral, hasta la cota absoluta actual de 2 m, yacen principalmente sobre los sedimentos antiguos aluviales – marinos, raramente sobre las rocas de la Formación San Luis. Están representados principalmente por arcillas cienosas y cienos azulados oscuros, y fuertemente salinizados. Las arcillas tienen gran cantidad de restos orgánicos y conchas marinas actuales. El espesor es de 1.0-1.5 m. En algunos casos los sedimentos están destruidos por la abrasión actual y las rocas que se extienden debajo afloran sobre la superficie. Además de los sedimentos descritos anteriormente hay que mencionar la presencia de una capa de poco espesor (0.2-0.5) m sobre las rocas originarias que afloran sobre la superficie antigua, esta capa está representada por el aluvio transformado en suelo (Plá & Arencivia, 2005).

3.1 Caracterización general de los suelos de la zona central

Zona Central: En esta zona se identificaron suelos tipo relleno de arenas arcillosas SC, poca compacta, muy húmeda, de baja resistencia debido a las cercanías del nivel de las aguas subterráneas. También hay sedimentos no consolidados representados por arcillas compresibles, saturadas con abundante materia orgánica, cienos orgánicos de consistencia muy blanda, saturados de origen marino, y sedimentos no consolidados, arcillas compresibles arenosas (CL) de baja plasticidad saturadas. Entre las obras que pudieran verse más afectadas están: Terreno de béisbol, Viviendas en la Zona Deportiva, Servicentro y Sede Universitaria. La zona de emplazamiento (ver Figura 5) es llana con un subsuelo formado con una gruesa capa de cieno marino con intercalaciones de estratos de

arenas finas y de otros materiales, teniendo pésimas cualidades para cementar sobre él (Fernández, 2015).

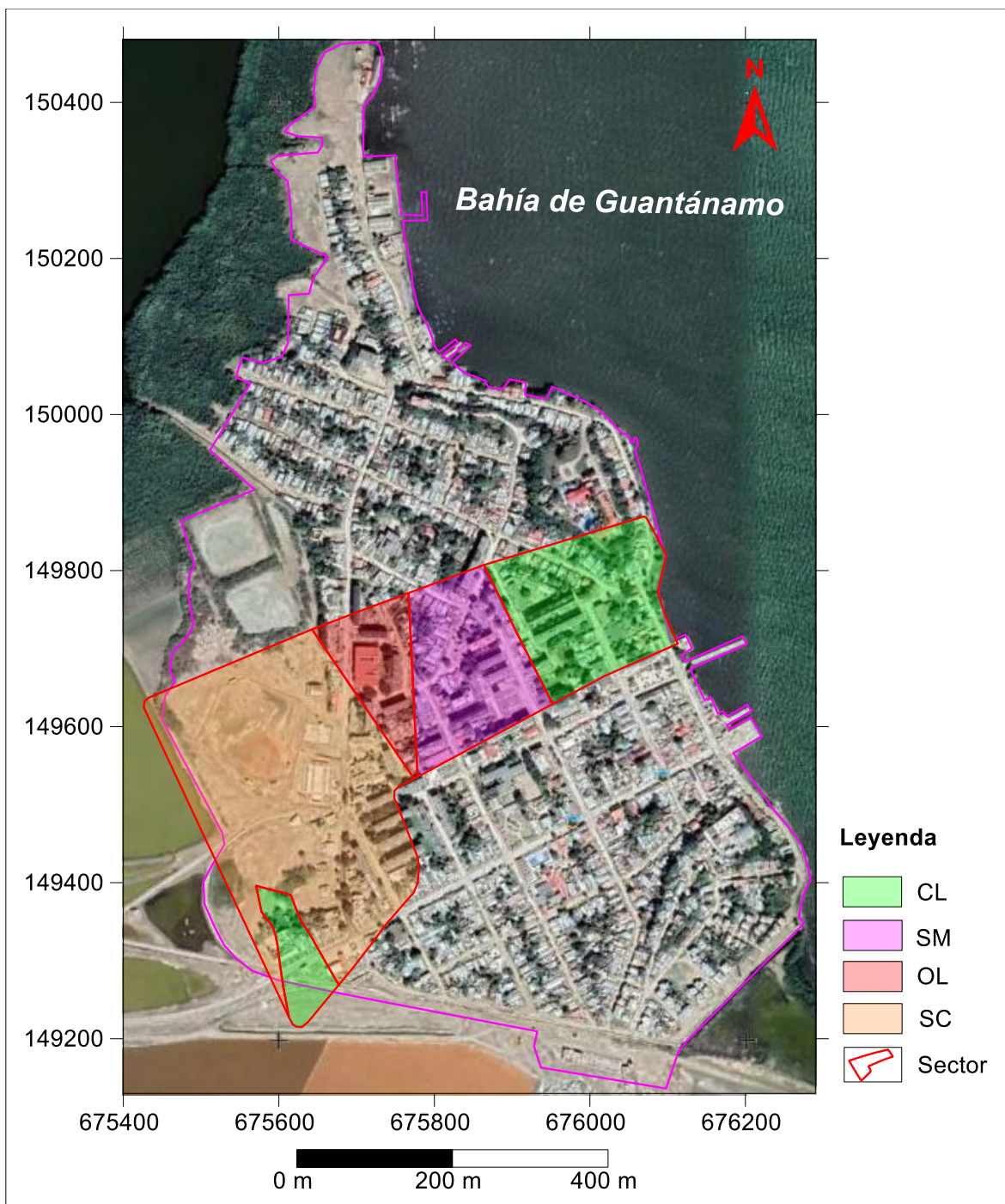


Figura 5: Esquema de ubicación de los suelos de la zona central.

3.2 Obtención del modelo 3D de los parámetros geotécnicos

El software profesional Gemcom Gems V6.4, fue la herramienta básica que permitió este tipo de modelación, el mismo se fundamenta sobre el gestor de base de datos Microsoft Access:

1- Procesamiento de la base de datos

- Creación e importación de las bases de datos en el Gemcom

2- Elaboración del Modelo digital del terreno

3- Estimación de los parámetros geotécnicos utilizados

3.2.1 Procesamiento de la base de datos en Gemcom.

La información que brindaron las bases de datos proviene de muestras de pozos de perforación para estudios geotécnicos. La base de datos se construyó mediante una serie de tablas o ficheros relacionales, vinculadas a través de algunos campos claves. A partir de los datos en formato ASCII se creó una workspace del tipo drillhole, donde se especificó el campo (HOLEID), que sirvió de vínculo entre las distintas tablas.

Adicionalmente se crearon las tablas HEADER, SURVEY, ASSAY y LITHOLOGY, en las cuales se definieron los campos a utilizar en la base de datos. Para cada campo, se asignó un tipo (real, entero, texto), se modificó el valor por defecto y el número de decimales (ver Figura 6). Para la importación de la base de datos se diseñó primero un perfil (profile) de importación para cada tabla. En cada tabla, se listaron los campos en el orden que se establecieron dentro del archivo ASCII.

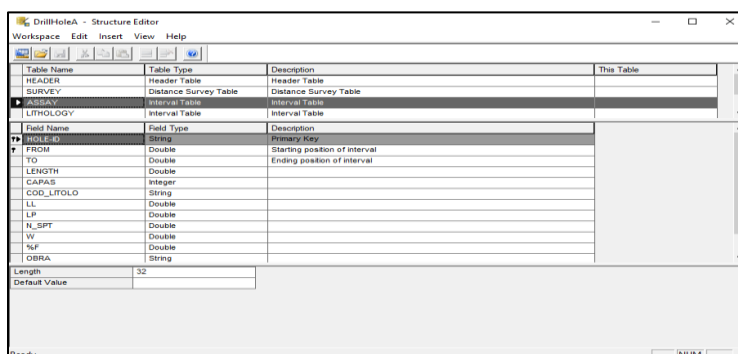


Table Name	Table Type	Description	This Table
HEADER	Header Table	Header Table	
SURVEY	Distance Survey Table	Distance Survey Table	
ASSAY	Interval Table	Interval Table	
LITHOLOGY	Interval Table	Interval Table	

Field Name	Field Type	Description
HOLEID	String	Primary Key
FROM	Double	Starting position of interval
TO	Double	Ending position of interval
LENGTH	Double	
CAPAS	Integer	
COD_LITFOL	String	
LL	Double	
LP	Double	
N_SPT	Double	
W	Double	
NF	Double	
OBRA	String	

Length: 32
Default Value:

Figura 6: Campos utilizados en la tabla ASSAY en la base de datos.

La disposición de los ficheros que conforman la base de datos cuenta con la información litológica de nueve pozos, que contienen las variables geotécnicas y la ubicación espacial.

- ASSAY: Identificación del pozo (HOLE-ID), desde (FROM), hasta (TO), longitud de muestreo (LENGTH), Límite líquido (LL), Límite plástico (LP), Número de golpes del ensayo de penetración estándar (NG-SPT), Humedad natural del suelo (W), Índice de plasticidad (IP) y Porcentaje de fino (% F).
- SURVEY: Identificación del pozo (HOLE-ID), desde (FROM), hasta (TO), Azimut del pozo y Dip.
- LITO: Hole-ID, desde (FROM), hasta (TO), longitud de muestreo (LENGTH), código litológico (LITOCOD).
- COLLAR, ubicación espacial x, y, z del pozo

Figura 7: Estructura de la base de datos utilizada en el software GEMCOM.

3.2.2 Creación de los perfiles de representación de los pozos de perforación.

La visualización de los pozos se basó en un esquema de colores con que se codificaron las propiedades geotécnicas. Para ello, se creó un nuevo profile para la litología a representar (LITHO).

El despliegue de los datos en 3D permitió la interpretación de las variables geotécnicas de los pozos de perforación. En la ventana (Trace) se indicó el desplegamiento de la traza del sondaje y el color, según el código de colores para cada campo determinado en las tablas.

En las perforaciones se cortaron las capas arcillas compresibles (CL), arena limosa (SM), material de relleno (SC), conglomerado (GP), cieno orgánico (OL), arcilla (CH) y Lutita (LU). En la figura 8 se representa en 3D para cada pozo de perforación el código de litología con el identificador del pozo (HOLE-ID).

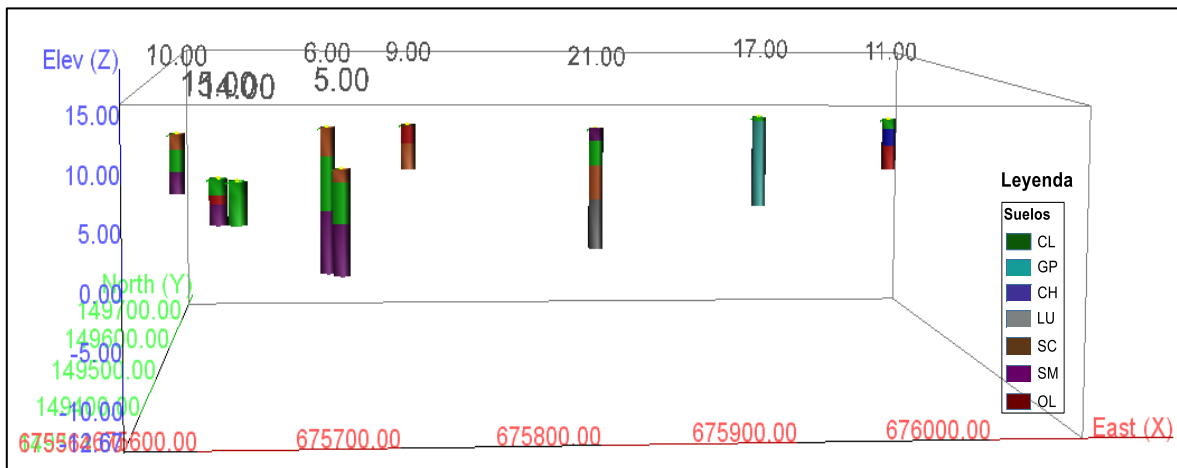


Figura 8: Representación 3D del código de litología en los pozos de perforación.

El levantamiento topográfico a escala 1:6 000 fue utilizado para la creación del modelo digital del terreno (MDT) (ver Figura 9), el cual fue ubicado en un workspace de tipo triangulación. La superficie fue modelada teniendo en cuenta el comportamiento estadístico para cada dirección usando el método “Create Surface by Laplace Griding”.

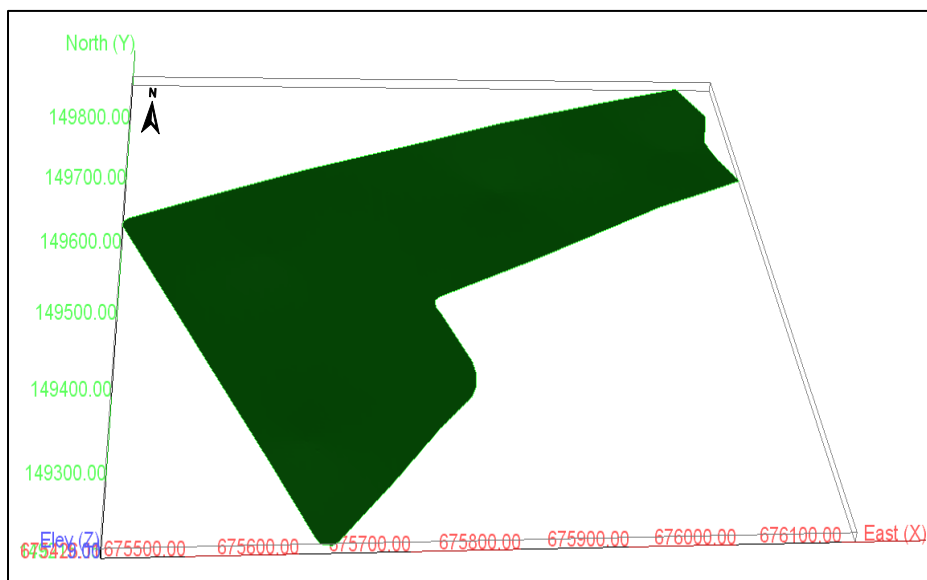


Figura 9: Esquema del modelo digital del terreno 3D.

La combinación del levantamiento topográfico con los resultados de las perforaciones permitió la representación de los diferentes cortes geológicos y la creación de los sólidos de las diferentes litologías en el sector (ver Figura 10).

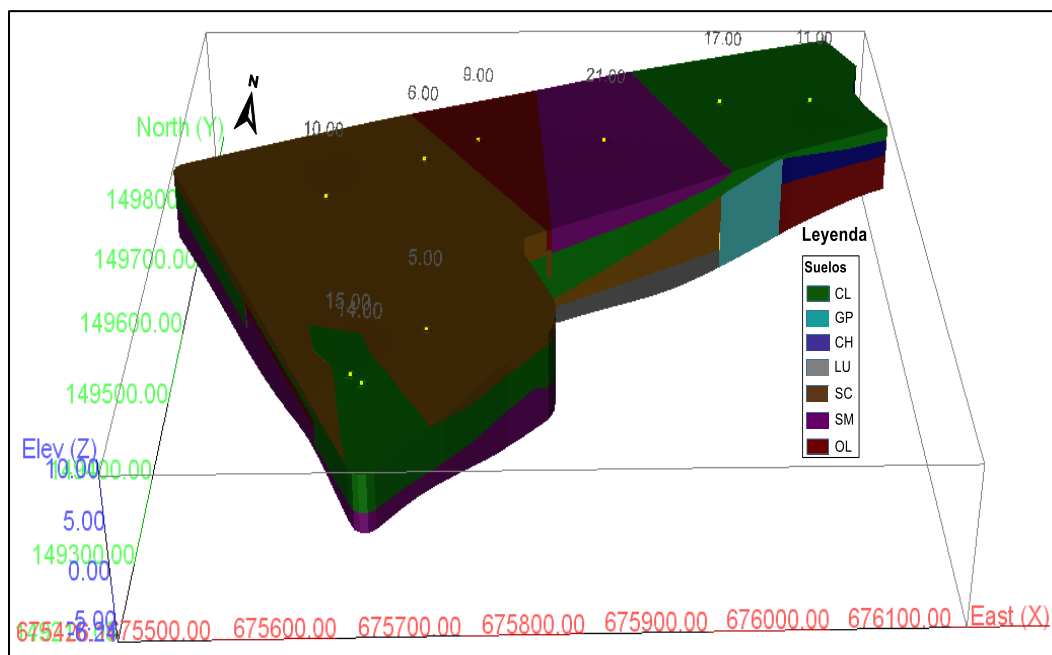


Figura 10: Representación 3D de los sólidos de las litologías presentes en el área de estudio.

El modelo de bloques realizado en 3D, con tamaño de bloque de 10 x 10 m y 0.5 m de altura de bloque, utilizando el Método de Inverso de una Potencia de la Distancia fue completado con la información de la estimación de las variables en estudio. Los intervalos muestreados en los pozos del sector de estudio no garantizaron la representación de los datos para la utilización del metodo Kriging Ordinario, el cual necesita el estudio de la variabilidad espacial a través del análisis de los semivariograma.

Para la obtención del modelo estimado de las distintas variables en el sector de estudio se utilizó el método del Inverso de la Distancia con potencia dos (ID2), el modelo de bloque 3D utilizado presenta la geometría mostrada en la Tabla 1.

Tabla 1: Geometría del modelo de bloque.

Coordenada	Origen	Dimensión	Cantidad de bloques
X	675405	10	75
Y	149155	10	75
Z	-7.75	0.5	40

Los parámetros usados en la estimación de las variables se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2: Parámetros de estimación de las variables.

Variables	*Rotación	Rango (m)			Tipo de Búsqueda	Método de estimación	Cantidad Muestras	
	ADR	X	Y	Z			Mín	Máx
LL	50,0,0	500	250	12	Octante	ID2	1	16
LP	50,0,0	500	250	12	Octante	ID2	1	16
% F	50,0,0	500	250	12	Octante	ID2	1	16
N_SPT	50,0,0	500	250	12	Octante	ID2	1	16
W	50,0,0	500	250	12	Octante	ID2	1	16

*Rotación: A – Azimuth, D – Dip, R – Rake. Según software SGemS 3.0

Para la validación de los resultados logrados en el modelo se comparó la media de las muestras versus al obtenido mediante las estimaciones (ver Tabla 3), brindando un nivel de precisión de los datos por encima del 95 %, donde el error mayor se encuentra en el porcentaje de fino (% F) con 2.91 de diferencia.

Tabla 3: Validación de las variables estimadas.

Parámetro	LI	% F	N_SPT	W
Media de las muestras	37.16	53.70	10.14	26.71
Media del Modelo	36.49	50.79	11.32	26.39
Error	0.67	2.91	-1.18	0.32

3.3 Determinación de la susceptibilidad del suelo a la licuefacción según el criterio chino, a partir del modelo 3D de los parámetros geotécnicos.

El municipio Caimanera se caracteriza por una susceptibilidad de licuefacción, ante terremotos de gran intensidad, en alta, media y baja, según el mapa pronóstico presentado por Fernández, 2015 (ver Figura 11). La zona central, según este estudio, está representada por una susceptibilidad de licuefacción media hacia el oeste, de alta a media en centro y media hacia el este.

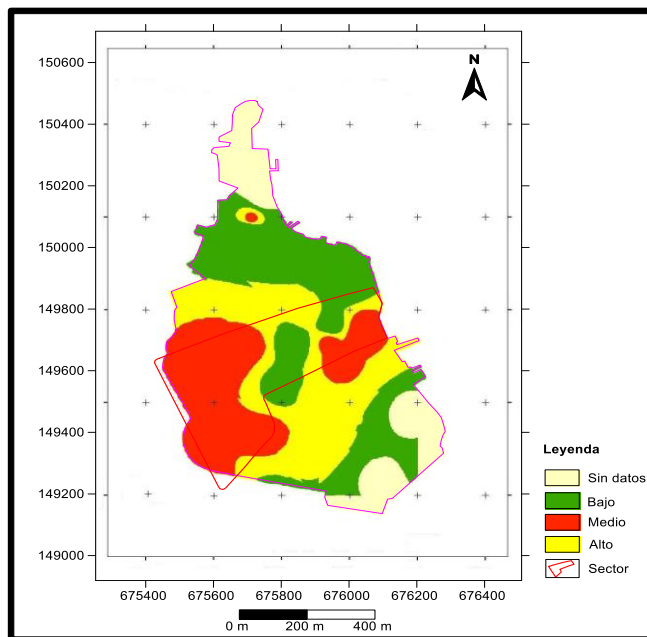


Figura 11: Esquema de ubicación de la zona central, según el mapa de pronóstico de susceptibilidad a la licuefacción (Fernández, 2015).

La susceptibilidad de licuefacción se determinó a partir del modelo 3D en las diferentes obras civiles de la zona central considerando las profundidades de las diferentes capas (ver Tabla 4).

Tabla 4: Representación de las litologías por calas.

1	9.0	Ampliación policlínico	capa vegetal Capa 1 Capa 2	OH CL OL
2	21.0	Funeraria	Capa 1 Capa 2 Capa 3 Capa 4	Relleno CL Arena Lutita calcárea
3	17.00	Hotel Caimanera	Capa 1 Capa 2	CL GP
4	11.00	Sede Univarsitaria	Capa 1 Capa 2 Capa 3	SC RELLENO OL
5	15.00	Servicentro Caimanera	Capa 1 Capa 2 Capa 3	GC CL sedimentos
6	14.00	Sucursal Bandec	Capa1 Capa 2	CL CL-ML
7	10.00	Terreno de béisbol	Capa 1 Capa 2 Capa 3	SC CL SM
8	6.00	Vivienda Zona Deportiva	Capa 1 Capa 2 Capa 3	SC CL SM
9	5.00	Vivienda entrada	Capa 1 Capa 2 Capa 3	SC CL SM

Los suelos tipo arcilla de alta plasticidad (CH), arena arcillosa (SC), arena limosa (SM) y arcilla de baja plasticidad (CL) presentes en el municipio Caimanera

presentan condiciones que hacen que sea favorable la licuefacción de los suelos a partir de sismos de gran magnitud (6,5 y más) (Fernández, 2015).

Teniendo en cuenta lo propuesto por los investigadores (Seed & Idress, 1971); (Wang, 1979) e (Idress, 2001,) y después de interpretar la información con que se contó se puede afirmar que los suelos licuables son los tipos CL, CI/MI, SM y SC, los que cumplen con las condiciones para que se amplifiquen las ondas sísmicas y ocurra la licuefacción de los suelos.

El contenido de fino es uno de los parámetros que define la clasificación de los suelos; permite discriminar entre un suelo de grano grueso o de grano fino. A partir del modelo 3D del comportamiento de este parámetro, se pudo delimitar que la Sede Universitaria es el área de mayor susceptibilidad a licuar teniendo en cuenta los contenidos de finos relativamente bajos (14 %) (ver Figura 12).

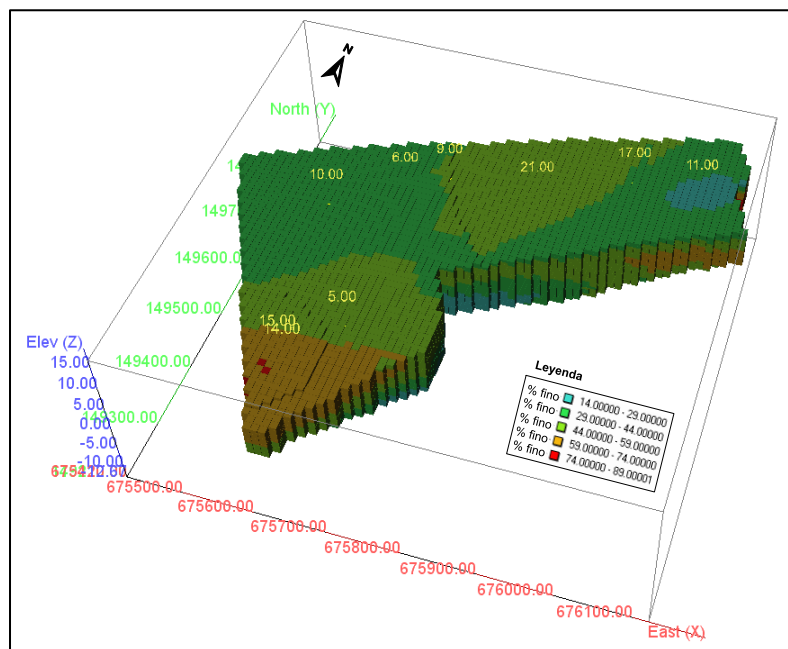


Figura 12: Distribución del por ciento de fino en el Modelo de bloques.

Los suelos con límite líquido bajo (< 35 %) está poco distribuidos (ver Figura 13), fundamentalmente en las viviendas de entrada, Sucursal Bandec y Servicentro en las cotas 5, 14, 15 en la parte sur del sector de estudio; lo que sugiere una alta susceptibilidad a la licuefacción. Según los criterios de Wang (1979) y Brandes

(2003), los suelos con LL inferiores al 32 % y bajos contenidos de finos pueden ser susceptibles a la licuefacción en caso de sismos.

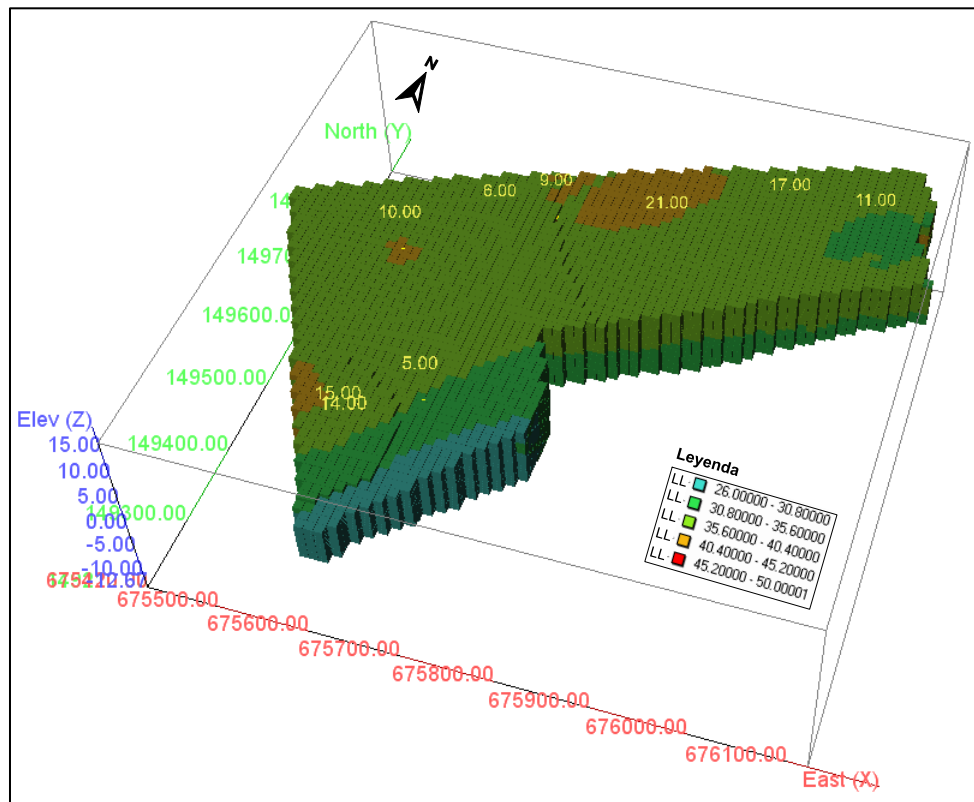


Figura 13: Distribución del límite líquido en el modelo de bloques.

La humedad (W) es un parámetro de variación moderada en la ciudad de Caimanera, donde predominan valores entre 16 % y 47 % (ver Figura 14). Los suelos de depósitos fluviales y eólicos, cuando se encuentran saturados, tienen una alta probabilidad de ser susceptibles de presentar licuefacción.

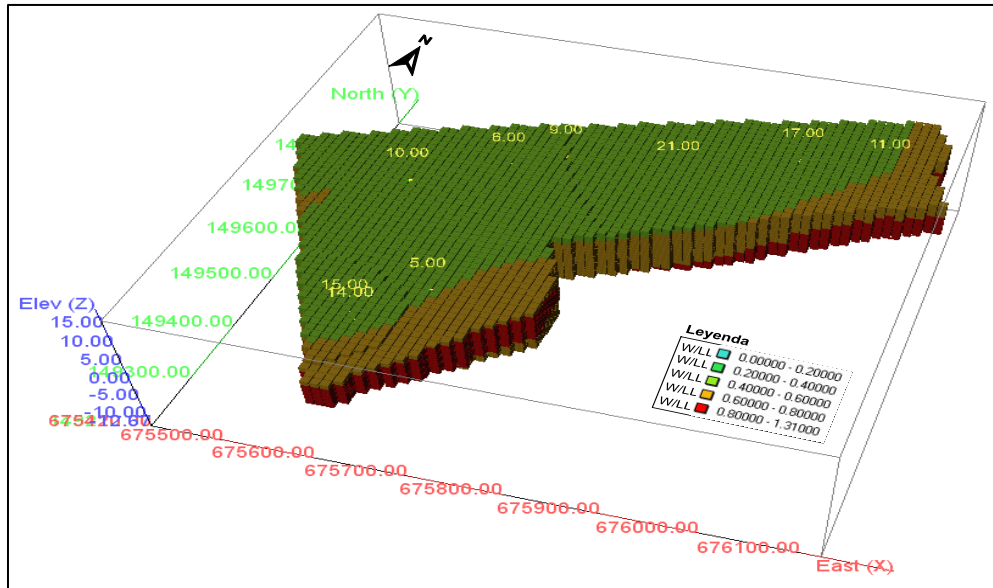


Figura 14: Distribución de la variable W/LI en el modelo de bloques.

El índice de plasticidad (IP) varía notablemente, se aprecia un predominio del IP entre el 3 % y el 18 % (ver Figura 15). Ambas variables (W, IP) se utilizan para establecer aproximaciones sobre las posibilidades de licuefacción (Seed et al. 2003 y Henríquez 2007). El Índice de plasticidad ($< 12\%$) influye notoriamente en la licuefacción de los suelos como se observa en la parte central del sector estudiado (ver Figura 16).

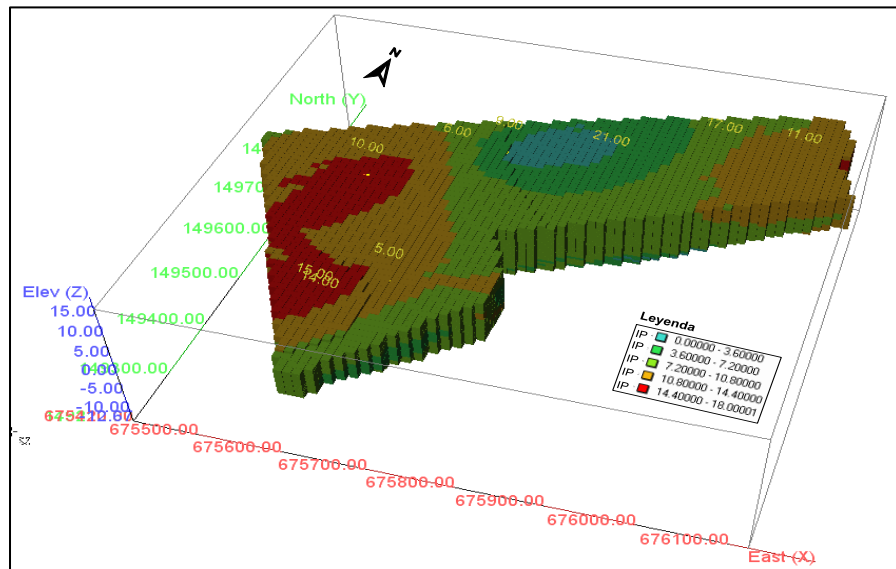


Figura 15: Distribución de la variable IP en el Modelo de bloques.

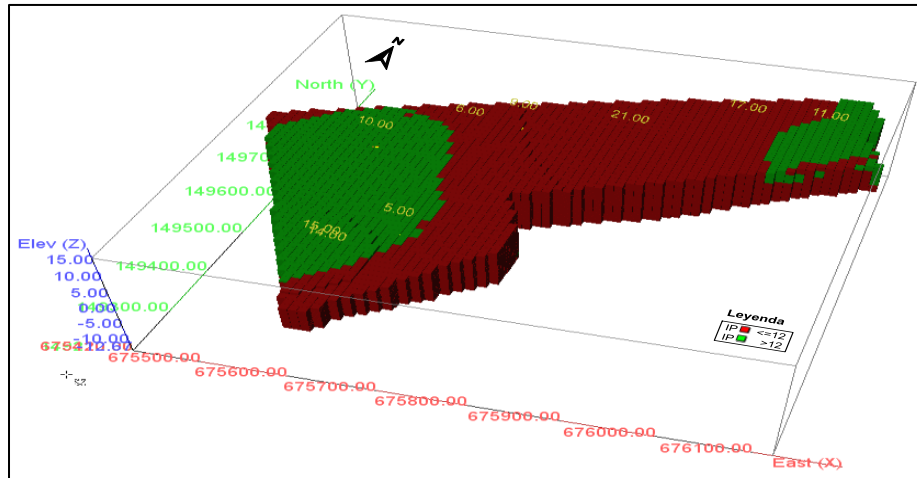


Figura 16: Distribución de la variable índice de plasticidad en el Modelo de bloques
 (IP) Índice plasticidad = $\frac{\text{límite líquido (LI)} - \text{límite plástico (Lp)}}{\text{límite líquido (LI)}} < 12 \%$

Otra de las condiciones necesarias para que tenga lugar la licuefacción es que el nivel freático esté alto, cerca de la superficie, y que el grado de compactación sea bajo, valores N de SPT inferiores a 20 golpes.

La variable N de SPT en el SW del sector de estudio presentó valores estimados superiores a 20 golpes, lo que indica una baja probabilidad a la ocurrencia del fenómeno de licuefacción. El sector W, según el modelo, muestra la mayor zona potencial de ocurrencia de este fenómeno; donde se localiza el policlínico (ver Figura 17).

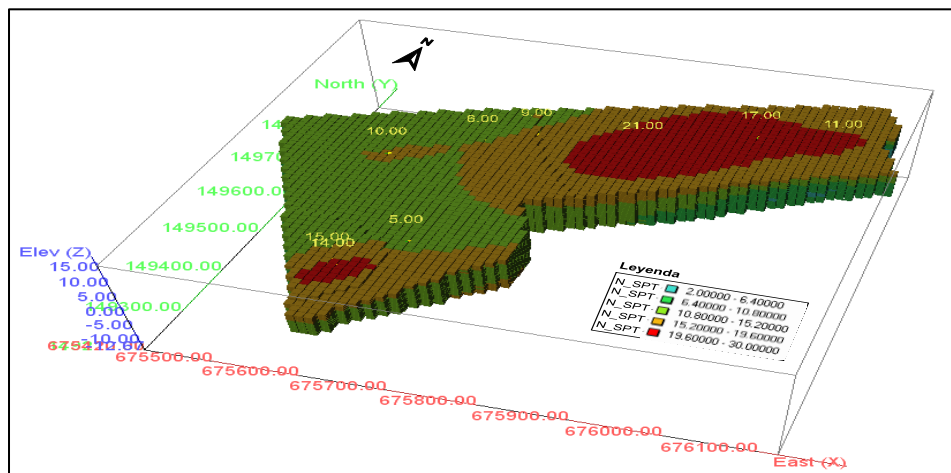


Figura 17: Distribución de la variable N_SPT en el modelo de bloques.

En el modelo se muestran capas con bajos valores de N de SPT, pero dada la alta profundidad a que se encuentran y al peso de las capas suprayacentes, se consideran de bajo potencial ante el fenómeno de licuefacción.

Las clasificaciones obtenidas de los modelos geotécnicos de la región central, en cuanto a la susceptibilidad a la licuefacción, no coinciden con los resultados obtenidos por Fernández, 2015 mostrados en la Figura 11, ejemplo de ello se evidencia en la Sede Universitaria donde según el modelo obtenido en la presente investigación se caracteriza por una alta susceptibilidad. La discrepancia entre estos resultados puede estar motivada por la utilización de los mapas 2D vs modelos 3D, este último considera la distribución vertical de las capas.

Para una mejor ilustración de los resultados arrojados por los modelos se elaboró la Tabla 5, en la cual se clasifica la susceptibilidad a la licuefacción de los suelos del sector de estudio considerando cada parámetro geotécnico. La Figura 18 muestra la distribución de los suelos donde se destaca con mayor porcentaje los suelos de alta susceptibilidad.

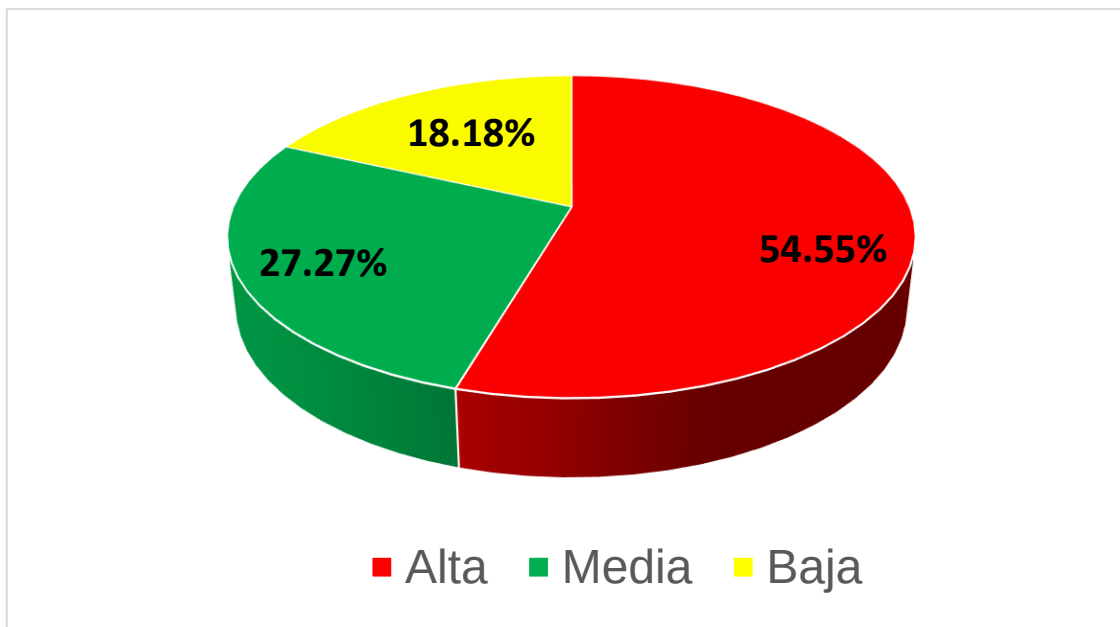


Figura 18: Distribución de la susceptibles de los suelos.

Tabla 5: Clasificación de la susceptibilidad a la licuefacción de los suelos.

		Variables geotécnicas					Susceptibilidad a la licuefacción
Suelos	Calas	LI < 35 %	% Finos < 15	W/LI > 0.9	IP = LI - Lp <12 %	N SPT < 20 golpes	
CL	Todos	(5,11,14)	(11)	(5,6,9)	(5,9)	(5,6,9,10,15,21) 17	Alta
GP	(17)	(17)	no	(17)	(5,6,9,11,14,17)	(17)	Media
CH	(11)	(11)	no	no	no	(11)	Baja
Lutita	(21)	(21)	Al SW	(21)	(21)	(21)	Alta
SC	(5,6,10,21)	(5,21)	(21)	(21)	(5,21)	(5,6,10,21)	Alta
SC 2	9	no	no	no	(9)	(9)	Baja
SM	(5,6,10,14,15,21)	(5,14)	Al sur	(5,6,14,15)	(5,6,14,15,21)	6,10,14,15	Alta
SM 2	no	Al Sur	Norte y Centro	Norte	Sur	Parte central	Alta
Lutita	no	Al Sur	Al Sur	Centro	Sur	Parte central	Alta
SC 3	no	no	Norte	Norte	Sur	Parte central	Media
OL	(9,11,15)	(11)	no	(11)	(9,11)	9,11,15	Media

Teniendo en cuenta el comportamiento del suelo ante la aplicación de estas variables geotécnicas se puede afirmar que la parte central de Caimanera está formada por:

1. Suelos licuables (cumplen con todas las variables geotécnicas)

CL

Capa 2: Compuesta por sedimentos no consolidados (CL), representados por arcillas compresibles, saturadas con abundante materia orgánica de consistencia

muy blanda, con abundantes restos de fósiles. Profundidad (1.21 m), localizada al SW del sector de estudio.

Capa1: Compuesta por arcilla de baja plasticidad (CL) color verde carmelita. Localizada al NE del sector de estudio, se encuentra aflorando.

Capa1: Relleno de arcilla de baja plasticidad arenosa (CL) con grava, 18 % de grava angulosa y roca sedimentaria, 31 % de arena de grano fino a medio, redondeados y 51 % de fino de baja plasticidad, color verde carmelita, suelo compacto. Localizada aflorando al SW del sector de estudio.

Capa2: Arcilla limosa (CL) muy húmeda color gris verde en ocasiones se presenta gris carmelita de consistencia blanda, con fósiles marinos. Localizada al SW del sector de estudio. Profundidad (1.3 m)

Capa 2: Sedimentos no consolidados (CL), representada por arcillas compresibles, saturadas con abundante materia orgánica de consistencia muy blanda, con abundantes restos de fósiles marinos. Localizada en el extremo NW del sector estudiado a una profundidad de 3.07 m.

Capa 2: (CL) Arcilla limosa de baja plasticidad, color verde carmelita, saturada, de consistencia muy blanda. Localizada al W del sector de estudio a una profundidad de 1.6 m

Capa 1: Arcilla limosa (CL) con arena CL-ML 20 % de arena de granos finos a medios, redondeados y 80 % de fino de baja plasticidad (LL: 28 %, IP: 6 %) color verde carmelita, saturado de origen marino localizada al SW del sector de estudio.

Capa 2: Arcilla limosa (CL) muy húmeda color gris verdoso en ocasiones se presenta gris carmelita de consistencia blanda, con fósiles marinos, localizada en la parte central del sector de estudio a una profundidad de 1.4 m

Suelo formado por Lutita

Capa 4: Lutita calcárea color gris carmelita severamente intemperizado, muy fracturado con (FeO) en planos de fracturas, en ocasiones se encuentra

moderadamente intemperizada, de dureza baja. Localizada desde el centro hasta el Sur del sector de estudio

SC

Capa 1: Material de relleno (SC) sin compactar representado por arena arcillosa, color carmelita verdoso, con gravas angulosas de arenisca, cubre toda la parte superior del área donde se encuentra aflorando, yace sobre sedimentos de la capa 2. Se localiza al SW del sector de estudio

Capa 1: Material de relleno (SC) formado por arena arcillosa con gravas de color carmelita claro, poco compacto, muy húmedo y de baja resistencia que se encuentra aflorando en la parte norte del sector de estudio.

Capa 1: Relleno depositado (SC) de arena arcillosa con grava y limo 22 % grava, fragmentos angulosos de lutita calcárea y arenisca de grano finos a medios 32 % de arena de granos finos a medios; 28 % de limo y 18 % de arcilla de baja plasticidad color verde carmelita se encuentra aflorando al NW del sector estudiado

Capa 3: Arena de grano muy fino con arcilla (SC), (Cenagosa) muy húmeda, color gris verde y azul. Presenta materia orgánica, poco compacta. Se encuentra localizado en la parte central del territorio a una profundidad de 4.2 m

Sm

Capa 3: Arena Limosa (SM) con restos fósiles de origen Marino. Localizado al SW a una profundidad 4.96 m

Capa 3: Arena Limosa (SM) con restos fósiles de origen Marino. Localizado al NW del sector de estudio a una profundidad de 8.97 m

Capa 3: Sedimentos no consolidados (SM) representados por cienos orgánicos de consistencia blanda, con abundantes restos de fósiles marinos, arcillas orgánicas

de baja plasticidad, saturadas. Se localiza al SW del sector de estudio a una profundidad de 2.2 m

Capa 1: Relleno compuesto de arena de grano fino a medio, arcilla limosa con material de construcción y abundante materia orgánica, húmeda, poco compacto, está localizada en la parte central del sector de estudio donde se encuentra aflorando.

Capa 3: Sedimentos no consolidados (SM), arcillas compresibles, color carmelita oscura, saturada de baja plasticidad con abundante material orgánico. Cieno orgánico de consistencia muy blanda con abundante resto de fósiles marinos. A una profundidad de 3.9 m en la parte NW del sector de estudio

1. Suelos licuefacción media (incumplen al menos con 1 variable geotécnica)

GP

Capa 2: Conglomerado estratificado (GP) con matriz arenosa, que al ser extraído de su estado natural se comporta como una Grava mal graduada con arena. Se localiza al NE del sector de estudio a una profundidad de 0.46 m

OL

Capa 2: Cieno orgánico (OL), saturado de consistencia blanda, no consolidado color gris azul, olor putrefacto con abundantes fósiles marinos. Presenta arena de granos finos redondeados a una profundidad de 0.2 m, localizándose en la parte norte del sector estudiado.

Capa 3: Cieno orgánico (OL) color gris y verde. Se localiza al NE del sector de estudio a una profundidad de 3.1 m

Capa 2: Sedimentos no consolidados representados por cienos orgánicos de consistencia blanda, con abundantes restos de fósiles marinos y arcillas orgánicas

de baja plasticidad, saturadas profundidad de 1.4 m, localizándose en la parte SW del sector de estudio

Suelos licuefacción baja (incumplen al menos con más de una variable geotécnica)

CH

Capa 2: Relleno compuesto por arcilla de alta plasticidad, color carmelita y verde de consistencia firme. Se localiza en la parte NE del sector de estudio a una profundidad de 1.2 m

SC₂

Se localiza en la parte norte del sector de estudio a una profundidad de 0.10 cm

CONCLUSIONES

1. Los suelos de la zona central de Caimanera están compuestos principalmente por: arena limosa, arcillas limosas, relleno de arena arcillosa y cieno orgánico.
2. El modelo 3D obtenido permitió obtener la distribución espacial orientativa del (límite líquido, humedad natural, número de golpes del ensayo de penetración estándar, porcentaje de fino del suelo y el índice de plasticidad) que inciden en la susceptibilidad de los suelos de la zona central de Caimanera.
3. Los suelos de la región central representados por arcillas compresibles, arcilla limosa, lutita calcárea y cieno orgánico presentan una alta susceptibilidad a la licuefacción.
4. Se pudo delimitar que las arcillas compresibles localizadas en la Sede Universitaria presentan la mayor susceptibilidad a la licuación, teniendo en cuenta los contenidos de finos relativamente bajos (14 %).

RECOMENDACIONES

1. Establecer un monitoreo sistemático en la zona de mayor susceptibilidad a la licuefacción.
2. Incrementar los estudios geotécnicos para garantizar una mayor representatividad de los datos para los estudios de modelación.
3. Modelación de la variable sismicidad para la evaluación de diferentes escenarios susceptibles a la licuefacción.

BIBLIOGRAFÍA

- Bandera, I. (2015). *Evaluación ingeniero – geológica de la ciudad de Caimanera*. Moa: Digital Universitaria.
- Borcherdt, R. D., Wentworth, C. M., Janssen, A., Fumal, T., & Gibbs, J. (1991). Methodology for predictive GIS mapping of spatial study zones for strong ground shaking in the San Francisco Bay Region, CA. *4th International Conference on Seismic Zonation*, (págs. 5-552).
- Brandes, H. G. (2003). *Geotechnical and Foundation Aspects. Handbook*. Honolulu, Haway.
- Chica, O. (1989). *Análisis geoestadístico en el estudio de la explotación de los recursos minerales*. Tesis doctoral, Universidad de Granada, Granada.
- Chinthaka, G. A. (2015). *Evaluación del potencial de expansión de los suelos en el Reparto Hermanos Cruz. Una contribución a la planificación urbana*. Tesis de grado, Universidad de Pinar del Río.
- Chuy, T. J. (1988). Influencia de las condiciones geológicas en la intensidad sísmica de Santiago de Cuba. *Movimientos Tectónicos Recientes de Cuba*, 2, 46-63.
- David, M. (1977). *Geostatistical Ore Reserve Estimation*. Amsterdam: Elsevier Scientific Publishing Company.
- David, M. (1984). *Applied Advanced Geostatistical Ore Reserve Estimation*. Amsterdam Oxford New York copyright Michel David.
- Estévez, E. (2000). 3D Orebody modelling and resource estimation of the Jucaro deposit, Pinar del Río, Cuba. *Minería y Geología*, XVII(2), 27-33.
- Fernández, L. (2015). *“Licuefacción de los suelos generada por sismos de gran magnitud. Caso de estudio Caimanera y Santiago de Cuba”*. Moa: Digital Universitaria.
- Fookes, P. (1997). The First Glossop Lecture: geology for engineers: the geological model, prediction and performance. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, 30, 293–424.
- González de Vallejo, L., Ferrer, M., Ortuño, L., & Oteo, C. (2002). *Ingeniería Geológica*. Madrid: Pearson Eduaction.
- González De Vallejo, L., Ferrer, M., Ortuño, L., & Oteo, C. (2002). *Ingeniería Geológica. Editorial* . Madrid: Prentice Hall.
- González, B. E. (1991). *Estimación del efecto sísmico en la ciudad de Santiago de Cuba*. Tesis doctoral, Instituto de Geofísica y Astronomía, La Habana.

- González, B. E., & Kogan, L. A. (1987). Estimación del grado base para el suelo patrón de la ciudad de Santiago de Cuba. Resultados de las Investigaciones de los Proyectos Geofísicos Internacionales. *Investigaciones Sismológicas*, 10, 1-18.
- González, B. E., & Pérez, L. D. (2000). *Escenarios de peligro sísmico y de fenómenos geotécnicos asociados en municipios urbanos de la ciudad de La Habana*. la Habana: 2do Taller de Mitigación y Prevención de Desastres-UNAICC.
- González, B. E., Mirzoev, K., Chuy, T. J., Golubiatnikov, V. L., Lyskov, L. M., & Zapata, J. A. (1989). Microzonación sísmica de la ciudad de Santiago de Cuba. *Comunicaciones científicas sobre Geofísica y Astronomía*, 1-14.
- Johnson, A. Y. (2009). *Modelo de recursos del sector CRIII-1 del yacimiento ferroniquelífero Cantarana*. Moa: Digital Universitaria.
- Kilby, W. (1995). *The Mineral Potential Project: An Overview*. En: GRANT, B. y J.M. NEWELL. 1994,. Geological Fieldwork .
- Maceo, Y. (2018). *Modelación 3D de las rocas intercaladas en la corteza laterítica a partir de los radargramas de geofísica de GPR, en un sector del yacimiento Camarioca Norte*. Moa: Digital universitaria.
- Martínez, A., & Pérez, I. (2000). *Metodología para la modelación de yacimientos residuales de Níquel. Tesis de ingeniería*. ISMMM, Geología. Moa: Digital Universitaria.
- Matheron, G. (1963). Principles of Geostatistics. *Economic Geology*, 58, 1246-1266.
- Matheron, G. (1971). *The Theory of Regionalized Variables And Its Applications* (Vol. Cahier No 5: 211). Centre of Morphologie Mathematique of Fontainebleau.
- Matos, I. (2016). *Modelo geométrico del yacimiento de cromita podiforme "Victoria II"*. Moa: Digital Universitaria.
- Montero. (s.f.). Recuperado el 21 de Junio de 2019, de <https://www.studocu.com/es/u/1154852>
- Ordaz, A. (2013). *Evaluación de las condiciones ingeniero-geológicas para el pronóstico de la respuesta dinámica de los suelos. Caso de estudio: Ciudad de San Cristóbal, Cuba occidental*. Tesis doctoral, Universidad de Pinar del Río.
- Ordaz, A. (2017). Contribución a la gestión de riesgos urbanos en la ciudad de Pinar del Río mediante un modelo geológico-geotécnico 3D. *Minería y Geología*, 33(4), 423-440.
- Ordaz, A., Estévez, E., Hernández, J. R., & Chuy, T. J. (2014). Modelación de parámetros geotécnicos como contribución a la zonación sísmica local: ciudad de San Cristóbal. *Minería y Geología*, 30(1), 1-16 .

- Plá, M., & Arencivia, E. (2005). *“Drenaje pluvial Caimanera”*. Investigación Ingeniero Geológico, Santiago de Cuba.
- Rienzo, F., Oreste, P., & Pelizza, S. (2008). Subsurface geological-geotechnical modelling to sustain underground civil planning. *Engineering Geology*, 96(3), 187–204.
- Rodríguez, M., & Machín, T. (2013). *Léxico estratigráfico de Cuba*. Instituto de Geología y Paleontología. La Habana: Centro Nacional de Información Geológica.
- Seed, R. B., Cetin, K. O., Moss, R. E., Kammerer, A. M., Wu, J., Pestana, J. M., . . . Faris, A. (2003). Recent advances in soil liquefaction engineering: a unified and consistent framework. *26th Annual ASCE Los Angeles Geotechnical Spring Seminar, Keynote Presentation, H.M.S. Queen Mary, Long Beach*, (págs. 1-72). California.
- Technical Committee for earthquake geotechnical engineering, T. (1999). *Manual for zonation on seismic geotechnical hazards*. The Japanese Geotechnical Society.
- Tomás, R., Cuenca, A., Delgado, J., & Doménech, C. (2004). Diseño de un modelo geológico-geotécnico 3D de la vega baja del río Segura (Alicante, Se España). *XVI Congreso internacional de ingeniería gráfica* (págs. 3-4). Zaragoza y Huesca, España: INGEGRAF.
- Tuttle, M., Law, K. T., Seeber, L., & Jacob, K. (1990). Liquefaction and Ground Failure Induced by the 1988 Saguenay, Quebec, Earthquake. *Canadian Geotechnical Journal*, 27, 580-589.
- Urra, J. L. (2015). *Modelación 3D de elementos químicos de la limonita en la presa de rechazo nueva, empresa Pedro Sotto Alba*. Moa: Digital Universitaria.
- Vidal, E. (2010). *Cálculo de la conductividad hidráulica de los acuíferos a partir de su resistividad eléctrica. Validación práctica*. Moa.
- Wang, W. (1979). *Some Findings in Soil Liquefaction, Research Report, Water Conservancy and Hydroelectric Power Scientific Research Institute*. Beijing.
- Youd, T. L., & Perkins, D. M. (1978). Mapping of liquefaction induced ground failure potential. *J. Geotech. Engrg. Div., ASCE*, 104(4), 433-446.
- Youd, T. L., & Perkins, D. M. (2015). *Geotechnical design procedure: liquefaction potential of cohesionless soils*. New York: Department of transportation geotechnical engineering Bureau.
- Zapata, J. A. (1996). *Utilización de variantes metodológicas de variantes metodológicas de microzanación sísmica en la ciudad de Santiago de Cuba*. Santiago de Cuba: CENAI.

Figura 1: Mapa de ubicación geográfica del municipio Caimanera. Elaboración propia. ...	15
Figura 2: Formaciones geológicas del municipio Caimanera.....	16
Figura 3: Esquema de profundidad del nivel freático en el municipio Caimanera, provincia Guantánamo (Fernández, 2015).....	19
Figura 4: Flujograma de las etapas que comprenden la metodología de la investigación. 22	
Figura 5: Esquema de ubicación de los suelos de la zona central.....	29
Figura 6: Campos utilizados en la tabla ASSAY en la base de datos.	30
Figura 7: Estructura de la base de datos utilizada en el software GEMCOM.....	31
Figura 8: Representación 3D del código de litología en los pozos de perforación.....	32
Figura 9: Esquema del modelo digital del terreno 3D.	33
Figura 10: Representación 3D de los sólidos de las litologías presentes en el área de estudio.....	33
Figura 11: Esquema de ubicación de la zona central, según el mapa de pronóstico de susceptibilidad a la licuefacción (Fernández, 2015).	35
Figura 12: Distribución del porcentaje de fino en el Modelo de bloques.	37
Figura 13: Distribución del límite líquido en el modelo de bloques.	38
Figura 14: Distribución de la variable W/LI en el modelo de bloques.	39
Figura 15: Distribución de la variable IP en el Modelo de bloques.	39
Figura 16: Distribución de la variable índice de plasticidad en el Modelo de bloques	40
Figura 17: Distribución de la variable N_SPT en el modelo de bloques.	40
Figura 18: Distribución de la susceptibles de los suelos.....	41