

*Universidad de Matanzas
Sede "Camilo Cienfuegos"
Facultad de Ciencias Técnicas*



**SELECCIÓN DEL MÉTODO MÁS EFICIENTE PARA MEDIR
ASENTAMIENTOS EN DIQUES.
CASO DE ESTUDIO: DIQUES DE CONTENCIÓN DE CAYO BUBA,
VARADERO**

Trabajo de Diploma en Ingeniería Civil

Autor: Ernesto Romero Carmenate

Tutor: MSc. Ing. Manuel Pedroso Martínez

Matanzas, 2019

DECLARACIÓN DE AUTORIDAD

Por medio de la presente declaro que yo, Ernesto Romero Carmentate soy el único autor del presente Trabajo de Diploma y, en calidad de tal, autorizo a la Universidad de Matanzas Sede "Camilo Cienfuegos" a emplearla como material de consulta.

Y para que así conste, firmo el presente a los ____ días del mes de _____ de 2019.

Handwritten signature of Ernesto Romero, consisting of a stylized 'E' and 'R' followed by the name 'Romero' in cursive.

NOTA DE ACEPTACIÓN

Miembros del Tribunal:

Presidente

Secretario

Vocal

DEDICATORIA

A mis padres, por haberme dado la vida y apoyarme en cada momento, sin importar las circunstancias y acompañarme hasta el fin del mundo si es preciso.

A mi hermano porque aunque estés lejos, cada día te tengo presente.

A mi niña malcriada, Yurisleydis, por haber compartido estos años, por el amor, la amistad, por apoyarme y apoyarme siempre. Por ponerme los pies en la tierra cada día y hacerme más humano.

A mis sobrinos, espero servirles de inspiración y que estudien, que el conocimiento es algo que no pesa y de lo que no los podrán despojar jamás.

A mi familia por darme tanto cariño, he aquí el primer Ingeniero Civil, y esperemos que en las nuevas generaciones venga alguno más.

A todos mis amigos, la familia que he ido conociendo con el paso de los días y con los que he aprendido mucho y vivido cosas inolvidables, no cambio ni un minuto del tiempo que hemos pasado juntos y aunque a veces existan kilómetros de separación los tengo presente cada día.

AGRADECIMIENTOS

A mis padres que han dado todo para hacerme quien soy, por enseñarme a ser persona, por no perder la paciencia y dedicarme cada segundo de tiempo.

A mi hermano , por enseñarme de esta vida y desde pequeño cuidarme y velar por mí aun estando lejos.

A Yuri por estar cada día en estos más de 4 años, y darme todo el amor del mundo.

A los nenes Ronald, Lidelena, Andrew y la recién nacida Lia, por cada día a pesar de su corta edad darme lecciones, por sacarme una sonrisa aun en esos días grises y hacerme sentir como un niño más.

A Mami y Papi, por haberme dado todo el amor del mundo y ver por mi felicidad en todo momento.

A mi tía Araelys por darme tanto amor de madre y apoyarme en todo momento.

A Leo por ser incondicional y estar siempre que lo he necesitado.

A mis abuelos Carmen y Andrés por arroparme y darme ese calor que solo los abuelos saben.

A mis tíos Bertha Elena, Andresito y Yami por siempre tener la palabra amable, cariñosa y aportarme tanto en mi crecimiento como persona.

A mis primos Leandro, Andrés, y Anabel por los buenos momentos que hemos pasado.

A mis suegros Olguita y Oriol por cuidarme y mimarme como un hijo más.

A Yeny y Juan porque aún sin conocernos y haber convivido mucho, me tratan como si fuese de su sangre.

A mi tutor, profesor y amigo, Manuel, por enseñarme y prepararme para la vida, por en estos 5 años siempre haberme guiado a ser un profesional de bien, si hoy soy quien soy es en parte gracias a ti.

A Elianny, Mily, Yily, Anto, y toda la familia de Cantel y Santa Clara, gracias por todo.

A Eduardo por ser el mejor amigo del mundo, oírme a aconsejarme, por ser un hermano.

A Alfre, Zahira, Yoa y Vero por estar ahí y dejarme ser parte de sus vidas.

A mis amigos de la infancia Adrián, Cristian, Ernestico, Sandy, Ernesto y Lianne con los que aprendí muchas cosas de esta vida y sin los cuales no fuese la misma persona hoy.

A, Sheila, Lia, e Iliam gracias por haber estado ahí durante momentos muy lindo de la Secundaria, y continuar ahí hoy en día sin importar el paso del tiempo, totalmente incondicionales.

A mi grupo 8 de la Vocacional, sin mencionar nombres porque cada uno es especial y significan mucho para mí, con ustedes aprendí a ser mejor persona y otras muchas que está de más decir, cada día pienso en los buenos momentos que vivimos, de los mejores.

A todos con los que he compartido aula en la Universidad, los que nos graduamos este año y los que no, de cada uno llevo recuerdos inolvidables, otra familia más.

A Ari, Pepe y Lianet, junto a ustedes este trayecto ha sido más ameno y agradable, por las horas de felicidad y las de no tanto, sin ustedes esto no hubiera sido lo mismo.

A todo y cada uno de los maestros y profesores que he tenido desde el Pre Escolar hasta la Vocacional por formarme y educarme, por todo lo bueno y malo que me enseñaron.

A mis profesores de la Universidad y compañeros de trabajo, cada uno de ustedes a dejado huellas en mi persona y les doy las gracias por ser más que profesores.

A todo el que de una forma u otra a formando parte de mi vida, en los mejores y peores momentos, lo que soy hoy lo he ido aprendiendo de cada uno de ustedes, a veces sin conocerlos.

No me alcanzaría la vida ni estas hojas para agradecerles a todos ustedes, los que llevo en mi corazón .

RESUMEN

La presente investigación tiene como objetivo principal seleccionar el método más eficiente para medir los asentamientos de diques, con caso de estudio los diques de contención de Cayo Buba, Varadero; para la cual se analizan las principales clasificaciones y características de los diques, los fallos más frecuentes en ellos, así como los tipos de asentamientos, y recordaciones para la vigilancia de estos movimientos verticales. Se determina la precisión necesaria para la calcular los asientos, los métodos para el monitoreo de las deformaciones tradicionales, dígase Niveles Óptico y Estaciones Totales, y algunos más modernos como LiDAR, InSAR, DGPS, Celdas de asentamiento, Sonda Hidrostática de asientos y el Sistema de Control de Terraplenes. Se valora cual sería el más eficiente para medir los asientos de los diques de contención de Cayo Buba. Se reconoce el estado actual de las obras en ejecución en las parcelas 21 y 20, se establece una metodología para realizar las mediciones a partir del equipo seleccionado para realizar los trabajos.

Palabras claves: asentamientos; diques; monitoreo de las deformaciones; precisión; metodología.

ABSTRACT

The main purpose of the present investigation is to select the most efficient method for measuring dyke settlements, with the case study of the containment dams of Cayo Buba, Varadero; for which the main classifications and characteristics of the dams are studied briefly, the most frequent failures in them, as well as the types of settlements, and reminders for the surveillance of these vertical movements. The necessary precision for the determination of seats, the methods for the monitoring of the traditional deformations are analyzed, such as Optical Levels and Total Stations, and some more modern ones such as LiDAR, InSAR, DGPS, Settlement Cells, Hydrostatic Seat Probe and the Embankment Control System. It is assessed which would be the most efficient to give control to the seats of the containment dams of Cayo Buba. The current status of the works in execution is recognized in plots 21 and 20, a methodology is established to perform the measurements from the selected equipment to carry out the works.

Keywords: settlements; dykes; monitoring of deformations; precision; methodology.

TABLA DE CONTENIDO

Introducción	1
Capítulo 1 "Marco teórico referencial de la investigación"	8
1.1. Los diques	8
1.1.1. Definición de diques.....	8
1.1.2. Clasificación de los diques.....	9
1.1.3. Elementos que conforman un dique.	12
1.1.4. Tipos de fallas de los diques.	13
1.2. Asentamientos.....	19
1.2.1. Generalidades.....	19
1.2.2. Causas de las deformaciones en las obras:.....	19
1.2.3. Clasificaciones de los asentamientos	20
1.2.3.1. De acorde al grado de uniformidad en su distribución.....	20
1.2.3.2. Clasificación de los asentamientos en función del tiempo.....	20
1.2.4. Asentamiento inmediato (Asentamientos elásticos)	21
1.2.5. Asentamiento por consolidación primaria.....	22
1.2.6. Asentamientos por consolidación secundaria	24
1.2.7. Recomendaciones para vigilar los asentamientos	24
1.3. Área de estudio	25
Conclusiones parciales del capítulo.....	29
Capítulo 2: " Métodos para la medición de asentamientos en diques"	30
2.1. Precisión necesaria en la determinación de asentamientos.	30
2.2. Criterios sobre la periodicidad de las observaciones de deformaciones	31
2.3. Métodos para la medición de asentamientos.	32
2.3.1. Métodos clásicos para la medición de asentamientos:.....	33
2.3.1.1. Niveles	33
2.3.1.2. Estación Total en las observaciones de los asentamientos	36
2.3.2. Métodos de tecnología avanzada para la medición de asentamientos	39
2.3.2.1. LiDAR.....	39
2.3.2.2. InSAR	42

2.3.2.3. GPS diferencial (DGPS)	45
2.3.2.4. Celdas de asentamiento	48
2.3.2.5. Sonda Hidrostática de Asientos (Profiler).....	50
2.3.2.6. Sistema de Control de Terraplenes DSM.....	51
Conclusiones parciales del capítulo.....	52
Capítulo 3: " Selección del método más eficiente para medir asentamientos en diques. Caso de estudio: Diques de Contención de Cayo Buba, Varadero "	53
3.1. Estado actual de las obras en ejecución.....	53
3.2. Selección del método de medición a utilizar	54
3.3. Establecimiento de la metodología de las mediciones.	57
3.4. Desarrollo de la metodología.....	59
Conclusiones	64
Recomendaciones	65
Referencias Bibliográficas.....	66
Anexos	71

INTRODUCCIÓN

La cayería al norte de la provincia de Matanzas es una fabulosa zona de atracción turística. Con el fin de ampliar la capacidad hotelera del país, la Empresa Banyan Tree tiene la visión de que el desarrollo integral de Cayo Buba superará los estándares y expectativas de los mejores resorts en el Caribe. Están seguros de que el desarrollo en el lugar se reconocerá como un resort de clase mundial, insuperable.

Cayo Buba pertenece al archipiélago Sabana –Camagüey, constituye uno de los primeros cayos en dirección Oeste–Este. Se localiza al SE de la Península de Hicacos, desde los 23°10'36" hasta 23°11'30" de latitud Norte y los 81°06'36" hasta 81°07'30" de longitud Oeste. Sus dimensiones aproximadas son 62 ha, su largo es de 1500 m y su porción más ancha 500 m aproximadamente; limita con:

- Por el Norte: con el Canalizo de Buba que lo separa de Cayo Libertad con profundidades de hasta 5 m
- Por el Oeste: con las aguas de la Bahía de Cárdenas con profundidades entre 2-6 m
- Por el Sur: con el canal de acceso a la Bahía de Cárdenas, con profundidades de hasta 8 m que lo separa de Cayo Diana
- Por el Este: con aguas exteriores o de intercambio de la Bahía de Cárdenas con profundidades entre 2-5 m

El proyecto inmobiliario incrementará el desarrollo turístico de la zona, que por sus características naturales debe ser considerado como “exclusivo” de alta categoría, donde se pueda brindar una privacidad y seguridad extrema al visitante en contacto directo con el medio.

El complejo será diseñado y operado de una manera que tenga en cuenta su entorno natural que lo rodea. En la estrategia de desarrollo se prioriza mantener el número de habitaciones original en 480 llaves, crear 2 resorts de diferentes mercados y clase para tener variedad y generar la máxima experiencia al huésped donde existan instalaciones compartidas y un Back of House centralizado para lograr mayor eficiencia, mantener el humedal como área de reserva verde de mangle para la exploración del huésped con el

medio ambiente y el laboratorio marino como parte de la responsabilidad social corporativa, diseñar el mejor hotel del Caribe y crear un sentido de hogar con la cultura cubana.

Desde hace muchos miles de años el nivel del mar ha estado elevándose por causas naturales. Pero a partir de la revolución industrial, los gases de efecto invernadero que se emiten a la atmósfera por la humanidad han provocado una aceleración del calentamiento global, con consecuencias negativas para el medio ambiente y la sociedad. El calentamiento global y la elevación del nivel medio del mar, tiene una serie de consecuencias que ya están presentes y habrán de acentuarse en el futuro. La elevación del nivel del mar se estima que para el año 2050 alcance más de 37 cm y hasta el 2100 el nivel medio del mar pudiera llegar hasta 1 metro por encima del nivel actual.

Al ser Cayo Buba un área llana baja la sobrelevación meteorológica del nivel del mar se observa habitualmente durante la ocurrencia de fenómenos meteorológicos extremos que generan vientos y olas de consideración: entiéndase huracanes, frentes fríos, bajas extratropicales, en una palabra: tormentas. Sus efectos principales, si es intensa, es la inundación costera por penetración del mar que afecta a todo tipo de instalación ubicada en la costa, además de que al aumentar la profundidad en las zonas cercanas a la costa facilita la llegada de olas mayores a la misma y el acercamiento a ésta del punto de rotura de las olas lo que aumenta su fuerza destructiva, de ahí la importancia que reviste su análisis para el diseño de obras costeras.

Como solución a los problemas geológicos en la "Conceptualización del Plan General de Relleno de Cayo Buba" elaborado por GEOEM (GeoCuba Estudios Marinos) dado en La Habana, a los 29 días del mes de septiembre del 2015 se proponen dos variantes de relleno, y para darle solución a las inundaciones en ambas se comprende la realización de diques. Estas obras perimetrales y de división interna de las parcelas cumplen la función de confinación de la arena y del agua acompañante producto del dragado.

Para la ejecución de los trabajos se establecieron dos parcelas, la parcela 20 y la 21. El día de hoy se trabaja en los diques de ellas, pero aún no se les da seguimiento a los asentamientos.

Todos los estudios referentes al tema del asentamiento de diques señalan que el conocimiento de este proceso en las zonas a construir es fundamental antes de dar la altura de proyecto.

En el mundo para medir asentamiento en diques se emplean las más altas tecnologías. Aparejado al desarrollo tecnológico ha ido el perfeccionamiento de Estaciones Totales y Niveles de Digitales, siendo los métodos más usados para la medición de asentamientos. Sin embargo, han aparecido en el sector tecnologías alternativas que ganan terreno en el mercado al simplificar las tareas, minimizar tiempos de trabajo y poseer altas precisiones. En la Provincia de Guangxi (China), en Masjed-Soleyman (suroeste de Irán) y en Barcelona se ha usado para computar la deformación en dique o presas de tierra la obtención de datos a partir de la tecnología InSAR; el GPS Diferencial (DGPS) se usó en la presa de tierra La Aceña (España) y las celdas de asiento en los muros de tierra de la Presa Gallito Ciego. En Cuba de manera general el control de asientos en diques se limita en la mayor parte a Niveles, y en extraña ocasión se emplean Estaciones Totales; se desconoce por el autor el uso otros medios para estas mediciones verticales en el área foránea.

De las diversas tecnologías empleadas a nivel mundial para determinar con gran precisión los valores de los asientos. La **situación problemática** de la investigación es ¿Cuál será el método más eficiente para medir asentamientos en diques, específicamente los diques de convención de Cayo Buba?

La situación existente lleva a plantear el siguiente **problema científico**: ¿Cómo realizar con los métodos contemporáneos existentes la medición de asentamientos de diques, específicamente los diques de convención de Cayo Buba, para lograr la máxima eficiencia posible?

Se define como **hipótesis** que si se analizan los conocimientos y tecnologías actuales referentes al tema se pudiera seleccionar el método más eficiente para medir asentamientos en diques.

Para dar respuesta a la problemática existente se precisa como **objetivo general**: Seleccionar el método más eficiente para medir asentamientos en diques, como caso de estudio los diques de contención de Cayo Buba, Varadero. Para dar cumplimiento al problema científico y al objetivo general se definen como **objetivos específicos**:

- Elaborar el marco teórico referencial concerniente a los diques y asentamientos
- Analizar los métodos actuales que se pueden emplear para la medición de los asentamientos en los diques
- Seleccionar el método más eficiente para medir asentamientos en diques, como caso de estudio los diques de contención de Cayo Buba, Varadero

Pertinencia: La investigación constituirá un referente a la hora de seleccionar el método más eficiente para medir asentamientos en diques, y se puede utilizar en los diques de contención de Cayo Buba, Varadero.

Las tareas principales de la investigación están directamente vinculadas con los objetivos específicos al ser estos la guía para lograr el éxito, ellas son:

- La investigación de los conocimientos existente a nivel internacional, nacional y local referente al tema de investigación
- El análisis de las técnicas actuales para la medición de los asentamientos en los diques
- La selección el método más eficiente para medir asentamientos en diques, como caso de estudio los diques de contención de Cayo Buba, Varadero

Métodos científicos:

Métodos teóricos:

- Analítico-sintético: Una vez se definió el objetivo general y las tareas de la investigación, se comenzó la recopilación de información referente al tema, se establecieron puntos de concatenación entre la presente indagación y materiales anteriores en cuanto a enfoque, visión y perspectiva. Al localizar la información en

las diferentes fuentes bibliográficas, se realizó el fichaje para su procesamiento, el cual consistió en una lectura exhaustiva con el fin de describir los elementos relacionados en la búsqueda y se estableció conexiones entre los mismos que posibilitaron el logro de los objetivos y el cumplimiento de las tareas de investigación

- Inductivo-deductivo: Se tomó como referente los resultados de investigaciones referidas a la medición de asentamientos en diques y se analizaron nuevos métodos de medición que pueden ser aplicados en el área de estudio
- Histórico-lógico. Como parte de la caracterización del objeto de estudio, y como resultado de la revisión bibliográfica, se elaboró una reseña con la descripción de los antecedentes de los estudios de los métodos para la medición de asentamientos en diques, tanto en el ámbito nacional como en el internacional

Métodos empíricos:

- Revisión de documentos: Para el desarrollo de la investigación se consultaron diferentes fuentes tanto en formato digital como impreso en diferentes idiomas, con el objetivo de profundizar en aspectos fundamentales de los métodos para la medición de asentamientos en diques
- Entrevista: Se realizaron entrevistas estructuradas de carácter abierto, para facilitar al entrevistado que diera cualquier respuesta que considerase apropiada sobre hechos, situaciones, acontecimientos, opiniones y actitudes que involucren al caso de estudio. Las mismas fueron de tipo directiva centrada, pues tuvieron el objetivo de conocer las opiniones de diferentes personas con respecto al tema objeto de la investigación, fundamentalmente funcionarios de los organismos incidentes en la construcción de los diques de contención de Cayo Buba

Los **valores** que se destacan de la investigación son:

- Valor económico: Utilizar el método más eficiente para medir asentamientos de los diques, como los diques de contención de Cayo Buba para que así no se atrase el cronograma de ejecución.

- Valor práctico: Con este trabajo de diploma se propone el método más eficiente para medir asentamientos de diques, como los diques de contención de Cayo Buba.

El Trabajo de Diploma se estructura de la siguiente forma:

- Resumen / Abstract
- Índice
- Introducción

Se define la situación problemática y se formula el protocolo de la investigación en el que se precisan el problema científico, el objetivo general, los objetivos específicos y la hipótesis, así como los métodos utilizados en la investigación.

- Capítulo 1: "Marco teórico referencial de la investigación"

En este capítulo se recoge el estado del arte, donde se precisan conceptos elementales fundados en la información de los materiales recopilados, como son el de dique, sus clasificaciones, elementos que los conforman y los tipos de fallas más frecuentes que se producen. También el de asentamientos, las causas de las deformaciones en las obras y las clasificaciones de los asentamientos. Y por último se conoce del área de estudio.

- Capítulo 2: "Técnicas actuales para la medición de los asentamientos en los diques"

En este capítulo se analizan las precisiones necesarias en la determinación de asentamientos, la periodicidad con la que deben realizarse las observaciones de deformaciones y las técnicas actuales para la medición de los asentamientos en diques.

- Capítulo 3: "Selección del método más eficiente para medir asentamientos en diques. Caso de estudio: Diques de Contención de Cayo Buba, Varadero".

A partir del caso de estudio se selecciona el método más eficiente para la medición de los asentamientos en los diques de Cayo Buba y la exigencia necesaria en la exactitud de las observaciones.

- Conclusiones.
- Recomendaciones.
- Bibliografía.
- Anexos.

CAPÍTULO 1 "MARCO TEÓRICO REFERENCIAL DE LA INVESTIGACIÓN".

Los suelos son el más antiguo de los materiales de construcción y el más complejo de cuantos se conocen. Su variedad es enorme y sus propiedades, variables en el tiempo y el espacio, son difíciles de entender y medir. El siglo XX constituyó el de mayor esfuerzo de los científicos para resolver los problemas que enfrentaba la Mecánica de Suelos y con ello el diseño y construcción de presas de tierra. (Novoa, 2002)

En ocasiones suelen ser confundidos los diques con las pequeñas presas de tierra al poseer grandes similitudes en su finalidad y funcionamiento estructural. El principal elemento distintivo de cada obra es el período en que se hallan expuestos a la acción del agua. Las presas se usan para acumular agua, de ahí que estén expuestas en todo momento y los diques al diseñarse para evitar las penetraciones de agua solo intervienen durante las inundaciones.

1.1. Los diques

1.1.1. Definición de diques.

El hombre desde que se estableció a márgenes de ríos o costas lidió con sus desbordamientos o penetraciones al subir el agua por encima del nivel del terreno, necesitó encausar las aguas para su uso o proteger de la fuerza destructora de las olas determinadas estructuras o áreas. Una ingeniosa solución para resolver estos problemas fue establecer muros lo más impermeables posibles, usando las materias primas que tenían a su disposición; madera, piedras y tierra fueron los básicos. En el 2019 continúan usándose los dos últimos antes mencionado y se les suma el hormigón.

En la esfera internacional destacan recientemente los escritos sobre el tema de (Porto y Gardey, 2017), (Gil y Orozco, 2016), (Chaquea y otro, 2016) y (Burcharth, Macineira y Noya, 2015). Sin embargo, en lo que va década tanta a nivel nacional como provincial son escasas las investigaciones sobre los diques, sobresalen (Milán, Machado y Rueda, 2018) (Leiva, 2017) y (Velázquez, 2016).

A partir de la revisión bibliográfica, ante la similitud en la definición de dique brindada por múltiples investigadores y conocedores de la temática, el autor los define como: terraplenes artificiales que se construyen para permitir la contención de las aguas, su almacenamiento o su regulación.

Múltiples pueden ser las clasificaciones que se le pueden dar, y cada autor la realiza según los resultados de sus investigaciones.

1.1.2. Clasificación de los diques

Según (Porto y Gardey, 2017) pueden existir varios tipos de diques y se distinguen por su utilidad o materiales constituyentes.

1. Según la utilidad:

Si se busca imposibilitar el avance del agua, se habla de dique de contención (Figura 1.1). Los diques rompeolas (Figura 1.2), en cambio, superponen capas de diversos materiales para minimizar la energía que proviene del oleaje, brindan protección a un determinado lugar (como un puerto).



Figura 1.1 Diques de contención en Ainaži (Letonia).

Fuente: (Porto y Gardey, 2017)



Figura 1.2 Diques de rompeolas.

Fuente: (Porto y Gardey, 2017)

Aquel que se encuentra separado de la costa, por lo general ubicado paralelamente a ella, se denomina dique exento, tienen la misma finalidad que los rompeolas (Figura 1.3). Un dique seco, por otra parte, es una instalación portuaria que permite sacar los barcos del agua para repararlos.



Figura 1.3 Diques exentos paralelos a la línea de orilla.

Fuente: (National Shoreline Erosion Control Development and Demonstration Program, 2013)

Hay diques que se construyen para el desarrollo de centrales hidroeléctricas. Ese es el caso del Dique Florentino Ameghino, que se encuentra en la provincia argentina de Chubut. Este dique que contiene las aguas del río Chubut permite generar energía eléctrica y brinda protección a diferentes pueblos.

Un dique natural, por último, se forma por el arrastre y la acumulación de materiales que genera un río, que eleva la ribera de forma progresiva (Figura 1.4). Otros nombres que recibe la ribera son terraplén aluvial, *levée* (un término que viene del francés) y ribazo. Esta clase se forma en el borde del río en las épocas en las que el caudal crece. Es muy común en los ríos de las llanuras, cuyo cauce es de tipo divagante y con una pendiente escasa.



Figura 1.4 Dique Natural

Fuente: (Porto y Gardey, 2017)

2. Según los materiales constituyentes:

La selección del tipo de dique dependerá exclusivamente de la función que va a desempeñar, la importancia del diseño y el espacio en donde se va a construir ya sea río, mar o lago. De acuerdo a los materiales utilizados, los diques se catalogan como: diques de tierra, dique de roca-tierra y diques enrocados. Los diques de tierra son aquellos donde su volumen principal está compuesto por suelos arcillosos, arenosos o de grano fino, mientras que los diques de roca-tierra se componen de suelo de agregados gruesos y finos,

finalmente los diques enrocados están constituidos por material de agregado grueso (TAW, 1998).

1.1.3. Elementos que conforman un dique.

Se construyen en forma de trapecio invertido donde se pueden apreciar tres rasgos geométricos fundamentales como: la corona, el lado húmedo y el lado seco. Adicionalmente, el dique puede estar compuesto por otros elementos que complementan la tarea de encausar el flujo del curso de agua. (Gil y Orozco, 2016)

Según (TAW, 1998) la función principal de los elementos y su importancia en el diseño de un dique dependerán exclusivamente del tipo de dique. Para un dique de río que se expone a un período de tiempo relativamente largo y con altos niveles de agua es necesario enfatizar en los elementos internos de la estructura como la tubería y algunas definiciones de macroestabilidad y microestabilidad. En cuanto a diques de mar la duración de la carga es relativamente corta, aunque con un alto grado de oleaje, por tanto, se hace referencia a los elementos externos como la altura de la corona y el revestimiento.

La capacidad de retención de agua de un dique está determinada principalmente por la corona y la estabilidad del cuerpo del dique. La altura de la corona establece la probabilidad de desbordamiento. Por lo tanto, el principal objetivo de los elementos que componen el dique es proporcionar y garantizar estabilidad en la corona y al mismo tiempo en la estructura de tierra que deberá ser dimensionada para que pueda resistir la carga de diseño a la que será expuesta (resistencia del dique a la erosión). La función que cumplen algunos elementos es muy bien definida por (Gil y Orozco, 2016):

- Corona o cresta (Crown): La cresta del vertedero es la encargada de prevenir los desbordamientos, por tal motivo, debe ser diseñada con factores de seguridad para cumplir con la altura y base correcta. Además, se debe escoger el tipo de suelo adecuado para su construcción
- Núcleo del dique (Dike core): El primer requerimiento del núcleo es ser estable, para las cargas de los elementos del dique como las cargas externas (TAW, 1998).

El cálculo del núcleo depende del tipo de suelo con el que se construirán, con el fin de evitar, por ejemplo, el efecto de tubificación en el dique.

- Pendientes y bermas (Slopes and berms): Cumplen la función de dar estabilidad al dique.
- Lado húmedo (Outer side): Es la sección del dique que soporta la carga hidráulica proporcionada por el nivel constante del agua.
- Lado seco (Inner side): Es la sección del dique que proporciona estabilidad a la estructura.

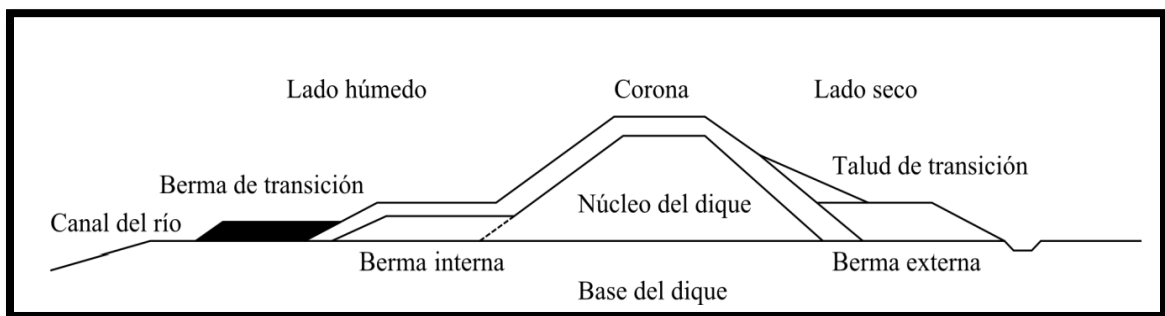


Figura 1.5: Elementos que conforman un dique

Fuente: (TAW, 1998)

1.1.4. Tipos de fallas de los diques.

Las fallas que alcanzan a producirse en los diques de materiales locales es la fundamental inquietud de los diseñadores, inversionistas y de todos los individuos que alcanzan ser dañados por las fallas estas obras.

Las fallas más significativas y desastrosas según el orden ocurrencia las enumeran (Lligüi y Ñauta, 2014) de la siguiente forma:

1. Agrietamiento
2. Sifonamiento mecánico
3. Deslizamiento de taludes
4. Pérdidas por filtración
5. Sismos
6. Licuación

Seguidamente, se muestran las características fundamentales de estos tipos de fallas en los diques, así como las formas para evitar su ocurrencia.

1. Agrietamiento: Esta patología puede exhibirse por deformación donde se encuentran posibles áreas de tracción.

Se reportan como agrietamientos aquellos que no pueden pasar inadvertidos, pero posiblemente muchas fallas se achacan a otras causas, principalmente sifonamiento, tienen su origen en la aparición de grietas y fisuras no muy grandes en la masa del suelo. (Novoa, 2010)

Este fenómeno sucede en el momento en que se experimentan deformaciones diferenciales en diferentes fragmentos del terraplén, ocasionándose zonas de tracción. Los agrietamientos pueden ser transversales y longitudinales.

- Agrietamientos transversales: Las fisuras transversales son muy dañinas, pues traspasan la estructura desde la cara húmeda hasta la cara seca, y proporcionan el flujo en la zona del terraplén.

Se causan por asentamientos diferenciales en segmentos contiguos del terraplén; el agrietamiento se empeora si el terreno en la faja del cauce se constituyó por estratos compresibles.

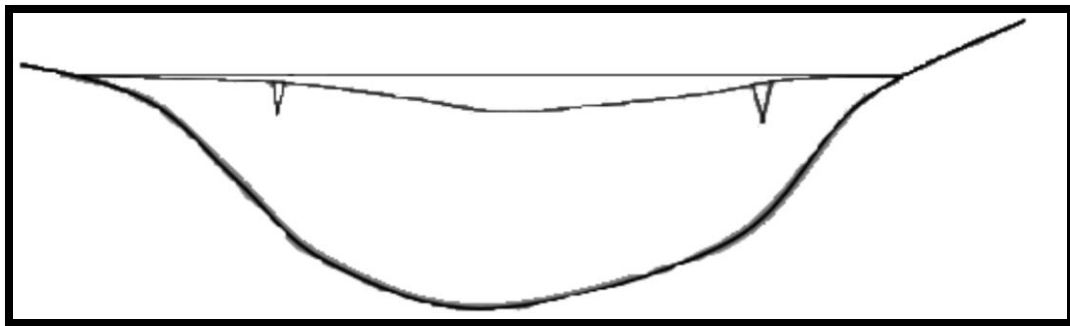


Figura 1.6. Agrietamiento transversal.

Fuente: (Novoa, 2010)

- Agrietamientos longitudinales: Son menos dañinas que las transversales, se exhiben con frecuencia en presas grandes que tiene espaldones de enrocamiento.

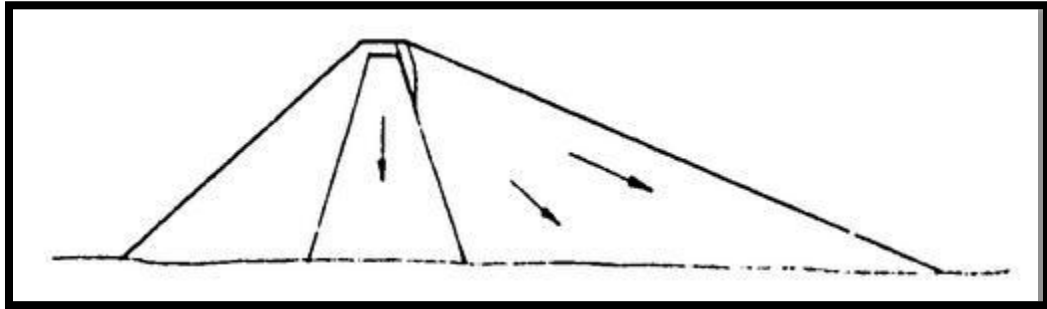


Figura 1.7. Agrietamientos longitudinales.

Fuente: (Novoa, 2010)

- Agrietamientos interiores: estas no son visibles, a causa de que pueden originarse en áreas protegidas con capas de grava que las disimulan. Consiguen originar en donde un segmento pequeño de terraplén se asienta encima de un suelo cuantiosamente más comprensible que las demás zonas bajo el terraplén; si se prevé esto se recomienda compactar los materiales impermeables de la parte húmeda.

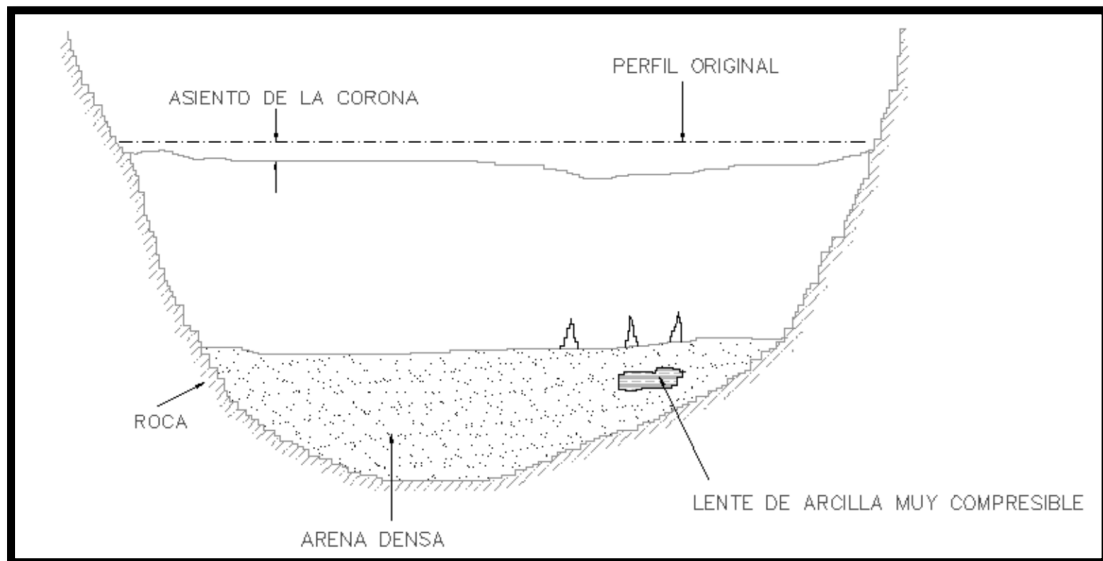


Figura 1.8. Agrietamientos interiores.

Fuente: (Novoa, 2010)

En nuestros días se han desarrollado métodos matemáticos que permiten predecir las posibles zonas de tracción y fisura en los diques.

El accionar más conveniente para evadir que se originen fallas por agrietamientos es la elección del método de compactar los suelos arcillosos.

2. Sifonamiento mecánico: se produce en el momento que una fuga de agua se concentra y erosiona el suelo progresivamente, hasta formar un conducto que une al embalse con el pie del talud aguas abajo. (Novoa, 2010)

Una de las causas fundamentales que intervienen en el sifonamiento es la falta de compactación del terraplén donde deja alguna capa suelta o floja.

También, y no menos significativo, la falla de los diques se ocasiona a la existencia de arcillas dispersivas; ellas se erosionan por causa de las partículas coloidales permanecen en suspensión en el agua.

Algunas exigencias para que no se desarrolle el sifonamiento son la homogeneidad del terraplén y el grado de compactación.

3. Deslizamiento de taludes: sucede en el momento que en una determinada faja de falla se experimentan tensiones de corte superiores a la resistencia del suelo. El fallo por deslizamientos de taludes es una causa usual en diques de tierra, los cuales se originan con mayor repetición durante los cinco primeros años de construido el dique. Pueden concentrarse de tres maneras:

- Deslizamientos durante la construcción: no originan la muerte de trabajadores, pero sí perjuicios materiales. Suceden frecuentemente si la base del dique es de arcilla blanda, frágil o sensitiva.
- Deslizamiento del talud aguas abajo durante la operación: son mucho más peligrosos. Se originan a causa de que las presiones de poro de la malla de flujo restringen las tensiones efectivas y consiguientemente la resistencia a cortante es menor al esfuerzo cortante aplicado.

- Deslizamiento del talud aguas arriba luego de un vaciado rápido: ocurre en el momento del primer vaciado, será devastador solamente si se situara encima de la obra de toma ya que obstaculizaría el drenaje y por consiguiente se ocasiona el rebase de la cortina.

Las metodologías de estudio de estabilidad de taludes se inscriben entre los de análisis límite, que radican en suponer un mecanismo de falla para el talud y designar a tal mecanismo los principios de resistencia del material, para intentar predecir si con tal resistencia, hay o no probabilidad de que el mecanismo hipotético alcance a suceder.

Hay diversos métodos de análisis cuantitativo, fundamentalmente origen semiempírico, que intentan relacionar las propiedades del suelo con los esfuerzos a los que este se ve expuesto.

Uno de los menos complejo para estimar del factor de seguridad es el método de Fellenius, el cual radica en fraccionar la cuña de deslizamiento en rebanadas para analizar el estado de tensiones en todas ellas por separado.

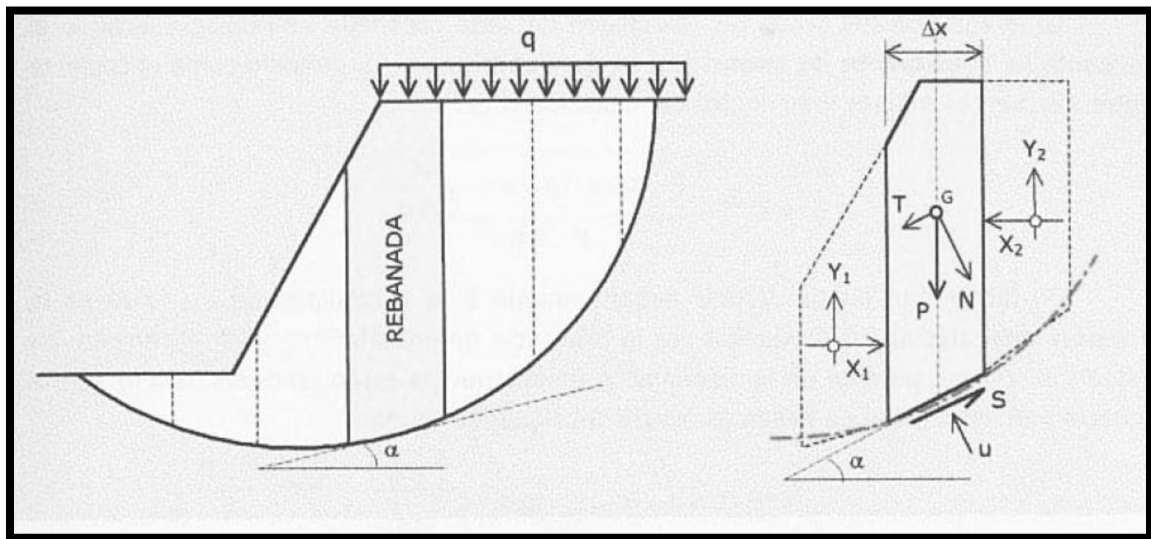


Figura 1.9. Estado de fuerzas actuantes en una rebanada de terreno.

Fuente: (Lligüi y Ñauta, 2014)

En este método, el factor de seguridad se haya de la correspondencia entre las fuerzas estabilizadoras y las fuerzas desestabilizadoras que operan encima de cada rebanada, de

ahí que para conseguir un talud estable es preciso que las fuerzas estabilizadoras sean mayores a las desestabilizadoras.

4. Pérdidas por filtración: esta clasificación de falla es peligrosa, pero no desastrosa, siempre que el fundamento de la obra sea el acopio.

Para evadir las pérdidas por filtración es necesario establecer en el análisis geológico las áreas de fallas, áreas cársticas y suelos permeables. Una sugerencia para reducir las filtraciones por el terraplén es compactar con humedades superiores a la óptima de la prueba de Proctor Estándar.

5. Sismos: Las rupturas en dique derivadas por los sismos exhiben las características que se mencionan a continuación.

a) Se muestran fisuras longitudinales en la corona de la presa.

b) Los perjuicios se originan por la componente horizontal del sismo.

c) Las rupturas por deslizamiento causada por los temblores son pocas.

d) Los sismos más perjudiciales son los de mayor tiempo de duración.

e) Espaldones granulares con deficiente compactación o con cuantiosos finos engendran asientos fuertes que dañan al material impermeable.

f) Del sismo puede desprenderse el peligro de la falla por licuación.

6. Licuación. - acontece a causa de la existencia de suelos finos no cohesivos, de distribución suelta e impregnados.

La forma existente de impedir este ejemplo de falla es a través el análisis geológico, con el que se debe evadir ubicar el cimiento encima de esta clasificación de materiales, y se debe garantizar el uso de áreas de préstamo que no posean estos suelos.

Un denominador común de la gran mayoría de fallas de diques son los asentamientos.

1.2. Asentamientos

1.2.1. Generalidades

Uno de los causantes básicos de fallas en diques son los asentamientos. Esta acción no es más que la deformación que sucede en el tiempo en el plano vertical y según su sentido puede ser hacia arriba o hacia abajo, de ahí que se defina como un vector con dirección y sentido, expresado en un valor numérico antecedido por un signo negativo (-) si el asentamiento es hacia abajo o positivo (+) si es hacia arriba (levantamiento). (Metodología para el control de deformaciones de obras a partir de métodos geodésicos, 2004)

1.2.2. Causas de las deformaciones en las obras:

De forma general las deformaciones de las obras ocurren a causa de la acción de factores naturales y antropogénicos.

- Dentro de los naturales están:

- a. Los cambios hidrotérmicos del suelo de la base o cimiento de la obra;
- b. La capacidad de los suelos a hincharse, consolidarse, asentarse y otros fenómenos ingeniero-geológicos;
- c. A la influencia del calentamiento desigual de la obra y la acción del viento.

- Dentro de la acción de los factores antropogénicos están:

- a. La influencia de las cargas impuestas de carácter constante o momentáneo;
- b. La variación de las propiedades físico-mecánicas de la base y los suelos relacionados con la disminución de la humedad;
- c. Errores que se cometieron en las investigaciones al determinar las características principales del suelo;
- d. La influencia de los procesos tecnológicos que ocasionan vibración, cambio de temperatura de partes aisladas de la obra, cargas dinámicas;
- e. La acción en la obra que se construye o en explotación de trabajos en zonas aledañas, tales como voladuras para excavar cimientos, o para extraer materiales para canteras, entre otras.

1.2.3. Clasificaciones de los asentamientos

1.2.3.1. De acorde al grado de uniformidad en su distribución.

Los asentamientos según "Metodología para el control de deformaciones de obras a partir de métodos geodésicos" del Grupo Empresarial GEOCUBA (2004) pueden ser uniformes y diferenciales según sea el grado de uniformidad en su distribución sobre el área de la base del cimiento.

➤ **Asentamientos uniformes**

Sucedan únicamente en los casos en los que la presión ejercida por el peso de la obra y la compresibilidad de los suelos, en todas las áreas bajo los cimientos, poseen similares dígitos.

➤ **Asentamientos diferenciales**

Ocurren fundamentalmente si hay diferencia de densidad, por pesos diferentes encima del cimiento de la obra y por las acciones que provocan los cimientos próximos, lo que trae distorsiones en la construcción o en algunos de sus elementos en forma de flexión, inclinación e incluso aberturas y colapso de la construcción.

Los asentamientos uniformes generalmente no ocasionan grandiosos perjuicios, a causa de que la deformación en la plana vertical sucede del mismo modo, y los deterioros ocurren solamente en las interconexiones de ese objeto con el resto de su medio. De forma inversa, los asentamientos diferenciales si producen averías y alcanzan a situar en fallo a la construcción o parte de ésta si exceden los valores límites de deformación hacia los cuales se planteó.

1.2.3.2. Clasificación de los asentamientos en función del tiempo

Según la opinión de varios expertos en el tema, el asentamiento que sucede en el suelo expuesto a cargas se clasifica en tres categorías:

➤ **Asentamiento Inmediato**, se induce por la deformación elástica del suelo seco y de suelos húmedos y saturados que no tienen variación en la cantidad de agua. Las

deducciones de los asentamientos inmediatos se fundan, habitualmente, en formulas obtenidas de la Teoría de la Elasticidad. Este tipo de asentamientos es característico en suelos granulares.

- Asentamiento por consolidación primaria, es el efecto de una variación de volumen en áreas saturadas cohesivas a causa de la eliminación del agua que se haya en los sitios disponibles. Este tipo de asientos alcanzan a ser frecuentes en limos y arcillas inorgánicas saturadas.
- Asentamiento por consolidación secundaria, se divisan en suelos saturados cohesivos y es consecuencia del arreglo plástico de las capas del suelo. Éste va tras el que anteriormente se mencionó bajo un esfuerzo efectivo constante. Este ejemplo de asentamiento prevalece en suelos altamente orgánicos y turbas.

Comúnmente, el asentamiento total de una fundación, A , puede ser calculado como:

$$S = S_i + S_p + S_s \quad \text{Ecuación 1.1.}$$

Donde:

S_i = asentamiento inmediato.

S_p = asentamiento por consolidación primaria.

S_s = asentamiento por consolidación secundaria.

1.2.4. Asentamiento inmediato (Asentamientos elásticos)

Se hallan a través de la Teoría de la Elasticidad, con la cual se infiere los asentamientos iniciales que sucede en el suelo después de aplicar las cargas. Para suponer la teoría antes expuesta, se consideran hipótesis sobre los suelos:

- a) El suelo es un medio continuo en todas direcciones
- b) El suelo es un compuesto totalmente homogéneo
- c) La relación esfuerzo-deformación del suelo sigue una función lineal

d) El suelo es un material isotrópico, por lo que todos los esfuerzos medidos son iguales en cualquier dirección.

En el día a día, son más llamativas las deformaciones verticales, o lo que es lo mismo, los asentamientos en la superficie del suelo que se ocasionan al aplicar cargas sobre él.

Las soluciones para los asentamientos basadas en la Teoría de la Elasticidad utilizan el módulo de elasticidad (E) y el módulo de Poisson (ν), sin embargo, una masa de suelo no tiene valores únicos de E y de ν , y la dificultad para determinar los valores apropiados de estos parámetros limita la aplicación práctica de estas soluciones (Berry & Reid, 1997).

Sin embargo, en depósitos de arcilla saturada, los asentamientos que se presentan inmediatamente durante la construcción se producen sin ningún drenaje del agua intersticial del suelo; lo cual hace que sea razonable la hipótesis de un módulo de elasticidad no drenado constante, ya que no hay cambio de volumen en la masa de suelo con una relación de Poisson $\nu = 0.5$ (para fines prácticos se considera $\nu = 0.45$) (Berry & Reid, 1997).

El módulo de elasticidad no drenado se puede obtener a partir de ensayos triaxiales, sin embargo, el resultado puede ser altamente erróneo a causa de la alteración y manipulación del material en el proceso de obtención y manipulación en el laboratorio. Por lo que, los autores recomiendan obtener el módulo de elasticidad no drenado a partir del ensayo de corte no drenado, debido que, aparentemente, en este proceso el material es menos alterado (Ganzhi y Pinos, 2014).

1.2.5. Asentamiento por consolidación primaria

El cálculo del proceso de consolidación para diques (terraplenes) sobre suelos blandos se basa en el hecho de que la presión del agua de los poros aumenta debido a la carga aplicada y el gradiente de presión resultante da lugar a un flujo de agua fuera del suelo. Este flujo de agua se asume, normalmente, que tendrá lugar sólo en la dirección vertical. Cuando las capas de drenaje se insertan en el perfil del suelo, el flujo de agua se supone que es vertical entre estas capas. (Larson, 1997)

En los casos en que el área cargada es pequeña en relación con el espesor de las capas compresibles, la influencia del flujo de agua horizontal no se puede despreciar. Este es, particularmente, el caso de zapatas circulares y cuadradas. En el caso de los diques (terraplenes), el flujo horizontal de agua, aparte del flujo en las capas de drenaje, normalmente se puede despreciar. Sin embargo, siempre hay una cierta influencia del flujo de agua horizontal en la tasa de los asentamientos en las partes exteriores del dique (terraplén) (Larson, 1997).

La colocación de un terraplén sobre la superficie del terreno genera un aumento de las presiones efectivas en las capas subyacentes de suelo en el tiempo. Si éste es de carácter compresible, la sobrepresión impuesta ocasiona una disminución del volumen con expulsión de agua de los poros. El cuantificar la magnitud de los asentamientos superficiales debido a este efecto supone, por una parte, calcular correctamente la sobrepresión impuesta por el peso del terraplén a diferentes profundidades y, por otra, aplicar la teoría y ensayos de suelo que sean más representativos. Debe tenerse presente que, para el caso de los terraplenes, durante el proceso de consolidación del suelo de fundación, se producen en el interior del terraplén efectos de arco y reacomodo de las partículas de suelo que distorsionan el valor teórico del asentamiento superficial y, por lo tanto, los valores calculados deben considerarse sólo como indicadores del orden de magnitud (Dujisín & Rutllant, 1974).

Los parámetros precisos para valorar la magnitud de asentamientos debajo de un dique expuestos por (Ganzhi y Pinos, 2014) encierran una comprensión de:

- El perfil del suelo que incluye el tipo de suelo, capas, nivel freático y el peso unitario;
- El índice de compresión para consolidación primaria y resultados de asentamientos de sitios con condiciones de suelos similares;
- La geometría del talud de relleno propuesto, se incluye el peso unitario de los materiales de relleno.

1.2.6. Asentamientos por consolidación secundaria

Una vez que la consolidación primaria concluye, o sea, en el momento que la disipación del exceso de la presión de poro es total, se aprecia un asentamiento debido al ajuste plástico de la estructura, que se nombra comúnmente flujo plástico. En el instante que la variación entre la deformación contra el logaritmo del tiempo es prácticamente lineal, se dice que es la etapa de la consolidación secundaria.

El asentamiento por consolidación secundaria es más importante que por consolidación primaria en suelos orgánicos y en suelos inorgánicos altamente compresibles.

Varios factores afectan a la magnitud de la consolidación secundaria y algunos de ellos no se entienden aun claramente. La tasa de compresión secundaria respecto a la primaria para un espesor dado del estrato de suelo es dependiente de la razón del incremento de esfuerzo ($\Delta\sigma'$) respecto al esfuerzo efectivo inicial (σ'_0). Para tasas pequeñas la tasa de compresión secundaria respecto a la primaria es mayor (Braja, 2001).

1.2.7. Recomendaciones para vigilar los asentamientos

A causa de la importancia que posee la fabricación de diques para evitar penetraciones costeras, y minimizar los daños humanos, materiales y paisajísticos, es preciso considerar las medidas oportunas para que estos ostenten buen funcionamiento y ofrezcan seguridad de acorde a los indicadores que se establecieron.

Se refieren seguidamente las recomendaciones que se convienen tener en cuenta tanto en la etapa de construcción como en la etapa de mantenimiento.

- En obras sobre situadas encima de suelos blandos, si el grosor de la capa de arcilla en la fundición es pequeño se recomienda eliminar con el equipamiento correcto, pero si el grosor es de tamaño mayor se procede a modificar la maniobra para enriquecer las características de resistencia del mismo y efectuar a lo unísono un trabajo geotécnico minucioso para describir el suelo.

- La fabricación de diques en pendientes con taludes entre 2 horizontal: 1 vertical a 6 horizontal: 1 vertical o superiores, se aconseja escalonar el terreno de contacto del terreno con el terraplén, y de haber penetraciones es conveniente situar drenes longitudinales en todos los escalones para evadir la desestabilización de la construcción.

En la ejecución de los diques se debe considerar lo siguiente:

- No edificar muros si la temperatura ambiente es menor a 2°C a la sombra, pues esto perturbaría el agua encerrada en el suelo, alcanzaría inclusive a congelarse y entorpecer la compactación.
- Evadir el tránsito de automóviles en el período que se ejecuta la compactación, pues esto crea agrupaciones de surcos de rodadura.
- Establecer pendientes como mínimo del 6% a lo largo de la construcción del terraplén para evacuar velozmente las aguas pluviales (de lluvia), si son diques de encausamiento, la pendiente se colocará hacia el lado de la cara húmeda.
- Debe realizarse la compactación de forma uniforme, en los costados, así como en el eje del terraplén, pues esto es probable que forme grietas laterales y combaduras del área de rodadura.

1.3. Área de estudio

Cayo Buba representa un pequeño territorio insular con una superficie próxima a las 62 hectáreas, que se localiza a 500 m al Sureste de Cayo Libertad, en el extremo Norte de la Península Hicacos.

Es un cayo bajo donde las alturas apenas sobresalen al metro. Forma parte de una llanura de origen marino-lacustre, se constituye prácticamente de su totalidad en una marisma, ya que más del 90 % de su territorio se inunda tanto durante la pleamar como en la bajamar; donde no existen afloramientos rocosos, presenta una topografía muy llana, con ausencia de pendientes significativas; por lo que escasamente puede ser subdividida geomorfológicamente.

El litoral de Cayo Buba se caracteriza según expertos de GeoCuba Estudios Marinos por un único tipo de costa: biogénica de mangle, la que es interrumpida en su porción Norte y Sur, por pequeñas playas cuya longitud no sobrepasa los 40,0 m las mayores, encajadas en el mangle costero, con bermas de 10.0 a 15.0 m; con pendientes muy suaves. tanto en la playa emergida como en la sumergida: constituidas por arenas biogénicas carbonatadas que van desde calor crema grisáceo hasta gris oscuro. La vegetación del entorno es virgen, con mangles en lugares que alcanzan de 7.0 a 10.0 metros de altura y abundante follaje.

En el cayo existe poca variedad de elementos geólogo-geotécnicos, ya que se constituye litológicamente por arena y turbas de color carmelita ocre.

Según aprobó la Dirección Provincial de Planificación Física se puede construir en un área total de 36 ha divididas en dos parcelas, denominadas 20 y 21.

GeoCuba Estudios Marinos propone dos variantes de relleno para solucionar las inundaciones, con cotas de relleno tecnológico en la parte Norte y Este de 2 m y en la parte central de 1.85 m, para facilitar pendientes para el drenaje que de forma general en las 2 parcelas será de Norte a Sur. La variante definitiva que se construye hoy en día es la número 2. En la primera se rellenarían 23.3ha, con 3746 m de diques y se consumirían para el relleno 548125 m³ de arena, 167749 m³ de rajón y 94158 m³ de suelo seleccionada de tipo A2 o A4. En la segunda el área total a rellenar sería de 19.8 m³, la longitud de los diques de 3333 m, un volumen de arena de 89057 m³, de rajón 13166 m³ y 4149 m³ de suelo seleccionada de tipo A2 o A4.

La altura de proyecto de los diques oscila entre + 1.80 y 2.00 N.M.M. El ancho de corona será 4.00 m, con viraderos cada 70-100 m, lo cual permite el cruce de vehículos y ahorra material, esta solución esta conciliada con el constructor.

En su estructura los diques tendrán una capa mínima inicial de 50 cm de rajón hasta la cota de +.20 m o hasta el nivel del terreno en los casos en que este sea superior y será necesario el desbroce y eliminación de la raíz de la vegetación y creación de una trinchera de 0.5 m por debajo de la cota del terreno que sirva como cajuela, permite una mayor estabilidad del mismo. Por las características del terreno, para el cálculo de los volúmenes

se concibió una capa de 2 m de asentamientos del rajón. La altura de la corona se logra con material A2-A4 que se compacta por capas de 20 cm. El espesor de esta capa depende de la altura del terreno.

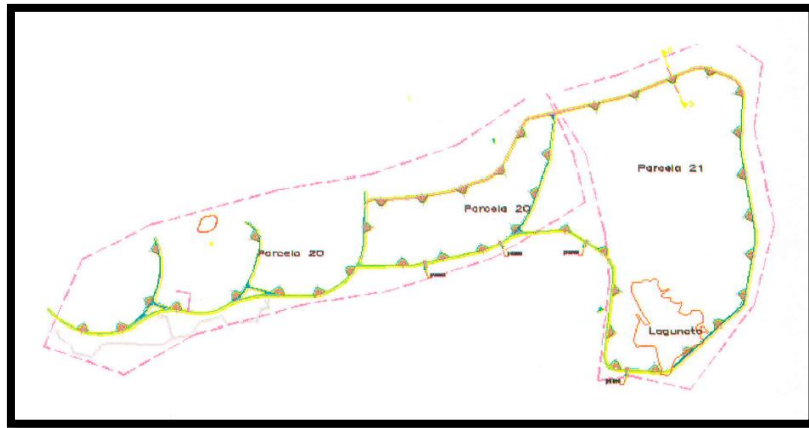


Figura 1.10: Diques de la Variante 2

Fuente: (GeoCuba Estudios Marinos, 2015)

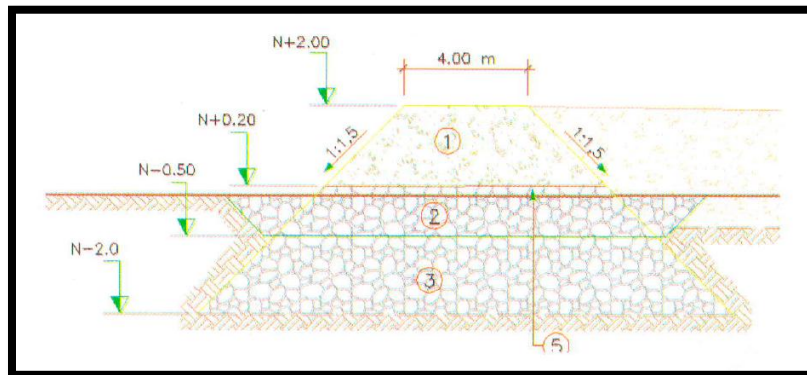


Figura 1.11: Estructura de los diques

Fuente: (GeoCuba Estudios Marinos, 2015)

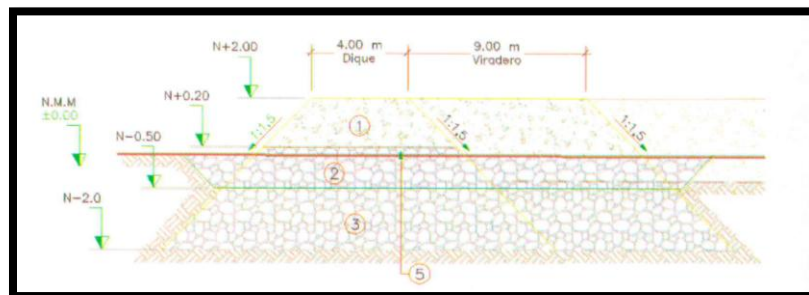


Figura 1.12: Estructura de los diques en la zona del viradero.

Fuente: (GeoCuba Estudios Marinos, 2015)

Las zonas interiores de las parcelas son rellenadas íntegramente con sedimentos marinos (arena) con el objetivo fundamental de elevar la cota del terreno y aumentar la potencia de arena que se encuentra por encima de la turba hasta alcanzar espesores superiores en todos los casos a 1.50m. Por encima de la arena se propone una capa de 0.20 m de material selecto A2-A4.

Conclusiones parciales del capítulo

- Los diques son estructuras construidas por el ser humano, típicamente muros de contención, se proyectan y ejecutan según las prácticas de ingeniería de sonido para controlar, o reencausar el flujo de agua para proporcionar un nivel de resguardo contra una inundación temporaria.
- Los asentamientos son patologías que frecuentemente azotan a los diques y ocasionan fallas que puede variar su visibilidad, magnitud y consecuencias en dependencia de la forma de evolución.
- Siempre que se construye un dique se debe velar desde la fase de diseño las características geológicas del terreno y del material de préstamo a utilizar, así como el grado de compactación que se les dé a cada una de las capas del terraplén.
- Los diques de Cayo Buba, del tipo de contención, son diseñados para cumplir una doble función, prevenir inundaciones en el cayo y confinar el material de relleno.

CAPÍTULO 2: " MÉTODOS PARA LA MEDICIÓN DE ASENTAMIENTOS EN DIQUES"

A lo largo de presente capítulo se analizan las precisiones necesarias en la determinación de asentamientos y la periodicidad con la que deben realizarse de las observaciones de deformaciones verticales. Además, los métodos actuales para la medición de asentamientos en diques, tanto tradicionales como novedosos.

2.1. Precisión necesaria en la determinación de asentamientos.

El monitoreo de las deformaciones de grandes estructuras tecnológicas es una realidad en las últimas décadas, pues las mismas pueden causar daños y perjuicios severos a las obras o lesiones a las personas y en el peor de los casos las pérdidas de vidas humanas. Estas deformaciones pueden atribuirse a varias causas, como una investigación incompleta de las condiciones ingeniero geológico de la cimentación, la construcción inapropiada de la misma, así como insuficiente conocimiento de las condiciones de operación y la ocurrencia de eventos naturales como ciclones y terremotos (Acosta y García 2007).

Con el propósito de poder medir las deformaciones empleando métodos topográficos, surge el problema de establecer el tipo de medición y su precisión. De acuerdo con el tipo de solución que se establezca dependerá el método y los equipos a emplear, así como también los gastos en materiales tiempo, dinero y lo que es más importante la veracidad de los resultados obtenidos (Castañeda y Martínez, 2018).

La precisión de las mediciones se puede obtener con base en la necesidad del constructor, normas técnicas o por medio de cálculos especiales. Inicialmente se puede hablar de la precisión de partida en la determinación de la magnitud de la deformación, así como también de la precisión directamente de las mediciones topográficas. Por ejemplo, en el caso del estudio de los asentamientos se puede hablar sobre el error en la determinación del asentamiento y resolver el problema de encontrar los desniveles en varios ciclos de nivelación. Es obvio que si se conocen las tolerancias establecidas para la precisión entonces no es difícil establecer qué tipo de mediciones se deben realizar. Para esto se requiere escoger el método y diseñar un esquema de mediciones, luego realizar los cálculos

para la ejecución del proyecto, estos permitirán establecer la precisión deseada (Castañeda y Martínez, 2018).

La precisión deseada se puede establecer si se resuelven dos situaciones que se presentan en la práctica: la primera situación que se puede presentar es cuando se mide el fenómeno en su estado crítico, es decir cuando la deformación está cerca de alcanzar su valor máximo calculado, y el segundo caso es cuando se puede describir la magnitud de la deformación en lapso, es decir el fenómeno está sucediendo y no se ha acercado al punto crítico de la deformación (Castañeda y Martínez, 2018).

Siempre en los controles más allá del método o medios que se utiliza, hay que considerar la precisión con que se realiza.

Los errores medios cuadráticos admisibles en el cálculo de los asentamientos deben ser:

- ± 1.0 mm - para edificios y obras erigidas sobre suelos rocosos o semirosos.
- ± 2.0 mm - para edificios y obras erigidas sobre suelos arenosos, arcillosos y otros por el estilo compresibles.
- ± 5.0 mm - para edificios y obras erigidas sobre rellenos, proclives a asentarse, turba o materiales similares.

Sin embargo, ha de advertirse que hay disímiles objetos de obras muy delimitados, en los que el funcionamiento requiere de una gran rigidez geométrica, de ahí que los asentamientos se deben medir con errores medios cuadráticos permisibles inferiores a ± 1 mm; en este caso se ha de aplicar la nivelación geométrica Ni -006, u otra variante tecnológica que permita cumplir tal exigencia (microvelación, procedimientos de metrología, nivelación hidrostática especial).

2.2. Criterios sobre la periodicidad de las observaciones de deformaciones

La periodicidad de las observaciones de deformaciones se establece en la mayoría de los casos de forma empírica y tiene que ver mucho en esta decisión el comportamiento de deformaciones de la obra, por lo que los criterios aquí expuestos sólo sirven de pauta.

En la etapa de construcción se deben realizar las observaciones en el momento que la obra alcanza el 25, 50, 75y 100% de su carga y dimensión de proyecto y en la etapa de explotación se valora el tipo de suelo de la base, por ejemplo, si los suelos son cohesivos (arcillas, limo) es necesario observar cada tres o cuatro meses y en los no cohesivos (arena) cada cinco o seis meses. Para suelos con tendencias a asentarse puede disminuirse hasta tres meses.

Si en la deformación de la obra influyen factores externos, tales como: la variación del régimen del nivel de aguas del manto freático, temperatura del suelo de la base, acción de fuerzas dinámicas, es necesario realizar las mediciones geodésicas antes de que comience la acción de los factores anteriormente expuestos, en el período de su acción y al finalizar.

No obstante, se recomienda para la etapa de explotación observar las deformaciones dos y tres veces al año hasta su estabilización, o sea, hasta que la velocidad de los asentamientos sea de uno o dos milímetros al año. Para el caso de obras muy propensas a deformaciones las observaciones continúan en un intervalo de dos a tres años.

El examen de los asientos es una de las acciones más significativas de la ingeniería por el peligro que constituyen en las disímiles estructuras, para su realización se usan diversos métodos.

2.3. Métodos para la medición de asentamientos.

La aplicación del método para el monitoreo de las deformaciones se fundamenta en el establecimiento, en lugares determinados de la construcción y su entorno, de un conjunto de puntos de control o chequeo de estabilidad. A estos puntos se le miden con elevada precisión los elementos que determinan su posición: coordenadas X, Y, y su altura Z. Todos estos valores están referidos a un sistema inicial de cuyos valores “supuestamente” son invariables. De esta forma se realizan mediciones en diferentes períodos de tiempo, principalmente en función del crecimiento de la carga sobre su base y la velocidad de las deformaciones. La diferencia de coordenadas de un ciclo con respecto al primero, u otro en particular, refleja la magnitud del movimiento ocurrido en ese espacio de tiempo (Milán, Machado y Ruedas, 2018).

Paralelamente, se registran o se miden los valores de los fenómenos o causas que puedan provocar estas deformaciones (características del suelo, magnitud de las cargas, nivel hidrostático, temperatura ambiente del aire, precipitaciones, velocidad y dirección del viento). Además, se dispone de los estudios ingeniero-geológicos del área de emplazamiento y de los materiales constitutivos de la estructura en su conjunto, así como de la tecnología y la fundamentación para el diseño y construcción de la obra (Milán, Machado y Ruedas, 2018).

Entre las metodologías de inspección de desplazamientos en estructuras se logran distinguir los geotécnicos (péndulos directos e invertidos, inclinómetros, girómetros) y los geodésico-topográficos (nivelación, trilateración, triangulación, poligonación de precisión, colimación angular, etcétera). Los métodos clásicos son muy confiables y posibilitan obtener precisiones elevadas, de hasta la centésima de milímetro.

Con los nuevos progresos tecnológicos surgen otros métodos para el control deformacional y movimientos, como los que se basan en fibra óptica, escáneres, fotogrametría satelital o mediante GPS diferencial (DGPS).

2.3.1. Métodos clásicos para la medición de asentamientos:

2.3.1.1. Niveles:

Un nivel de anteojo, nivel óptico o equialtímetro es un instrumento topográfico que permite determinar el desnivel entre dos puntos mediante visuales horizontales dirigidas a miras verticales. En su forma más elemental, está constituido por un nivel tubular adosado a un anteojo astronómico, de forma tal que el eje de colimación de éste, sea paralelo al eje del nivel tubular. Este instrumento va montado sobre un trípode mediante un tornillo ad-hoc y gira alrededor de un eje de rotación (Colectivo de Autores, 2018).



Figura 2.1: Niveles digitales Leica DNA

Fuente: (Colectivo de Autores, 2018).

Los niveles de anteojo o equaltímetros se consiguen clasificar en niveles de plano, niveles de línea, niveles automáticos y niveles digitales. Los dos primeros se dejaron de utilizar desde hace mucho tiempo y por esa causa no se abordan en este texto.

➤ Niveles automáticos: En ellos, el anteojo se halla rígidamente incorporado a la plataforma nivelante; no dispone un eje horizontal ni un nivel tubular. La horizontalidad del eje de colimación se logra mediante un mecanismo compensador que se sitúa en el interior del anteojo, que de forma automática proporciona la visual horizontal.

➤ Niveles digitales: Estos equipos poseen un dispositivo electrónico que permite la lectura a miras provistas de un código de barra. Una vez enfocada la mira, se presiona un botón y la medida (lectura de hilo medio y distancia) aparece directamente en la pantalla del instrumento. Disponen, además de una memoria interna para almacenar los datos que se midieron y no tener que anotarlos en una libreta a mano. Son muy útiles en aquellos trabajos donde un gran número de puntos deben levantarse, lo que ahorra hasta un 50% del tiempo. La visual horizontal se consigue del mismo modo que en los niveles automáticos, la principal diferencia radica en el sistema de lectura digital.

En los Automáticos, mediante un sistema compensador se fuerza a la visual horizontal que atraviesa el centro óptico del objetivo a pasar por el centro del retículo. Esto se consigue mediante un compensador automático que se compone por espejos y prismas capaces de

disponerse de acuerdo a la dirección de la gravedad. Un compensador automáticamente refleja y refracta al haz de luz horizontal que atraviesa el centro óptico del objetivo, dirigiéndolo al punto de intersección de los hilos vertical y horizontal del retículo. Los compensadores de los niveles automáticos tienen un rango de trabajo de unos pocos minutos, por lo tanto, previamente debe ser centrada la burbuja del nivel esférico.

El objetivo de la nivelación es determinar la diferencia de altura entre dos puntos, denominada desnivel. Para ello se utiliza un nivel de anteojo y miras. Con el nivel se establece una visual horizontal y se toman las lecturas sobre miras colocadas en posición vertical sobre los puntos cuyo desnivel se pretende conocer. Esta operación topográfica, realizada mediante un nivel de anteojo y miras, se denomina Nivelación geométrica.

Las alturas de los puntos del terreno también pueden ser determinadas por otros métodos, como por ejemplo el método de nivelación trigonométrica. El cual se basa en la medición de ángulos verticales con un teodolito (o estación total). La nivelación trigonométrica es más rápida y menos precisa que la nivelación geométrica.

➤ Error de Colimación.

El error de colimación es el más importante de los errores instrumentales que afectan a los niveles ópticos o de anteojo. Se trata de un error del tipo sistemático y afecta a las lecturas de mira. A causa del error de colimación, las lecturas efectuadas sobre las miras tendrán valores mayores o menores a los correctos. Este error del instrumento se debe a que, en condiciones de medición, el eje de colimación forma un ángulo con la horizontal. Si un nivel tiene error de colimación, la magnitud y signo de este error se mantiene constantes; mientras que el efecto en las lecturas varía en función de la distancia a la mira. A mayor distancia entre nivel y mira, mayor error en las lecturas.

En dependencia de que el nivel sea de línea o automático, la causa del error de colimación será diferente, pero el resultado final es el mismo: si está el nivel en condiciones de medir, la visual que debería ser horizontal no lo será. Esto causa errores sistemáticos en las lecturas de mira.

A continuación, se describe como se manifiesta el error de colimación en niveles de línea y automáticos:

a) En Niveles de Línea: Centrada la burbuja del nivel tubular, la visual correspondiente al hilo medio no es horizontal. Esto se debe a que los ejes de colimación y del nivel tubular no son paralelos. Las proyecciones de los dos ejes que se mencionaron sobre un plano vertical deberían ser paralelas, pero a causa del error de colimación no lo son.

En los niveles de línea existe también el que recibe el nombre de error de cruce. Se produce si hay falta de paralelismo entre las proyecciones de los ejes de colimación y del nivel tubular sobre un plano horizontal. Los efectos del error de cruce son poco importantes y no se consideran en los trabajos de topografía convencionales.

b) En Niveles Automáticos: si está en el centro la burbuja del nivel esférico y por lo tanto el compensador en rango de trabajo, la visual horizontal que atraviesa al centro óptico del objetivo no pasará por el retículo. La posición del retículo no es la correcta, por lo tanto, la lectura de hilo medio no se corresponde con una visual horizontal.

2.3.1.2. Estación Total en las observaciones de los asentamientos

Si se posee de una estación total (Figura 2.2) no equivale a efectuar todo aquel trabajo de aplicación de la Topografía que se apetezca. Siempre se fundamenta a partir de saber cuáles son las opciones serias de ese equipo de medición y los requerimientos del trabajo en materia. Si la cuestión es el monitoreo de las deformaciones, y en específico de los asentamientos, la utilización de la Estación Total debe realizarse con elevada atención. Para este estudio la precisión regulada de los trabajos de deformaciones es:

a) La base geodésica de referencia altimétrica, comúnmente llamada ramillete, se ha de determinar con un error medio cuadrática de $m_s \leq \pm 1.0$ mm. El control periódico o cíclico de su estabilidad también se medirá con esta precisión.

b) La base planimétrica de referencia para la determinación de las coordenadas X, Y se determinará con un error de $m_{x,y} \leq \pm 2.0$ mm.



Figura 2.2: Estación total GPT3105W

Fuente: (Castañeda y Martínez, 2018)

La altura, y el asentamiento entre ciclos, del punto de control más débil de la red geodésica, se determinarán con un error medio cuadrático que está en dependencia de la complejidad de la obra, adaptándose tres categorías de precisión:

- Primera categoría: $m_s \leq \pm 1.0$ mm.
- Segunda categoría: $m_s \leq \pm 2.0$ mm.
- Tercera categoría: $m_s \leq \pm 5.0$ mm.

La determinación de las coordenadas X, Y (para calcular el desplazamiento horizontal), y la altura Z (para calcular el asentamiento) de cualquier punta de control horizontal de la obra, estará en un entorno de error medio cuadrático de $m_{x,y} \leq \pm 1.0$ mm - $\leq \pm 4.0$ mm. La determinación del error medio cuadrático de posición espacial (X, Y, Z) de cualquier punta será de $m_{x,y,z} \leq \pm 2.0-5.0$ mm.

El control de la estabilidad del sistema de referencia vertical con la Estación Total, es del modo tradicional al que se realiza por métodos geométricos. Constituye la premisa

fundamental a cumplir en el estudio de los asentamientos. Si el sistema de referencia o inicial tiene la forma de ramillete de tres puntos o más, la tarea consiste en colocar la Estación Total en el centro del ramillete, y determinar la altura independiente de cada uno de los puntos, con un amarre en altura al punto que tradicionalmente se empleó de salida en el ramillete dado. Aquí no hay que corregir desniveles, ni medirlos, pues la Estación Total determina automáticamente la altura. Como estrategia de precisión se ha de determinar la altura de cada uno de los puntos, se parte de uno inicial y regresa a él. Luego se ha de variar la altura del bastón en un valor que ofrece y se procede a realizar la misma secuencia de determinación de alturas. Así se tendrán dos alturas independientes para cada punto y el control de cierre de la línea. La diferencia permisible entre alturas de un mismo punto será de ± 3 mm, al igual que el error de cierre.

➤ Secuencia lógica de la línea de nivelación con la Estación Total

Una vez que se chequea la estabilidad de los puntos del sistema de referencia inicial, sabiéndose que los puntos conservan sus alturas dentro del rango permisible de ± 1.0 mm, se procede a determinar las alturas de cada punto de control y se observa estrictamente las distancias permisibles para cada categoría de precisión.

En algunas obras lineales como las presas existen dos ramilletes que se construyen para el método de la nivelación geométrica. Es muy conveniente determinar las alturas de cada punto de control de manera independiente, se sale con la referencia de altura inicial del Ramillete Uno, y luego hacerlo con el Ramillete Dos.

La diferencia permisible entre cada altura independiente será de ± 0.3 mm para la primera categoría; ± 0.6 mm para la segunda categoría, y de ± 2.5 mm para la tercera.

La altura definitiva del punto será el promedio de las dos alturas independientes. De esta manera no es necesario ajustar la altura, constituye esto una gran ventaja de la Estación Total.

2.3.2. Métodos de tecnología avanzada para la medición de asentamientos

El desarrollo de las ciencias aplicadas y las comunicaciones de los últimos tiempos permite desarrollar tecnologías que proveen posiciones con precisión milimétrica auxiliándose de filtros matemáticos, cabalmente utilizables en el control de movimientos en diques.

2.3.2.1. LiDAR

LiDAR (de light detection and ranging) es un tipo de tecnología la cual involucra una técnica de teledetección óptica que permite medir la distancia entre un sensor ya sea aerotransportado o terrestres y un objeto, en el cual se utiliza la luz de un láser para obtener una muestra densa de la superficie de la tierra produciendo mediciones exactas representadas en puntos con atributos de coordenadas (X, Y, Z) (Esri, 2016).

Los principales componentes usados por el sistema LiDAR a nivel físico son: un vehículo de recolección ya sea un avión, un helicóptero, un dron, un vehículo automotor adecuado físicamente para esta labor y un trípode, adicional a esto se debe incluir un equipo de recolección de datos o sistema de escáner laser, un sistema de posicionamiento global (GPS) y un sistema de navegación por inercia (INS), teniendo en cuenta que los vehículos utilizados son solo el medio de transporte del equipo de captura, el láser escáner realiza el barrido de información que se desea obtener, el GPS proporciona una ubicación satelital del área donde se están realizando la captura de datos dándole así una georreferenciación espacial de los datos y el sistema INS mide la rotación, inclinación y encabezamiento del sistema (Castañeda y Martínez, 2018).

LiDAR es un sensor óptico activo que transmite rayos láser hacia un objetivo mientras se mueve a través de rutas de topografía específicas. El reflejo que produce el láser del objetivo lo detectan y analizan los receptores en el sensor LiDAR. Estos receptores registran el tiempo preciso desde que el pulso láser dejó el sistema hasta que regresó para calcular la distancia límite entre el sensor y el objetivo. Combinado con la información posicional (GPS e INS), estas medidas de distancia se transforman en medidas de puntos tridimensionales reales del objetivo reflector en el espacio del objeto (Esri, 2016).



Figura 2.3: Escáner Terrestre Leica C10

Fuente: (Castañeda y Martínez, 2018)

Los pulsos láser que se originan desde un sistema LiDAR se reflejan desde objetos y por arriba del plano del suelo: vegetación, inmuebles, puentes y así sucesivamente. Un pulso láser que se emite consigue retornar al sensor LiDAR a modo de una o cuantiosas devoluciones.

El primer pulso láser que retorna es el de mayor significación y se relacionará con la forma de mayor tamaño en la perspectiva como un árbol o la azotea de un inmueble. La primera devolución igualmente puede simbolizar el suelo, en cuyo proceso la técnica LiDAR mostrará únicamente un regreso.

Varias devoluciones pueden detectar las elevaciones de varios objetos dentro de la huella láser de un pulso láser saliente. Las devoluciones intermedias, en general, se utilizan para la estructura de la vegetación, y la última devolución para los modelos de terreno de suelo desnudo (Esri, 2016).

La información adicional se almacena junto con cada valor posicional x, y, y z. Los siguientes atributos del punto LiDAR se mantienen para cada pulso láser registrado: intensidad, número de devolución, cantidad de devoluciones, valores de clasificación de punto, puntos que están en el borde de la línea de vuelo, valores RGB (rojo, verde y azul), tiempo del GPS, ángulo de escaneo y dirección de escaneo. Una vez que el sensor ha

terminado de tomar la información genera nubes de puntos con información pero que es una nube de puntos. Una nube de puntos es un conjunto de datos de gran tamaño integrado por datos de puntos 3D. Los escáneres láser aéreos son los instrumentos de uso más frecuente para la recopilación de datos de nube de puntos geográficos (Castañeda y Martínez, 2018).

Los datos LiDAR geográficos están disponibles en los formatos LAS (LiDAR Aerial Survey) o ASCII (xyz), LAS es un formato de archivo estándar del sector definido por la American Society of Photogrammetry and Remote Sensing que incluye un sistema de clasificación de puntos. Un archivo LAS procesado puede tener puntos clasificados como tierra árida, vegetación alta o baja, edificio, etc. (Castañeda y Martínez, 2018).

Las nubes de puntos se obtienen de datos sin formato escaneados a partir de objetos físicos como exteriores e interiores de edificios, plantas de procesamiento, topografías o elementos fabricados. Después de recopilar los datos sin formato, estos deben convertirse en archivos de nube de puntos legibles. Programas como Autodesk ReCap o Arcgis convierte datos de exploración sin formato en archivos de exploración (archivos RCS) y archivos de proyecto (archivos RCP) que hacen referencia a varios archivos RCS. Los dos formatos se pueden asociar al dibujo 3D. Después, se puede añadir una capa de nube de puntos al Administrador de visualización, donde resulta posible filtrar los datos de nube de puntos o bien aplicar estilo de color (Autodesk, 2017).

Cada punto LiDAR debe poseer una tipificación establecida que precisa el tipo de objeto que mostró el pulso láser. Los puntos LiDAR se alcanzan a catalogar en diversas categorías que contienen suelo o terreno desierto, parte superior de cubierta forestal y agua. Las disímiles clases se precisan a través de códigos numéricos de enteros en el archivo LAS.

La nube de puntos en formato LAS es útil para la generación de imágenes de intensidad; tiene una amplia utilidad para la clasificación y filtrado (automático y manual) de puntos del terreno y los ubicados por encima de éste. Es el insumo principal para la generación de MDE LiDAR en formato vectorial como el TIN (Triangulated Irregular Network) o en ráster como una malla regular de datos de elevación (Esri, 2016).

➤ Tipos de LiDAR

Hay dos prototipos básicos de LiDAR: transportados de forma aérea y terrestres.

En el LiDAR aerotransportado el sistema se instala en un vehículo aéreo (avión, dron o helicóptero) desde el cual la luz de láser infrarrojo se emitirá hacia el suelo y se devolverá al sensor aerotransportado en movimiento. Existen dos clases de sensores de este tipo que son los topográficos y los batimétricos que brindan un sinfín de utilidades (Paulblgis, 2016).

El LiDAR terrestre se puede utilizar para derivar modelos de superficie para usar en varias aplicaciones como silvicultura, hidrología, geomorfología, planificación urbana, ecología del paisaje, ingeniería costera, evaluaciones de levamientos topográficos y cálculos volumétricos (Esri, 2016).

Hay dos tipos principales de LiDAR terrestre: móvil y estático. En el caso de la adquisición móvil, el sistema LiDAR se monta en un vehículo en movimiento. En el caso de la adquisición estática, el sistema LiDAR normalmente se monta en un trípode o dispositivo estacionario. Ambos sensores LiDAR tienen un láser seguro para los ojos (Castañeda y Martínez, 2018).

El LiDAR terrestre recopila puntos muy densos y altamente exactos, que permiten la identificación precisa de los objetos. Estas nubes de punto densas se pueden utilizar para administrar instalaciones, realizar relevamientos topográficos de carreteras y vías férreas, e incluso crear modelos de ciudades en 3D para espacios en el exterior y en el interior, para mencionar algunos ejemplos (Esri, 2016).

2.3.2.2.InSAR

Los Sensores Remotos encierran un conjunto de técnicas, que elaboradas por los científicos y llevadas a cabo por instrumentos, son utilizadas para la adquisición de datos e informaciones del mundo físico a partir de la detección y medición de señales en forma de radiación, partículas y campos emanados de objetos localizados en el rango de visión de un sensor (Short, 2009).

Los sensores activos son capaces de generar su propia energía irradiándola hacia el exterior, captando y midiendo posteriormente una fracción de esta señal; capacidad que les permite

trabajar aun en la oscuridad de la noche. Pertenecen a la familia de los sensores Radar (Radio Detection and Ranging), desarrollados a tal grado en las últimas dos décadas, que se desprendió toda una nueva línea de Radares, conocida bajo el nombre de “Radares de Apertura Sintética” (SAR - Synthetic Aperture Radar), la cual, gracias a su configuración particular, permite la creación de imágenes tridimensionales que detallan la superficie terrestre con un alto nivel de resolución, prescindiendo de antenas de gran tamaño. Esta tecnología también se destaca por la gran capacidad que posee para atravesar nubes y toda clase de condiciones meteorológicas, haciéndola inmune a las lluvias, nevadas, cenizas y vientos, al trabajar con radiaciones pertenecientes al espectro electromagnético de las microondas (Hermosilla, 2016).

El uso de satélites de alta resolución permite obtener una gran densidad de puntos en estas infraestructuras de carácter lineal, facilitando un análisis muy detallado del movimiento que se produce (Pros, González y Martínez, 2013).

Su nombre –Radar de Apertura Sintética- lo recibe debido a que durante su vuelo sobre la superficie terrestre a una velocidad constante, el SAR se encuentra continuamente almacenando los parámetros de los ecos que son recibidos cada vez, desde una posición distinta. Se dice que la suma coherente de estos ecos permite “sintetizar” en forma virtual la apertura de una antena más grande a la real (Zozaya, 2015).

Una de las más recientes técnicas que se vale de la tecnología SAR es la llamada Interferometría SAR (o InSAR), capaz de medir diferencias de altura en el mismo pixel entre dos imágenes distintas capturadas en distintas fechas y desde posiciones cercanas, generando un sinnúmero de aplicaciones en beneficio de toda la humanidad (Hermosilla, 2016).

La técnica InSAR se funda en el procesamiento y estudio de la información adquirida a través de imágenes SAR. Se precisan diferentes fases en el tratamiento de la técnica InSAR: la toma de los datos, la confección interferométrica y la creación de planos de subsidencias.

De las utilidades más notables del InSAR se destacan: divisar o bien examinar las consecuencias de imperfecciones en zonas residenciales; en áreas víctimas de terremotos; en los movimientos de tierras; en zonas volcánicas; y en deslizamiento de glaciares.

Mediante SAR podemos llegar a realizar estudios o generar mapas de deformación históricos, entendiendo que nos podemos remontar hasta el punto en que existan imágenes archivadas (en el caso ERS, desde 1991 hasta nuestros días), mientras que con las técnicas tradicionales nos restringimos a estudios anteriormente planificados y motivados, generalmente, por el conocimiento a priori de la deformación (Agudo, y otros, 2015).

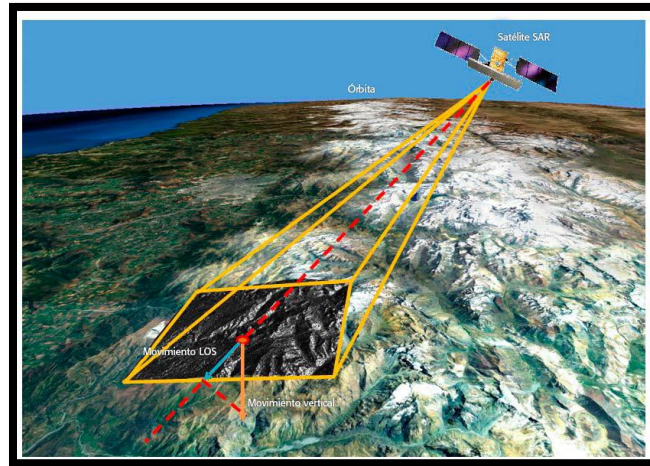


Figura 2.4: Geometría de adquisición de las imágenes SAR

Fuente: (Espinosa y Mora, 2012)

A lo largo de la generación de cada imagen SAR consigue alrededor 100 millones de medidas, a diferencia que con GPS logramos, si se usa adquisición manual, cerca de decenas, centenares o millares de puntos.

Asimismo, el SAR no tan sólo suministra una ganancia intensiva de datos, sino que esta ganancia se efectúa de modo regular en el tiempo. Esto proporciona los trabajos de seguimiento de los asientos durante un tiempo.

➤ Adquisición de los datos SAR

Consideramos un satélite, por ejemplo, el satélite ERS-1 de la Agencia Europea, que se encuentra a una cota nominal de 785 km y tiene una velocidad aproximada de 10 km/s. La configuración del sistema se basa en una antena situada sobre una plataforma satelital que transmite pulsos de microondas a intervalos regulares. Los pulsos se propagan por la atmósfera hasta llegar a la superficie terrestre, donde se producen varias reflexiones debidas a la interacción con diferentes objetos. Los ecos que vuelven en la dirección de la

antena se adquieren por la misma antena, que actúa como emisor y receptor. El retardo de cada eco es: $t = 2R/c$, donde R es la distancia antena-blanco y c es la velocidad de la luz. Hemos de tener en cuenta que la distancia recorrida por el pulso entre el satélite y un punto del terreno es doble (consideramos la ida y vuelta del pulso). El muestreo del terreno se obtiene mediante la repetición de los pulsos con una frecuencia que se denomina PRF (pulse repetition frequency). Mediante este muestreo obtenemos información en dos direcciones: en la dirección de range, dirección que une el satélite con el punto observado, y, en la dirección de azimuth, dirección de vuelo del satélite. (Agudo, y otros, 2015).

Un sistema SAR mide distancias y fases en la dirección LOS (Line Of Sight, i.e. línea que une el satélite con el punto tierra que estamos observando), con un cierto ángulo de incidencia respecto a la vertical, θ , que para los satélites ERS es de aproximadamente 23° . Como consecuencia, el sistema puede medir deformaciones en la dirección LOS. Así, como resultado del escaneo que realiza el satélite obtenemos una imagen SAR compleja (entendida como una matriz 2D de valores complejos) que para los satélites ERS cubre unos 100 por 100 km^2 . Cada píxel contiene dos componentes, que corresponden a la parte real e imaginaria de la señal compleja adquirida. A partir de dichas componentes podemos derivar una imagen de fase y otra de amplitud. La amplitud de una imagen SAR nos desvela información sobre la potencia de la señal reflejada por el terreno. Observamos que los diferentes tipos de superficie responden de manera diferente al impacto de los pulsos de microondas. Por ejemplo, las áreas urbanas muestran típicamente valores de amplitud muy altos, a diferencia de las zonas boscosas. (Agudo, y otros, 2015).

El uso de datos que se obtienen mediante interferometría diferencial avanzada (InSAR) resulta muy efectivo en el estudio de los movimientos sufridos por diques.

2.3.2.3. GPS diferencial (DGPS)

El sistema DGPS involucra la operación simultánea de al menos dos receptores, uno de los cuales se debe encontrar en un sitio de coordenadas conocidas o consideradas fijas, y el otro u otros en puntos cuyas coordenadas se requiere conocer. La combinación matemática de los observables de una y otra estación durante muchas épocas permite conocer las incógnitas requeridas en el sistema de ecuaciones que se forma (errores de reloj, retardos y

adelantos de la señal debidos a la troposfera e ionosfera, errores orbitales, etcétera). medidas: pseudodistancias de código (C/A en L1 y L2C, y P en L1 y L2) y medidas de fase de la portadora (en L1 y L2) (Galán, 2011).

Nominalmente, la precisión con que se puede medir la fase en un receptor es de 0.01 ciclos, lo cual implica que para las longitudes de onda en las portadoras GPS (unos 19 cm para L1 y 24 cm para L2), la medida de pseudodistancias de fase sin tener en cuenta los errores propios del sistema anteriormente citados, puede tener una precisión del orden de 2 mm (Galán, 2011).



Figura 2.5: Medición de asentamiento con GPS diferencial.

Fuente: (Ganzhi y Pinos, 2014)

La técnica relativo o diferencial GPS de vigilancia simultánea de la misma zona de satélites entre dos puntos (que se denomina referencia o base, y el otro rover o móvil) descarta la gran parte de los errores que afectan al GPS, éste es, evidentemente, el que se emplea en posicionamiento de precisión.

La precisión del método relativo o diferencial GPS con medidas de fase ha demostrado que se pueden alcanzar precisiones del orden milimétrico, depende sobre todo de la distancia de línea base y de la combinación de observables que se utilice. En función de la distancia de línea base también es importante el método que se utilice de resolución de ambigüedades, pero generalmente, con distancias tan cortas como las del caso que nos ocupa, incluso con receptores GPS monofrecuencia L1 es factible alcanzar una precisión por debajo de los 5 mm (Galán, 2011).

➤ Las fundamentales prestaciones del DGPS al control de movimientos son:

- a) Puentes, presas y diques de contención; estructuras elevadas o petroleras; tuberías.
- b) Movimientos de laderas y subsidencias del terreno; campos petroleros; volcanes.
- c) Análisis de datos y movimientos a causa de terremotos.

En los últimos 10 años, la exploración de la utilidad del método DGPS se agrupa especialmente en las áreas: control de movimientos en presas y diques; puentes, torres; estructuras de tierra, y laderas.

Se observa que Estados Unidos y China son los territorios en los que más avanza en la investigación de las prestaciones de esta técnica. China se encuentra a la delantera, pues desarrolla un gran trabajo de exploración en tal campo, investigan en el control de movimientos de puentes, rascacielos e infraestructuras y diversas áreas tales como el control de subsidencias en el terreno.

De los aspectos más significativos de la técnica DGPS es que resulta una técnica viable en la utilización para el monitoreo de movimientos en infraestructuras por sencillez de montaje y la simplicidad de operación del sistema. Además, puede trabajar eficientemente con cualquier otro equipo de monitoreo de movimientos preexistente y el valor que se asocia es bajo en comparación con otros sistemas de auscultación tradicionales.

Los datos que se adquieren se pueden tratar en tiempo real con telecontrol y monitorización, lo que interviene de buena manera en la capacidad de reacción en la gestión de la seguridad de los diques o de cualquier otra infraestructura.

Se puede afirmar que el sistema es útil de cara a la gestión de la auscultación y la seguridad de diques, al reflejar adecuadamente su movimiento y deformación, constituye un método alternativo a los existentes.

2.3.2.4. Celdas de asentamiento

La celda de asentamiento (settlement cell) es un instrumento muy sencillo y útil, que su diseño permite medir deformaciones verticales (asentamientos o expansiones) en un punto de interés al interior de un terraplén. Las lecturas se realizan desde una caseta y es

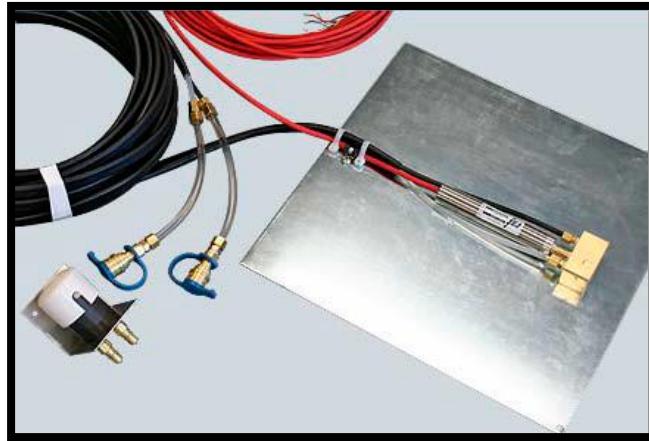


Figura 2.6: Celda de asentamiento de cuerda vibrante

Fuente: (Manual de Mecánica de Suelos. Instrumentación y Monitoreo del Comportamiento de Obras Hidráulicas, 2012)

particularmente útil donde el acceso es difícil. Además, su instalación no interfiere con el proceso de construcción.

Las celdas de asentamiento consisten en tres componentes principales: un transductor de presión, un conjunto de tubos y cables de conexión, y un depósito de líquido; y los accesorios: un derivador múltiple, un barómetro, y una unidad de lectura.

- Transductor (transducer): Dispositivo que consta de una carcasa hermética de acero inoxidable en donde se aloja el sensor para medir la presión. Los transductores pueden ser de cuerda vibrante o neumáticos.
- Tubos portadores (carrier pipe): Consisten en un par de tubos de plástico de 4.8 mm (3/16 in) de diámetro dentro de una cubierta de polietileno, que están llenos de un líquido compuesto por una mezcla de 50% de agua y 50% líquido anticongelante (etilenglicol). Los tubos usan conectores rápidos para acoplarse al depósito de líquido. En el transductor

que se venteó se utiliza un tubo de 3.2 mm (1/8 in) de diámetro que se conecta a una cámara desecante (para absorción de humedad).

- Cables eléctricos: Para conectar el transductor con la unidad de lectura.
- Depósito de líquido (reservoir): Este depósito mantiene llena la tubería de conexión con el transductor. El líquido es agua desairada; si el instrumento se localiza en un sitio donde se presenten heladas, el líquido debe estar compuesto por una mezcla de agua y etilenglicol en una proporción 1:1.
- Derivador múltiple (connection manifold): Para conectar al depósito hasta ocho celdas.
- Barómetro (barometer): Registra la presión atmosférica en el momento de la toma de lecturas.
- Unidad de lectura: Tiene la función de proporcionar la energía y recibir las señales eléctricas del transductor, exhibir las lecturas en forma digital y almacenar los datos.



Figura 2.7: Instalación de una celda de asentamiento

Fuente: (Manual de Mecánica de Suelos. Instrumentación y Monitoreo del Comportamiento de Obras Hidráulicas, 2012)

El transductor de presión, unido al tubo lleno de líquido, quedan embebidos en el relleno; el otro extremo del tubo termina en un depósito de líquido. El depósito de líquido debe colocarse con una elevación mayor que el punto de medición. El tubo actúa como una

columna de líquido, y el transductor mide la presión en el fondo creada por la columna de agua. Al asentarse la base en la que se coloca el transductor, se incrementa la altura de la columna de agua. El asentamiento se calcula con la medición del cambio de presión y transformándolo en metros de carga hidráulica, mediante la diferencia se conoce el asentamiento.

2.3.2.5. Sonda Hidrostática de Asientos(Profiler)

Profiler es una sonda hidrostática utilizada en líneas de asientos planteada para la vigilancia de asientos o levantamientos bajo terraplenes o cimentaciones. El método no es más que una sonda de asientos provista con un transductor de presiones de alta sensibilidad acoplada a un depósito por un tubo relleno de líquido.



Figura 2.8: Sonda Hidrostática de Asientos

Fuente: (Catálogo Instrumentación Geotécnica. SISGEO, 2016)

La sonda Profilfer se extiende metro a metro y pasa por una tubería de polietileno de alta densidad enterrada en el relleno, terraplén, etc.

El transductor computa el perfil de la tubería referente al nivel del depósito que se ubica sobre el trípode, que se sitúa en suelo firme. En el panel de la cara superior del enrollador, un display LCD muestra la lectura directamente en milímetros.

2.3.2.6. Sistema de Control de Terraplenes DSM

El monitoreo de asientos del terreno o de terraplenes es de radical relevancia para la valoración de la estabilidad durante la construcción.

Constan dos tipos de células de asiento DSM: el modelo D422R para terraplenes y el modelo D422F para sondeos.

Según del tipo de utilización, las células de asiento se colocan en disímiles configuraciones, ensambladas entre sí por una línea hidráulica a una célula de referencia y acopladas a un sistema automático de adquisición de información.



Figura 2.9: Sonda Hidrostática de Asientos

Fuente: (Catálogo Instrumentación Geotécnica. SISGEO, 2016)

El principio de trabajo se fundamenta en la variación de presión producida por el cambio en la altura de una columna de líquido. Las diferenciaciones de nivel entre un punto de referencia y los puntos de medida causan variaciones proporcionales del nivel hidráulico en las células de asiento.

Conclusiones parciales del capítulo:

- La precisión de determinación de los asentamientos de las obras debe ser formulada por el inversionista, el constructor o aquel que la explota, en base al conocimiento de las características constructivas de la obra, su cimiento, cargas, tipo de suelo, régimen de explotación, y la acción de las fuerzas a que se somete.
- De los medios tradicionales para medición de asentamientos en diques el más recomendable es el Nivel Digital pues brinda gran exactitud en las mediciones, y puede ser aumentada si se usan además miras de invar, ya que estas no se ven afectadas por los cambios de temperatura.
- De los métodos novedosos para la medición de asentamientos resultan sumamente interesantes el uso del DGPS, InSAR y LiDAR (aerotransportado en drones o terrestre) por todo el desarrollo que tienen hoy en día, y además se pueden usar para otras acciones que no sea la medición de asentamientos.

CAPÍTULO 3: "SELECCIÓN DEL MÉTODO MÁS EFICIENTE PARA MEDIR ASENTAMIENTOS EN DIQUES. CASO DE ESTUDIO: DIQUES DE CONTENCIÓN DE CAYO BUBA, VARADERO".

En este capítulo se detalla el estado actual de la construcción de los diques en Cayo Buba. Se realiza la selección del método más eficiente para medir asentamientos en diques, considerando los expuestos en el capítulo anterior y se establece una metodología de medición que pudiera ser usada en los diques del caso de estudio de este trabajo de diploma.

3.1. Estado actual de las obras en ejecución:

Desde noviembre de 2018 se trabaja en la fabricación de los diques de la parcela 21 y en febrero del presente año se iniciaron las construcciones en la parcela 20 .

Según controles de autor, que encabezó (Chirino Núñez, Ángel Luis. 2019) la construcción de diques avanza de forma satisfactoria desde el punto de vista estructural pero no se realizan mediciones para darle seguimiento a los asentamientos, al no existir una base Plano-Altimétrica.

Hasta el presente se desarrollaron las siguientes actividades en el cayo:

- Área total intervenida: 145 663 m²
- Longitud de diques construidos: 2851 m
- Longitud de arenaplen (acceso al muelle de servicio): 600 m
- Área con rellenos compactada: 17053 m²
- Área empleada como vaciaderos de arena producto del dragado: 39719m²
- Área influenciada por los rellenos con vegetación muerta: 795859 m²

El proyecto considera asentamientos de hasta 2 m, y los diques en la primera etapa tienen una altura para el tránsito sobre los mismos. Es necesario dar seguimiento a sus asentamientos ya que el proyecto establece que hasta que estos no se asienten la cantidad establecida no se deben llevar los diques hasta la cota de proyecto. De existir estabilidad en los mismos, el proyectista decidirá si es necesario esperar, de lo contrario la etapa constructiva debe servir como precarga con el paso de la maquinaria pesada.



*Figura 3.1: Diques construidos hoy en día en las parcelas 21 y 20.
Fuente: (GeoCuba Estudios Marinos, 2019)*

3.2. Selección del método de medición a utilizar.

El método de medición a utilizar para el control de los asentamientos en los diques de Cayo Buba debe seleccionarse responsablemente para lograr la mayor eficiencia posible y cumplir con la precisión solicitada por los inversionistas del proyecto. Es necesario empezar la medición de asentamientos cuanto antes pues no se puede dar la cota máxima de proyecto hasta que no tener un control de los asentamientos.

De los métodos tradicionales, para la realización de las mediciones en el área de estudio el autor considera que no es favorable usar Estaciones Totales pues en la nivelación ocurren errores instrumentales por desajuste en el limbo vertical. Además, es difícil establecer una línea de referencia fija, situada fuera de la influencia de los movimientos, a la que puedan

referirse todos los puntos controlados pues el área en el cayo es muy limitada y tendría consecuencias desfavorables en la vegetación.

Los Niveles Digitales son fáciles de utilizar, con su empleo se puede señalar mayor precisión, automatización en la captura de datos, rapidez, manejo de la información en formatos digitales y la obtención del producto final: el plano topográfico con características impecables impensables en los levantamientos que se realizaban hace 20 años. Pero al no existir monumentos de referencia Plano-Altimétricos para comenzar las mediciones, se considera desestimado este método. Asimismo, es un trabajo que se realiza directamente sobre el terreno y significa un empleo significativo de tiempo realizar las mediciones.

De los métodos de tecnología avanzada para la medición de asentamientos, se desestiman directamente las Celdas de asentamiento, las Sondas Hidrostáticas de Asientos y Sistema de Control de Terraplenes DSM ya que van enterradas y significaría excavar en los diques ya construidos y un gasto económico elevado que no está estimado por los inversionistas y realizar todos los tramites de compra e importación podría significar más atrasos en el control de las deformaciones verticales de los diques objeto de estudio y directamente en el cronograma de la obra.

Ya se explicó que la tecnología LiDAR ejecuta una investigación masiva de puntos, tributa datos abundantes de todos los objetos existentes en el área donde se emplee. Pero esto puede significar también en un inconveniente al momento de su almacenaje. Claro está que toda esta información deberá ser guardada completamente, sin discriminar nada, pues la cantidad de información que se obtiene constituye una de las ventajas. Por ende, hemos de disponer de una tecnología conforme al volumen de datos, de modo que se requiere de una memoria abundante en nuestro ordenador de trabajo, mucho mayor que en otros métodos.

La falta de información acerca de esta técnica hace que el conocimiento e interés general en ella sea escasa, de manera que los investigadores sean los únicos que trabajen con ella y desarrollen distintos métodos de trabajo. Actualmente se desarrolla bastante, y se obtienen resultados bastante óptimos en el tratamiento de registro.

Si bien ahorra tiempo de trabajo, al ser desconocida esta tecnología en nuestro país significaría un atraso en la realización de las mediciones de los diques de Cayo Buba de las parcelas 21 y 20, en los que urge realizar el control de asientos.

Por su parte, la tecnología InSAR es el fácil acceso hoy en día pues las grandes compañías y agencias espaciales como la ESA están dispuestas a proveer de información en forma abiertamente disponibles y libres de costo para todo tipo de usuarios al igual que el software S1TBX para todo aquél que se interese en manipular imágenes Sentinel-1.

Las imágenes SAR predestinadas a elevar modelamientos de deformación superficial, tienen una clara superioridad cara a los puntos de examen que se obtiene por estaciones GPS o inclinómetros. Esto se causa especialmente a que las imágenes SAR suministran una cobertura espacial que ni una densa red de sensores in situ podría superar. Sin embargo, por otra parte, se debe considerar que tanto las estaciones GPS como los inclinómetros ostentan una resolución temporal que es imposible para InSAR a causa de que el ciclo orbital que utiliza éste, generalmente toma varios días o semanas. En contextos difíciles, InSAR brinda la ventaja añadida, que reside en prescindir de observadores en terreno, impidiendo no sólo poner en peligro la integridad física de los expertos y los equipos sino también de la flora y fauna del área de estudio que puede provocar la colocación y manejo del instrumental.

Para el empleo del DGPS se debe velar que las condiciones meteorológicas sean favorables (que no halla nubes) para no afectar la precisión, y significaría un factor incalculable para programar las mediciones.

Por tanto, el autor plantea que el método más eficiente, que permitirá realizar las mediciones de asientos en los diques de Cayo Buba en cuanto el inversionista solicite el servicio a entidades especializadas sin comprometer la precisión establecida en el proyecto es el método InSAR.

En la medición de los asentamientos hay que mantener ciertos requisitos técnicos (tolerancias), las cuales están en función de la precisión que se requiere alcanzar en el tipo de medición que se ejecutará. Anteriormente se expuso que los diques de Cayo Buba son

obras clasificadas como obras tendentes a asentarse por lo que se recomienda trabajar con los datos de InSAR con un error medio cuadrático nunca superior a ± 5.0 mm.

3.3. Establecimiento de la metodología de las mediciones.

Con el fin de llevar a cabo las mediciones, la presente metodología se compone de continuas operaciones a seguir. Gran parte de la totalidad de las operaciones son del tipo informáticas y por ello es necesario el empleo de un software que se especializa en el trabajo con de imágenes satelitales con el nivel de complejidad que involucra. Seguidamente, el esquema de flujo a seguir, que comienza con la adquisición de las imágenes SAR, y concluye con la generación y visualización de un interferograma.

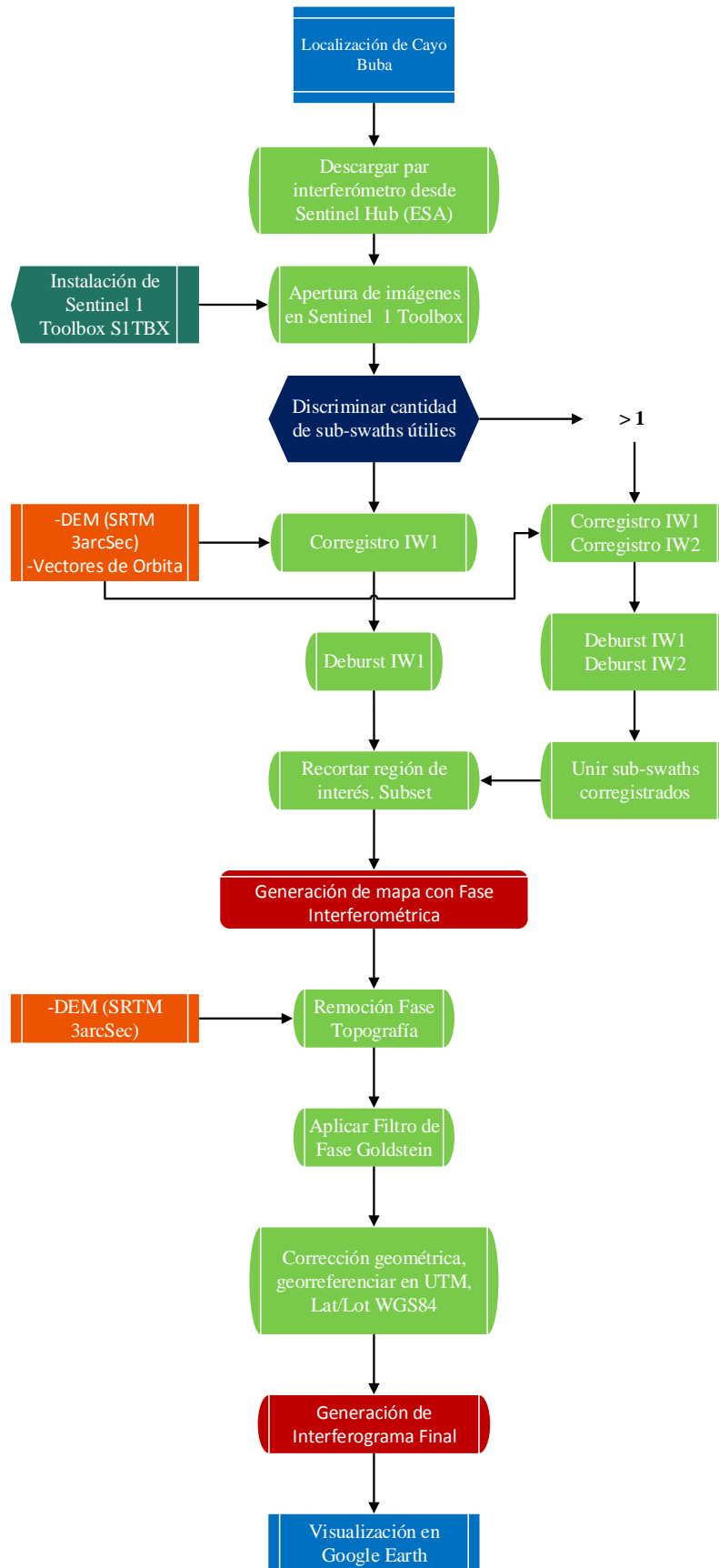


Figura 3.2: Diagrama con la metodología a seguir.
Fuente: (Elaborado por el autor)

3.4. Desarrollo de la metodología:

➤ Localización de Cayo Buba:

Para inicial, se localiza Cayo Buba en estudio ubicándolo dentro del mapa. Este emplazamiento se puede llevar a cabo en la misma plataforma desarrollada por la ESA bajo el nombre de Sentinel Scientific Data Hub, donde se encuentran gratuitamente disponibles los productos Sentinel-1, Sentinel-2 y Sentinel-3. A la plataforma se accede directamente desde <https://scihub.copernicus.eu/dhus/>

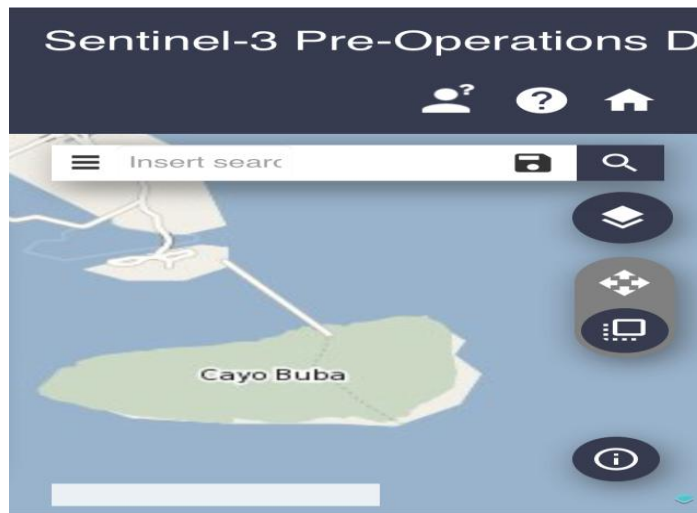


Figura 3.3: Localización de Cayo Buba.

Fuente: (Sentinel Hub, ESA)

➤ Descarga de par Interferométrico SAR

Para la descarga de imágenes, es preciso registrarse y adquirir un perfil con usuario y contraseña, que es totalmente gratuito. Para localizar las imágenes de trabajo, se requiere ingresar los criterios de búsqueda y delimitar la región de interés. En este caso, se encierra la región que rodea a Cayo Buba, se marca la opción para Sentinel-1 y se define el período de captura e ingestión de imágenes, el cual pudiera ser para el caso del estudio de Cayo Buba desde enero de 2019. Se detallan el tipo de producto Single Look Complex, el modo de adquisición Interferometric Wide swath y la polarización deseada (VV o VV+VH).

Automáticamente el buscador extiende todas las imágenes capturadas por el sensor y disponibles en la plataforma bajo las especificaciones ya ingresadas. Para seleccionar un par de imágenes SAR compatibles, se debe tener especial atención tanto en la polarización como en la captura ascendente o descendente de las imágenes. Para la descarga, se debe considerar que cada imagen Sentinel-1 pesa aproximadamente entre 2 a 3 Gb si posee un solo sentido de polarización (VV o HH) y entre 5 a 7 Gb si posee doble polarización (VV+VH o HH+HV).

➤ Sentinel-1 Toolbox (S1TBX) y apertura de imágenes SAR

Las operaciones que continúan estarán realizadas en el software Sentinel-1 Toolbox, que se desarrolló y distribuyó por la Agencia Europea Espacial ESA. Este programa incluye una compilación de herramientas de procesamiento y análisis capaz de tolerar los formatos de misiones SAR de la ESA. Estas misiones incluyen Sentinel-1, ERS-1&2 y ENVISAT. S1TBX admite la realización simultánea de múltiples procesos de forma independiente; incluye herramientas de calibración, filtros de speckle, corrección, ortorectificación, mosaikado, polarimetría e interferometría (ESA).

Tras la descarga de las imágenes SAR, éstas se abren directamente desde S1TBX. La visualización de la imagen se obtiene tras desplegar las bandas y seleccionar la de Intensidad (físicamente hablando, componente de Amplitud).

Las imágenes adquiridas en modo IW se componen de 3 escenas o subswath, llamadas IW1 (Interferometric Wide swath 1), IW2 e IW3, que abarcan desde la escena más cercana al sensor hasta la más lejana respectivamente. A su vez, cada subswath se subdivide en franjas llamadas Burst.

➤ Corregistro

Este paso es esencial antes de comenzar con el proceso interferométrico. Para comenzar, se asigna una imagen como la principal (master image) y otra como secundaria (slave image), y se selecciona el subswath IW1 para comenzar. Este proceso permite que los píxeles de la imagen secundaria se “remueban” con el fin de se alinien con la imagen maestra. Conceptualmente, este procedimiento asegura que cada punto en tierra se

corresponda con la misma coordenada (rango, azimuth) de pixel tanto en la imagen maestra como en la secundaria, representando cada punto de la superficie en el mismo pixel. Para tal efecto es imprescindible contar con un DEM de la zona (SRTM 3sec) y los datos orbitales para cada imagen (estos datos contienen información acerca de la posición y velocidad del satélite durante la adquisición de cada imagen), ambos automáticamente se descargan por el software.

➤ Deburst y Merge

La operación Deburst se utiliza para juntar cada franja Burst de cada subswath que ya se corrigió en una sola imagen. La diferencia es clara y permite trabajar el producto de forma más compacta.

Posteriormente la operación Merge se utiliza para ensamblar dos subswaths distintos siempre que éstos se encuentren uno al lado del otro.

➤ Subset y fase interferométrica

La función Subset que se incluye en S1TBX resulta de gran utilidad cuando se trata de pequeñas regiones de interés en medio de grandes regiones que se abordan por la imagen SAR. Esta función permite limitar el área de estudio por medio del recorte de la imagen y de paso acortar así los tiempos de procesamiento en las siguientes operaciones.

Una que se recorta la imagen SAR, los pasos a seguir son netamente interferométricos. Para comenzar con la generación de la fase interferométrica, ésta es formada mediante la multiplicación cruzada de la imagen maestra con el conjugado complejo de la secundaria. La amplitud de ambas imágenes es multiplicada mientras que la fase queda representada por la diferencia de fase entre las dos imágenes. Este complejo procedimiento matemático se realiza automáticamente por S1TBX mediante la función “Interferogram Formation”, en esta función también se extrae la fase de tierra plana ϕ_{flat} .

➤ Remoción de fase topográfica

La fase interferométrica se conforma de cinco distintos componentes, el primero de ellos se removió en el paso anterior y corresponde a la fase contribuida por la curvatura de la tierra ϕ_{flat} . De esta manera, despreciando la contribución de la fase atmosférica y anulando el ruido (suponiendo la conservación de las propiedades retrodispersoras de la superficie), sólo queda remover la fase generada por la topografía del terreno para aislar el movimiento que se induce entre ambas imágenes SAR. Esta fase topográfica puede ser calculada y modelada mediante un Modelo Digital de Elevación (SRTM 3sec), el cual se descarga automáticamente por S1TBX. Bajo esta operación, la fase interferométrica queda reducida a la fase inducida por el movimiento del terreno, obteniendo el primer interferograma en el estudio.

➤ Filtro de Goldstein

La fase interferométrica que se obtiene del paso anterior continúa visualmente distorsionada. Los principales factores que contribuyen en ésta distorsión son provenientes de ruidos termales, cambios temporales, o errores aleatorios en los procesos previos. El algoritmo de filtración que ideó Goldstein y Werner el año 1998, mejora significativamente la visibilidad de los asientos en un interferograma y reduce el ruido que se induce por factores externos decorrelacionados (Goldstein & Werner, 1998). Este filtro alcanza sus mejores resultados al suavizar la fase en regiones con altas correlaciones, mientras que resulta inútil en zonas donde la correlación es nula

➤ Corrección geométrica

Para poder visualizar correctamente el interferograma que se obtiene, éste debe encontrarse debidamente en posición en una localización geográfica única y bien definida en un sistema de coordenadas con un Datum específico, este posicionamiento se llama georreferenciación de la imagen. En este caso, el Datum a utilizar corresponde al WGS84 (World Geodetic System 84), estos parámetros se ajustan nuevamente en el S1TBX.

En la nueva imagen que se obtiene ya es posible discriminar la ubicación de lugares cercanos al área de estudio, pero aún no se logra localizar a ciencia cierta la ubicación del

precisa dentro del mismo interferograma. Para ello resulta ventajoso contar con el software de visualización gráfica del globo completo provisto de mapas tridimensionales, Google Earth.

➤ Visualización en Google Earth

Para montar una imagen externa en Google Earth se requiere una georreferenciación en el sistema de coordenadas Lat/Lon WGS84, el cual también se encuentra disponible en las herramientas de SITBX.

Al observar detenidamente el interferograma que se obtiene mediante el proceso de interferometría diferencial, la escala de Fase desplegada automáticamente al costado izquierdo de Google Earth permite analizar la magnitud del asentamiento.

La secuencia con que se mueven los colores dentro de un interferograma resulta un factor clave al intentar discriminar entre un movimiento ascendente o descendente del terreno en cuestión. Según la regla interpretativa si al observar el valor de la fase se dirige desde los valores positivos hacia los negativos, entonces el orden sugiere un acercamiento de la superficie al sensor, es decir, esta superficie describe un levantamiento; en cambio, si se dirige desde los negativos a los positivos, entonces el orden sugiere un alejamiento relativo de la superficie al sensor, y por lo tanto un movimiento de subsidencia o asentamiento; esto se debe a que la fase interferométrica representa una medida de distancia entre el Sensor que captura la imagen y la superficie observada, la cual puede verse disminuida (se acorta distancia) como amplificada (se incrementa la distancia). Considerando que por cada ciclo que se completa se tiene la mitad de la longitud de onda con que trabaja el satélite radar, es decir, ~2,8cm para Sentinel-1A, resulta correcto estimar los valores de asentamiento.

CONCLUSIONES

- Los diques son estructuras que se pueden clasificar en dependencia de su utilización o materiales componentes. Los de Cayo Buba son diques de contención enrocados con rajón. Al ser estructuras construidas sobre el suelo, es característico el asentamiento en ellos. Hasta que se asienten la cantidad que se establece por el inversionista no se deben llevar los diques hasta la cota de proyecto.
- En Cuba predomina el uso de Niveles Ópticos y Estaciones Totales para la medición de asentamientos, pero a nivel mundial cada día surgen métodos nuevos que son aplicables a estas acciones topográficas. El método a utilizar por cada usuario depende en gran medida de la precisión que necesita y la que le es capaz de brindar el equipo.
- Para Cayo Buba, un área donde no existen puntos de referencia y se persigue preservar al máximo la vegetación autóctona, es recomendable usar la Interferometría con Radar de Apertura Sintética (InSAR). Este método proporciona descargar de internet los datos de las capturas realizadas por satélites SAR y con simples programas informáticos medir los asentamientos en los diques por el período deseado.

RECOMENDACIONES

- Al Departamento de Construcción de la Universidad de Matanzas considerar en alguna de las asignaturas del próximo plan de estudio E conocimientos referidos a la construcción de diques al resultar una solución para territorios bajos ante las tormentas y la sobrelevación del nivel del mar producto al Cambio Climático.
- Al Departamento de Construcción de la Universidad de Matanzas incluir en el programa de la asignatura Topografía el análisis de métodos novedosos que son factibles utilizar en los trabajos topográficos.
- A empresas cubanas como GeoCuba iniciar en el uso de tecnologías modernas, tales como la Interferometría con Radars de Apertura Sintética (InSAR) pues resultan un gran avance de la ciencia y les brinda múltiples prestaciones, una de ellas la medición de asentamientos.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Acosta González, L. E., Ricardo Desdín, S. E., Cano Ricardo, Y. & Rivas Freeman, E., 2017. *Monitoreo geodésico de los asentamientos en tanques verticales de almacenamiento*. Holguín.
2. Acosta Gonzalez, L. E., 2011. *Monitoreo del nivel de vulnerabilidad geotecnica en estructuras por metodos goeodésicos*. Habana.
3. Acosta, L. E., 2011. *Monitoreo del nivel de vulnerabilidad geotécnica en estructuras por métodos geodésicos*. La Habana.
4. Acosta, L. y. G. J., 2007. *La Geodesia en los estudios de peligro, vulnerabilidad y riesgos de desastres*. Habana.
5. Agudo, y otros, 2015. *¿Como medir deformaciones del terreno con teledetección radar?*.
6. Ahrens, J., 1987. *Characteristics of reef breakwaters*. CERC, Vicksburg USA, Technical Report CERC-87-17.
7. Ahrens, J. P. y. J. C., 1990. *Design and Performance of Reef Breakwaters*. Journal of Coastal Research, SI Vol. 7, pp. 61-75.
8. American Petroleum Institute, 2014. *API 653. Welded Steel Tanks for Oil Storage, 5*. Washington, DC, USA.
9. Autodesk, 2017. *AUTODESK KNOWLEDGE NETWORK*. Obtenido de <https://knowledge.autodesk.com/es/support/autocad-map-3d/learn-explore/caas/CloudHelp/cloudhelp/2018/ESP/MAP3D-Use/files/GUID-7C7DD8A7-B561-45B0-A803-852E0A667F3C-htm.html>.
10. Berry, P. L. & Reid, D., 1997. *Mecanica de Suelos*. Ciudad de México.
11. California, D. O. W. R. T. C. N. R. A. S. O., 2012. *Urban Levee Design Criteria*.
12. Capotea, A. y otros, 2015. *Nuevo Dique de Poniente del Puerto de Almería (1.a fase)*. Revista Iberoamericana del Agua 3.
13. Castañeda Ducuara, L. J. & Martínez Rodríguez, W. A., 2018. *ANÁLISIS COMPARATIVO ENTRE LEVANTAMIENTOS TOPOGRÁFICOS CONVENCIONALES DE DETALLE VERSUS TECNOLOGÍA LiDAR TERRESTRE ESTACIONARIA*,

APLICADA A DEFORMACIONES EN ESTRUCTURAS DE GRAN TAMAÑO.
UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS, BOGOTÁ.

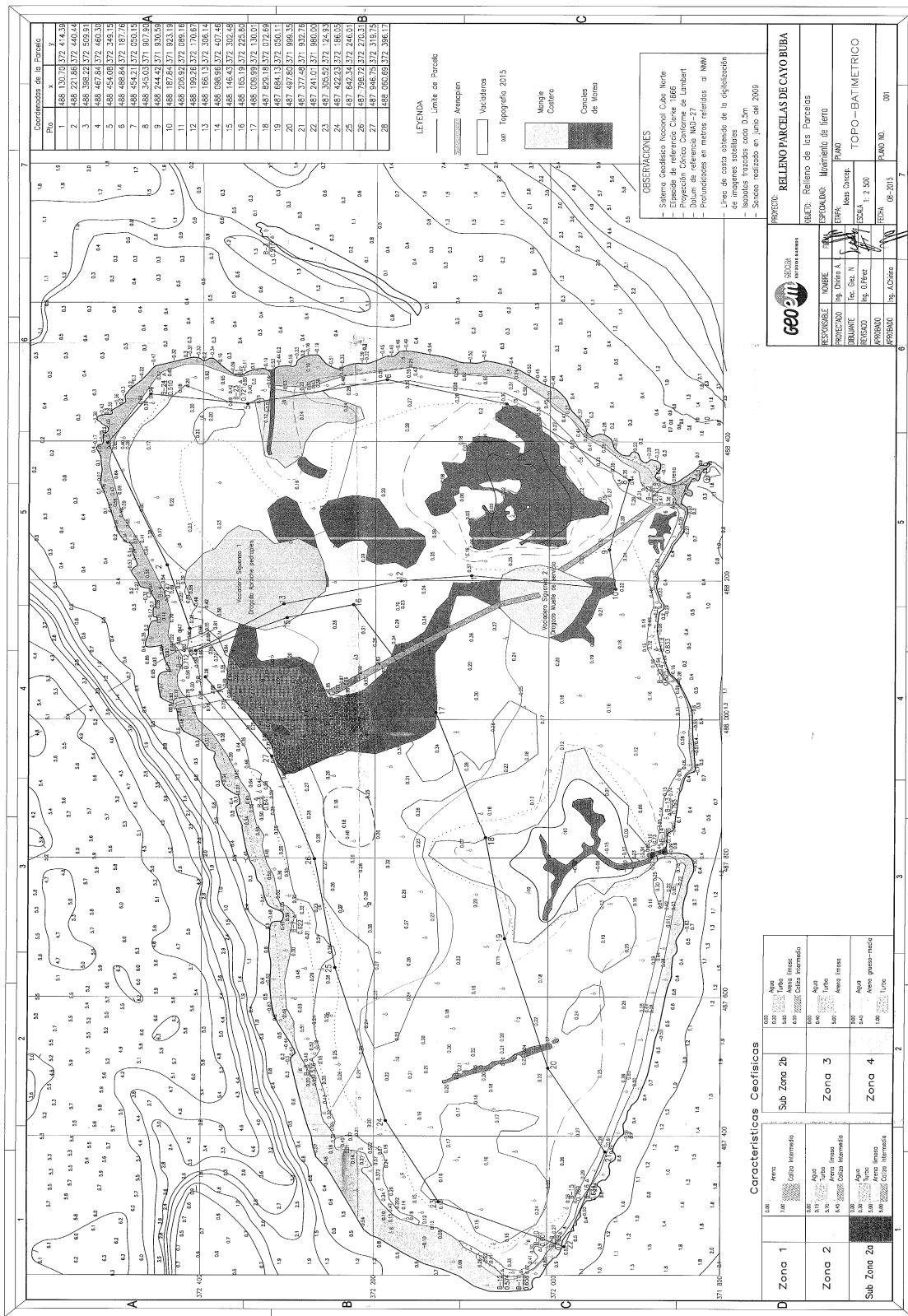
14. CEM, 2003. *Coastal Engineering Manual - CEM.M 1110-2-1100*. US Army Corps of Engineers – Washington, D.C.
15. Chaquea, A. G. C. M. I. M. A. S. J. C. & V. J. F., 2016. *Análisis y diseño para la rehabilitación del dique marginal derecho del Río Cali entre el Km 25+000 Y 25+300*. Pontificia Universidad Javeriana Cali.
16. CHENG, P. W. J. S. H. Z. W., 2002. *Large Structure Health Dynamic Monitoring Using GPS Technology*. Hong Kong: The Hong Kong Polytechnic University.
17. Colectivo de Autores, 2018. *Niveles Ópticos. Fundamentos de instrumental*. Departamento de Agrimensura. Universidad Nacional de la Plata.
18. Corredor A, S. M. P. E. M. E. G.-M. M. M. J., 2014. *Single-layer Cubipod armored breakwaters in Punta Langosteira (Spain)*. Proc. of 34th International Conference on Coastal Engineering. ASCE2014;34.
19. Das, B. M., 2007. *Fundamentos de Ingeniería Geotécnica*. México.: Thomson and Leaning.
20. Department of the Army, U. A. C. o. E. M., 2002. *Structural Deformation Surveying*. Washington, DC 20314-1000.
21. Esri, 2016. *ArcMap*. Obtenido de ArcGis For Desktop: <http://desktop.arcgis.com/es/arcmap/10.3/manage-data/las-dataset/what-is-lidar-data-.htm>.
22. Fernández, W. D., 2015. *Mejora de la precisión planimétrica y altimétrica en levantamientos topográficos*. Studiositas.
23. Fredlund, M. D. F. D. G. & W. G. W., 2000. *An equation to represent grain-size distribution*. Canadian Geotechnical Journal.
24. Galán Martín, D., 2011. Control de movimientos en presas mediante DGPS. Aplicación a la presa de La Aceña, España. *Tecnología y Ciencias del Agua, antes Ingeniería hidráulica en México, vol. II, núm. 3, julio-septiembre de 2011* , pp. 159-176.
25. Ganzhi Fajardo, F. P. & Pinos Ruiz, C. F., 2014. *Control de asentamientos de diques sobre suelos blandos construidos en el Proyecto Control de inundaciones del Río Cañar*. Cuenca, Ecuador .

26. Gardey, P. y., 2017. *Definición de dique - Qué es, Significado y Concepto*. Florida.
27. GeoCuba Estudios Marinos, 2015. *Conceptualización del Plan General de relleno de Cayo Buba*. La Habana.
28. GEOCUBA, 2004 . *Metodología para el control de deformaciones de obras a partir de métodos geodésicos*.
29. Gil Ruiz, J. & Orozco Collazos, J. A., 2016. *Diseño de la rehabilitación del dique del Río Cauca entre el Km 18 + 925 A Km 19 + 025 empleando cuatro materiales disponibles en la Ciudad de Cali*. Pontificia Universidad Javeriana Santiago de Cali.
30. Goldstein, . R. M. & Werner, . C. L., 1998. *Radar interferogram filtering for geophysical applications*. California: California Institute of Technology.
31. Gutiérrez-Serret R, G.-G. J., 2015. *Diseño, construcción y explotación de diques de abrigo portuario en España desde finales del siglo XX*. Madrid., pp. 80-97.
32. Gyssels, P., 2014. *Optimización y diseño de estructuras de defensa costera de enrocado en el litoral argentino*. Universidad Nacional de Córdoba.
33. Gyssels, . P. y otros, 2013. *Breakwater stability study by a physical model*. IMTA Vol. iv, núm. 4.
34. Hermosilla Díaz, D. E., 2016. *Interferometría Radar de Apertura Sintética (InSAR) aplicada al estudio del movimiento en laderas aledañas al volcan Calbuco con ayuda de imagenes Sentinel-1*. Universidad Técnica Federico Santa María.
35. Institute., A. P., 2014. *API 653. Welded Steel Tanks for Oil Storage, 5*. Washington, DC, USA: API Publications.
36. Jin Luo, Q. Z. L. L. W. X., 2018. *Monitoreo y caracterizando la deformación de una presa de tierra en la provincia de Guangxi, China*. Engeo.
37. Julian, A. H., 2014. *Metodología para el análisis de estabilidad de taludes*. Madrid.
38. LARSON, R. E. B. P. E. L., 1997. *Prediction of settlements of embankments on soft, fine-grained soils*. Londres.
39. Leiva Llerena, I., 2017. *Tendencias actuales en el análisis de la integridad de presas de tierra*. Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas.
40. Lligüi Ortega, E. A. & Ñauta Ñauta, P. E., 2014. *Análisis geotecnico-ecológico comparativo entre diques construidos con materiales arcillosos y gravosos en el Proyecto Control de inundaciones del Río Cañar*. Cuenca.

41. Maciñeira E, P. E. B. V. S. J. N. F., Proc. Coastal Structures and Solutions to Coastal Disasters Joint Conference, ASCE 2015, 9-11 Sep. *Probabilistic design of the secondary breakwater in the new harbour basin of the outer port of A Coruña*. Boston.
42. Medina JR, V. C., 2014. *Diseño y construcción de diques rompeolas*. s.l.:Ingeniería del Agua, IWA Publishing-Editorial UPV 2014;18.1.
43. Milán Guevara, C. A., Machado Querol, I. & Rueda Pérez³, J., 2018. *Control de deformaciones en embalses con el empleo del taquímetro electrónico TS-09 Plus para la nivelación trigonométrica*. La Habana
44. Montero, J. F., 2016. *Una contribución al establecimiento del margen de seguridad contra el deslizamiento de presas de gravedad en explotación en función de la información disponible*. Lima.
45. NC, 1.-1., 1987. *Monumentos Geodésicos. Diseños y Dimensiones*". La Habana.
46. Novoa Armas, R., 2002. *Criterios para diseñar presas de tierra prioridad y secuencia*. Editorial ISPJAE, Cuba.
47. Novoa Armas, R. & Horta Mestas, J. E., 2010. *Presas de Tierra*.
48. Paulblgis, 2016. *GEOGRAPHIC INFORMATION SYSTEMS BLOG*. California.
49. Podest, E., 2017. *Synthetic Aperture Radar*. Texas.
50. Pros Llavador, F., González López, S. & Martínez Benjamín, J. J., 2013. *Control del asentamiento de los diques Este y Sur del puerto de Barcelona mediante datos InSAR*. Torrejón de Ardoz (Madrid).
51. Royal-Haskoning-DHV, 2013. *Aguablanca Dike along the Cauca River, Cali, Colombia Diagnosis and recommendations*.
52. Rutllant, D. &., 1974. *Libro de Mecánica de Suelos en la Ingeniería Vial. Capítulo 5*. Santiago de Chile.
53. Santosa, M. & otros, C. y., 2015. *Aspectos innovadores en el diseño y construcción del dique Oeste en el puerto exterior de A Coruña en Punta Langosteira*. Madrid, Revista Iberoamericana del Agua, pp. 89-100.
54. Short, D. N., 2009. *Remote Sensing Tutorial*. London.
55. SISGEO, 2016. *Catálogo Instrumentación Geotécnica*.
56. TAW, 1998. *Fundamentals of water retaining structures*.

57. Vasquez, N., 2001. *Tesis Doctoral. Cálculo de la subsidencia unidimensional debida a los descensos del nivel piezométrico. aplicación al casco urbano de Murcia y a los efectos sobre sus edificios.* Sevilla.
58. Velázquez Sentmenat, A., 2016. *Análisis de las filtraciones y la estabilidad de taludes de presas de tierra.* Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas.
59. WRD, C., 2012. *Urban Levee Design Criteria California Department Of Water Resources.* Sacramento.
60. Zozaya, A. J., 2015. *Simulador básico de un radar de apertura sintética.* Cotopaxi, Ecuador: Instituto Espacial Ecuatoriano.

ANEXOS



Anexo: Plano Topobatimétrico
Fuente: (GeoCuba Estudios Marinos, 2015)

LEYENDA

- Limite de Parcela
- Anticuenca
- Valedero
- Topografía 2015
- Manglar Costero
- Cuentas de Mar

OBSERVACIONES

- Sistema Caidado Nacional Cuba Norte
- Etimología de referencia Cuenca 1988
- Proyección Cénica Conforme da Lambert
- Datum de referencia MDA-27
- Profundidades en metros referidos al NNM

Línea de costa obtenida de la digitalización de imágenes satelitales

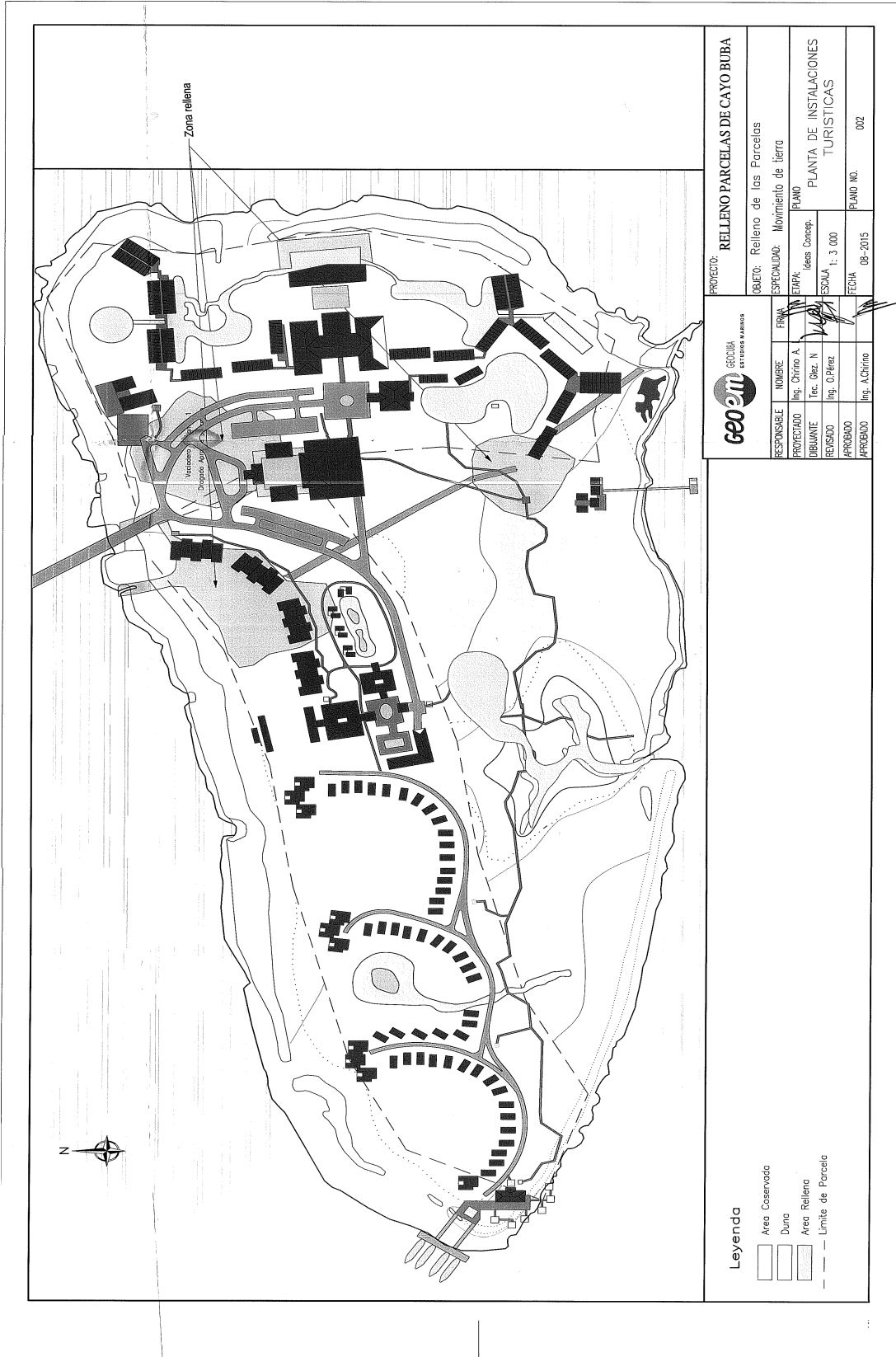
- Isobates trazadas con DTM
- Sondeos realizados en junio del 2009

PROYECTO: RELLENO PARCELAS DE CAYO BUBA

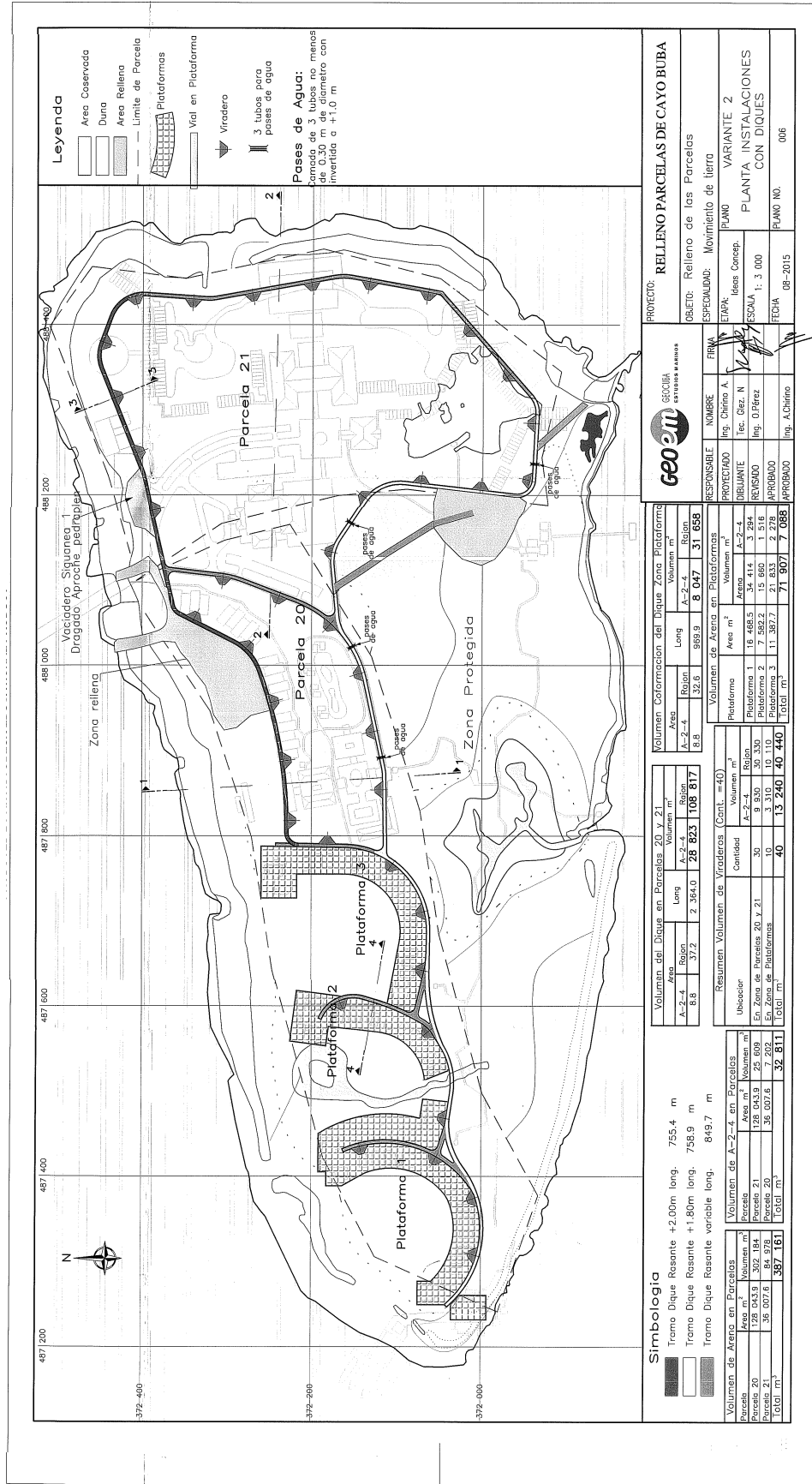
RESPONSABLE	ING. ERIK
PROYECTADO	ING. CHIRIS A.L.
DISEÑADO	ING. ANA ROSA
REVISADO	ING. DIEGO N.
APROBADO	ING. OSCAR L. 2 500
FECHA	06-2015
PLANO NO.	001

Características Cefísticas

COD.	Área	Descripción
001	Agua	Agua
002	Agua	Agua
003	Agua	Agua
004	Agua	Agua
005	Agua	Agua
006	Agua	Agua
007	Agua	Agua
008	Agua	Agua
009	Agua	Agua
010	Agua	Agua
011	Agua	Agua
012	Agua	Agua
013	Agua	Agua
014	Agua	Agua
015	Agua	Agua
016	Agua	Agua
017	Agua	Agua
018	Agua	Agua
019	Agua	Agua
020	Agua	Agua
021	Agua	Agua
022	Agua	Agua
023	Agua	Agua
024	Agua	Agua
025	Agua	Agua
026	Agua	Agua
027	Agua	Agua
028	Agua	Agua
029	Agua	Agua
030	Agua	Agua
031	Agua	Agua
032	Agua	Agua
033	Agua	Agua
034	Agua	Agua
035	Agua	Agua
036	Agua	Agua
037	Agua	Agua
038	Agua	Agua
039	Agua	Agua
040	Agua	Agua
041	Agua	Agua
042	Agua	Agua
043	Agua	Agua
044	Agua	Agua
045	Agua	Agua
046	Agua	Agua
047	Agua	Agua
048	Agua	Agua
049	Agua	Agua
050	Agua	Agua
051	Agua	Agua
052	Agua	Agua
053	Agua	Agua
054	Agua	Agua
055	Agua	Agua
056	Agua	Agua
057	Agua	Agua
058	Agua	Agua
059	Agua	Agua
060	Agua	Agua
061	Agua	Agua
062	Agua	Agua
063	Agua	Agua
064	Agua	Agua
065	Agua	Agua
066	Agua	Agua
067	Agua	Agua
068	Agua	Agua
069	Agua	Agua
070	Agua	Agua
071	Agua	Agua
072	Agua	Agua
073	Agua	Agua
074	Agua	Agua
075	Agua	Agua
076	Agua	Agua
077	Agua	Agua
078	Agua	Agua
079	Agua	Agua
080	Agua	Agua
081	Agua	Agua
082	Agua	Agua
083	Agua	Agua
084	Agua	Agua
085	Agua	Agua
086	Agua	Agua
087	Agua	Agua
088	Agua	Agua
089	Agua	Agua
090	Agua	Agua
091	Agua	Agua
092	Agua	Agua
093	Agua	Agua
094	Agua	Agua
095	Agua	Agua
096	Agua	Agua
097	Agua	Agua
098	Agua	Agua
099	Agua	Agua
100	Agua	Agua



Anexo: Plano Planta con Instalaciones
Fuente: (GeoCuba Estudios Marinos, 2015)



PROYECTO: RELLENO PARCELAS DE CAYO BUBA

OBJETO: Relleno de las Parcelas

ESPECIALIDAD: Movimiento de tierra

ETAPA: Ideas Concep.

PLANO: VARIANTE 2

PLANTA INSTALACIONES CON DIQUES

ESCALA: 1: 3 000

FECHA: 08-2015

PLANO NO.: 006

RESPONSABLE: Ing. Chino A.

PROYECTADO: Ing. Chino A.

DEBUTANTE: Tec. Diaz. N.

REVISADO: Ing. O.Perez

APROBADO: Ing. A.Chino

Volúmen Conformación del Dique Zona Plataformas

Area	Long	Volúmen m³	Region
A-2-4	899.9	8 047	31 688
Total			

Volúmen del Dique en Parcelas 20 y 21

Area	Long	Volúmen m³	Region
A-2-4	2 364.0	28 823	108 817
Total			

Resumen Volúmen de Viraderos (Cont. = 40)

Ubicador	Cont.	Volúmen m³
En Zona de Parcelas 20 y 21	30	9 930
En Zona de Plataformas	10	3 310
Total	40	13 240

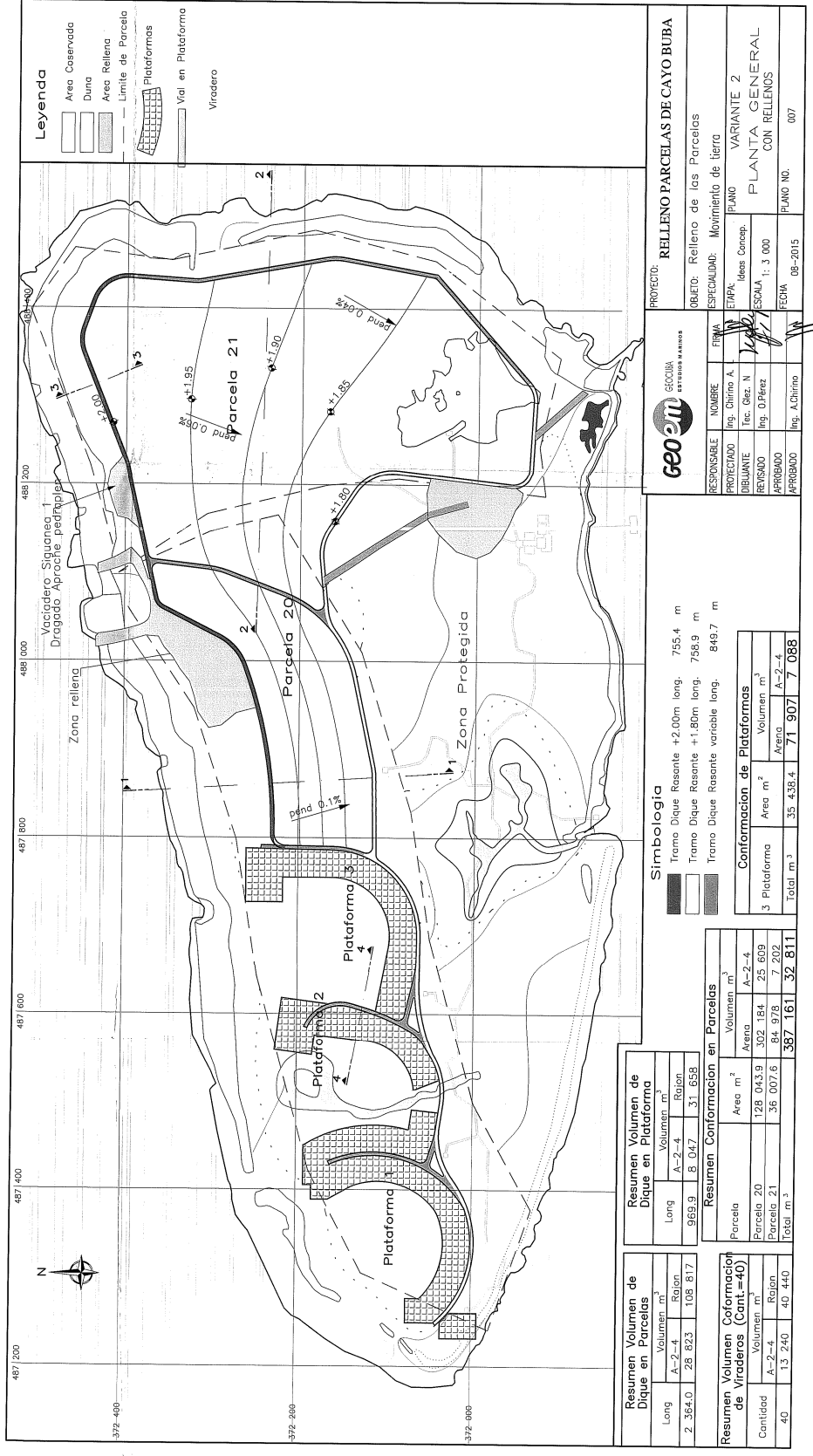
Simbología

Tramo Dique Resante	+2.00m long.	755.4 m
Tramo Dique Resante <td>+1.80m long.</td> <td>758.9 m</td>	+1.80m long.	758.9 m
Tramo Dique Resante variable long.		849.7 m

Volúmen de Arena en Parcelas

Parcela	Area m²	Volúmen m³
Parcela 20	128 043.9	302 184
Parcela 21	36 007.6	84 978
Total	164 051.5	387 161

Anexo: Plano Planta General Diques Variante 2
Fuente: (GeoCuba Estudios Marinos, 2015)



Leyenda

- Area Caseruada
- Duna
- Area Rellena
- Limite de Parcela
- Plataformas
- Vial en Plataforma
- Viradero

PROYECTO: RELLENO PARCELAS DE CAYO BUBA

OBJETO: Relleno de las Parcelas

ESPECIALIDAD: Movimiento de tierra

ETAPA: Ideas Conceptuales

PLANO: VARIANTE 2

ESCALA: 1:3 000

PLANTA GENERAL CON RELLENOS

FECHA: 06-2015

PLANO NO.: 007

RESPONSABLE: Ing. Chirino A. Pérez

PROYECTADO: Ing. Chirino A. Pérez

DIBUJANTE: Ing. D. Pérez

REVISADO: Ing. D. Pérez

APROBADO: Ing. A. Chirino

Simbología

- Tramo Dique Rosante +2.00m long. 755.4 m
- Tramo Dique Rosante +1.80m long. 798.9 m
- Tramo Dique Rosante variable long. 849.7 m

Conformación de Plataformas

3 Plataformas	Area m ²	Volumen m ³
Arca	A-2-4	7 202
Total m ³	35 438.4	71 907 7 068

Resumen Volumen de Dique en Parcelas

Parcela	Area m ²	Volumen m ³
Parcela 20	128 043.9	25 609
Parcela 21	36 007.6	7 202
Total m ³		387 161 32 811

Resumen Volumen de Dique en Parcelas

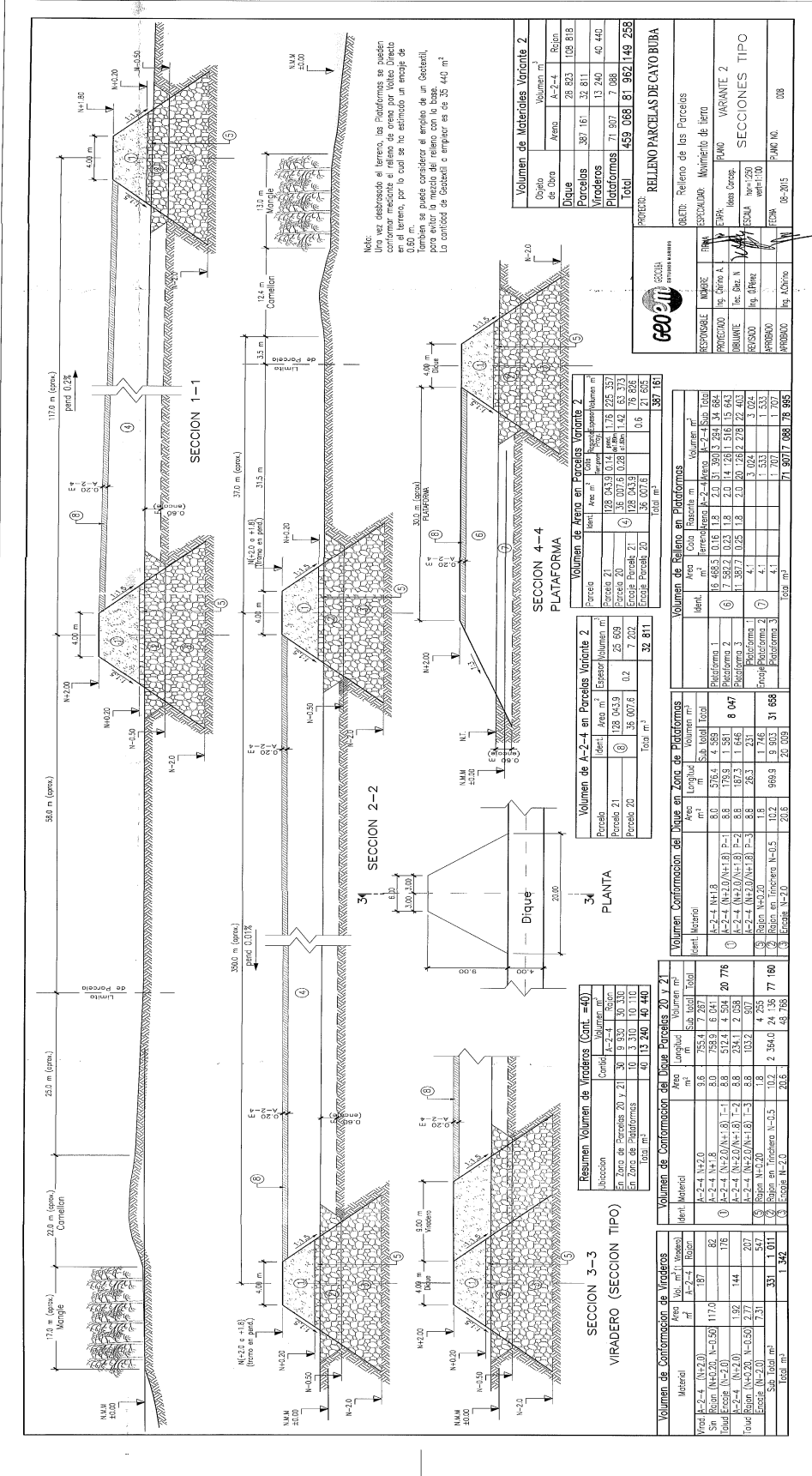
Long	Volumen m ³	Razon
2 384.0	28 823	108 817
969.9	8 047	31 658

Resumen Volumen de Plataformas

Long	Volumen m ³	Razon
2 384.0	28 823	108 817
969.9	8 047	31 658

Anexo: Plano Pendientes Variante 2

Fuente: (GeoCuba Estudios Marinos, 2015)



Volumen de Materiales Variante 2

Ópalo de Obra	Arena	A-2-4	Rejon
Dique	367.16	32.811	108.818
Viraderos	71.907	7.988	40.440
Plataformas	459.066	81.962	149.258
Total	1.297.139	172.761	298.516

Volumen de Relleno en Parcelas Variante 2

Parcela 21	128.043.9	0.2	25.569	1.76	222.337
Parcela 20	128.043.9	0.2	25.569	1.42	183.373
Escala Frenab. 21	128.043.9	0.2	25.569	0.6	76.892
Escala Frenab. 20	128.043.9	0.2	25.569	0.6	76.892
Total	512.176.6	0.8	102.729		560.596

Volumen de Arena en Parcelas Variante 2

Parcela 21	128.043.9	0.2	25.569	1.76	222.337
Parcela 20	128.043.9	0.2	25.569	1.42	183.373
Escala Frenab. 21	128.043.9	0.2	25.569	0.6	76.892
Escala Frenab. 20	128.043.9	0.2	25.569	0.6	76.892
Total	512.176.6	0.8	102.729		560.596

Volumen de Relleno en Plataformas

Ident.	Área	Coef. Relleno	Volumen m ³
1	15.683.3	0.16	2.510.9
2	15.683.3	0.16	2.510.9
3	15.683.3	0.16	2.510.9
4	15.683.3	0.16	2.510.9
5	15.683.3	0.16	2.510.9
6	15.683.3	0.16	2.510.9
7	15.683.3	0.16	2.510.9
8	15.683.3	0.16	2.510.9
9	15.683.3	0.16	2.510.9
10	15.683.3	0.16	2.510.9
11	15.683.3	0.16	2.510.9
12	15.683.3	0.16	2.510.9
13	15.683.3	0.16	2.510.9
14	15.683.3	0.16	2.510.9
15	15.683.3	0.16	2.510.9
16	15.683.3	0.16	2.510.9
17	15.683.3	0.16	2.510.9
18	15.683.3	0.16	2.510.9
19	15.683.3	0.16	2.510.9
20	15.683.3	0.16	2.510.9
21	15.683.3	0.16	2.510.9
22	15.683.3	0.16	2.510.9
23	15.683.3	0.16	2.510.9
24	15.683.3	0.16	2.510.9
25	15.683.3	0.16	2.510.9
26	15.683.3	0.16	2.510.9
27	15.683.3	0.16	2.510.9
28	15.683.3	0.16	2.510.9
29	15.683.3	0.16	2.510.9
30	15.683.3	0.16	2.510.9
31	15.683.3	0.16	2.510.9
32	15.683.3	0.16	2.510.9
33	15.683.3	0.16	2.510.9
34	15.683.3	0.16	2.510.9
35	15.683.3	0.16	2.510.9
36	15.683.3	0.16	2.510.9
37	15.683.3	0.16	2.510.9
38	15.683.3	0.16	2.510.9
39	15.683.3	0.16	2.510.9
40	15.683.3	0.16	2.510.9
Total	1.297.139	0.8	172.761

Volumen de Conformación del Dique en Zona de Plataformas

Ident.	Área	Longitud	Volumen m ³
1	15.683.3	1.8	278.297
2	15.683.3	1.8	278.297
3	15.683.3	1.8	278.297
4	15.683.3	1.8	278.297
5	15.683.3	1.8	278.297
6	15.683.3	1.8	278.297
7	15.683.3	1.8	278.297
8	15.683.3	1.8	278.297
9	15.683.3	1.8	278.297
10	15.683.3	1.8	278.297
11	15.683.3	1.8	278.297
12	15.683.3	1.8	278.297
13	15.683.3	1.8	278.297
14	15.683.3	1.8	278.297
15	15.683.3	1.8	278.297
16	15.683.3	1.8	278.297
17	15.683.3	1.8	278.297
18	15.683.3	1.8	278.297
19	15.683.3	1.8	278.297
20	15.683.3	1.8	278.297
21	15.683.3	1.8	278.297
22	15.683.3	1.8	278.297
23	15.683.3	1.8	278.297
24	15.683.3	1.8	278.297
25	15.683.3	1.8	278.297
26	15.683.3	1.8	278.297
27	15.683.3	1.8	278.297
28	15.683.3	1.8	278.297
29	15.683.3	1.8	278.297
30	15.683.3	1.8	278.297
31	15.683.3	1.8	278.297
32	15.683.3	1.8	278.297
33	15.683.3	1.8	278.297
34	15.683.3	1.8	278.297
35	15.683.3	1.8	278.297
36	15.683.3	1.8	278.297
37	15.683.3	1.8	278.297
38	15.683.3	1.8	278.297
39	15.683.3	1.8	278.297
40	15.683.3	1.8	278.297
Total	617.340	40	149.440

Resumen Volumen de Viraderos (Cont. = 40)

Ident.	Área	Longitud	Volumen m ³
1	15.683.3	1.8	278.297
2	15.683.3	1.8	278.297
3	15.683.3	1.8	278.297
4	15.683.3	1.8	278.297
5	15.683.3	1.8	278.297
6	15.683.3	1.8	278.297
7	15.683.3	1.8	278.297
8	15.683.3	1.8	278.297
9	15.683.3	1.8	278.297
10	15.683.3	1.8	278.297
11	15.683.3	1.8	278.297
12	15.683.3	1.8	278.297
13	15.683.3	1.8	278.297
14	15.683.3	1.8	278.297
15	15.683.3	1.8	278.297
16	15.683.3	1.8	278.297
17	15.683.3	1.8	278.297
18	15.683.3	1.8	278.297
19	15.683.3	1.8	278.297
20	15.683.3	1.8	278.297
21	15.683.3	1.8	278.297
22	15.683.3	1.8	278.297
23	15.683.3	1.8	278.297
24	15.683.3	1.8	278.297
25	15.683.3	1.8	278.297
26	15.683.3	1.8	278.297
27	15.683.3	1.8	278.297
28	15.683.3	1.8	278.297
29	15.683.3	1.8	278.297
30	15.683.3	1.8	278.297
31	15.683.3	1.8	278.297
32	15.683.3	1.8	278.297
33	15.683.3	1.8	278.297
34	15.683.3	1.8	278.297
35	15.683.3	1.8	278.297
36	15.683.3	1.8	278.297
37	15.683.3	1.8	278.297
38	15.683.3	1.8	278.297
39	15.683.3	1.8	278.297
40	15.683.3	1.8	278.297
Total	617.340	40	149.440

Volumen de Conformación de Viraderos

Material	Área	Longitud	Volumen m ³
A-2-4 (N=2.0)	9.8	753.4	7.297
B-2-4 (N=2.0)	9.8	753.4	7.297
C-2-4 (N=2.0)	9.8	753.4	7.297
D-2-4 (N=2.0)	9.8	753.4	7.297
E-2-4 (N=2.0)	9.8	753.4	7.297
F-2-4 (N=2.0)	9.8	753.4	7.297
G-2-4 (N=2.0)	9.8	753.4	7.297
H-2-4 (N=2.0)	9.8	753.4	7.297
I-2-4 (N=2.0)	9.8	753.4	7.297
J-2-4 (N=2.0)	9.8	753.4	7.297
K-2-4 (N=2.0)	9.8	753.4	7.297
L-2-4 (N=2.0)	9.8	753.4	7.297
M-2-4 (N=2.0)	9.8	753.4	7.297
N-2-4 (N=2.0)	9.8	753.4	7.297
O-2-4 (N=2.0)	9.8	753.4	7.297
P-2-4 (N=2.0)	9.8	753.4	7.297
Q-2-4 (N=2.0)	9.8	753.4	7.297
R-2-4 (N=2.0)	9.8	753.4	7.297
S-2-4 (N=2.0)	9.8	753.4	7.297
T-2-4 (N=2.0)	9.8	753.4	7.297
U-2-4 (N=2.0)	9.8	753.4	7.297
V-2-4 (N=2.0)	9.8	753.4	7.297
W-2-4 (N=2.0)	9.8	753.4	7.297
X-2-4 (N=2.0)	9.8	753.4	7.297
Y-2-4 (N=2.0)	9.8	753.4	7.297
Z-2-4 (N=2.0)	9.8	753.4	7.297
Total	1.011	81.011	1.542

Volumen de Conformación del Dique Parcelas 20 y 21

Ident.	Área	Longitud	Volumen m ³
1	15.683.3	1.8	278.297
2	15.683.3	1.8	278.297
3	15.683.3	1.8	278.297
4	15.683.3	1.8	278.297
5	15.683.3	1.8	278.297
6	15.683.3	1.8	278.297
7	15.683.3	1.8	278.297
8	15.683.3	1.8	278.297
9	15.683.3	1.8	278.297
10	15.683.3	1.8	278.297
11	15.683.3	1.8	278.297
12	15.683.3	1.8	278.297
13	15.683.3	1.8	278.297
14	15.683.3	1.8	278.297
15	15.683.3	1.8	278.297
16	15.683.3	1.8	278.297
17	15.683.3	1.8	278.297
18	15.683.3	1.8	278.297
19	15.683.3	1.8	278.297
20	15.683.3	1.8	278.297
21	15.683.3	1.8	278.297
22	15.683.3	1.8	278.297
23	15.683.3	1.8	278.297
24	15.683.3	1.8	278.297
25	15.683.3	1.8	278.297
26	15.683.3	1.8	278.297
27	15.683.3	1.8	278.297
28	15.683.3	1.8	278.297
29	15.683.3	1.8	278.297
30	15.683.3	1.8	278.297
31	15.683.3	1.8	278.297
32	15.683.3	1.8	278.297
33	15.683.3	1.8	278.297
34	15.683.3	1.8	278.297
35	15.683.3	1.8	278.297
36	15.683.3	1.8	278.297
37	15.683.3	1.8	278.297
38	15.683.3	1.8	278.297
39	15.683.3	1.8	278.297
40	15.683.3	1.8	278.297
Total	617.340	40	149.440

Volumen de Conformación del Dique en Zona de Plataformas

Ident.	Área	Longitud	Volumen m ³
1	15.683.3	1.8	278.297
2	15.683.3	1.8	278.297
3	15.683.3	1.8	278.297
4	15.683.3	1.8	278.297
5	15.683.3	1.8	278.297
6	15.683.3	1.8	278.297
7	15.683.3	1.8	278.297
8	15.683.3	1.8	278.297
9	15.683.3	1.8	278.297
10	15.683.3	1.8	278.297
11	15.683.3	1.8	278.297
12	15.683.3	1.8	278.297
13	15.683.3	1.8	278.297
14	15.683.3	1.8	278.297
15	15.683.3	1.8	278.297
16	15.683.3	1.8	278.297
17	15.683.3	1.8	278.297
18	15.683.3	1.8	278.297
19	15.683.3	1.8	278.297
20	15.683.3	1.8	278.297
21	15.683.3	1.8	278.297
22	15.683.3	1.8	278.297
23	15.683.3	1.8	278.297
24	15.683.3	1.8	278.297
25	15.683.3	1.8	278.297
26	15.683.3	1.8	278.297
27	15.683.3	1.8	278.297
28	15.683.3	1.8	278.297
29	15.683.3	1.8	278.297
30	15.683.3	1.8	278.297
31	15.683.3	1.8	278.297