

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA
ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL



**OBTENCIÓN DE LA TASA DE EROSIÓN EN TALUDES
CONFORMADOS POR TIERRA BLANCA JOVEN (TBJ)
EN LA ZONA ORIENTE DEL ÁREA METROPOLITANA
DE SAN SALVADOR (AMSS)**

PRESENTADO POR:

CRISTIAN ANTONIO GÓMEZ GONZÁLEZ

PARA OPTAR AL TITULO DE:

INGENIERO CIVIL

CIUDAD UNIVERSITARIA, AGOSTO DE 2018

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR

RECTOR:

MSC. ROGER ARMANDO ARIAS ALVARADO

SECRETARIO GENERAL:

MSc. CRISTOBAL HERNAN RIOS BENITEZ

FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA

DECANO:

ING. FRANCISCO ANTONIO ALARCON SANDOVAL

SECRETARIO:

ING. JULIO ALBERTO PORTILLO

ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL

DIRECTOR:

ING. JORGE OSWALDO RIVERA FLORES

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA
ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL

Trabajo de Graduación previo a la opción al Grado de:

INGENIERO CIVIL

Título:

**OBTENCIÓN DE LA TASA DE EROSIÓN EN TALUDES
CONFORMADOS POR TIERRA BLANCA JOVEN (TBJ)
EN LA ZONA ORIENTE DEL ÁREA METROPOLITANA
DE SAN SALVADOR (AMSS)**

Presentado por:

CRISTIAN ANTONIO GÓMEZ GONZÁLEZ

Trabajo de Graduación Aprobado por:

Docentes Asesores:

ING. LESLY EMIDALIA MENDOZA MEJÍA

ING. JOSÉ MIGUEL LANDAVERDE QUIJADA

ING. MAURICIO ERNESTO VÁZQUEZ CERROS

PhD. ING. JOSÉ ALEXANDER CHÁVEZ HERNÁNDEZ

SAN SALVADOR, AGOSTO DE 2018

Trabajo de Graduación Aprobado por:

Docentes Asesores:

ING. LESLY EMIDALIA MENDOZA MEJÍA

ING. JOSÉ MIGUEL LANDAVERDE QUIJADA

ING. MAURICIO ERNESTO VÁZQUEZ CERROS

PhD. ING. JOSÉ ALEXANDER CHÁVEZ HERNÁNDEZ

AGRADECIMIENTOS

Este proyecto, ha sido posible completarlo gracias a la ayuda incondicional de muchas personas que durante el desarrollo de esta investigación mostraron su valioso apoyo.

Agradezco a mis asesores internos: **Ing. Lesly Emidalia Mendoza** por su tiempo en cada una de las revisiones de este trabajo, y además, por su gran comprensión; también, al **Ing. José Landaverde Quijada** por guiarme con sus conocimientos de campo en la ejecución de esta investigación. A cada uno de ellos, agradezco infinitamente por tomar parte de su tiempo para ir a las visitas de campo, teniendo presente las condiciones del área.

Agradezco de forma especial a mis asesores externos: **PhD. Ing. José Alexander Chávez Hernández** por brindarme su conocimiento y ayuda, en cada uno de los capítulos que conforman este trabajo; también agradezco, al **Ing. Mauricio Ernesto Vásquez** por su valioso tiempo para ir a las visitas de campo, por compartir su conocimiento, y por motivarme a salir adelante.

Quiero tomar este espacio para agradecer totalmente al equipo que me apoyo a lo largo de todas las visitas, ellos sin importar las condiciones del área no dudaron en acompañarme; doy las gracias a: **Br. Alma Gómez, Br. Yanet Recinos, Br. Gerardo Mena, Br. Evelin Rivas, Br. David Serrano, Br. Yesenia Recinos, y Br. Carlos Mauricio.**

Agradezco a la escuela de Ingeniería Civil especialmente al **Ing. Jorge Flores** (director de la escuela) por brindarme su apoyo con el equipo del GPS de doble frecuencia. También, al personal del laboratorio de suelos y materiales “Ing. Mario Ángel Guzmán Urbina”, **Ing. Evelio López** y al técnico **Carlos Morataya** por el préstamo de las instalaciones y el equipo necesario para la realización de los ensayos de laboratorio.

Agradezco a los ingenieros que me brindaron su apoyo con la ejecución del método del GPS de doble frecuencia en la zona de estudio, **Ing. David Funes, Ing. Guillermo Rivera, e Ing. German Lozano**

Agradecimientos especiales al **Ing. José Ranulfo Cárcamo**, por el apoyo del equipo topográfico para las visitas de campo.

Agradezco a la **Universidad de El Salvador** por formarme como buen profesional, desarrollando mi capacidad para enfrentar retos y solucionarlos de manera eficiente.

Así mismo, agradezco a la **Oficina de Planificación del Área Metropolitana de San Salvador OPAMSS** por brindarme apoyo con transporte, para llevar a cabo visitas de campo.

También doy gracias a la **Alcaldía de Ilopango** por apoyarme en el área de seguridad; brindando personal del Cuerpo de Agentes Metropolitanos (CAM), que en todo momento mostraron los valores que representa a esta institución.

Gracias.

DEDICATORIA

Este trabajo está dedicado a mi madre **Sonia Cristina González**, que ha sido mi guía desde pequeño dándome sus mejores consejos para formar de mí, un hombre de bien. Es por ello, que este logro se lo dedico a ella, para que se sienta orgullosa, y a la misma vez, para agradecerle por todo su amor, y por la comprensión que ha tenido para mi persona.

También, dedico este trabajo a mi padre **Cristhian Estrada** que me ha apoyado en mi educación y me ha brindado muchos consejos para llegar a ser un buen profesional en el mundo laboral.

Dedico especialmente este trabajo a mi hermana **Alma Cristina Gómez** por su apoyo incondicional; por ayudarme en toda mi carrera, por su amor y por su gran entusiasmo. Le deseo que cumpla todas sus metas y que su vida este llena de mucha dicha.

También dedico este trabajo a mi familia, que ha estado a mi lado durante toda mi carrera y me han brindado su apoyo incondicional.

Cristian Antonio Gómez González

ÍNDICE

Contenido	Pág.
INTRODUCCIÓN	IV
CAPÍTULO No.1 GENERALIDADES	1
1.1 ANTECEDENTES.....	2
1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	5
1.3 OBJETIVOS.....	6
1.3.1 OBJETIVO GENERAL.....	6
1.3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	6
1.4 ALCANCES.....	7
1.5 LIMITACIONES.....	7
1.6 JUSTIFICACIÓN.....	8
CAPÍTULO No.2 MARCO TEÓRICO	9
2.1 GENERALIDADES DE TECTÓNICA, Y GEOLOGÍA DE EL SALVADOR.....	10
2.1.1 TECTÓNICA.....	10
2.1.2 GEOLOGÍA.....	12
2.2 CARACTERÍSTICAS GEOLÓGICAS DEL ÁREA DE ESTUDIO	14
2.2.1 GEOLOGÍA DEL AMSS.....	15
2.3 EROSIÓN.....	25
2.3.1 DEFINICIÓN	25
2.3.2 TIPOS DE EROSIÓN.....	27
2.3.3 FACTORES QUE AFECTAN LA EROSIÓN HÍDRICA O EROSIÓN FLUVIAL.....	37
2.4 ESTIMACIÓN DE LA PERDIDA DE SUELO	44
2.4.1 MÉTODOS DIRECTOS.....	45
2.4.2 MÉTODOS INDIRECTOS.....	47
2.5 PROBLEMAS QUE SE PRESENTAN EN EL ÁREA DE ESTUDIO.....	50
2.5.1 CAMBIOS EN LA GEOMORFOLOGÍA DE LA QUEBRADA EL ARENAL SECO	54
CAPÍTULO No.3 METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN	58
3.1 INTRODUCCIÓN.....	59
3.2 INFORMACIÓN BIBLIOGRÁFICA.....	59

3.3 ESTABLECIMIENTO DE LOS CRITERIOS QUE SE REQUIEREN ENCONTRAR EN LOS TALUDES QUE SERÁN LOS PUNTOS DE ESTUDIO PARA LLEVAR A CABO LA INVESTIGACIÓN.....	59
3.4 SELECCIÓN PRELIMINAR DE PUNTOS DE INVESTIGACIÓN	59
3.5 INVESTIGACIÓN Y SELECCIÓN DE TÉCNICAS DE CUANTIFICACIÓN DE PERDIDA DE SUELO	60
3.6 DESCRIPCIÓN DE LAS CONDICIONES INICIALES DE LOS TALUDES SELECCIONADOS	60
3.7 DESCRIPCIÓN DE LA APLICACIÓN DE LAS METODOLOGÍAS DE EVALUACIÓN DE EROSIÓN A UTILIZAR.....	65
3.8 ESTUDIO DE LAS CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DE LOS MATERIALES PRESENTES EN LOS TALUDES.....	65
3.8.1 OBTENCIÓN DE MUESTRAS.....	69
3.8.2 RESULTADOS DE LABORATORIO	71
3.8.3 COMPARACIÓN DE RESULTADOS GRANULOMÉTRICOS CON OTRAS INVESTIGACIONES.....	71
CAPÍTULO No.4 APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA	76
4.1 INTRODUCCIÓN	77
4.2 INFORMACIÓN BIBLIOGRÁFICA.....	78
4.3 ESTABLECIMIENTO DE LOS CRITERIOS QUE SE REQUIEREN ENCONTRAR EN LOS TALUDES QUE SERÁN LOS PUNTOS DE ESTUDIO PARA LLEVAR A CABO LA INVESTIGACIÓN.....	80
4.3.1 CRITERIOS ESTABLECIDOS.....	80
4.4 SELECCIÓN PRELIMINAR DE PUNTOS DE INVESTIGACIÓN	81
4.5 INVESTIGACIÓN Y SELECCIÓN DE TÉCNICAS DE CUANTIFICACIÓN DE PERDIDA DE SUELO	97
4.5.1 TÉCNICA “A” TALUDES CON SUPERFICIE APROXIMADAMENTE PLANA EN LA CRESTA Y EXPUESTOS A EROSIÓN LATERAL Y VERTICAL (BAUTISTA ET AL., 2016).....	97
4.5.2 MÉTODO DE TRANSECTO DE CÁRCAVAS.....	99
4.5.3 MÉTODO DEL GPS DE DOBLE FRECUENCIA.....	101
4.5.4 TÉCNICA FOTOGRAMÉTRICA CON EL USO DE UN VEHÍCULO AÉREO NO TRIPULADO	102
4.6 DESCRIPCIÓN DE CONDICIONES INICIALES DE LOS TALUDES SELECCIONADOS	106

4.6.1 PUNTO No. 10 TALUD ZONA FRANCA III	106
4.6.2 PUNTO No. 9 TALUD ZONA FRANCA II.....	109
4.6.3 PUNTO No. 3 TALUD AEROPUERTO II.....	111
4.6.4 PUNTO No. 2 TALUD AEROPUERTO I.....	115
4.7 DESCRIPCIÓN DE LA APLICACIÓN DE LAS METODOLOGÍAS DE EVALUACIÓN DE EROSIÓN A UTILIZAR.....	118
4.7.1 INSTALACIÓN DE EQUIPO DE REFERENCIA PARA TÉCNICA “A” TALUDES CON SUPERFICIE APROXIMADAMENTE PLANA EN LA CRESTA Y EXPUESTOS A EROSIÓN LATERAL Y VERTICAL (BAUTISTA ET AL., 2016).....	118
4.7.2 INSTALACIÓN DE EQUIPO DE REFERENCIA PARA TÉCNICA DEL GPS DE DOBLE FRECUENCIA.....	131
4.8 ESTUDIO DE LAS CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DE LOS MATERIALES PRESENTES EN LOS TALUDES.....	132
4.8.1 OBTENCIÓN DE MUESTRAS.....	132
4.8.2 RESULTADOS DE LABORATORIO	134
4.8.3 COMPARACIÓN DE RESULTADOS GRANULOMÉTRICOS CON OTRAS INVESTIGACIONES.....	150
CAPÍTULO No.5 ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS.....	165
5.1 INTRODUCCIÓN	166
5.2 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS Y CÁLCULO DE LA TASA DE EROSIÓN.....	167
5.2.1 TALUD ZONA FRANCA III (PUNTO No. 10).....	169
5.2.2 TALUD ZONA FRANCA II (PUNTO No. 9).....	187
5.2.3 TALUD AEROPUERTO II (PUNTO No. 3).....	198
5.2.4 TALUD AEROPUERTO I (PUNTO No. 2).....	212
5.3 COMPARACIÓN DE TASAS DE EROSIÓN	224
CAPÍTULO No.6 CONCLUSIONES	226
6.1 CONCLUSIONES	227
6.2 RECOMENDACIONES.....	235
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	236
ANEXOS	

INTRODUCCIÓN

El Salvador es un país afectado por peligros geodinámicos como terremotos, erosión, inundaciones y movimientos de laderas. Hoy en día, la erosión fluvial está causando cambios drásticos en la morfología de la región. El Área Metropolitana de San Salvador (AMSS) ha sido testigo de esta situación en los últimos años; en donde los mayores problemas se han presentado cerca de la caldera de Ilopango, específicamente en la cuenca alta del río Las Cañas, en donde influye: la urbanización descontrolada del AMSS, el tipo de suelo presente (TBJ), las actividades antrópicas, la lluvia, entre otros factores; que ocasiona, la generación de cárcavas, la disminución de la calidad del agua por los sedimentos, el incremento de riesgo de inundaciones, los cambios geomorfológicos en ríos y quebradas (forma, tipo, curso, etc.), y daño en obras civiles.

El tipo de suelo presente (TBJ) es uno de los factores principales que está involucrado en el proceso erosivo, este suelo fácilmente se erosiona porque no es compacto, lo que genera una alta porosidad y una densidad del suelo relativamente baja. La región más inestable corresponde con los depósitos de mayor espesor de la tefra volcánica.

Guzmán & Melara (1996), Amaya & Hayem (2000), Rolo et al. (2004), Hernández (2004), Molina et al. (2009), Avalos & Castro (2010), Asencio & Zúniga (2010), Sebesta & Chávez (2010) han estudiado los aspectos geotécnicos y litológicos de la TBJ, caracterizándola como arenas limosas, y limos arenosos; existen además, otras investigaciones sobre el comportamiento de este suelo como la del Ing. Oscar Ayala (2013), y Bautista et al., (2016), este último evaluó algunos tipos de erosión en taludes conformados por TBJ.

Esta investigación se ha llevado a cabo para continuar el estudio de la Tierra Blanca Joven y su comportamiento ante factores que controlan o aceleran los procesos erosivos. El objetivo es cuantificar la pérdida de suelo en taludes constituidos por TBJ, durante un periodo de tiempo determinado.

Una de las características que se ha pretendido analizar es el comportamiento de este suelo en las dos estaciones principales del año (seca y lluviosa). Con las investigaciones ya

realizadas se tuvo una base teórica de las propiedades, y con ellas se ha determinado el comportamiento de taludes o laderas ante los factores erosivos.

El procedimiento para obtener dicha tasa, fue seleccionar una de las zonas del AMSS que a lo largo de estos últimos años ha experimentado pérdidas de suelo de gran magnitud; luego, seleccionar aquellos taludes que según la bibliografía recabada y el conocimiento de expertos son los más vulnerables por la erosión en el sector. Posteriormente, se aplicaron las técnicas de cuantificación de erosión, que permitan evaluar el tipo de erosión que experimenta dicha zona.

Finalmente, se realizó una interpretación y un análisis de los resultados obtenidos, en donde, se evidenció el comportamiento que tiene la TBJ ante factores internos y externos. La tasa de erosión fue obtenida de cada punto de estudio, y se realizó, una comparación con las tasas obtenidas en investigaciones anteriores (Bautista et al., 2016), esto para verificar si los resultados presentaban el mismo comportamiento o presentaban variaciones que permitieran evaluar la incidencia de los diferentes factores a los que se vieron sometidos los taludes, sobre el cálculo de las tasas de erosión.

CAPÍTULO No.1

GENERALIDADES

1.1 ANTECEDENTES

El Salvador a lo largo de su historia ha experimentado una serie de fenómenos naturales como terremotos, tormentas tropicales, sequías, etc. El AMSS ha presentado con el impacto de estos fenómenos, innumerables pérdidas, tanto humanas como económicas; de estos fenómenos el que actualmente mayor incidencia presenta cada año son los fenómenos hidrológicos; manifestándose en lluvias intensas (corta duración o prolongadas).

Los materiales presentes en el AMSS están constituidos en gran parte (con espesores importantes) por Tierra Blanca Joven (TBJ); que es producto de la última erupción pliniana de la caldera de Ilopango, en el año 536 D.C. (Dull et al., 2010). Erupción conformada por depósitos de caída, flujos piroclásticos y oleadas piroclásticas. Según Hernández (2004) las unidades identificadas de la TBJ fueron nombradas por las letras: A, B, C, D, E, ignimbritas (Alfa y Beta), F, y G.

Además hay presencia de productos de erupciones volcánicas provenientes del volcán de San Salvador, entre los que se puede mencionar a los estratos: Andesita de San Salvador (ASS), G1, G2, Ignimbritas Boquerón (IB) y Apopa; también, existen materiales de la erupción del Plan de la Laguna que produjo depósitos con el mismo nombre (PL). De las erupciones antes mencionadas, las principales con las que se encuentra formada la superficie del AMSS son las producidas por la Caldera de Ilopango y el Volcán de San Salvador.

Debido a que los materiales anteriormente descritos son recientes y por lo tanto poco consolidados, da lugar a que se presenten problemas erosivos; ya sea por escorrentía superficial o por el desgaste causado por la energía que lleva la corriente de agua en las quebradas y ríos, afectando a la población que habita cerca de taludes o laderas.

Para identificar las características y el comportamiento de estos suelos se han realizado estudios a lo largo de los años que abordan el tema de la erosión, investigan los factores que la provocan, y han creado técnicas para su cuantificación; que permiten tener un mejor control sobre estos procesos.

El Dr. Michel Schmidt-Thomé, integrante de la Misión Geológica Alemana quien trabajó en El Salvador entre 1969-1974, elaboró un documento que aborda sobre la Geología del Área Metropolitana de San Salvador, en el cual se contempla algunas consideraciones para el desarrollo de la ciudad, llamado The Geology in the San Salvador area (El Salvador, Central America), a basis for city development and planning [La geología en el área de San Salvador (El Salvador, Centroamérica), una base para el desarrollo y la planificación de la ciudad].

El documento “MECANISMO DE RUPTURA DE TALUDES EN IGNIMBRITAS DE TIERRA BLANCA JOVEN, CALDERA DE ILOPANGO, EL SALVADOR”, desarrollado por Walter Hernández geólogo del SNET, explica que las características de homogeneidad e isotropía de estas ignimbritas son determinantes en el mecanismo de ruptura de taludes constituidos por estos materiales, ya que, la exposición a cambios de temperatura por la actividad solar generan planos de debilidad, y que con ayuda de otros factores, como la lluvia o los sismos, producen grietas paralelas verticales a la cara de los taludes. También, la investigación del ingeniero Oscar Edgardo Ayala Valdez “APLICACIÓN DE LOS MODELOS CONSTITUTIVOS PARA REPRESENTAR EL COMPORTAMIENTO DE TIERRA BLANCA JOVEN, UNIDAD G” que trata sobre la aplicación de tres modelos constitutivos para representar el comportamiento de la TBJ, unidad G, depósito de caída; para luego evaluar cuál de ellos presenta el comportamiento más cercano a los resultados obtenidos en laboratorio. En el estudio se determinó que los taludes estudiados presentan pendientes cercanas a los 80° y que los ángulos de fricción interna de los materiales constituyentes de los taludes en la unidad G resultaron ser, en valores efectivos de 31°, concluyendo que para mantener la estabilidad en los taludes debe de existir presencia de cohesión aparente (succión, fuerzas capilares y cementación). Además, se cuenta con un estudio sobre la erosión fluvial que afecta al río Las Cañas, afirmando que la causa de erosión en los taludes resulta de sus cambios en la morfología y por motivos de la extracción de materiales pétreos, el cual lleva por nombre “ESTUDIO DE LA EVOLUCIÓN DE LA EROSIÓN FLUVIAL RECIENTE, EN LA MICROCUENCA DEL RIO LAS CAÑAS” elaborado por Geólogos del mundo en el año 2013.

La Organización de las Naciones Unidas, para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO), a través de su Programa Hidrológico Internacional, realizó una investigación llamada “PROCESOS

DE EROSIÓN-SEDIMENTACIÓN EN CAUSES Y CUENCAS” en el año 2010, en donde se detallan los diversos factores que afectan la erosión y sedimentación; las metodologías para su estimación (erosión tanto de impacto como laminar).

En 2013-2014 se llevó a cabo el estudio que lleva por título “Uso de Curva de Retención de Suelo-Agua y Monitoreo en Campo para Caracterizar Tefra Parcialmente Saturada en el Área Metropolitana de San Salvador, El Salvador”. En el periodo que duro la investigación fue monitoreada la humedad de sectores con TBJ del AMSS, para conocer su comportamiento y obtener la Curva de Retención de Suelo-Agua (CRSA). Se realizaron pruebas de laboratorio para medir succión y humedad haciendo uso de métodos como el papel filtro, olla de presión y centrífuga (Chávez et al., 2013). Trabajo que ha ayudado a comprender el comportamiento y características de tefra y su interacción con el medio ambiente.

Actualmente se cuenta con una investigación inicial en esta materia (cuantificación de erosión en el AMSS), realizada por William Antonio Bautista Mendoza, y Karen Cristina Cruz Rivas en su trabajo de graduación DETERMINACIÓN DE LA TASA DE DETERIORO EN TALUDES CONSTITUIDOS POR MATERIALES PIROPLÁSTICOS EN EL ÁREA METROPOLITANA DE SAN SALVADOR (AMSS), la investigación fue realizada en un tiempo y periodo establecido, donde recolectaron información en campo, e interpretaron los resultados; para generar la tasa de erosión de los taludes que formaron parte del estudio.

Hoy en día, existen herramientas aéreas que son de gran utilidad para este tipo de investigaciones; el vehículo aéreo no tripulado mejor conocido como “dron” es un claro ejemplo de esto. Es un elemento capaz de realizar levantamientos topográficos, obtención de datos en zonas de difícil acceso, fotografías, y filmaciones de vigilancia en obras lineales; que reduce el costo de desplazamiento, aumentando la seguridad y la calidad de la investigación.

Por todo lo anterior, seguir estudiando estos procesos erosivos, con la ayuda del equipo humano y tecnológico necesario, permitiría tener una mayor cantidad de información sobre el tema, y con ello servir a las entidades encargadas para ordenar, planificar, controlar y predecir las zonas más adecuadas para ser desarrolladas (según el usos).

1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Los problemas de erosión en el AMSS no son una novedad, la historia de la zona ha demostrado que siempre han existido procesos erosivos, pero en estas últimas décadas la situación se ha complicado; ejemplo de ello es la quebrada el Arenal Seco, Ilopango, que ha experimentado cambios considerables en su curso, en sus dimensiones y en el caudal que transporta; que ha sido el causante de innumerables problemas como la formación de cárcavas, desestabilización de obras de mitigación, inundaciones, entre otros; el poco tiempo en que este río ha ocasionado tanto daño hace pensar, ¿porque se está comportando de esta manera?.

Entre los factores externos más evidentes que aceleran los procesos erosivos en la zona se tienen: el nivel base, el clima (especialmente lluvias intensas de corta duración o prolongadas), la geología (materiales poco consolidados como la TBJ), tectónica, actividades antrópicas (como por ejemplo la extracción de materiales pétreos en las partes bajas de los ríos y la construcción de urbanizaciones en lugares que no son aptos para habitar), son los que más destacan. Estos factores, conforman un sólo sistema que siempre buscará su equilibrio, si uno de éstos cambia en el tiempo como resultado se tendrá al sistema buscando su equilibrio propio, sin importar qué deba hacer para lograrlo. Cada año se observan grandes cambios en las quebradas y ríos, se invierte mucho dinero en obras de protección y estos mismos se encargan de destruirlas; se ha tratado de controlar esta situación en muchos casos, tratando de solucionar el problema sin comprender las causas que lo originan, generando que no se tomen las mejores decisiones.

Desde el punto de vista teórico, el estudio del desgaste de los suelos (proceso erosivos) suele ser difícil de determinar detalladamente, pero la experiencia ha proporcionado lineamientos que permiten realizar aproximaciones sobre su cuantificación, por lo que se requiere un seguimiento a los estudios realizados sobre este tema, tomando en cuenta aspectos que permitan evaluar el efecto que tendría inviernos prolongados (copiosos), como secos (poca lluvia).

Con todo esto, se busca comprender el comportamiento de los ríos ante procesos erosivos, para tener criterios que permitan tomar las mejores decisiones a la hora de proyectar obras para la solución de este problema en el AMSS.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 OBJETIVO GENERAL

- Obtener la tasa de erosión en taludes conformados por Tierra Blanca Joven (TBJ) en la zona oriente del Área Metropolitana de San Salvador (AMSS).

1.3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Determinar las condiciones desfavorables ante procesos erosivos que deben poseer los taludes que sean considerados en estudio.
- Tomar las técnicas de cuantificación de erosión en taludes, que más se adecúen, a los factores y condiciones del lugar en estudio.
- Usar tecnología de vanguardia (vehículo aéreo no tripulado, GPS de precisión, etc.), para obtener las condiciones del lugar en estudio, como: topografía, cálculo de volúmenes, toma de datos, entre otros aspectos; que serán comparados con los obtenidos de la técnica de cuantificación de campo seleccionada.
- Verificar las condiciones iniciales de los taludes en estudio: dimensiones, condiciones geológicas, tipo de erosión que experimentan y algunos antecedentes que describan su estado.
- Aplicar las técnicas seleccionada de cuantificación de erosión a los taludes a estudiar.
- Obtener muestras de suelo en cada estrato de los taludes seleccionados y determinar sus características físicas a través de los respectivos ensayos de campo y laboratorio.
- Determinar la tasa de erosión de los taludes conformados por Tierra Blanca Joven (TBJ).
- Interpretar los resultados y obtener las respectivas conclusiones.

1.4 ALCANCES

- La tasa de erosión que sufren los taludes localizados en la zona oriente del Área Metropolitana de San Salvador (AMSS) será cuantificada en época seca y lluviosa, para tener información más representativa del comportamiento de estos.
- Los taludes en ríos a estudiar serán seleccionados de forma tal que presenten erosión horizontal y vertical, y el registro de erosión será tomado donde el río o quebrada tenga mayor impacto.
- La cuantificación de erosión será evaluada por una técnica aérea, con el uso de un vehículo aéreo no tripulado (dron), también, por la técnica del GPS de doble frecuencia y a la vez por una técnica de campo empírica, haciendo una comparación entre ellas y obtener de esta forma, cuál técnica de cuantificación (utilizada) proporciona los resultados más representativos del fenómeno en estudio.

1.5 LIMITACIONES

- Al realizar el presente trabajo de graduación de forma individual, limita cuantitativamente el número de taludes que estarán integrados en este estudio; dejando sin analizar otras zonas del Área Metropolitana de San Salvador (AMSS) que sufren procesos erosivos.
- El período de monitoreo de los taludes en este estudio será como máximo de un año; lo ideal sería monitoreos continuos, que abarcaran varios períodos lluviosos que pudiesen tener características diferentes, y obtener un mejor comportamiento de la erosión de los taludes; pero por motivo del tiempo que conllevaría el monitoreo ideal mencionado, no puede ser llevado a cabo en su totalidad en esta investigación.
- Debido a las grandes extensiones de los taludes, se estudiarán los sectores de éstos que presenten evidentes signos de procesos erosivos.
- La obtención de datos de erosión representativos durante el período de estudio, estará en función de las condiciones meteorológicas que se presenten en el área de evaluación y en las regiones cercanas que sean de influencia.

- Los monitoreos de los taludes para la época lluviosa dependerán de las condiciones que presente la zona de estudio, resguardando en todo momento la integridad física y seguridad de los investigadores en campo.

1.6 JUSTIFICACIÓN

La historia climatológica de El Salvador muestra que en el paso de los años han existido una serie de fenómenos naturales que han puesto en evidencia, aspectos de erosionabilidad y factores que afectan la estabilidad en los taludes; la situación se complica con el impacto al ciclo hidrológico producido por el crecimiento urbanístico (disminución de la infiltración e incremento de la escorrentía superficial) que contribuye a la extensión de las zonas propensas a inundaciones en las partes bajas de los ríos. Un claro ejemplo de esta problemática es la que se vive periódicamente en el Reparto Las Cañas, Ilopango; en 2010 fue escenario de la formación de una cárcava de grandes dimensiones provocada por el impacto de la tormenta tropical Agatha, dejando sin hogar a más de 50 familias. Los casos en donde la población salvadoreña se ve afectada por desprendimientos de tierra cerca de sus hogares son muy frecuentes, las instituciones encargadas realizan trabajos de mitigación que se hacen improvisadamente y que en algunos casos no son adecuadas para resolver la problemática, y ocasiona que el gobierno invierta cantidades excesivas de dinero cada año.

Por lo tanto, el presente trabajo de graduación pretende obtener: resultados representativos del comportamiento de los taludes conformados por Tierra Blanca Joven (TBJ) ante procesos erosivos, contribuir a las entidades gubernamentales correspondientes con más estudios y bases de datos; con los que puedan generar predicciones reales sin recurrir a aproximaciones, y de esta forma planificar y ordenar el desarrollo del AMSS, seleccionando las medidas más efectivas en la solución de los problemas relacionados con este tema; ocasionando una disminución en la inversión pública anual.

CAPÍTULO No.2

MARCO TEÓRICO

2.1 GENERALIDADES DE TECTÓNICA, Y GEOLOGÍA DE EL SALVADOR

El objetivo de esta sección es dar a conocer el origen y la dinámica de los materiales presentes en la zona de estudio de este trabajo de investigación, para lo cual se debe de conocer sobre la Tectónica, y Geología de El Salvador, a continuación se resumen las características de los aspectos mencionados.

2.1.1 TECTÓNICA

El Salvador se encuentra influenciado por dos sistemas tectónicos, uno de ellos está conformado por la subducción de la Placa Oceánica (Cocos) con la Placa Continental (Caribe); el segundo sistema lo comprende la interacción de la Placa del Caribe con la de Norte América en la zona norte del país de Guatemala, conformando el sistema de fallas Motagua-Polochic como se muestra en la Figura No. 2.1.1.

La zona de subducción generada por el primer sistema tectónico recibe el nombre de Fosa Mesoamericana, ubicada frente a la costa de Centroamérica, y es causante del vulcanismo en la región, dando origen al Graben Central Centroamericano; que en El Salvador está conformado como una depresión estructural que localmente es conocida como Graben Central que se extiende por todo el país con un ancho variable entre 15 km a 30 Km (Hernández W., 2004).

De acuerdo a Stoiber y Carr (1973), en El Salvador se pueden definir tres sistemas o familias de fallas dominantes: Sistema de fallas WNW-ESE, Sistema de fallas NNW-SSE y Sistema de fallas NE-SW. De los sistemas de fallas mencionados, el que se encuentra en la zona de estudio es el WNW-ESE que se explica a continuación.

Sistema de fallas **WNW-ESE**: este es el sistema más importante en El Salvador y su rumbo es N70W. Las fallas de este sistema definen los límites Norte y Sur del Graben Central (ver Figura No. 2.1.2); donde se ha desarrollado el arco volcánico activo y donde han ocurrido los terremotos más destructivos.

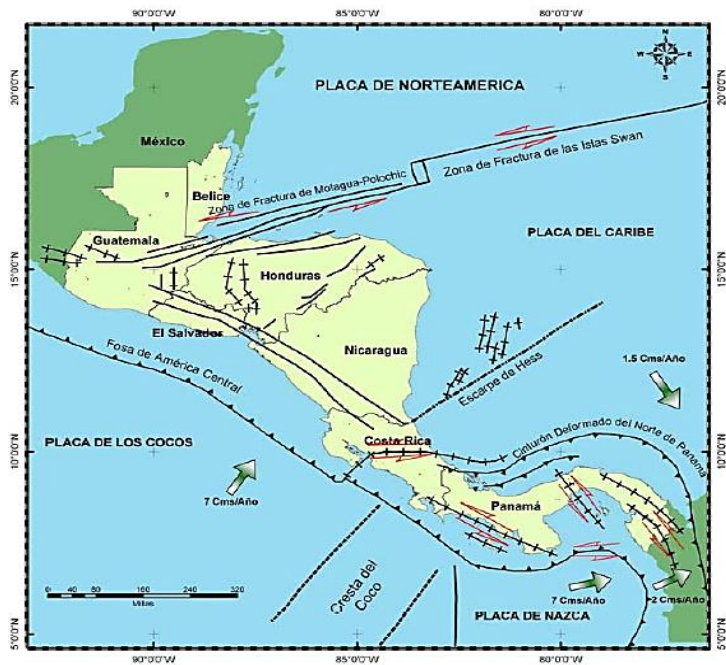


Figura No. 2.1.1 Mapa tectónico regional de Centroamérica. (Benito et al., 2005).

FUENTE: María Rodríguez, (2008). "METODOLOGÍA PARA LA EVALUACIÓN DE PELIGROSIDAD A LOS DESLIZAMIENTOS INDUCIDOS POR TERREMOTOS", Pág. 142.

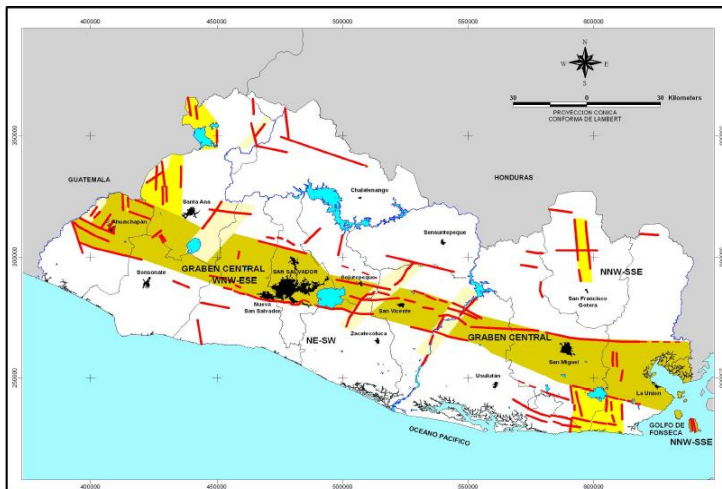


Figura No. 2.1.2 Sistema de fallas asociadas a la formación y evolución del Graben Central en El Salvador

Fuente: www.snet.gob.sv/Geologia/Vulcanologia/memorias/mtecVSM3.pdf.
Página consultada en 2017.

2.1.2 GEOLOGÍA

Los materiales que constituyen el territorio salvadoreño poseen edades aproximadamente de mediados del periodo Mesozoico, y también, existen del periodo Cenozoico (ver Figura No 2.1.3); conformando el 95% de los afloramientos presentes en la actualidad. En este periodo de tiempo se diferencian dos secuencias, una de ellas es sedimentaria la cual es muy reducida en su distribución comparada con la secuencia volcánica que es mayoritaria (más extendida y reciente).

TIEMPO GEOLOGICO (millones de años)	EDONES	ERATEMA	SISTEMA		SERIE
0			CUATERNARIO		Holoceno
1,8					Pleistoceno
		C E N O Z O I C O	T E R C I A R I O	N E O G E N O	Plioceno
					Mioceno
22,5	F A N E R O			P A L E O G E N O	Oligoceno
					Eoceno
65					Paleoceno
	Z O I C O			M E S O Z O I C O	C R E T A C I C O
		Superior			
141		JURASICO	Malm		
			Dogger		
			Lias		
195		TRIASICO	Superior		
			Medio		

Figura No. 2.1.3 Fragmento del esquema cronológico donde se encuadran los materiales de El Salvador.
FUENTE: María Rodríguez, (2008). "METODOLOGÍA PARA LA EVALUACIÓN DE PELIGROSIDAD A LOS DESLIZAMIENTOS INDUCIDOS POR TERREMOTOS", Pág. 131.

A continuación se realiza una breve descripción de las formaciones que tienen influencia en el área de estudio.

2.1.2.1 FORMACIONES VOLCÁNICAS E INTRUSIVAS

Dentro de las formaciones fundamentales del magmatismo-vulcanismo salvadoreño se tiene: la formación Morazán, Chalatenango, Bálsamo, Cuscatlán, San Salvador, Todos Santos, Valle de Ángeles, y Grupo Yojoa. El área de estudio se encuentra ubicada en el AMSS y las formaciones que tienen mayor influencia son las del Bálsamo, Cuscatlán y San Salvador (ver Figura No. 2.1.4), que se describen a continuación.

Formación San Salvador: originada en el periodo Holoceno hasta Pleistoceno (Ver Figura No. 2.1.3) se encuentran en la cadena volcánica joven que atraviesa la parte Sur del país y están compuestos por productos extrusivos de los volcanes individuales.

Formación Cuscatlán: originada en el periodo del Pleistoceno hasta el Plioceno superior y se encuentran en la cadena volcánica vieja que atraviesa la parte Norte del país y están compuestos por productos extrusivos de los volcanes individuales.

Formación Bálsamo: originada en el periodo del Plioceno y está compuesta por productos volcánicos en los cuales abundan los aglomerados con intercalaciones de tobas volcánicas endurecidas y corrientes de lava basáltica-andesítica.

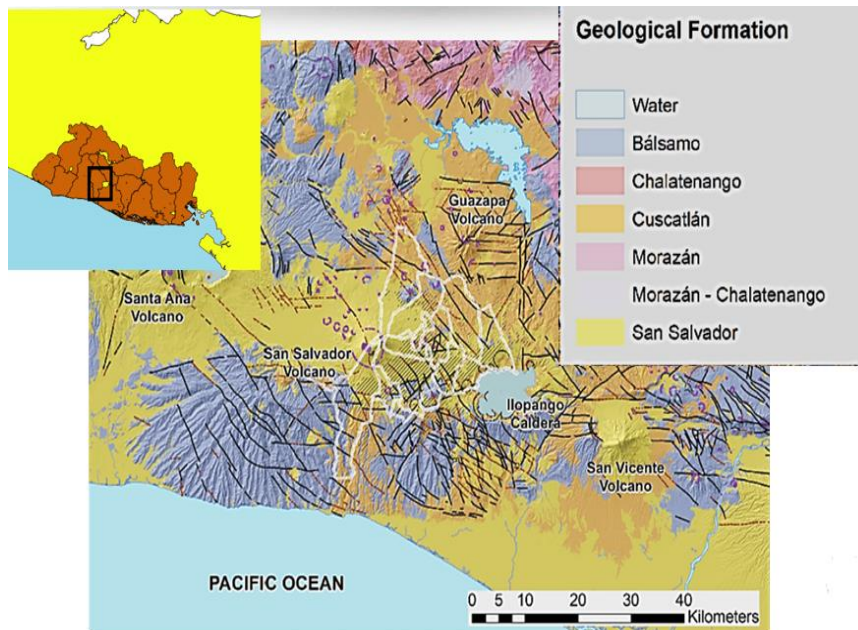


Figura No. 2.1.4 Mapa geológico representando las formaciones del AMSS.

FUENTE: Realizado por el AUTOR, basado en Sebesta et al., (2017). "Vertical ground motion of the San Salvador metropolitan area (AMSS) seen at the ALOS InSAR data".

2.2 CARACTERÍSTICAS GEOLÓGICAS DEL ÁREA DE ESTUDIO

El AMSS se ubica entre dos elementos geológicos representativos que son el volcán de San Salvador y la Caldera de Ilopango, su geología superficial está conformada por el miembro s4 denominado Tierra Blanca, que es producto de la formación San Salvador que en su mayoría está constituida por productos piroclásticos siendo el más reciente la Tierra Blanca Joven (TBJ) que ha sido objeto de estudio por varios geólogos e ingenieros como Schmidt-Thomé, Walter Hernández, Robert Dull, Alex Chávez, Oscar Ayala, entre otros; que han elaborado documentos sobre las características y propiedades que posee este material.

La geomorfología del AMSS se ve influenciada por las estructuras volcánicas, las fallas geológicas (ver Figura No. 2.2.1), materiales piroclásticos, materiales efusivos, y las condiciones climáticas como pueden ser la dirección de los vientos durante la erupción, la temperatura y las precipitaciones.

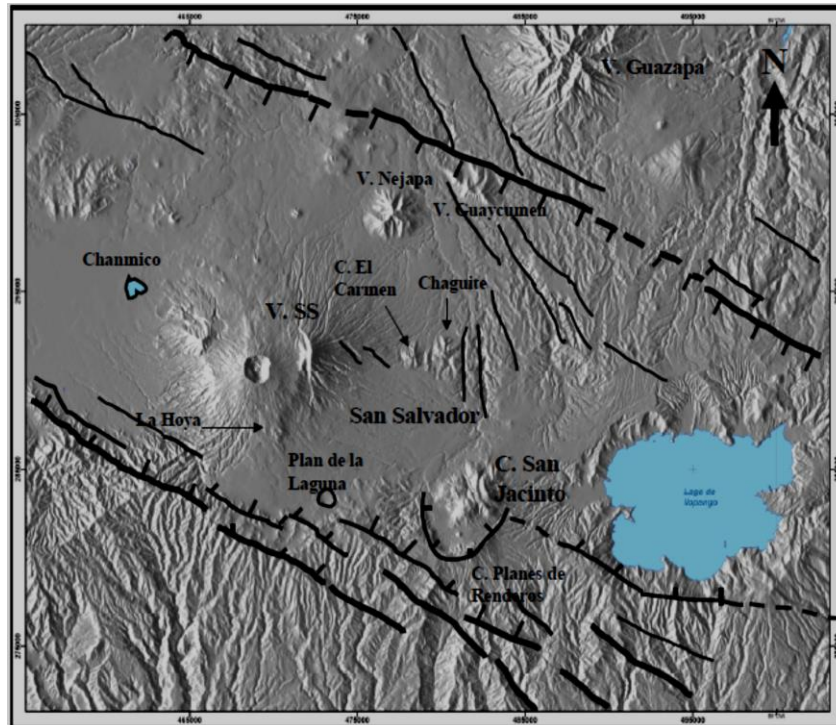


Figura No. 2.2.1 Fallas de la estructura principal del graben Central, Complejo Volcánico San Salvador, caldera de Ilopango, cerro San Jacinto, caldera Planes de Renderos, cráter Boquerón, Chanmico y Plan de la Laguna. Los volcanes antiguos de Guazapa, Nejapa, Guaycumen, El Carmen y Chaguire.
Fuente: Hernández, (2007). "ASPECTOS GEOLÓGICOS QUE INFLUYEN EN LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS Y EN LA RESPUESTA SÍSMICA DEL ÁREA METROPOLITANA DE SAN SALVADOR", Pág. 2.

2.2.1 GEOLOGÍA DEL AMSS

La secuencia geológica del AMSS, en orden de aparición está compuesta por las formaciones Bálsamo, Cuscatlán y San Salvador (ver Figura No.2.2.2).

La formación Bálsamo está subyacente a la formación Cuscatlán, constituida por importantes ignimbritas ácidas y lavas básicas intercaladas; sobre esta última se encuentra la formación San Salvador que está representada por las tefras del volcán San Salvador, caldera de Ilopango, caldera de Coatepeque y el cráter de Plan de la Laguna (PL).

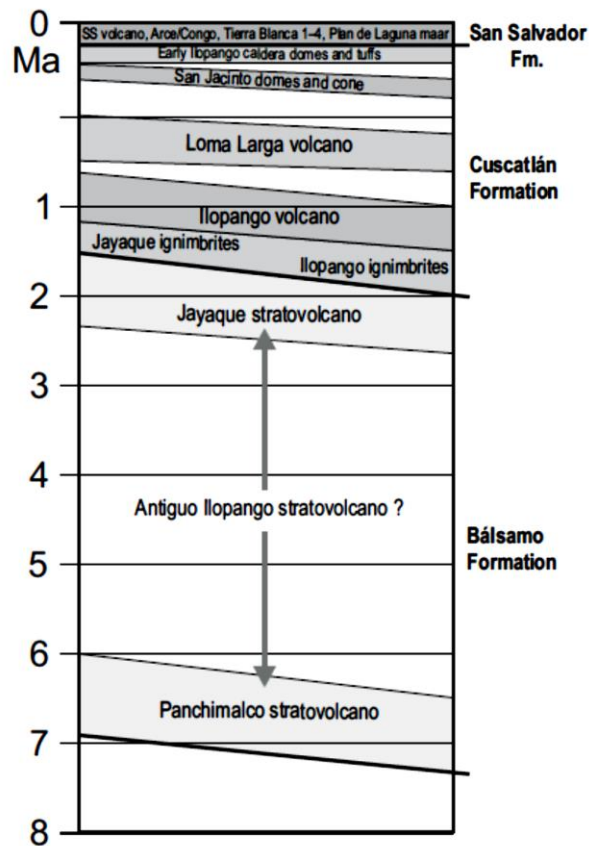


Figura No. 2.2.2 Sucesión y edades probables de las unidades geológicas que constituyen la formación Bálsamo, formación Cuscatlán y formación San Salvador. La escala con respecto a la edad es de 1 Ma. Fuente: Lexa et al., (2011). "Geology and volcanic evolution in the southern part of the San Salvador Metropolitan Area", Pág. 134.

A continuación, se describe de forma resumida los depósitos que conforman el AMSS y sus respectivos centros eruptivos (ver Tabla No. 2.2.1 y Tabla No. 2.2.2), en el siguiente orden: **Caldera de Coatepeque, Complejo Volcánico San Salvador, y Caldera de Ilopango**. Además, en la Figura No. 2.2.3 se muestra la distribución espacio-temporal de estos depósitos con respecto a sus centros de emisión respectivos, ordenados del más antiguo hasta el más joven.

CENTROS ERUPTIVOS	DEPÓSITOS (EVENTOS IMPORTANTES)	DESCRIPCIÓN
Caldera de Coatepeque	Arce	Cenizas compuestas por arenas medias a finas de pómez con biotita característica, tienen colores beige claro amarillento, algo consolidados.
	Congo	El depósito Congo sobreyace las tefras Arce, está compuesto por cenizas finas, color beige claro, algo cementadas. Subyace a un paleosuelo café algo desarrollado.
Volcán San Salvador	Andesita San Salvador	La colada de lava más antigua conocida hasta el momento que aflora del volcán San Salvador es una colada lávica andesítica
	G1	Pómez de caída vesiculado, de composición dacítico a andesítico, grisáceo, algo suelto, con moderada presencia de líticos oxidados y angulares. Estratigráficamente se localiza sobre TB4 y debajo de TB3.
	G2	Aspecto moteado evidenciado por un tono gris y beige, recordando el pómez del G1
	Ignimbrita Boquerón (IB)	Flujos piroclásticos de color café oscuro, mostrando cada uno de ellos, intercalaciones de delgadas oleadas piroclásticas (surges) de color café claro a pardo.
	Apopa	Constituido por lapilli escoriáceo basáltico, gris oscuro, vesicular y suelto cuando no presenta oxidación, pero en la mayor parte de los afloramientos es de color café debido a la oxidación la cual une un grano con otro, concediéndole cementación y consolidación.
	Plan de la Laguna (PL)	Base lapilli andesítico, vesicular gris, superpuesto por oleadas.

*Tabla No. 2.2.1 Detalle de los diferentes depósitos que constituyen el AMSS y su respectivo centro eruptivo.
Fuente: Realizado por el AUTOR, basado en la investigación de Hernández, (2007). "ASPECTOS GEOLÓGICOS QUE INFLUYEN EN LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS Y EN LA RESPUESTA SÍSMICA DEL ÁREA METROPOLITANA DE SAN SALVADOR".*

CENTROS ERUPTIVOS	DEPÓSITOS (EVENTOS IMPORTANTES)	DESCRIPCIÓN
Caldera de Ilopango	TB4	Lapilli de pómez con gradación normal, la base de esta unidad la constituye una ceniza de caída fina, blanca de espesor delgado (25 - 10 cm), y el techo por ceniza fina de casi el metro de espesor de color amarillento.
	TB3	Es una pómez y cenizas de caída de granulometría fina, blanca con presencia de lapilli acrecional, y flujos piroclásticos basales. En la zona proximal se han identificado depósitos de flujos piroclásticos en cuya matriz de ceniza fina están diseminados fragmentos de pómez. El techo de esta capa presenta un paleosuelo delgado poco desarrollado de color café, café amarillento y frecuentemente presenta discontinuidades paralelas a la cara de los taludes como respuesta a los procesos de exfoliación.
	TB2	Depósito que tiene espesor de 1 m dentro de un radio de 10 km del centro de emisión, está compuesto por una caída de pómez ligeramente mayor que la TB3 y caracterizado por ser mal seleccionado con abundantes minerales oscuros representados por hornblenda. El techo presenta un paleosuelo de delgado espesor, de color café oscuro.
	TBJ	Depósitos y flujos piroclásticos o ignimbritas

*Tabla No. 2.2.2 Detalle de los diferentes depósitos que constituyen el AMSS y su respectivo centro eruptivo.
Fuente: Realizado por el AUTOR basado en la investigación de Hernández, (2007). "ASPECTOS GEOLÓGICOS QUE INFLUYEN EN LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS Y EN LA RESPUESTA SÍSMICA DEL ÁREA METROPOLITANA DE SAN SALVADOR".*

La TBJ es la unidad estratigráfica con mayor presencia en el AMSS, por tal razón se realizará en la sección 2.2.1.1 una descripción más detallada acerca de este material.

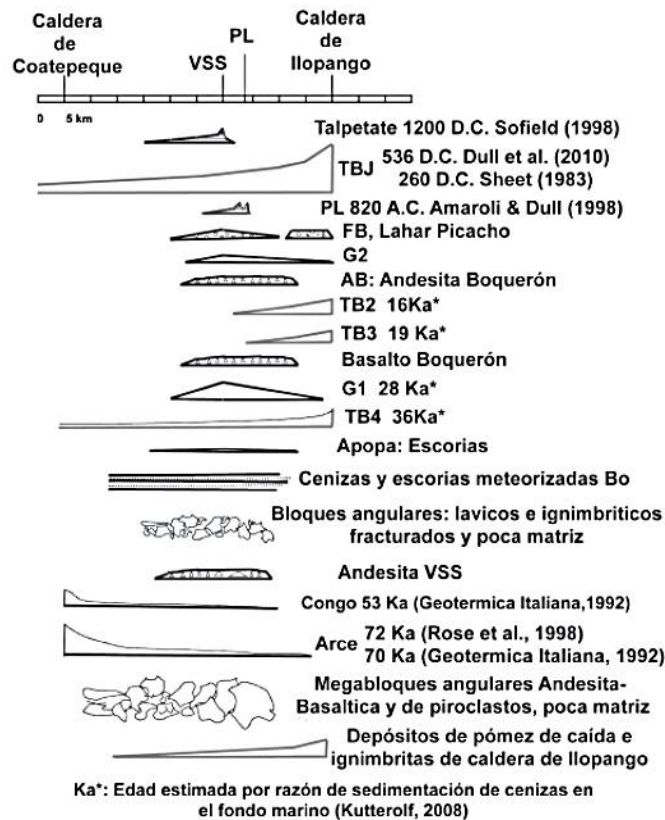


Figura No. 2.2.3 Esquema que muestra la distribución espacio-temporal de los distintos materiales volcánicos en el AMSS respecto a sus centros de emisión.

Fuente: Chávez, (2012). "PROBLEMÁTICA Y CONOCIMIENTO ACTUAL DE LAS TEFRAS TIERRA BLANCA JOVEN EN EL ÁREA METROPOLITANA DE SAN SALVADOR, EL SALVADOR"

2.2.1.1 DESCRIPCIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS DE LOS SUELOS DE TIPO TIERRA BLANCA JOVEN (TBJ)

La TBJ es producto de una erupción pliniana reciente y voluminosa (536 D.C., después de Dull et al., 2010). El material eyectado cubrió un área de 300 000 km² y su volumen se estima en 70 km³ (Chávez et al., 2011). Estuvo conformada por depósitos de caída y por un gran volumen de depósitos de piedra pómez que se acumuló cerca de la caldera; en la cuenca alta del río Las Cañas se pueden tener espesores que superan los 60 m.

La estratigrafía de los depósitos de TBJ fue realizada inicialmente por Hart y Steen-McIntyre en 1983, dividiéndola en dos grandes unidades T1 y T2. En 1998, Vallancey Houghton, hacen una revisión de campo de estas unidades y las subdividen en 6 unidades, actualmente se trabaja

con la estratigrafía elaborada por Hernández (2004), donde identificó 8 unidades denominadas de la “A” a la letra “G”, entre las que se incluye la Unidad Ignimbrita α y β , como se muestran en el perfil estratigráfico de la Figura No. 2.2.4.

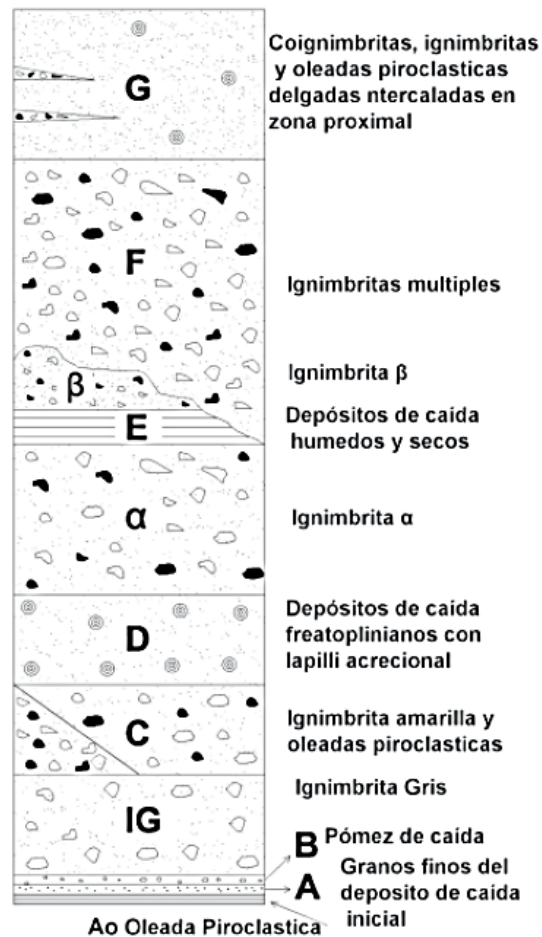


Figura No. 2.2.4 Perfil estratigráfico de las unidades de la Tierra Blanca Joven.
 Fuente: Chávez, (2012). "PROBLEMÁTICA Y CONOCIMIENTO ACTUAL DE LAS TEFRAS TIERRA BLANCA JOVEN EN EL ÁREA METROPOLITANA DE SAN SALVADOR, EL SALVADOR"

En la Tabla No. 2.2.3, se ha realizado un resumen de las diferentes características que presentan las unidades de la Tierra Blanca Joven (TBJ). Además, en las figuras No. 2.2.5 y 2.2.6 se muestran imágenes de las Unidades D, Ignimbrita Alfa y Unidad E encontradas en la quebrada El Arenal Seco (Ilopango).

UNIDAD	DESCRIPCIÓN DEL MATERIAL	TIPO DE DEPOSITO
Unidad A	Es un depósito fino, granular y localmente disperso de color café. Está compuesto por pómez, y abundantes líticos; ambos con tamaño de arena hasta grava.	Depósito de caída
Unidad B	Cenizas gruesas basales, y lapilli de caída en el techo. Presenta un color amarillento y cementación de óxidos de hierro	Depósito de caída
Unidad C	Compuestos por dos flujos piroclásticos; el basal de color gris (Ignimbrita Gris), rico en líticos andesíticos, de cohesión similar al sobreyacente. Este último es el más importante, de color amarillento (Ignimbrita Amarilla), rico en líticos hidrotermalizados	Depósito de flujos piroclásticos
Unidad D	Es un depósito que se caracteriza por ser rico en cenizas de granos finos. En las facies intermedias y distales es no consolidado, sin embargo, hacia el borde caldérico esta unidad está bastante cementada por minerales sulfatados y silicatados.	Depósito de caída
Unidad Ignimbrita Alfa	Ignimbrita masiva, con techo de color rosado tenue y beige en todo el depósito, posee matriz rica en cenizas finas, pómez centimétricos y pocos líticos, cementada en la base por sulfatos y silicatos, el resto de la unidad está no consolidada.	Depósito de flujos piroclásticos
Unidad E	Depósitos secos y húmedos alternados. Los depósitos secos son color claro, compuestos por cenizas gruesas con lapilli fino pumítico y líticos andesíticos (gravas y arenas); se caracterizan por ser no consolidados, y bastante deleznales. Los depósitos húmedos están constituidos por cenizas muy finas, bien seleccionadas, color café claro, y café oscuro cuando están húmedos, se caracterizan por estar bastante consolidados y son ricos en fragmentos vítricos y en cristales	Depósitos de caída

Unidad Ignimbrita Beta	está constituida por una Ignimbrita de color café claro, muy compacta, con abundante matriz fina con pómez y lítico en moderada presencia	Depósitos de flujos piroclásticos
Unidad F	Compuesta por varios flujos piroclásticos masivos, no soldados, de color claro a beige claro, con granulometría mal seleccionada. Presentan matriz de cenizas gruesas con abundantes fragmentos de pómez y líticos.	Depósitos de flujos piroclásticos
Unidad G	Los flujos son de matriz fina, poco cementados y se caracterizan por tener baja consolidación. Las coignimbritas están formadas por capas delgadas de cenizas finas relativamente bien seleccionadas con moderada presencia de lapilli acrecional, El conjunto da un aspecto estratificado debido a los cambios granulométricos y en la estación lluviosa adoptan tonalidades claras y beiges.	Depósitos de caída, flujos y oleadas piroclásticas

Tabla No. 2.2.3 Descripción de las unidades de la Tierra Blanca Joven (TBJ)

Fuente: Realizado por EL AUTOR, basado en la investigación de Hernández, (2004). "Características Geomecánicas y Vulcanológicas de las Tefras Tierra Blanca Joven, Caldera de Ilopango, El Salvador", Tesis M.Sc., Tutor: Miguel Galera, Universidad Politécnica de El Salvador.

Para observar la estratigrafía que presentan los taludes constituidos por TBJ, se puede ver la Figura No 2.2.7, donde se identifican las unidades de este suelo; desde la F hasta la unidad C (en ocasiones la unidad G, no se encuentra; debido a la erosión que han sufrido los depósitos a través del tiempo).

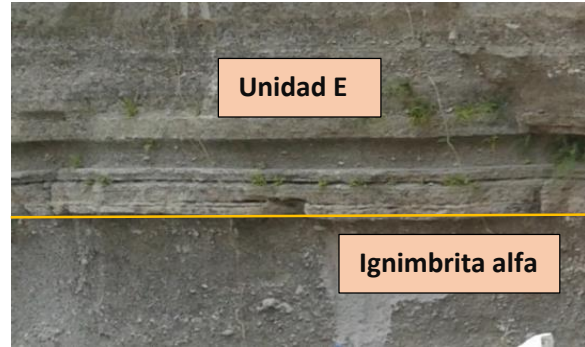


Figura No. 2.2.5 En la fotografía izquierda se observa una muestra inalterada de la unidad D obtenida de la quebrada El Arenal Seco, y la fotografía derecha muestra una sección de un talud que contiene a la Unidad E y la Ignimbrita Alfa en la misma zona.

Fuente: DEL AUTOR, Fotografía tomada el 11/7/2017

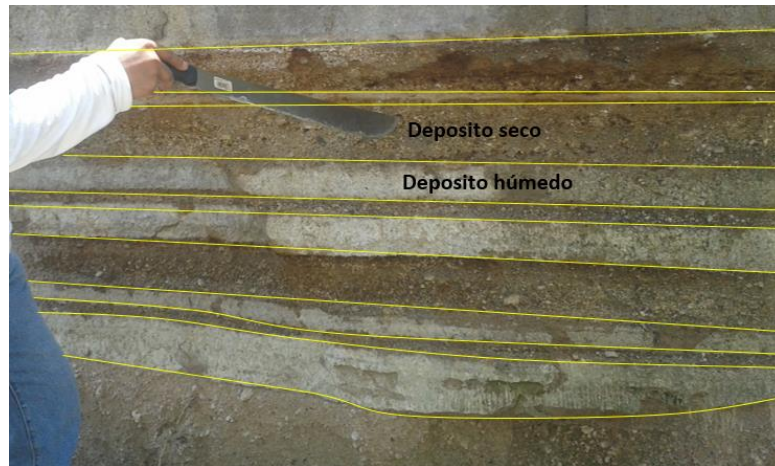
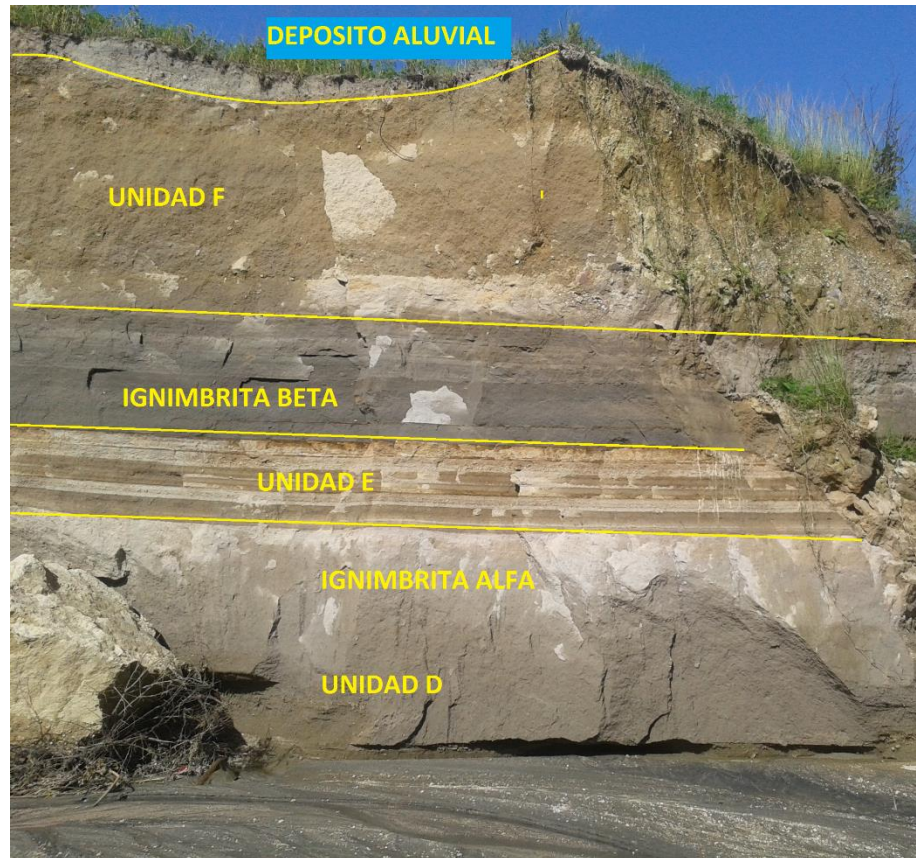


Figura No. 2.2.6 Presencia de unidad E, donde se identifican las subdivisiones secas y húmedas intercaladas.

Fuente: DEL AUTOR, Fotografía tomada el 11/7/2017



*Figura No. 2.2.7 Perfil estratigráfico de TBJ de un talud constituido por este tipo de suelo, ubicado en la quebrada El Arenal Seco, Ilopango.
Fuente: DEL AUTOR, fotografía tomada el 3/7/2017*

Las TBJ por su composición y características, son materiales muy susceptibles al deterioro por diversos procesos, destacándose los procesos erosivos, que pueden presentarse a causa de diferentes factores, como son: la Tectónica, el clima, actividades antrópicas, entre otros. Por lo que, para comprender lo que ocurre en la zona donde se encuentra este tipo de suelo (AMSS), se realizará un apartado (sección 2.3) donde se explicará el fenómeno de la erosión, detallando los principales tipos que pueda experimentar, sus procesos, y además, los factores que influyen en su magnitud.

2.3 EROSIÓN

A continuación, se presenta la definición, los tipos y procesos erosivos principales que pueden experimentar las TBJ.

2.3.1 DEFINICIÓN

La erosión fluvial es un proceso que integra el desprendimiento de material su transporte y su posterior depósito como se puede observar en la Figura No. 2.3.1; Dentro de los tipos de erosión existentes, la erosión por viento y la erosión fluvial (por el agua), son las que podrían tener mayor efecto en las TBJ, pero debido a las condiciones presentes en el AMSS, la erosión por el viento es mínima en comparación con la fluvial, por lo cual en este trabajo de investigación no se tomará en consideración.

Por lo general, los suelos muy erosionables son aquellos que poseen: grados de pendientes altos, climas lluviosos, y actividad humana perjudicial (remoción de la capa vegetal, impermeabilización de suelos, etc.), que frecuentemente intensifican o aceleran la erosión.

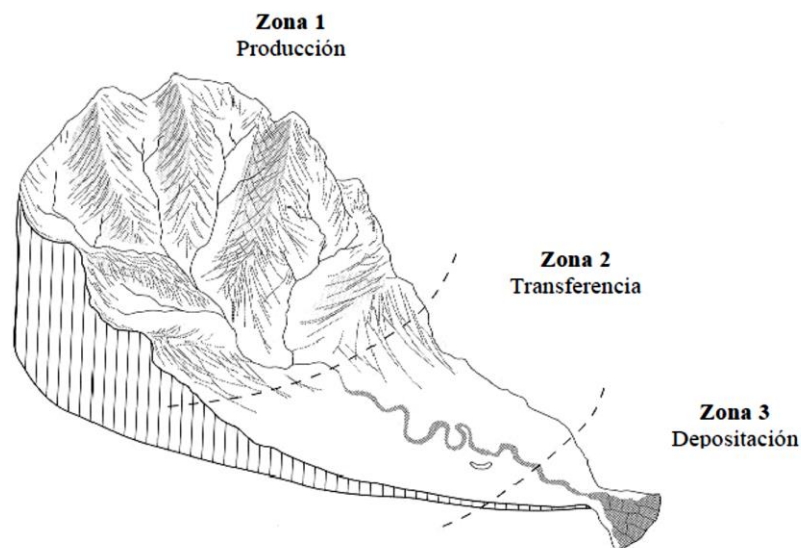


Figura No. 2.3.1 Zonificación del sistema fluvial dependiendo de procesos actuantes

Fuente: Chávez et al., (2010). "Cartografía y evaluación para estudiar los procesos erosivos en el Área Metropolitana de San Salvador", Pág. 10

Los procesos erosivos fluviales son impulsados por fuerzas como por ejemplo los esfuerzos cortantes generados por el impacto de las gotas de lluvia, por la escorrentía superficial, y los flujos sub-superficiales con influencia directa de la resistencia que presente el suelo a desprenderse.

Cuando se rompe el límite de la resistencia al movimiento de las partículas se dice que estas, se convierten en sedimentos que serán transportados, hasta el momento en que la cantidad de sedimentos supere la capacidad de transporte del sistema fluvial, resultando en la depositación y acumulación de sedimentos en la superficie.

Para que la erosión ocurra, se necesitan velocidades mayores que las requeridas para el transporte de las partículas o sedimentos, como se puede apreciar en la Figura No. 2.3.2 donde se presenta el diagrama de Hjulström que indica las velocidades necesarias con respecto al tamaño de las partículas para que se produzca la erosión, el transporte y la sedimentación. Las fuerzas encargadas en la oposición del transporte de las partículas son la gravedad, la cohesión del suelo y la fricción. Las fuerzas erosivas que aceleran este proceso son las de tracción, levantamiento y abrasión.

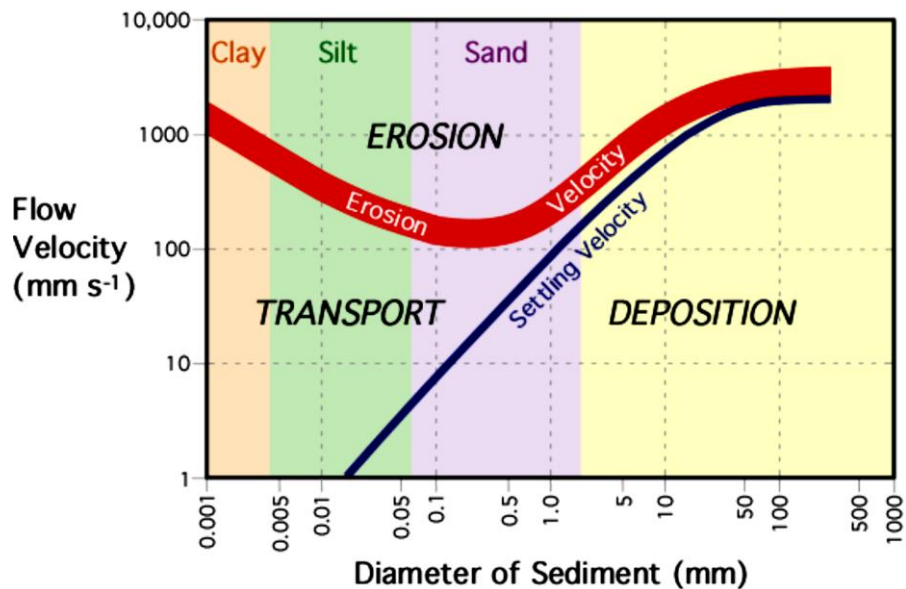


Figura No. 2.3.2 Curva de Hjulström, velocidades de erosión, transporte y sedimentación.
Fuente: Geólogos del Mundo, (2010). "Caracterización de la Inundabilidad en el Área Metropolitana De San Salvador", Pág. 14.

2.3.1.1 ERODABILIDAD Y EROSIVIDAD

La erosionabilidad o erodabilidad, es la susceptibilidad o facilidad con que un suelo es desprendido y transportado por los fenómenos erosivos. Cuando se inicia el movimiento de las partículas es porque las fuerzas encargadas de resistir el transporte de estas, han sido superadas por las fuerzas erosivas del sistema fluvial, ocasionando su movimiento.

La erosionabilidad es una propiedad cuyas causas específicas son muy complejas, y dependiendo de las características del fenómeno en cada sitio algunos de los factores que la afectan tienen importancia muy superior a los demás. Para suelos granulares (arenas y gravas) las fuerzas que resisten el movimiento son causadas principalmente por el peso propio de las partículas. Los suelos finos (arcillosos) en cambio deben ésta fuerza generalmente a la cohesión (Díaz, 2001. Pág. 48).

Por otro lado, la erosividad es una medida de la capacidad de un agente erosional, como la lluvia o flujo superficial, para erosionar la superficie de suelo (en pocas palabras son las fuerzas que actúan en la superficie). Depende de la energía cinética disponible, la cual es determinada por factores como intensidad de lluvia, tamaño de gota de lluvia, profundidad de flujo y ángulo de pendiente (Chávez et al., 2010. Pág. 11).

2.3.2 TIPOS DE EROSIÓN

Se conocen diversos tipos de erosión, de los cuales se tomarán en cuenta los que actualmente podrían estar afectando la TBJ.

- **Erosión por gotas de lluvia:** cuando las gotas de lluvia impactan el suelo desnudo pueden soltar y mover las partículas a distancias realmente sorprendentes.
- **Erosión laminar:** las corrientes superficiales de agua pueden producir el desprendimiento de las capas más superficiales de suelo, en un sistema de erosión por capas que se profundizan.
- **Erosión en surcos:** la concentración del flujo en pequeños canales o rugosidades hace que se profundicen estos pequeños canales formando una serie de surcos generalmente semiparalelos.

- **Erosión en cárcavas:** los surcos pueden profundizarse formando canales profundos o la concentración en un sitio determinado de una corriente de agua importante puede generar canales largos y profundos llamados cárcavas. Una vez se inicie la cárcava es muy difícil de suspender el proceso erosivo.
- **Erosión lateral y vertical:** la fuerza tractiva del agua en las corrientes y ríos produce ampliación lateral de los cauces, profundización y dinámica general de la corriente.

2.3.2.1 EROSIÓN POR GOTAS DE LLUVIA

La lluvia es uno de los principales problemas causante de los procesos erosivos en el país, las variables que juegan un papel importante en este tipo de erosión son: la cantidad, la intensidad y duración del evento. Dependiendo del comportamiento de las tres variables mencionadas, así será el resultado de la erosividad generada; por ejemplo si la intensidad y la cantidad de lluvia es alta la erosión será más rápida, el impacto de la gota de agua creará un cráter en la superficie del suelo, cuyo volumen se regirá por el tamaño y la velocidad del impacto de la gota; además, del tamaño y densidad de las partículas del suelo afectado, así como, de la profundidad del agua en la superficie (Díaz, 2001. Pág. 60).

El tipo de suelo tiene un papel muy importante en este tipo de erosión, por ejemplo si la gota de lluvia impacta un suelo de baja cohesividad como una arena suelta, en la superficie se formara un cráter por impacto como se describió en el párrafo anterior, ahora bien, si la gota de lluvia impacta en un suelo de cohesión fuerte la situación cambia con respecto al caso anterior debido que ahora las fuerzas erosivas de la gota deben de vencer las fuerzas internas del material que conforma el suelo (Chávez et al., 2010. Pág. 13), lo que se ejemplifica en la Figura No. 2.3.3.

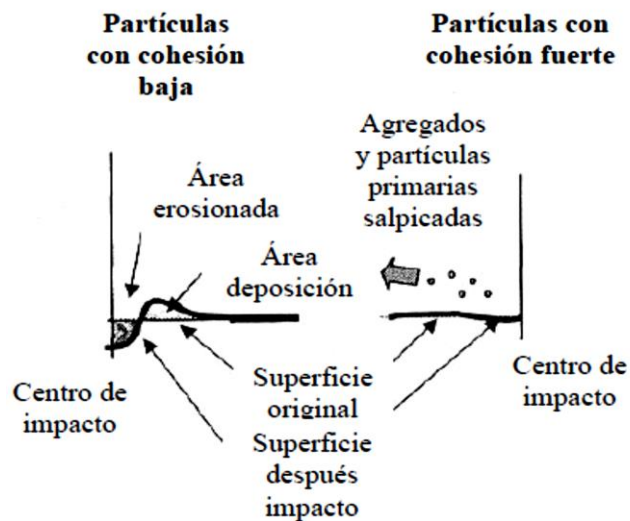


Figura No. 2.3.3 Impacto de las gotas de lluvia en suelos cohesivos y no cohesivos.
 Fuente: Chávez et al., (2010). "Cartografía y evaluación para estudiar los procesos erosivos en el Área Metropolitana de San Salvador", Pág. 13

2.3.2.2 EROSIÓN LAMINAR

La erosión laminar consiste en el desprendimiento o remoción y transporte en capas bien definidas superficiales de suelo por acción de la escorrentía superficial (ver Figura No 2.3.4), se asume que es la primera fase del proceso erosivo. Esta erosión es efectiva en pendientes fuertes y en terrenos planos sin cobertura.

El agua parcialmente se infiltra y se acumula sobre la superficie del terreno formándose una capa delgada de agua con flujos de 2 a 3 milímetros de espesor. El flujo laminar es poco profundo en la cresta de la ladera, pero la profundidad aumenta en la parte inferior de esta. El flujo propiamente laminar tiene poco poder erosivo, pero en zonas se convierte en turbulento, aumentando en forma importante su capacidad de erosión.

Una vez que la erosión laminar se encuentre a un nivel de severidad alto, se puede asumir que comenzará la erosión por surcos (Chávez et al., 2010. Pág. 14).

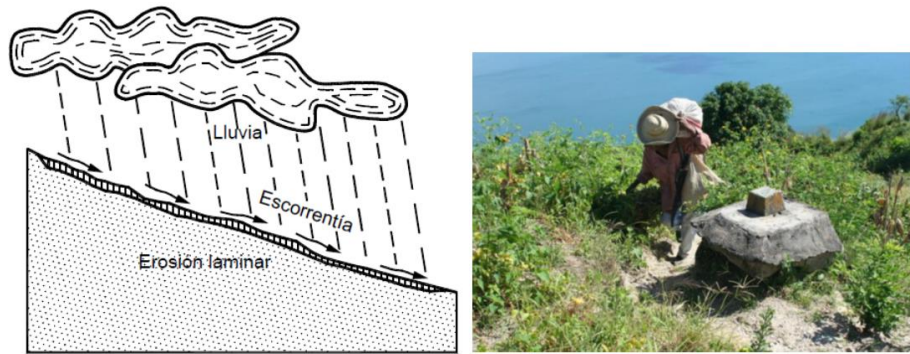


Figura No. 2.3.4 Esquema de erosión laminar y un punto geodésico denudado en la ladera de escarpe de la caldera de Ilopango (año 2005).

Fuente: Díaz, (2001). "CONTROL DE EROSIÓN EN ZONAS TROPICALES", Pág. 62, y Chávez et al., (2010). "Cartografía y evaluación para estudiar los procesos erosivos en el Área Metropolitana de San Salvador", Pág. 6.

2.3.2.3 EROSIÓN EN SURCOS

La concentración de un flujo de agua en ciertas áreas de la superficie del suelo genera esfuerzos críticos de cortantes que al ser alcanzados producen micro-canales que comúnmente son llamados surcos (ver Figura No. 2.3.5). Estos canales varían en forma y en tamaños, con anchos que varían entre 50-300 mm y profundidades arriba de los 30 mm. Los surcos erosionan aguas abajo dentro de un suelo cohesivo y uniforme sin que se amplíe mucho su ancho (ver Figura 2.3.6) (Chávez et al, 2010. Pág. 14).

La acción de la lluvia y el flujo de agua generado en la dirección principal de la pendiente forman los microsurdos de erosión (Rills) y a medida que la cantidad de flujo aumenta los surcos se hacen más profundos y de menor densidad por unidad de área. Cuando existen surcos paralelos pueden llegar a formar una red de drenaje en donde los surcos más profundos rompen la divisorio de los surcos más pequeños llevando el agua al punto más bajo (Díaz, 2001. Pág. 63).



Figura No. 2.3.5 Ejemplo de presencia de micro-canales en taludes de la quebrada El Arenal Seco, Ilopango.
Fuente: DEL AUTOR, Fotografía tomada el 31/8/2017

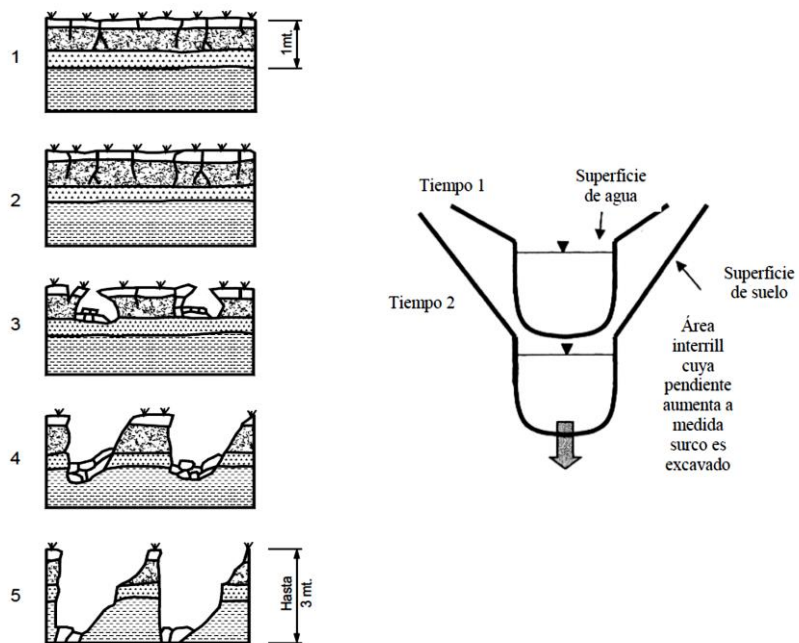


Figura No. 2.3.6 Proceso de formación de surcos y ejemplo de surco equilibrado erosionando hacia abajo en un suelo uniforme

Fuente: Díaz, (2001). "CONTROL DE EROSIÓN EN ZONAS TROPICALES", pág. 63. Y Chávez et al., (2010). "Cartografía y evaluación para estudiar los procesos erosivos en el Área Metropolitana de San Salvador", Pág. 16.

2.3.2.4 EROSIÓN POR CÁRCAVA

La etapa avanzada de los surcos es la erosión por cárcava, y ocurre cuando los canales se profundizan y se amplían por la unión de dos o más surcos para generar una cárcava (ver Figura No. 2.3.7); estas poseen una mayor capacidad de transporte de sedimentos comparada con la de los surcos, debido a que tienen tasas de flujo mayores.

La formación se da cuando un lugar sin vegetación permite la generación de depresiones erosionables en donde el agua se acumula; si hay suficiente escorrentía concentrada entonces la cabecera de la cárcava aparece; este mecanismo de formación trabaja mejor donde la superficie del suelo se agrieta, siendo el lugar donde se infiltra el agua. Una vez, el agua rompe a través del suelo en algún lugar de la ladera, entonces la erosión retrograda se da rápidamente a lo largo de la zona

El flujo que se concentra en la depresión seguirá erosionando hasta un punto en que alcance una superficie resistente a la erosión, es aquí, donde la cárcava tiende a aumentar su ancho y a disminuir la profundización. Este proceso erosivo avanza hacia arriba (ver Figura No. 2.3.8) formando una o varias gradas, o cambios bruscos de pendiente (Díaz, 2001. Pág. 66).

Aunque el volumen total de pérdidas de suelo en el mundo debida a la erosión en cárcavas es comúnmente menor que la debida a la erosión laminar y en surcos, los daños asociados con la erosión en cárcavas puede ser mucho más significativo y los riesgos para las vidas humanas pueden ser mayores.



Figura No. 2.3.7 Erosión en Cárcavas. En la imagen se puede observar la erosión por cárcava; en Zona Franca, Ilopango. Por la pendiente y la concentración de agua los surcos evolucionaron a barranco, presentando erosión retrograda y dificultando el acceso a la quebrada El Arenal Seco.

Fuente: DEL AUTOR, Fotografía tomada el 28/7/2017

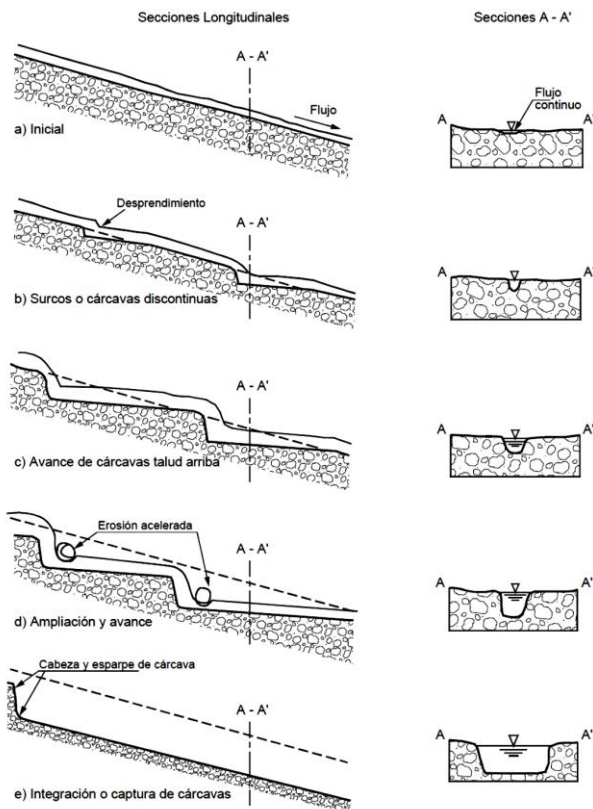


Figura No. 2.3.8 Etapas en el desarrollo de una cárcava (Adaptado de Leopold, Wolman y Miller, 1964).

Fuente: Díaz, (2001). "CONTROL DE EROSIÓN EN ZONAS TROPICALES", Pág. 67.

2.3.2.5 EROSIÓN LATERAL Y VERTICAL

Los procesos erosivos de un río o una quebrada son complejos y son regidos por fenómenos hidráulicos y geomorfológicos, en los que actúan una cantidad de variables; situación que

genera los cambios en la sección transversal del cauce, en los taludes laterales, en el fondo y de igual manera condiciona el comportamiento del flujo. Los ríos aluviales presentan un cambio significativo de profundización y erosión lateral durante y después de las avenidas.

La erosión lateral de los taludes se da de manera episódica (Figura No. 2.3.9), se producen en ciclos de derrumbes de las paredes de la ladera por los flujos del río o quebrada y el material excavado es transportado por el mismo flujo; reiniciando nuevamente el ciclo. Este proceso frecuentemente se observa en la zona de estudio, en donde se produce erosión en la base de los taludes de TBJ y por gravedad o por acción del mismo flujo estos dejan caer el volumen de suelo que los hace inestables (ver Figura No. 2.3.10), dejando paredes casi verticales y dejando consigo un aumento en el ancho del río o quebrada.

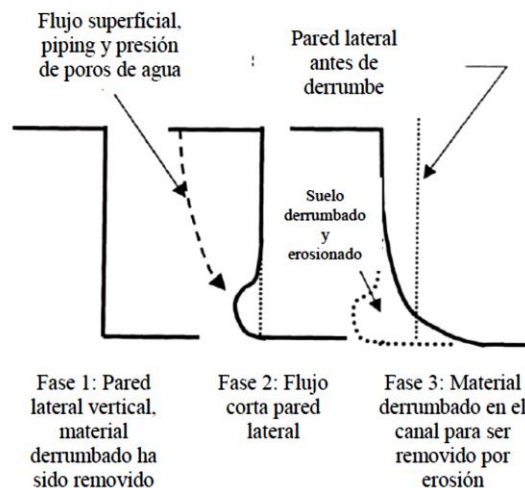


Figura No. 2.3.9 Fases de erosión lateral en los taludes del cauce de un río o quebrada (Toy et al., 2002, p.103).
Fuente: Chávez et al., (2010). "Cartografía y evaluación para estudiar los procesos erosivos en el Área Metropolitana de San Salvador", Pág. 21.

La corriente de agua puede producir una profundización del cauce cuando existe un desequilibrio entre la capacidad de erosión, transporte de la corriente y el suministro de carga sólida. Al ocurrir este desequilibrio las aguas tratan de tomar sedimentos del propio lecho del río, produciendo una erosión de fondo. La erosión del fondo del río ocurre cuando la fuerza de la corriente supera la resistencia a la erosión de los materiales del fondo.

Un fenómeno muy común de erosión en las riberas de los ríos es la erosión interna debida a los ascensos y descensos de los niveles del río. Al bajar el nivel del río se produce un movimiento de agua subterránea desde el suelo del talud de la orilla hacia la corriente. Este movimiento puede generar el transporte de partículas, la socavación, y el colapso; generándose, deslizamientos de bloques de talud, aún a velocidades muy bajas de la corriente. Un resultado típico de esto, es la formación de una topografía en gradas del talud de la orilla (ver Figura 2.3.11), las capas de suelos limosos y arenosos se erosionan mucho más fácilmente que las de suelos más cohesivos (Díaz, 2001. Pág. 125).



*Figura No. 2.3.10 Presencia de erosión en la base del talud, Aeropuerto de Ilopango
Fuente: DEL AUTOR, Fotografía tomada el 3/7/2017*

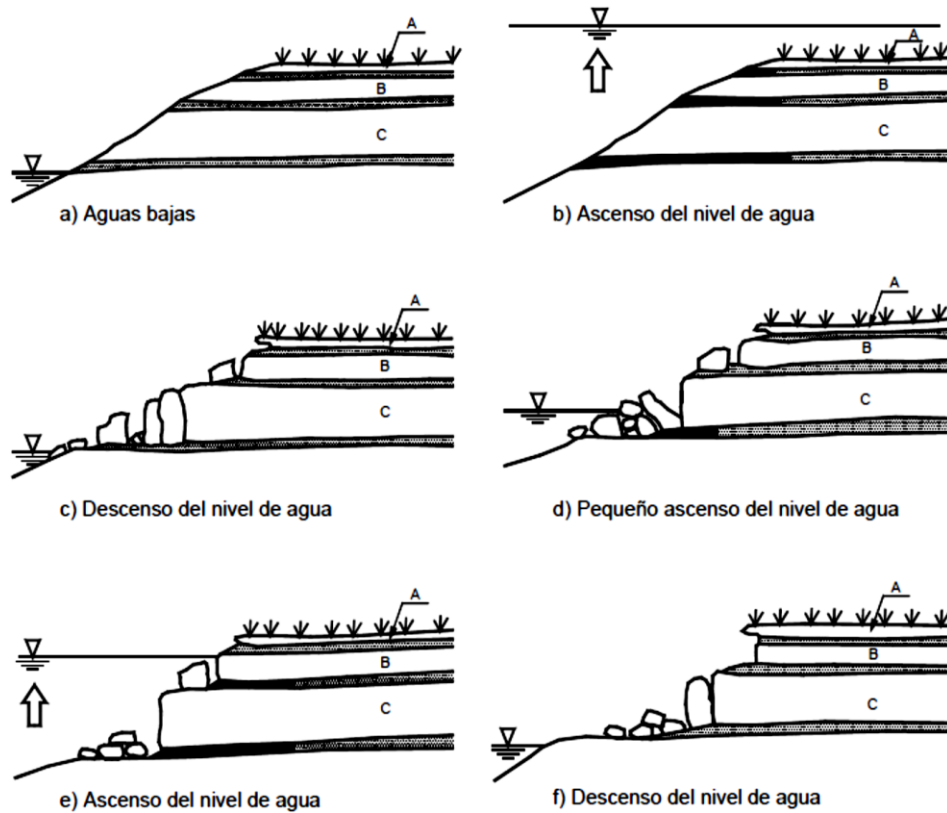


Figura No. 2.3.11 Proceso de erosión de la orilla por el descenso del nivel de agua (Hagerty, 1998).
 Fuente: Díaz, (2001). "CONTROL DE EROSIÓN EN ZONAS TROPICALES", Pág. 126.

Por medio de la erosión hídrica se puede generar el inicio de otro tipo de erosión, por ejemplo la erosión por cárcavas y la erosión por barranco que según las investigaciones recabadas han tenido presencia en la zona durante estos últimos años; por lo tanto este tipo de erosión (la erosión hídrica) será el principal proceso erosivo monitoreado en este trabajo de investigación, y para entender los factores que aceleran la erosión vertical y la erosión horizontal en un río o quebrada se realizará una sección que aborde esta temática (Sección 2.3.3).

2.3.3 FACTORES QUE AFECTAN LA EROSIÓN HÍDRICA O EROSIÓN FLUVIAL

Existen factores que controlan los procesos erosivos en los ríos o quebradas, estos se pueden dividir en: controles internos y controles externos; ya que controlan el comportamiento o la posible respuesta que el sistema fluvial puede presentar en un determinado periodo, y se clasifican en externo e internos por el hecho que no todas las variables son propias del lugar y que afectan solamente cuando tienen presencia en la zona.

Dentro de los factores o controles que influyen en la erosión de un sistema fluvial en específico se encuentran los que a continuación se detallan:

- Clima
- Vegetación
- Geología
- Topografía
- Uso de la tierra
- Tectónica

Cualquier cambio en uno de estos factores produce una secuencia de reacciones y efectos, produciéndose ajustes dentro del sistema fluvial. Las variables internas se llaman así porque son controladas hasta alguna extensión por los controles externos de la cuenca, sin embargo, su influencia principal en la operación de los sistemas fluviales es de control (Chávez, 2010).

2.3.3.1 CLIMA

La variable del clima es un factor externo y su mayor exponente en la zona de estudio es la lluvia, debido a que tiene influencia directa en la mayoría de los tipos de erosión presentes (erosión de impacto, surcos, cárcavas, etc.). Variables como cantidad de agua caída (mm) e intensidad de la tormenta (mm/hr), son las que determinan la erosividad de un evento lluvioso. Si cae más lluvia de la que puede infiltrarse en el suelo, entonces producen escorrentía (UNESCO, 2010. Pág. 9).

Pese a que la intensidad de la tormenta se encuentra en directa relación con la erosión y sedimentación producida, son las de intensidad intermedia las que, en el largo plazo, producen la mayor cantidad de pérdida de suelo (UNESCO, 2010. Pág. 10).

2.3.3.2 VEGETACIÓN

La vegetación es un factor propio de la zona que actúa como cubierta protectora, minimiza la acción de impacto de las gotas de lluvia pero depende directamente de la altura y continuidad de la copa de los árboles así como de la cobertura superficial (pastos, hierbas y arbustos).

Las tasas de erosión de impacto bajo las copas de los árboles, pueden ser hasta tres veces mayores que las producidas en suelos desnudos que reciben precipitación directa. Según UNESCO, (2010), se ha demostrado que las raíces de los árboles juegan un papel muy importante en los movimientos de tierra en laderas ya que las raíces profundas pueden servir de anclas para las masas de suelo (ver Figura 2.3.12).

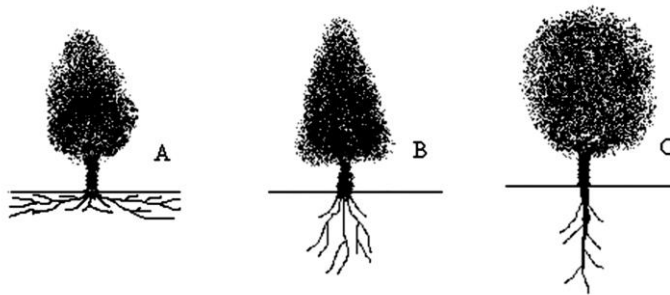


Figura No. 2.3.12 Tipos de raíces y su efecto en el control de la erosión. Las raíces de las plantas ayudan a sostener el suelo en su lugar, siendo las raíces superficiales (A) las más adecuadas para controlar la erosión hídrica y eólica. Por otro lado, las raíces más profundas (B y C) ayudan a prevenir movimientos de masas en pendientes (Adoptado de García-Chevesich, 2008).

Fuente: UNESCO, (2010). "Procesos de erosión-sedimentación en causas y cuencas" Pág. 13.

2.3.3.3 GEOLOGÍA

Cada tipo de suelo es diferente en cuanto a la resistencia a la erosión o en otras palabras en su erodabilidad. Este es un factor interno independiente que se ve afectado ante la presencia de factores externos como la lluvia, el uso de suelo, entre otros; y que su respuesta varía con el tipo de suelo presente. Un suelo con problemas de erosión puede ser 10 veces más susceptible a este fenómeno que los que sí tienen un mayor grado de resistencia. Estas fuerzas de oposición a la denudación de los suelos están en función de variables propias del material

presente como por ejemplo la textura, contenido de materia orgánica, estructura y permeabilidad.

Es interesante darse cuenta que son las partículas medianas las que más fácilmente se erosionan. Si bien, las partículas más finas son más livianas, éstas poseen una mayor superficie de contacto entre ellas, y por lo tanto, una mayor cohesividad, lo que las hace más resistentes a la erosión. Por otro lado, las partículas más gruesas son más pesadas, lo que también aumenta su resistencia a la erosión. Sin embargo, las partículas medianas (0,1 a 1 mm) no poseen cohesividad ni peso relevantes, por lo que son éstas las más erosionables (UNESCO, 2010. Pág. 15). Teniendo en cuenta esta información se podría decir que la variable importante en términos de la erosión y con respecto a la textura de un suelo es el porcentaje de limos ya que estos se encuentran en cuanto al tamaño de las partículas entre las arcillas y las arenas.

Un dato relevante con respecto a los materiales geológicos presentes en un área determinada y su respuesta ante factores externos es el contenido de humedad inicial del suelo; el suelo que ya está húmedo cuando la lluvia cae sobre él, alcanzará más rápidamente su tasa de infiltración final. A menudo, la correlación entre la erosión y la cantidad de lluvia que cae en una estación o en un año están relacionadas con este factor.

2.3.3.4 TOPOGRAFÍA

Las variables como la inclinación, forma del perfil y largo de la pendiente son determinantes en la cantidad y velocidad del escurrimiento generado por un evento lluvioso. La distancia horizontal en la que viaja una partícula de suelo desprendida por el impacto de una gota de lluvia, está en directa relación con la inclinación de la pendiente.

Por otro lado, la longitud de la pendiente influye en la profundidad, y por ende, en el poder erosivo del flujo superficial que se genere, siendo estas variables mayores en las secciones más bajas de la ladera, debido a una mayor área de contribución.

La forma de la pendiente influye directamente en las tasas de erosión, porque estas cambiarán a medida que la inclinación del terreno lo haga también, en la Figura No. 2.3.13 se puede observar el comportamiento de la erosión y sedimentación con respecto a los cambios topográficos presentes en una pendiente.

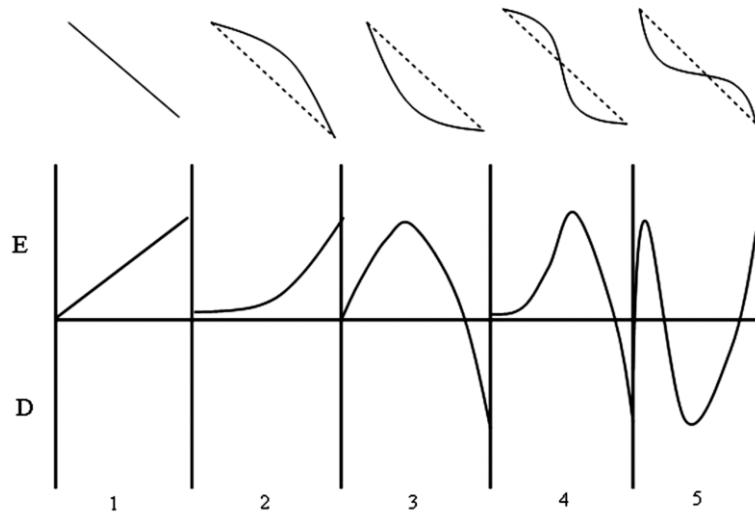


Figura No. 2.3.13 Variaciones en las tasas de erosión (E) y depositación (D), según cambios topográficos a lo largo de una pendiente (Adoptado de Terrence et al., 2002).
Fuente: UNESCO, (2010). "Procesos de erosión-sedimentación en causas y cuencas" Pág. 17.

2.3.3.5 USO DE LA TIERRA (ACTIVIDADES ANTRÓPICAS)

El ser humano es un factor indirecto en los procesos erosivos, y es uno de los más perjudiciales; se realizan construcción en áreas que afectan indirectamente a los drenajes naturales. Actividades de construcción de caminos, expansión de urbanizaciones, extracción de materiales pétreos, entre otras; representan una enorme alteración en el ciclo hidrológico, lo que se traduce en una disminución de la capacidad de infiltración de los suelos, que conlleva a la generación de grandes cantidades de erosión y sedimentación.

Uno de los elementos antrópicos que más efectos tiene sobre la erosión y la dinámica fluvial de un río, es la construcción de puentes, este contrae la sección de la corriente de agua, que ocasiona un represamiento del flujo y un redireccionamiento de la corriente aguas arriba como aguas abajo, con respecto la obra de paso ejecutada.

Entre los factores antrópicos que pueden estar afectando el AMSS, se pueden mencionar los siguientes:

- Sobrepastoreo. El suelo se va compactando por el continuo pisoteo, dejando al descubierto la tierra y acelerando la erosión.
- Obras públicas, las autopistas, los embalses y otras obras de ingeniería llevan consigo un aumento de la erosión.
- Expansión de las áreas metropolitanas. Con el aumento actual de la población urbana, gran parte de los mejores suelos que rodeaban los iniciales asentamientos humanos han desaparecido para siempre.
- Extracción de materiales pétreos. La extracción de materiales pétreos en algún sector del río modifica directamente el perfil longitudinal de este; y si se añade la alta vulnerabilidad que usualmente tienen las comunidades ubicadas en las zonas aledañas a los ríos y quebradas, el riesgo se incrementa notablemente.

PERFIL DE EQUILIBRIO Y NIVEL BASE DE UN RÍO

Si la cantidad de material extraído del fondo del canal, es igual a la cantidad de material depositado en un determinado lugar por el río, se dice que este presenta un estado de equilibrio. Si se generan cambios en el flujo natural del río, nuevamente buscará su perfil de equilibrio; entre más fuerte es la modificación, mayor será la reacción del río. Las nuevas características del canal en equilibrio (forma del canal, tamaño, profundidad, pendiente, tamaño de los sedimentos del fondo) pueden ser muy diferentes a las características originales de este.

Entre las características del perfil de equilibrio se pueden mencionar (Chávez, 2010, Pág. 25):

- 1) El perfil de equilibrio se alcanza una vez logrado el equilibrio entre diversas variables: caudal, velocidad, y carga; de todas ellas el río solo puede modificar directamente la velocidad que está en función de la pendiente;
- 2) No siempre el perfil de equilibrio tiene que ser una curva cóncava regular, por ejemplo si en un tramo el caudal disminuye aguas abajo sin que la carga disminuya de masa y de calibre en la misma proporción, se produce un perfil convexo;

- 3) La mayor parte de los perfiles son cóncavos ya que el caudal aumenta generalmente de aguas arriba a aguas abajo y la carga disminuye de calibre por el desgaste durante el transporte;
- 4) Todos los puntos del perfil son solidarios y todos de nivel variable, con la excepción del nivel base;
- 5) Es falso que el perfil de equilibrio deba originar depositación al final de su evolución.

Al punto más bajo del perfil longitudinal de un río se le denomina nivel de base (ver Figura No. 2.3.14). En los ríos que desembocan en el mar, éste es su nivel de base, mientras que para los afluentes lo es el nivel del río en que desembocan.

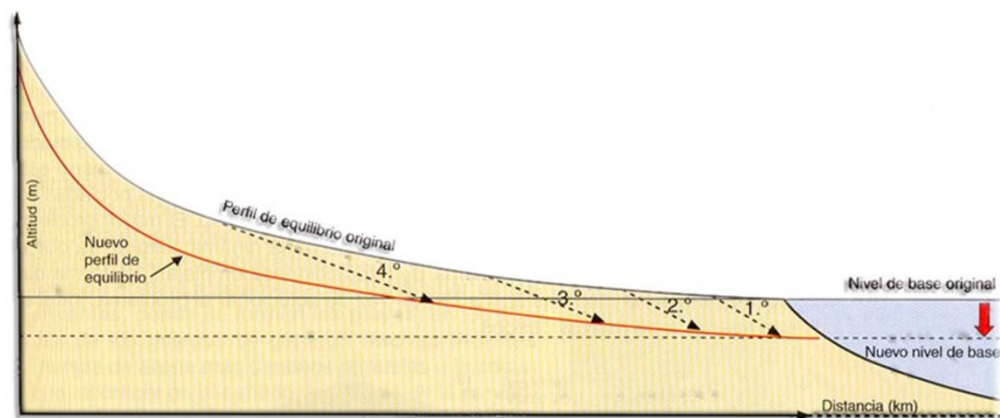


Figura No. 2.3.14 Erosión remontante realizada por un río en la búsqueda de un nuevo perfil de equilibrio, respecto al nivel base.

Fuente: <http://www.biologiasur.org>, página visitada en 2017

Si el nivel de base desciende porque se eleva el continente o desciende el nivel del mar, se produce una erosión remontante (erosión que progresa gradualmente hacia la cabecera de una cuenca fluvial como consecuencia de una bajada del nivel de base). Por el contrario, si el nivel de base asciende, se produce una sedimentación remontante.

2.3.3.6 TECTÓNICA

Se refiere a las fuerzas internas que deforman la corteza terrestre. Estas fuerzas pueden llevar a elevamientos a gran escala, subsidencia localizada, giros, fracturamiento y fallamiento. Donde

hay elevación se incrementa la energía de la velocidad del agua que baja por un drenaje. Una de las tasas más altas de producción de sedimentos se da en las zonas de elevación tectónica. Las pendientes de los valles es afectada por el fallamiento y elevación localizada, lo que podría afectar el patrón lateral del canal; el giro puede causar la migración de canales y afectar los patrones de sedimentación en los ríos (Chávez, 2010, Pág. 23).

Los depósitos de TBJ están afectados por las fallas jóvenes (recientes). Este tipo de fallas afecta los procesos erosivos, principalmente la erosión en ríos como la erosión horizontal y erosión vertical.

Para comprender de una mejor manera la actuación de los diversos factores explicados en esta sección 2.3.3 se presenta la Figura No. 2.3.15 en la que se puede apreciar como los factores actúan en un mismo sistema.

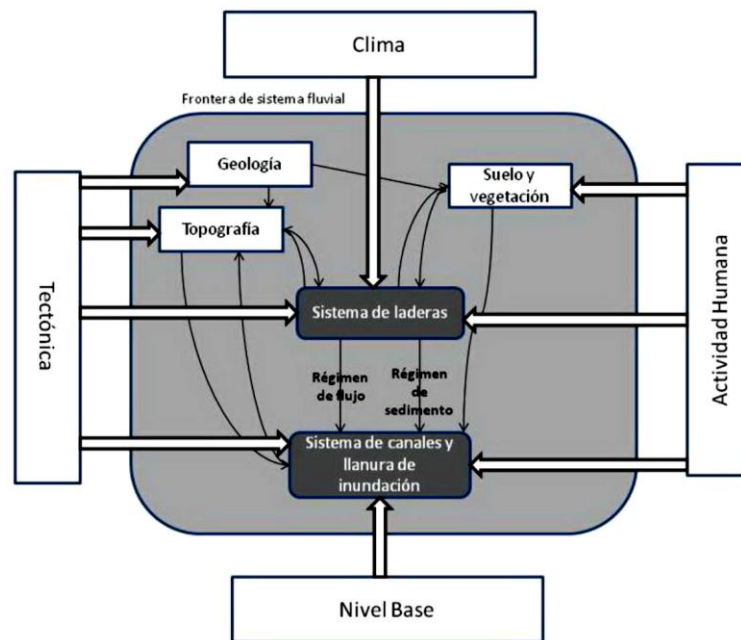


Figura No. 2.3.15 Representación simplificada del sistema fluvial, se plantea la conexión que existe entre los factores internos y externos (Charlton, 2007, Pág.14).
Fuente: Chávez et al., (2010). "Cartografía y evaluación para estudiar los procesos erosivos en el Área Metropolitana de San Salvador", Pág. 23.

En el Área Metropolitana de San Salvador posiblemente los factores externos de la erosión fluvial (El clima, tectónica, cambio en el nivel base y las actividades humanas) estén provocando cambios en los sistemas fluviales haciendo que la problemática de erosión sea bastante intensa; por lo general, las actividades humanas pueden contribuir a dichos procesos erosivos, por ejemplo, cuando se hacen reservorios, se desvían drenajes, estabilización de laderas, enderezado de sección de canal, canalizaciones, extracción de arena o grava, cambios en el uso del suelo principalmente por procesos urbanos que quitan cobertura vegetal e impermeabilizan área y por fallas en las descargas a ríos o quebradas o rupturas de tuberías (Chávez, (2010). Pág. 41).

En esta sección 2.3 se ha explicado el tema de la erosión, sus causas, procesos y los factores que influyen en la aceleración de este fenómeno, pero en un estudio de esta índole donde se requiere información propia de la zona a estudiar, es necesario realizar una cuantificación de la erosión generada en el sector en lo que dure el periodo de investigación; debido a esta situación se abordará en la sección 2.4 los diversos métodos de medición de erosión existentes en la actualidad, para posteriormente tomar en cuenta el método que más se adapte a las condiciones presentes en el área de investigación.

2.4 ESTIMACIÓN DE LA PERDIDA DE SUELO

Normalmente, la erosión de un suelo se mide como pérdida de suelo expresado en la relación peso/superficie-tiempo. Para su evaluación hay métodos directos e indirectos.

- Métodos directos: Permiten conocer con exactitud la velocidad y la magnitud de la erosión
- Métodos indirectos: Se aplican a zonas extensas y consisten en una serie de ecuaciones que relacionan los diferentes parámetros que condicionan estos procesos de degradación. El más usado es la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (USLE) adoptado por la FAO.

2.4.1 MÉTODOS DIRECTOS

Las mediciones se pueden hacer en el campo o en el laboratorio; las dos tienen sus ventajas y desventajas. Las mediciones en campo se llevan a cabo bajo el clima real, topografía, suelo y vegetación; sin embargo, se pierde cierto control de investigación; es posible que durante las mediciones el clima no sea el representativo (tormentas o sequías), también el equipo puede ser dañado por vandalismo o por las inclemencias del tiempo. En las pruebas de laboratorio se puede tener más control de los parámetros que participan, pueden llevar poco tiempo (minutos a horas) pudiéndose repetir para corroborar resultados; pero no pueden representar en su totalidad algunos parámetros importantes que no se pueden simular en el laboratorio (Chávez, (2010). Pág. 34).

La información sobre los volúmenes de pérdidas de suelo es escasa, muy pocos esfuerzos se han destinado a la investigación en este campo. Con la incorporación de nuevos actores en los procesos de validación y difusión de tecnologías ha surgido el interés por fundamentar de forma más precisa las acciones que están emprendiendo en la promoción de prácticas de Conservación de Suelo y su significado en términos económicos para los productores y para los países.

Con estos métodos se busca establecer relaciones entre la cantidad de suelo erosionado y los factores que intervinieron en el deterioro durante el periodo de tiempo en que fueron aplicados. Hay diferentes métodos de medición de erosión, los cuales se agrupan de la siguiente manera: medición de variación en el nivel superficial, medición de la escorrentía superficial y otros tipos de medición de erosión (Bautista et al., 2016. Pág. 71).

2.4.1.1 MEDICIÓN DE VARIACIÓN EN EL NIVEL SUPERFICIAL

La medición de este tipo, tiene como objetivo medir espesores de las variaciones que ocurren en los suelos, ya sean producto de la erosión o del asolvamiento. Estos datos recolectados se utilizan para calcular las pérdidas volumétricas en un área determinada, un ejemplo de este tipo de medición es el método de clavos y arandela que se explica a continuación:

El método de clavos y arandelas puede considerarse uno de los más sencillos y fáciles de aplicar para cuantificar las pérdidas de suelo ocasionadas por la erosión hídrica. El método consiste en

utilizar clavos con arandelas, colocados a lo largo de un transecto a intervalos regulares. La arandela se coloca de manera que descansa sobre la superficie del suelo, tocando ligeramente la cabeza del clavo (Colegio Postgraduados Chapingo, 1982). El propósito de la arandela es marcar cortes en el terreno ocasionados por erosión y de esta forma medir el espesor de la capa de suelo perdido.

2.4.1.2 MEDICIÓN DE LA ESCORRENTÍA SUPERFICIAL

Se define la escorrentía o escurrimiento superficial como el flujo de agua sobre la superficie del terreno, cuya capacidad erosiva viene dada por las condiciones topográficas y de cobertura vegetal del mismo. Es el resultado de una insuficiente velocidad de penetración del agua lluvia en el material que constituye el suelo, es por ello que cuando se presentan precipitaciones intensas o duraderas se produce la escorrentía. En este tipo de mediciones se conoce el método de parcelas de escorrentía que se describe a continuación:

El método de parcelas de escorrentía divide el terreno en porciones limitadas por paredes que aíslan el agua producto de escorrentía de manera que puedan cuantificarse con depósitos (tanques) que se encuentran al final del terreno limitado.

2.4.1.3 OTROS TIPOS DE MEDICIÓN DE EROSIÓN

El método de transecto de cárcavas consiste en delimitar transecto a lo largo de la cárcava; el número de transecto dependerá de la regularidad de la sección transversal que está presente. El objetivo de este método es realizar dos mediciones de la sección transversal de la cárcava, una antes del inicio de la época lluviosa y otra al final de esta, de manera que al multiplicar por la longitud del transecto pueda encontrarse el volumen de suelo que se perdió por efectos de las lluvias.

El método de trampas y sedimentos es una modificación de las parcelas de escorrentía que permite medir la erosión hídrica en un área determinada, bajo condiciones específicas. Este método tiene la finalidad de captar los sedimentos provenientes de la escorrentía. Para ello se establecen parcelas con bordes que limiten los escurrimientos y se colocan estructuras en los puntos de descarga del área de la parcela. Se realizan monitoreos de los sedimentos interceptados y almacenados en los tanques, se recomienda hacerlo periódicamente y en

dependencia de la frecuencia e intensidad de eventos de lluvia. En cada monitoreo que se realice, se tomarán muestra del material en los depósitos, para determinar el peso seco del mismo y de esa manera saber cuánto material se ha erosionado (por peso).

El método de raíces expuestas fue implementado por Dunne, (1977), en Kenia, África. Este método plantea que los indicadores más generales de disminución superficial en algunas áreas donde ocurre erosión intensa, son las raíces de los árboles o los montículos de suelo residual, protegidos bajo el dosel de árboles o arbustos mientras que el suelo a su alrededor es rebajado. De esta manera, si es posible datar los árboles o arbustos, es decir estimar su edad mediante el conteo de anillos de crecimiento, la altura del montículo dividida por la edad de la planta, indica la tasa promedio de disminución de la superficie.

Método de precisión con GPS también conocido como Sistema GNSS, consiste en receptores con canales que les permiten realizar un seguimiento de las señales GPS, GLONASS y el reciente Galileo simultáneamente. El rastreo de las señales satelitales para el cálculo de las coordenadas de la posición en un sistema de referencia seleccionado, puede ser efectuado en tiempo real. Está basado en satélites artificiales que pueden proporcionar a los usuarios información sobre la posición y la hora con gran precisión, en cualquier parte del mundo. El fundamento del GNSS radica en un receptor GPS fijo en la Tierra con una posición de referencia conocida, con la cual compara la información recibida por el GPS y calcula así el error. Este receptor transmite la corrección de errores a los receptores próximos a él, y así estos pueden a su vez, corregir los errores producidos por el sistema dentro del área de cobertura de transmisión de señales del equipo GPS de referencia.

2.4.2 MÉTODOS INDIRECTOS

Estos métodos son utilizados para medir la erosión del suelo sin necesidad de estar presente físicamente en el lugar donde se realizará la medición.

2.4.2.1 MEDICIONES POR FOTOGRAMETRÍA

Estas técnicas se basan en la recolección de información en un estado estático, es decir se auxilian de secuencias fotográficas para determinar los cambios ocurridos en la superficie de los suelos, tras la ocurrencia de los procesos erosivos. Existen hoy en día vehículos aéreos no

tripulados (drones) que sobrevuelan una zona específica (a distancias verticales conocidas) tomando fotografías, que luego son analizadas usando métodos fotogramétricos, en donde son obtenidos los cambios en el tiempo. Siempre es necesario hacer controles en campo; siendo buen método cuando las tasas de erosión son altas y los cambios en la superficie es substancialmente mayor que la resolución de la medición. El costo por medida es menor ya que se miden gran cantidad de puntos, pero el costo general es mayor a otros métodos debido al equipo. La mayor limitación es que la fotografía de la superficie tiene que ser sin vegetación u otras obstrucciones.

2.4.2.2 ECUACIÓN UNIVERSAL

La Ecuación Universal de Pérdidas de Suelo (USLE), desarrollada en los años 70 por Wischmeier y Smith (1978), es largamente utilizada en el mundo, incluso en los trópicos. La USLE, que calcula la pérdida de suelo promedio anual en laderas bajo usos y manejos de suelo específicos, es una ecuación estocástica, es el producto de seis factores independientes.

A pesar de su relativa robustez predictiva, la USLE es muchas veces mal utilizada en los trópicos, generando predicciones incorrectas. Los principales problemas de utilización de la ecuación son: (i) aplicación en situaciones donde sus factores no pueden ser determinados de datos con razonable precisión; (ii) aplicación de la ecuación en cuencas complejas utilizando los promedios de longitud e inclinación de laderas y valores promedios de K y C; (iii) utilización indiscriminada de los factores C y P sin considerar las limitaciones de longitud de laderas; y (iv) utilización de la ecuación en situaciones donde hay cárcavas y/o depositación de sedimentos (UNESCO, 2010. Pag.22)

La pérdida de suelo promedio anual por área unitaria es dada por la ecuación (Wischmeier y Smith, 1978):

$$A = R K L S C P$$

Dónde:

A = pérdida de suelo promedia anual
R = erodabilidad de la lluvia y esorrentía
K = erodabilidad del suelo

- L = factor de longitud de vertiente (adimensional)
- S = factor de gradiente de la vertiente (adimensional)
- C = factor de uso y manejo del suelo (adimensional)
- P = factor de prácticas conservacionistas (adimensional)

En la figura No 2.4.1 se han esquematizado las variables que integran la ecuación universal con sus respectivas características.

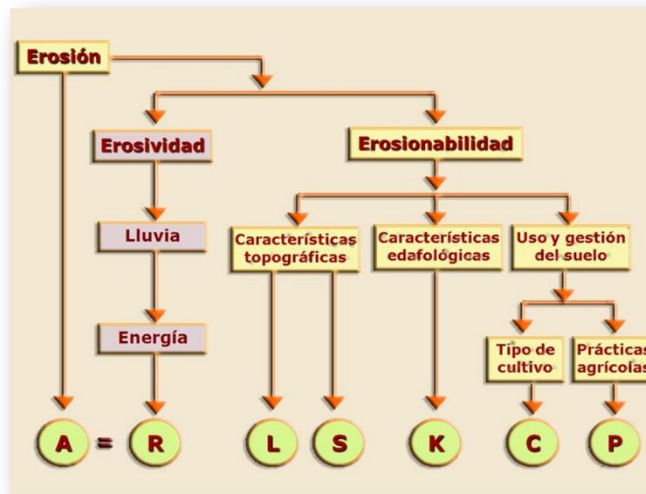


Figura No. 2.4.1 Variables de la ecuación universal con sus respectivas características.
Fuente: <http://www.biologiasur.org>, página visitada en 2017.

Debido a la sencillez de esta ecuación, se ha utilizado como técnica de investigación; pero esta ecuación no se recomienda utilizarla para estimar pérdidas de suelo en cárcavas o en riveras de los ríos, debido a que está basado sobre el supuesto de pendiente de terreno, suelos, cultivo y manejo uniformes. Es un procedimiento estadístico (empírico o "agrupado") que no contempla los procesos físicos de separación, transporte y sedimentación en forma mecánica. Finalmente, no fue diseñado para estimar rendimientos de sedimentación en cuencas complejas.

Si el lector quiere profundizar en la obtención de los parámetros de la ecuación universal de la pérdida de suelo, consultar Morgan, R.P.C. (1997). Erosión y Conservación del Suelo. (2da edición). España. (Pág. 129-134).

En este trabajo de investigación se tiene como finalidad poner en práctica métodos que puedan adaptarse a las condiciones del terreno del área a estudiar, a la vez que los registros puedan

obtenerse de manera sencilla y sin incurrir en gastos económicos considerables. Por estas razones se ha decidido profundizar en los métodos siguientes: **MÉTODO DE CLAVOS Y ARANDELAS, MÉTODO DE PRECISIÓN CON GPS Y MEDICIÓN POR AEROFOTOGRAMETRÍA.** Estos métodos que serán descritos a detalle en el **Capítulo No 4.**

2.5 PROBLEMAS QUE SE PRESENTAN EN EL ÁREA DE ESTUDIO

El presente estudio se realizará en un área aproximada de 2km², en la quebrada El Arenal Seco del municipio de Ilopango, cerca de la ladera occidental de la caldera; entre la Zona Franca de San Bartolo, Carretera de Oro y Aeropuerto de Ilopango (ver Figura No. 2.5.1). La quebrada El Arenal Seco ha sufrido constantemente procesos de erosión hídrica en el lecho, lo que ha dado lugar a su profundización y ensanchamiento; y así generar laderas verticales de diferentes alturas (oscilando entre 5 y 30 metros).

El material presente en las laderas es la TBJ, y debido a los procesos erosivos que ha experimentado la zona, ha dejado en evidencia las diferentes unidades que integran este material (desde el punto de vista geológico); observándose desde la unidad G en el techo hasta la unidad C (en algunas de ellas).

La TBJ es un material relativamente rígido y fuerte en su estado natural, debido a la cementación que poseen, pero no se puede decir con exactitud qué tipos de agentes de cementación actúan en ella. Diversos autores que han estudiado este material lo clasifican como arenas limosas y limos arenosos, y han descubierto que este suelo tiende a reducir la resistencia al corte cuando está en condiciones saturadas comparada con el estado de humedad natural. El comportamiento de los taludes se ve afectada por los proceso erosivos, dados por la escorrentía fluvial que al impactar en la base de los taludes los erosiona y produce la desestabilización de los mismos dando lugar a los desprendimientos en bloques; otros factores, que inciden en el deterioro de la zona son los eventos sísmicos, que al poseer planos de exfoliación se activan y producen desprendimientos de material; además de lo anterior, existe el efecto que produce el clima, por medio de las lluvias intensas y/o prolongadas, por ejemplo los huracanes o depresiones tropicales como el Mitch (1998), Stan (2005), Ida (2009),

Alex (2010), Agatha (2010) y 12-E (2011), que debido al aumento de la humedad, la masa de suelo incrementa su peso, generando una disminución de la resistencia al corte, que hace que se produzcan deslizamientos y flujos en los mismos; factores antrópicos, como la urbanización aumenta la escorrentía superficial, debido a la impermeabilización de los suelos, disminuyendo la capacidad de infiltración de estos; existen otros factores, sin embargo, los descritos anteriormente son los que presentan mayor efecto en la erosión de la zona.



Figura No. 2.5.1 Quebrada El Arenal Seco, Ilopango.
Fuente: Imagen correspondiente al 25/7/2017 (Google Earth)

Hay diversos tipos de erosión presentes en el área de estudio, algunos con un potencial de afectación mayor que otros; tal es el caso de la erosión tipo cárcava, que de acuerdo a la información recabada, en estos últimos años ha causado daños en la infraestructura del cauce de la quebrada, dado que esta pertenece a la cuenca alta del río las Cañas (ver Figura No 2.5.2) que es donde se han presentado los cambios más drásticos, como es el caso del año 2012, donde la cárcava que estaba presente en uno de los taludes del Aeropuerto de Ilopango erosionó a tal punto que afectó directamente la pista de aterrizaje y con ello la funcionalidad de dicha terminal aérea (ver Figura No. 2.5.3).

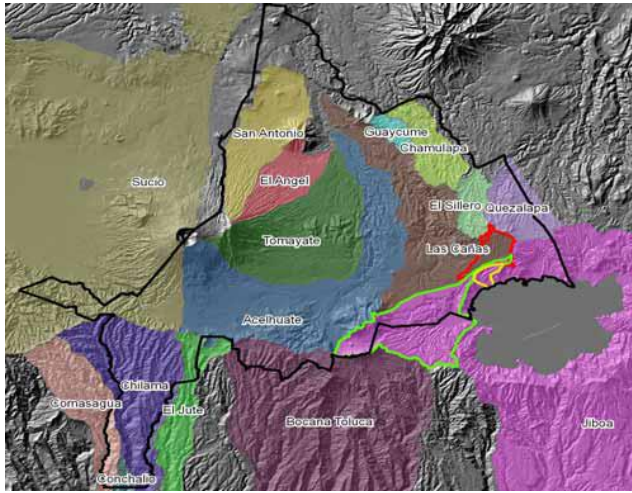


Figura No. 2.5.2 Cuencas y subcuencas del AMSS. En línea roja la microcuenca del Arenal Seco de Ilopango, en verde la del Chagüite y en amarillo la del Güilapa.
 Fuente: Geólogos del Mundo, (2010). "Caracterización de la Inundabilidad en el Área Metropolitana De San Salvador", Pág. 4.

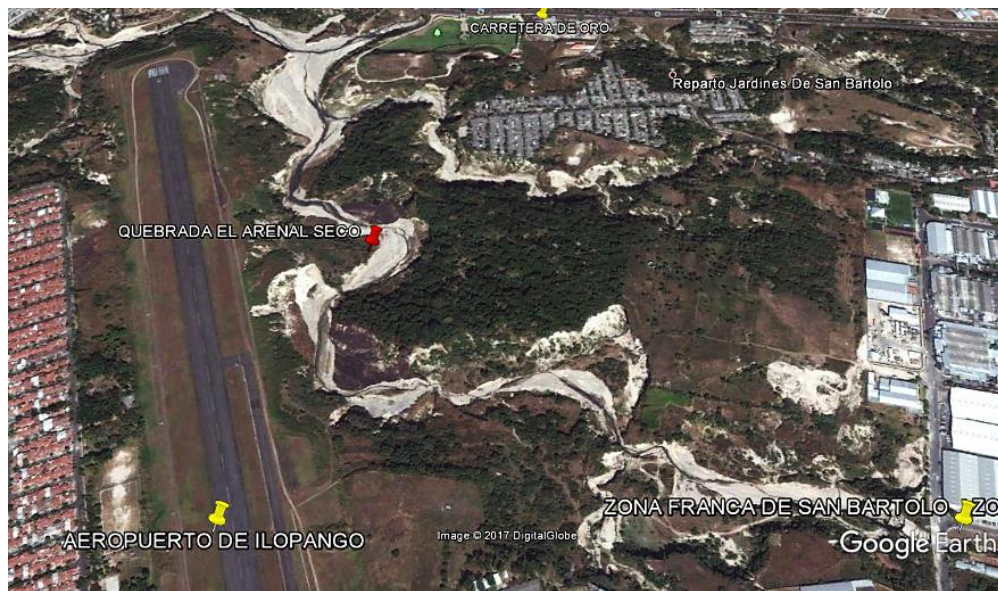


Figura No. 2.5.3 Quebrada El Arenal Seco, presenta erosión retrograda cerca de la pista del aeropuerto de Ilopango
 Fuente: Imagen correspondiente al 26/01/2010 (Google Earth)

Una situación similar ocurrió en el año 2010 cuando se generó una cárcava de grandes dimensiones en el reparto Las Cañas en Ilopango (ver Figura No. 2.5.4) provocada por el impacto de la tormenta tropical Agatha, dejando sin hogar a más de 50 familias



*Figura No. 2.5.4 Cárcava generada en el reparto Las Cañas, Ilopingo, debido a las lluvias registradas por la tormenta tropical Agatha en el año 2010.
Fuente: Mendoza, (2016). "FENÓMENO DE EROSIÓN EN LOS SUELOS"*

OPAMSS, construyo para el Área Metropolitana un mapa de vulnerabilidad a la erosión fluvial, encontrándose que la zona en estudio posee un nivel de vulnerabilidad intensa y profunda (ver figura No 2.5.5), que coincide con el comportamiento del área en estudio; esto corresponde al tipo de material geológico encontrado (poco consolidado) y a la dinámica natural, que provoca que la erosión fluvial sea bastante intensa

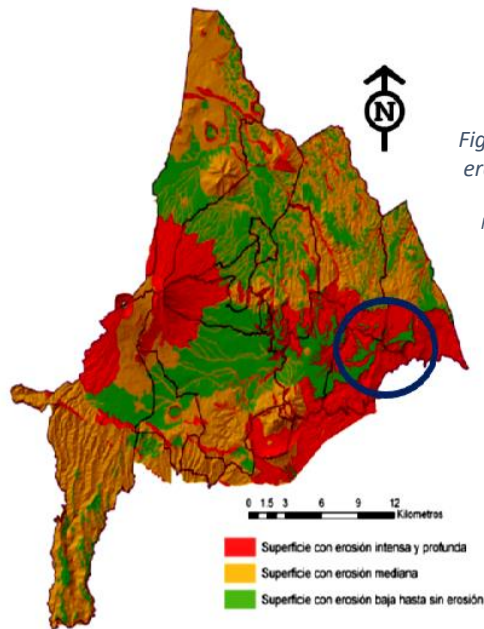


Figura No. 2.5.5 Vista general del mapa de vulnerabilidad de erosión fluvial. En el círculo azul se ubica aproximadamente la zona de estudio para esta investigación.

Fuente: Chávez et al, (2010). "Cartografía y evaluación para estudiar los procesos erosivos en el Área Metropolitana de San Salvador" Pág. 79.

2.5.1 CAMBIOS EN LA GEOMORFOLOGÍA DE LA QUEBRADA EL ARENAL SECO

La erosión en El Arenal Seco no es una novedad, siempre ha existido; en estas últimas décadas ha tomado relevancia por los considerables cambios en la topografía de la quebrada como resultado de su propio comportamiento, en la Figura No. 2.5.6 se puede observar claramente como el drenaje de esta quebrada ha evolucionado notoriamente en un periodo aproximado de 60 años.

En la presente sección se quiere mostrar los cambios que ha presentado la quebrada en estos últimos años. Donde se presentará los cambios en la profundización del cauce, los cambios en su curso, la erosión lateral de los taludes presentes y cárcavas generadas por el comportamiento de la quebrada.

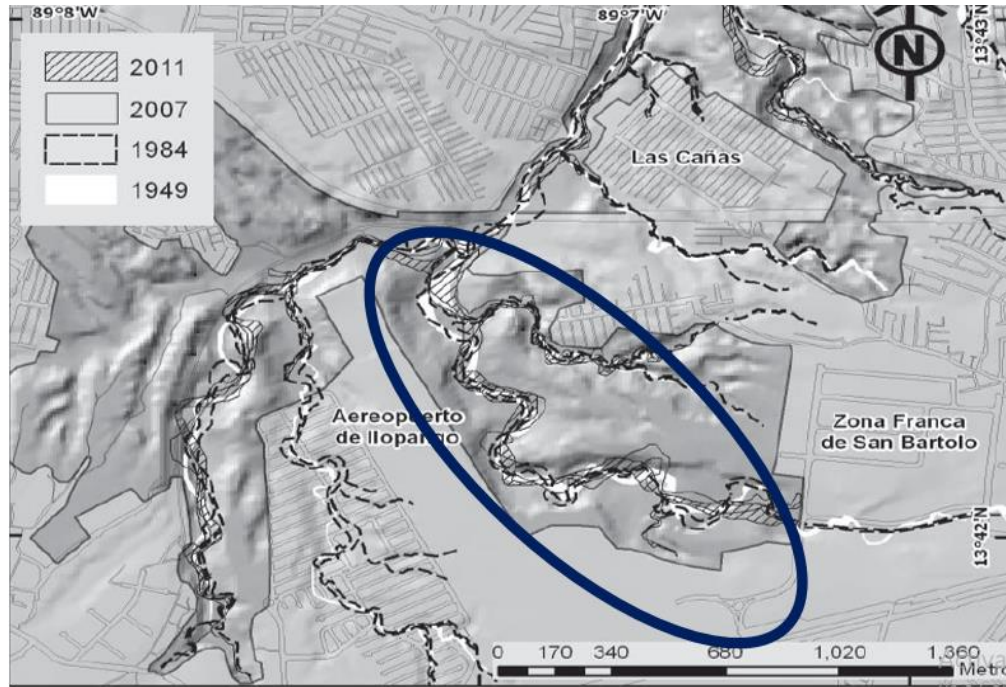


Figura No. 2.5.6 Cambios de drenaje en la quebrada El Arenal Seco (encerrada en azul) entre 1949-2011.
 Fuente: Chávez, (2012). "PROBLEMÁTICA Y CONOCIMIENTO ACTUAL DE LAS TEFRAS TIERRA BLANCA JOVEN EN EL ÁREA METROPOLITANA DE SAN SALVADOR, EL SALVADOR"

Para el año 2005 se puede observar el sector del Arenal Seco, específicamente en el talud del Aeropuerto de Ilopango, se generó erosión retrograda, como se muestra en la Figura No 2.5.7, la cual afectó posteriormente la pista de dicho aeropuerto (ver Figura No. 2.5.3).



Figura No. 2.5.7 Quebrada El Arenal Seco
 Fuente: Imagen correspondiente al 5/9/2005 (Google Earth)

La Zona Franca de San Bartolo, en el año 2010 (zona marcada con círculo rojo en la Figura No 2.5.8), tuvo problemas de erosión retrograda, lateral y vertical (como se muestra en la Figura No 2.5.9); debido al cambio realizado a la quebrada, en donde pasa, de estar canalizada y con un sistema de guardaniveles a descargar en un sector cubierto por depósitos de TBJ como se muestra en la Figura No 2.5.10.



Figura No. 2.5.8 Quebrada El Arenal Seco, en el círculo rojo se muestra la canalización en la Zona Franca De San Bartolo
Fuente: Imagen correspondiente al 1/10/2015 (Google Earth)



Figura No. 2.5.9 Erosión vertical en el sistema de guardaniveles zona franca, Ilopango
Fuente: Chávez et al, (2010). "Cartografía y evaluación para estudiar los procesos erosivos en el Área Metropolitana de San Salvador" Pág. 55.



*Figura No. 2.5.10 Quebrada El Arenal Seco, zona marcada con círculo rojo en Figura No. 2.5.8
Fuente: DEL AUTOR, Fotografía tomada el 3/2/2017*

La erosión hídrica es hoy en día un grave problema en la quebrada El Arenal Seco, los factores mencionados dentro de este capítulo ayudan a que se agrave la situación, el impacto que tiene cada uno de ellos es variable.

Las actividades antrópicas hoy en día juegan un papel muy importante; las urbanizaciones que han sido desarrolladas en zonas que son impactadas intensamente por la erosión, las construcciones civiles que no han respetado las condiciones geológicas del área y no se tiene la seguridad que se respeten en un futuro, son factores de los que depende la respuesta del sistema, cuando este es afectado por otros factores externos como las lluvias, movimientos tectónicos entre otros.

Esta situación genera los constantes colapsos de casas, los colapsos de los sistemas de drenajes de aguas servidas y aguas lluvias de las comunidades que se encuentren cercanas a las paredes de los taludes del sistema fluvial del río o quebrada; provocado por un mal diseño en la capacidad de la red de hídrica del área (frecuentemente la tubería para aguas negras sirve también para coleccionar agua pluvial), por los cambios de descarga de una cuenca hacia otra y las canalizaciones artificiales de los ríos donde se restringe el espacio para acomodar un caudal máximo durante las inundaciones.

CAPÍTULO No.3
METODOLOGÍA DE LA
INVESTIGACIÓN

3.1 INTRODUCCIÓN

En este capítulo se presenta la metodología para llevar a cabo el trabajo de graduación. Detallando las etapas para obtener la tasa de erosión en los taludes conformados por Tierra Blanca Joven (TBJ) en la zona oriente del AMSS; la base de la metodología presentada ha sido retomada de la investigación de la tesis denominada “DETERMINACIÓN DE LA TASA DE DETERIORO EN TALUDES CONSTITUIDOS POR MATERIALES PIROCLÁSTICOS EN EL ÁREA METROPOLITANA DE SAN SALVADOR (AMSS)” (Bautista et al., 2016).

Las técnicas de medición de erosión aplicadas en esta investigación, estarán en función de las condiciones que presente el área de estudio, además de la posibilidad de medir ciertas características en campo. Adicionalmente, se llevará a cabo una caracterización de los suelos presentes en los taludes, donde serán determinadas las propiedades físicas de cada estrato presente.

3.2 INFORMACIÓN BIBLIOGRÁFICA

En esta etapa se recopilará información bibliográfica y se realizarán consultas a expertos acerca de la geología, y geomorfología del área de estudio, con el objetivo de tener antecedentes de la geología y de su comportamiento ante proceso erosivos

3.3 ESTABLECIMIENTO DE LOS CRITERIOS QUE SE REQUIEREN ENCONTRAR EN LOS TALUDES QUE SERÁN LOS PUNTOS DE ESTUDIO PARA LLEVAR A CABO LA INVESTIGACIÓN

Los parámetros que se utilizarán para evaluar el deterioro en taludes constituidos por Tierra Blanca Joven (TBJ), deberán reflejar la situación que experimentan estos en el área de estudio. Estos se determinarán a partir de investigaciones previas, y observaciones de campo.

3.4 SELECCIÓN PRELIMINAR DE PUNTOS DE INVESTIGACIÓN

Se realizará una visita general en la zona de estudio con la finalidad de identificar lugares que reúnan las condiciones que se requieren investigar, tomando en cuenta condiciones geomorfológicas, geológicas, hidrológicas (tipo de erosión presente), así como de los factores antrópicos que presenten.

De los puntos preliminares identificados, se seleccionarán aquellos que posean la mayor cantidad de criterios establecidos en el apartado No 3 de esta metodología.

3.5 INVESTIGACIÓN Y SELECCIÓN DE TÉCNICAS DE CUANTIFICACIÓN DE PERDIDA DE SUELO

Se realizará una recopilación de algunos métodos que se han implementado en diferentes países de la región centroamericana, en los cuales las condiciones en campo son similares a las que presenta la zona de estudio.

Posteriormente, se seleccionarán las técnicas a aplicar, tomando en cuenta las ventajas y desventajas que presentan cada una de ellas, la adaptación que puedan tener, el tipo de erosión que evalúan, y las características que cada punto de estudio posea (topografía, cobertura vegetal, etc.).

3.6 DESCRIPCIÓN DE LAS CONDICIONES INICIALES DE LOS TALUDES SELECCIONADOS

Para cada talud seleccionado, se tomará registro de las condiciones iniciales en campo antes de la instalación del equipo. Estos registros se pueden obtener con la inspección visual y la medición de algunas características, entre las que se pueden mencionar:

Dimensiones iniciales: altura, pendiente, longitud.

Estratos: número de estratos identificados, espesor, textura que posee cada uno, (cada estrato se referencia a partir de la corona de cada talud) observando cada detalle y características que lo definen.

Además, se identificarán los factores antrópicos que pueden tener alguna influencia en su comportamiento ante factores erosivos. A continuación, se mostrarán los distintos ítems que se tomaron en cuenta para el registro de datos:

- **GENERALIDADES**

En este apartado se tendrá que adjudicar una identificación a cada talud y registrar la fecha en que se van a tomar los datos (ver Tabla No. 3.6.1).

GENERALIDADES	
Talud:	Fecha:
Responsable:	

Tabla No. 3.6.1 Datos generales del talud

- **LOCALIZACIÓN**

Se tomará el registro de la ubicación exacta del talud, así como de las coordenadas geográficas del lugar auxiliándose de un GPS. También, es importante dejar registrada la distancia que hay entre el talud y el centro de emisión de donde provienen los materiales por los que esta constituidos (auxiliándose de Google Earth) (ver Tabla No. 3.6.2)

LOCALIZACIÓN			
Ubicación:			
Coordenadas:	X=	(Longitud)	Y= (Latitud)

Tabla No. 3.6.2 Localización del talud

- **CONDICIONES DEL ENTORNO Y ELEMENTOS ANTRÓPICOS**

Aquí se pretende dejar registradas las condiciones de origen natural que hay en la zona donde se encuentra ubicado el talud, por ejemplo la presencia de un río o quebrada; así como también, los elementos antrópicos que se encuentran sobre o en las cercanías del mismo y que afectan su estabilidad, influyendo en su comportamiento y por supuesto, contribuyendo al deterioro que podrían experimentar (ver Tabla No. 3.6.3).

CONDICIONES DEL ENTORNO Y ELEMENTOS ANTRÓPICOS		
Existencia de ríos o quebradas:	Si	No
Nombre del río o quebrada		
Existencia de obras de protección	Si	No
Existencia de cárcavas	Si	No
Presencia de casas	Si	No
Presencia de zanjas	Si	No
Presencia de postes	Si	No
Presencia de otras estructuras	Si	No
Descripción:		

Tabla No. 3.6.3 Condiciones del entorno y elementos antrópicos del talud seleccionado

- **ESCARPE**

En este apartado se colocará la altura aproximada del talud, y la pendiente del mismo (ver Tabla No. 3.6.4). Esta actividad podrá ser ejecutada mediante la utilización de una cinta métrica.

ESCARPE	
Altura :	
Pendiente:	

Tabla No. 3.6.4 Altura y pendiente del talud

- **DIMENSIONES ESTIMADAS**

Aquí se dejará un registro del ancho y del alto del talud de la zona a estudiar (ver Tabla No. 3.6.5). Esta actividad se llevará a cabo utilizando una cinta métrica, cuya longitud sea la suficiente para cubrir las dimensiones que cada talud presente.

DIMENSIONES ESTIMADAS DEL SECTOR DEL TALUD EN ESTUDIO	
Longitud en la dirección X:	
Longitud en la dirección Y:	

Tabla No. 3.6.5 Dimensiones estimadas del talud

- **CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DE LA PARTE SUPERIOR DEL TALUD**

Se debe tomar nota de las características físicas observables en el talud, las cuales podrían influir a acelerar o a minimizar el deterioro que este pueda experimentar a lo largo del periodo de estudio (ver Tabla No. 3.6.6).

CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DE LA PARTE SUPERIOR DEL TALUD				
Existencia de grietas		Si	No	
Presencia de cobertura vegetal		Si	No	
Ubicación de la cobertura vegetal:				
Tipo de cobertura vegetal	Pasto ()	Matorral ()	Arbustivo()	Cultivo ()
Afloramiento de aguas		Si	No	
Pendiente de la parte superior del talud (corona):				
Plano ligeramente inclinado (0-2%)		Ondulado Suave (3-4%)		
Ondulado (5-12%)	Alomado (13-25%)		Quebrado (26-35%)	
Accidentado (36-70%)		Muy accidentado (>70%)		

Tabla No. 3.6.6 Características físicas del talud

- **MATERIALES EXISTENTES**

Auxiliándose de la bibliografía consultada sobre el tipo de materiales que se buscan para el presente estudio, se podrá realizar una caracterización preliminar, destacando el número de estratos que se pueden identificar (ver Tabla No. 3.6.7).

SUELOS EXISTENTES	
Tipo de suelo presente:	
Numero de estratos visualmente identificables:	

Tabla No. 3.6.7 Suelos existentes en el talud

- **CARACTERÍSTICAS DE LOS ESTRATOS**

Basándose en la información consultada sobre la estratigrafía del tipo de suelo presente en el área de estudio, se llevará a cabo una inspección visual para caracterizar preliminarmente cada estrato, se le colocará nombre, espesor y tamaño aproximado de los granos presentes (Ver Tabla No. 3.6.8).

CARACTERÍSTICAS DE LOS ESTRATOS			
Nombre	Altura promedio	Color	Tamaño del grano

Tabla No. 3.6.8 Características de los estratos que posee el talud

- **OTROS**

Aquí se deben registrar otras observaciones que pudieren existir en los alrededores del talud mismo, los cuales no aparecen en los ítems antes mencionados. Se deben escribir todas las notas, observaciones y aclaraciones que la persona responsable de recolectar esta información considera relevante (ver Tabla No. 3.6.9)

OTROS		
Existe probabilidad de deslizamientos	Si	No
OBSERVACIONES:		

Tabla No. 3.6.9 Otras características iniciales que presente el talud

- **ESQUEMAS Y REGISTROS TOPOGRÁFICOS**

Se tomarán fotografías del talud y se hará un esquema, referenciando la información más importante: altura, espesor de estratos, longitud del tramo a estudiar, y otras características particulares como la distancia existente entre la corona y algún otro elemento que pueda servir como referencia para facilitar su posterior ubicación.

Todos los ítems anteriormente descritos, se resumen en la siguiente ficha de recolección de información en campo (ver Tabla No. 3.6.10).

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL DEPARTAMENTO DE GEOTECNIA			
FICHA DE RECOLECCIÓN DE INFORMACIÓN DE ESTADO INICIAL DE TALUDES TRABAJO DE GRADUACIÓN: OBTENCIÓN DE LA TASA DE EROSIÓN EN TALUDES CONFORMADOS POR TIERRA BLANCA JOVEN (TBJ) EN LA ZONA ORIENTE DEL ÁREA METROPOLITANA DE SAN SALVADOR (AMSS)			
GENERALIDADES			
Nombre del talud:			Fecha:
Responsable:			
LOCALIZACIÓN			
Ubicación:			
Coordenadas:	X=	(Longitud)	Y= (Latitud)
Distancia al centro de emisión:			
CONDICIONES DEL ENTORNO Y ELEMENTOS ANTRÓPICOS			
Existencia de ríos o quebradas:	Si	No	
Nombre del río o quebrada			
Existencia de obras de protección	Si	No	
Existencia de cárcavas	Si	No	
Presencia de casas	Si	No	
Presencia de zanjas	Si	No	
Presencia de postes	Si	No	
Presencia de otras estructuras	Si	No	
Descripción:			
ESCARPE			
Altura :			
Pendiente:			
Longitud en la dirección X:			
Longitud en la dirección Y:			
CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DEL TALUD			
Existencia de grietas	Si	No	
Presencia de cobertura vegetal	Si	No	
Ubicación de la cobertura vegetal:			
Tipo de cobertura vegetal	Pasto ()	Matorral ()	Arbustivo () Cultivo ()
Afloramiento de aguas	Si	No	
Descripción de la pendiente del talud:			
Plano ligeramente inclinado (0-2%)		Ondulado suave (3-4%)	
Ondulado (5-12%)		Alomado (13-25%)	Quebrado (26-35%)
Accidentado (36-70%)		Muy accidentado (>70%)	
MATERIALES EXISTENTES			
Tipo de material presente:			
Número de estratos visualmente identificables:			
CARACTERÍSTICAS DE LOS ESTRATOS			
Nombre	Altura promedio	Color	Tamaño del grano
OTROS			
Existe probabilidad de deslizamientos	Si	No	
OBSERVACIONES:			

Tabla No. 3.6.10 Ficha de recolección de datos iniciales de cada talud seleccionado en el estudio.
Fuente: DEL AUTOR, 2017.

3.7 DESCRIPCIÓN DE LA APLICACIÓN DE LAS METODOLOGÍAS DE EVALUACIÓN DE EROSIÓN A UTILIZAR

Para poder aplicar la técnica de monitoreo seleccionada, se buscará una sección del talud donde se pueda apreciar una mayor evidencia del deterioro que está experimentando. Este sector, será el lugar donde se instalará el equipo. Además, se dejará un registro fotográfico de los puntos en estudio y de sus alrededores, para poder evaluar las condiciones iniciales.

3.8 ESTUDIO DE LAS CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DE LOS MATERIALES PRESENTES EN LOS TALUDES

Para esta investigación, es indispensable contar con una metodología que permita identificar los diferentes estratos por los que están compuestos los taludes que son objeto de estudio.

Anteriormente, han sido aplicadas dos metodologías para identificar los estratos de TBJ, las cuales han sido retomadas de las que describe el ingeniero Oscar Ayala Valdez, en el trabajo de graduación **“APLICACIÓN DE LOS MODELOS CONSTITUTIVOS PARA REPRESENTAR EL COMPORTAMIENTO DE TIERRA BLANCA JOVEN (TBJ), UNIDAD G”** en el año 2013. Las metodologías se describen a continuación:

Metodología No. 1: Consiste en el empleo de un perfil estratigráfico de TBJ, obtenido de la investigación realizada por Hernández (modificado, 2008; ver Figura No. 2.2.4). Con este perfil se procederá a realizar la identificación en campo de las unidades de TBJ, de la manera siguiente:

- **Identificación de la unidad E**
En primer lugar, debe identificarse el estrato de unidad E de TBJ (este juega un papel muy importante como capa guía en la identificación del resto de unidades de la Tierra Blanca Joven), que presenta las características:
 - ❖ Color café claro cuando esta seca y café oscuro cuando está húmeda.
 - ❖ Alternancia de niveles de depósitos de caída secos, de granulometría gruesa suelta (grava y arena gruesa hasta fina) y depósitos de caída húmedos; de granulometría fina consolidada. La unidad E se presenta en la Figura No. 3.8.1.



Figura No. 3.8.1 Unidad E, referencia para determinar los demás estratos de la TBJ.

Fuente: DEL AUTOR, fotografía tomada el 3/02/17

- **Identificación de la unidad D**

Posteriormente, se identifica la unidad D, la cual podrá encontrarse por debajo de la unidad E, según bibliografía (perfil estratigráfico, Figura No. 2.2.4). Esta unidad presenta las siguientes características:

- ❖ Posee una textura deleznable
- ❖ Granulometría con tamaños dominantes de partículas finas, fragmentos de lúticos angulares y pómez en forma dispersa
- ❖ Abundante presencia de lapilli acrecional, conformando coignimbritas (poco consolidadas) compuestas por cenizas finas y polvo volcánico, de color beige o grisácea al encontrarse húmeda (Imagen de unidad D, en Figura No. 3.8.2)

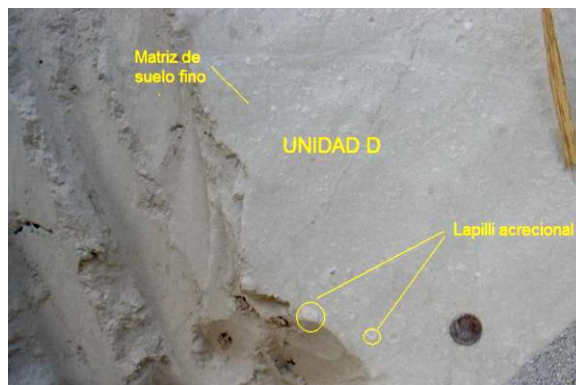


Figura No. 3.8.2 Unidad D de la TBJ

Fuente: Ayala O., "aplicación de los modelos constitutivos para representar el comportamiento de la Tierra Blanca Joven (TBJ), unidades G". Tesis, Universidad de El Salvador, (2013).

- **Identificación de la unidad F**

Esta podrá encontrarse por encima de la unidad E (ver Figura No. 2.2.4) presenta las siguientes características:

- ❖ Se encuentra constituida de múltiples depósitos de flujos piroclásticos, masivos, isotrópicos, de coloración blanca, los cuales se conforman por una matriz de arena limosa y grava, que engloba grandes fragmentos de pómez y líticos dispersos en toda la matriz (ignimbritas).
- ❖ Tamaño de líticos y pómez hasta de 15 cm de diámetro. (Imagen de unidad F, en Figura No 3.8.3)

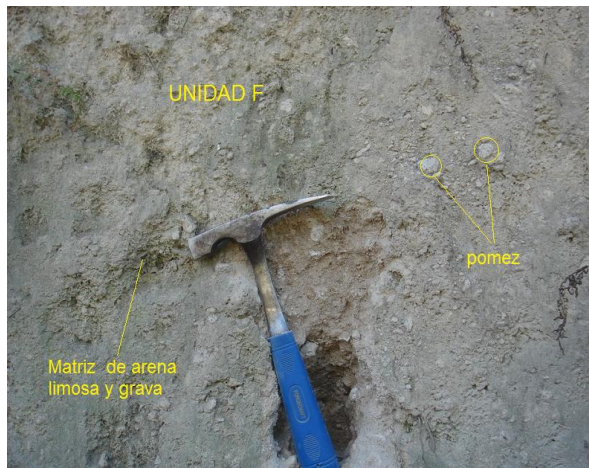


Figura No. 3.8.3 Unidad F de la TBJ
Fuente: Ayala O., "aplicación de los modelos constitutivos para representar el comportamiento de la Tierra Blanca Joven (TBJ), unidades G". Tesis, Universidad de El Salvador, (2013).

- **Identificación de la unidad G**

Se podrá encontrar por encima de la unidad F, según bibliografía (perfil estratigráfico, Figura No. 2.2.4). Esta unidad está formada por una secuencia compuesta por depósitos piroclásticos de caída (coignimbritas), flujos piroclásticos de textura fina (ignimbritas) y oleadas piroclásticas (surge). A continuación, se describen las características de cada una de ellos:

- ❖ Coignimbritas, se caracterizan por poseer materiales poco consolidados, de consistencia suave parecida al talco, producto de la caída por gravedad del material fino (ceniza volcánica) de la nube acompañante, con moderada presencia de lapilli acrecional.

- ❖ Ignimbritas, se caracterizan por tener una matriz de suelo fino (ceniza volcánica) consolidada, con presencia de líticos angulares y abundante pómez vesicular.
- ❖ Surges, se caracterizan por poseer un estrato delgado con alto grado de consolidación de color café claro. Imagen de unidad G en Figura No 3.8.4



Figura No. 3.8.4 Unidad G de la TBJ, depósito de caída

Fuente: Ayala O., "aplicación de los modelos constitutivos para representar el comportamiento de la Tierra Blanca Joven (TBJ), unidades G". Tesis, Universidad de El Salvador, (2013).

Con las características anteriores podrá identificarse el estrato de la unidad G, pero como es de notarse, no es suficiente identificar únicamente el tipo de unidad, sino que también es necesario definir el sistema de deposición. En el caso de esta investigación, deberán identificarse los depósitos de caída, una manera conveniente de hacerlo, es comparar el grado de consolidación o dureza de un estrato con respecto a otros, esto puede realizarse, utilizando un martillo de geólogo, con el cual se cortará el suelo, para observar el grado de consolidación. Generalmente, el depósito de caída posee una consolidación menor que los flujos y oleadas piroclásticas. Por lo que, si la consolidación se percibe muy blanda, podría tratarse de un estrato de unidad G de caída, pero si la consolidación se percibe muy dura, podría tratarse de un estrato de flujos u oleadas piroclásticas. Otra marcada diferencia para distinguir o identificar si se trata de un estrato de unidad G de caída, es verificar la presencia de abundante lapilli acrecional dentro del estrato, también, se puede observar las características físicas mencionadas para cada sistema de deposición y compararlas. La presencia de líticos podría indicar que se trata de un depósito de flujos piroclásticos.

Metodología No. 2: Consiste en aplicar la **Metodología No 1** y también, realizar ensayos de granulometría a los diferentes estratos del talud, para obtener sus respectivas curvas granulométricas. De esta manera, se procederá a comparar las curvas obtenidas en esta investigación, con las curvas granulométricas obtenidas de la investigación realizada por Hernández (2004) y también, contra las curvas presentadas por Bautista et al., (2016), a la TBJ.

3.8.1 OBTENCIÓN DE MUESTRAS

El muestreo se realizará con la finalidad de estudiar las características de los suelos presentes en la zona de estudio. Para esto, se evaluarán las diferentes unidades que conforman los taludes, realizando ensayos de laboratorio de muestras alteradas como inalteradas (dependiendo de la característica a estudiar) y de esta manera obtener las propiedades físicas.

El procedimiento para realizar la extracción de muestras se describe a continuación:

- **MUESTRAS INALTERADAS**

Este tipo de muestra debe conservar las condiciones que el suelo poseía in situ. Por lo cual, la obtención de esta debe seguir el siguiente procedimiento:

- ❖ Identificar cada estrato presente en el talud, utilizando la metodología descrita anteriormente.
- ❖ Se descubre la capa de material a la que, se pretende tomar la muestra.
- ❖ Se trata de alisar la superficie.
- ❖ Se excava una pequeña zanja alrededor de la marca, dejando entre el borde de la muestra y el borde interno de la zanja unos 10cm, de manera que esta pequeña excavación no afecte la muestra. La zanja deberá ser suficientemente ancha para permitir las operaciones de tallado, parafinado in situ y corte.
- ❖ Con las herramientas adecuadas, se le dará una forma aproximadamente cubica y se tallará hasta que tenga el tamaño final que se requiere, cuidando la muestra a medida que el proceso de tallado se acerque a la cara superior y a las cuatro caras laterales (ver Figura No. 3.8.5).
- ❖ Una vez que la zanja está suficientemente profunda y las caras de la muestra estén perfiladas, se procederá a extraer la muestra utilizando cuchillos, paletas

o sierras, y se retira cuidadosamente. Si la muestra tiene una buena consistencia, se tallará la cara inferior antes de proceder a parafinarla.

- ❖ Utilizando una brocha, se aplicará la parafina: una primera capa y se cubre con una venda. El proceso se repetirá hasta obtener un recubrimiento impermeable de 3 mm de espesor como mínimo.
- ❖ Si la muestra no tiene suficiente consistencia, antes de proceder a la extracción, una vez tallada la cara superior y las cuatro caras laterales, estas deben parafinarse como se describió en el párrafo anterior.
- ❖ Luego se confina la muestra con una caja y se procede a la extracción.
- ❖ La ultima cara (inferior), se parafina inmediatamente después de la extracción.
- ❖ Se debe colocar a la muestra una etiqueta con la siguiente información: procedencia, especificando con marcas las caras superior e inferior, y ubicación dentro; se cierra la caja y se coloca exteriormente otra etiqueta con los mismos datos, indicando adicionalmente advertencias de las precauciones requeridas para el transporte de la misma.
- ❖ Registrar la altura del estrato a donde se extrajo la muestra y tomar fotografías para tener referencia visual.
- ❖ La altura a la que se extrajo la muestra se registrará a partir del pie del talud hasta el lugar de la extracción, y si fuese posible, desde la corona del talud hacia la misma.



Figura No. 3.8.5 Extracción de muestra inalterada
Fuente: DEL AUTOR, fotografía tomada el 11/07/17

- **MUESTRAS ALTERADAS**

Las muestras alteradas se extraen con la finalidad de ser utilizadas para identificación y caracterización del material que se está investigando. Para llevar a cabo la extracción de muestras alteradas se seguirá el siguiente procedimiento:

- ❖ Identificar cada estrato presente en el talud, utilizando la metodología descrita al inicio de esta sección.
- ❖ Extraer muestras alteradas de cada estrato que se haya identificado
- ❖ Recolectar la cantidad suficiente de material de cada estrato según lo que indican los métodos para la realización de los ensayos de laboratorio que se pretenden realizar.
- ❖ Registrar la altura del estrato a donde se extrajo la muestra y tomar la respectiva fotografía como referencia visual.
- ❖ Identificar cada muestra colocando en la bolsa el nombre del talud y nombre del estrato al que pertenece el suelo extraído.
- ❖ Introducir en una segunda bolsa si es necesario la muestra, debido a que se necesita conservar las condiciones que posee In Situ cada estrato.

3.8.2 RESULTADOS DE LABORATORIO

Se realizarán ensayos de laboratorio, que permitan caracterizar los estratos presentes en los taludes en estudio (peso volumétrico, granulometría, gravedad específica, límites de Atterberg, entre otros).

3.8.3 COMPARACIÓN DE RESULTADOS GRANULOMÉTRICOS CON OTRAS INVESTIGACIONES

En este apartado se compararán las curvas granulométricas obtenidas de los ensayos de laboratorio en esta investigación, contra, las curvas granulométricas presentadas por Hernández, (2004). (Ver curvas granulométricas en la Figura No. 3.8.6 y los porcentajes que pasan en la Tabla No. 3.8.1), para las unidades C, D, E, F y G (zona proximal e intermedia); y también, contra las curvas presentadas por Bautista et al., (2016), para las unidades D, Ignimbrita α superior e inferior, E, F y G (ver curvas granulométricas en la Figura No. 3.8.7 y los porcentajes que pasan en la Tabla No. 3.8.2)

Las curvas que se aproximen más a los porcentajes que pasan de una determinada unidad, será identificada como esa unidad.

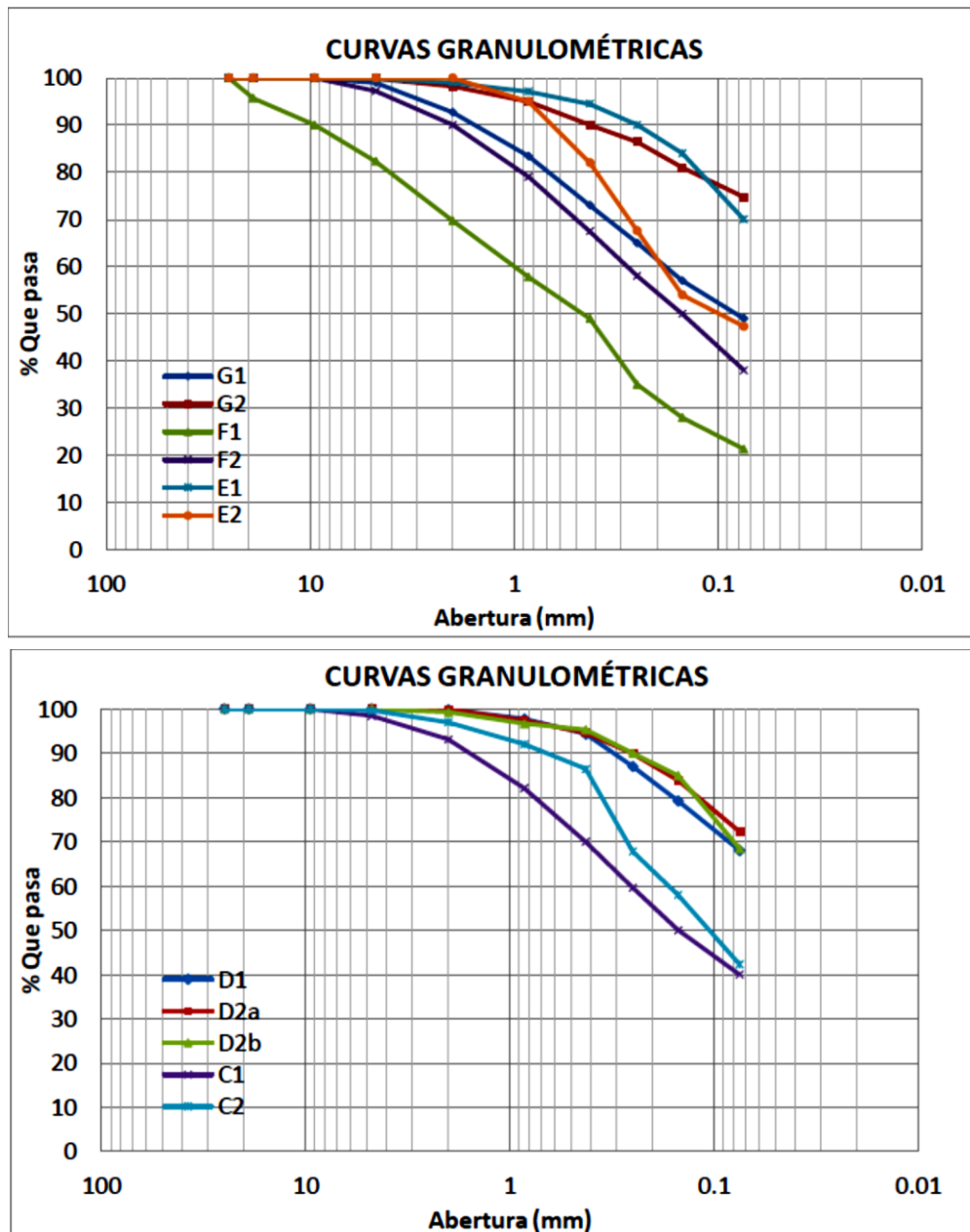


Figura No. 3.8.6 Curvas granulométricas de la TBJ, Hernández (2004)

Fuente: Ayala O., "aplicación de los modelos constitutivos para representar el comportamiento de la Tierra Blanca Joven (TBJ), unidades G". Tesis, Universidad de El Salvador, (2013).

UNIDAD		G1	G2	F1	F2	E1	E2
No malla	Abertura (mm)						
1"	25.000	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
3/4"	19.000	100.0	100.0	95.7	100.0	100.0	100.0
3/8"	9.500	100.0	100.0	90.0	100.0	100.0	100.0
No 4	4.750	99.0	99.8	82.3	97.2	99.8	100.0
No 10	2.000	92.7	98.2	69.7	90.0	99.0	100.0
No 20	0.850	83.4	95.0	57.8	79.0	97.1	95.0
No 40	0.425	73.0	90.0	49.0	67.5	94.5	82.0
No 60	0.250	65.0	86.4	35.0	58.0	90.0	67.6
No 100	0.150	57.0	81.0	28.0	50.0	84.0	54.0
No 200	0.075	49.0	74.7	21.3	38.0	70.0	47.3

UNIDAD		D1	D2a	D2b	C1	C2
No malla	Abertura (mm)					
1"	25.000	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
3/4"	19.000	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
3/8"	9.500	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
No 4	4.750	100.0	100.0	100.0	98.4	99.6
No 10	2.000	99.8	99.9	99.2	93.1	97.0
No 20	0.850	97.7	97.4	96.6	82.1	92.0
No 40	0.425	94.3	94.6	95.3	70.0	86.4
No 60	0.250	87.0	89.8	90.0	59.6	67.8
No 100	0.150	79.2	83.9	85.0	50.0	58.0
No 200	0.075	68.0	72.3	68.4	40.0	42.3

Tabla No. 3.8.1 Resultados granulométricos para las unidades de la TBJ, Hernández (2004)

Fuente: Ayala O., "aplicación de los modelos constitutivos para representar el comportamiento de la Tierra Blanca Joven (TBJ), unidades G". Tesis, Universidad de El Salvador, (2013).

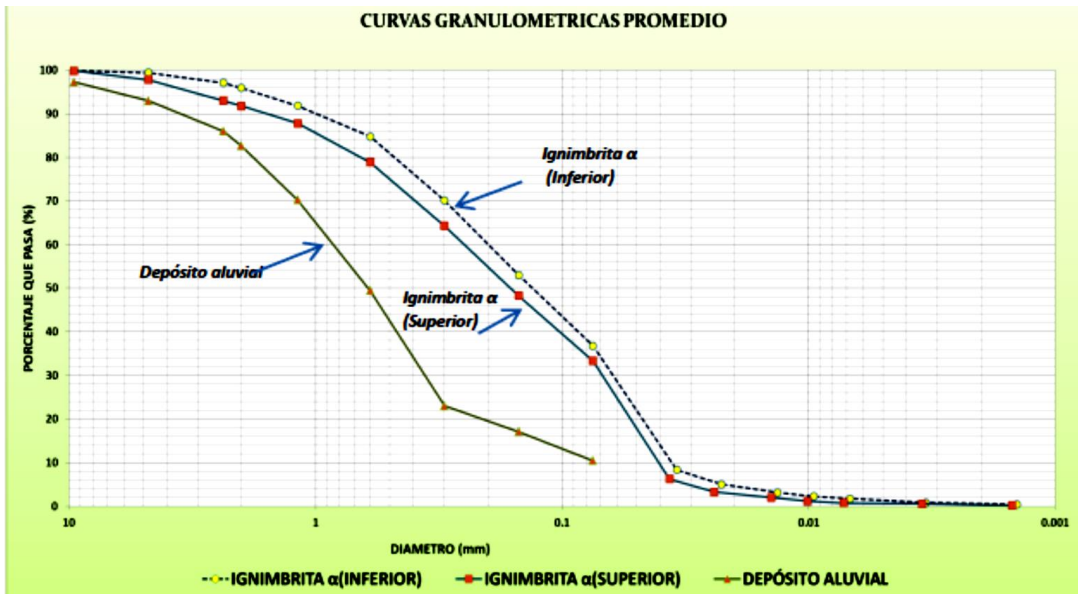
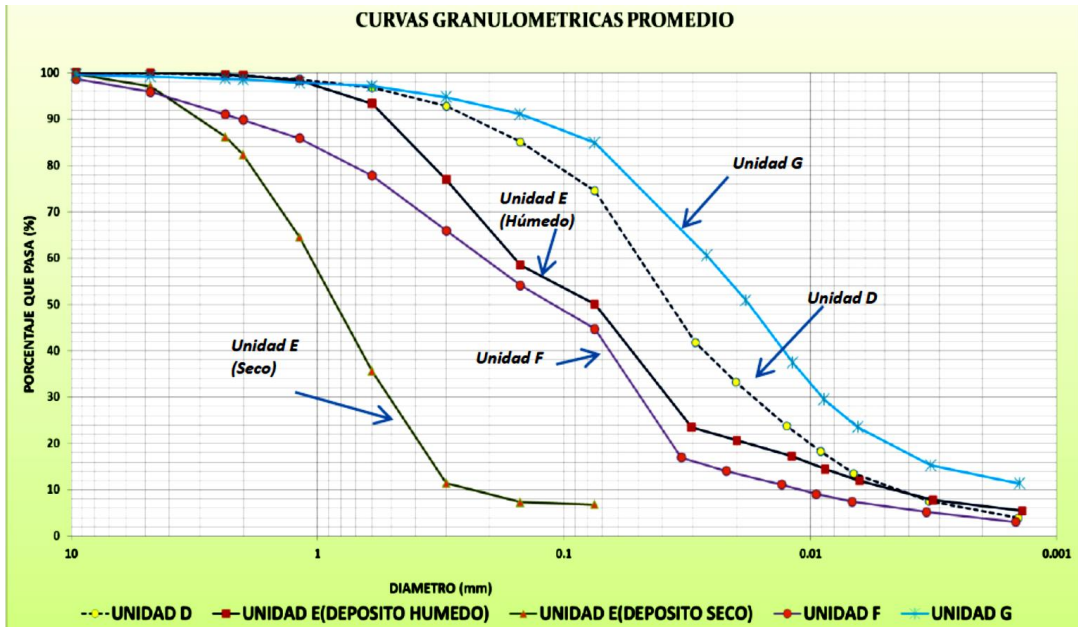


Figura No. 3.8.7 Curvas granulométricas de la TBJ
 Fuente: Bautista et al., (2016). "Determinación de la tasa de deterioro en taludes constituidos por materiales piroclásticos en el Área Metropolitana de San Salvador (AMSS)". Tesis, Universidad de El Salvador, (2016).

No malla	UNIDAD D		UNIDAD E INFERIOR (SECO)		UNIDAD E INFERIOR (HUMEDO)		UNIDAD F		UNIDAD G	
	tamaño promedio (mm)	% promedio que pasa	tamaño promedio (mm)	% promedio que pasa	tamaño promedio (mm)	% promedio que pasa	tamaño promedio (mm)	% promedio que pasa	tamaño promedio (mm)	% promedio que pasa
3/8"	9.5	100.00	9.5	99.69	9.5	100.00	9.5	98.65	9.5	99.57
No 4	4.75	99.91	4.75	97.08	4.75	99.96	4.75	95.88	4.75	99.2
No 8	2.36	99.60	2.36	86.15	2.36	99.60	2.36	90.98	2.36	98.69
No 10	2	99.42	2	82.31	2	99.39	2	89.85	2	98.54
No 16	1.18	98.56	1.18	64.56	1.18	98.30	1.18	85.85	1.18	97.87
No 30	0.6	96.80	0.6	35.52	0.6	93.33	0.6	77.84	0.6	97.14
No 50	0.3	92.88	0.3	11.44	0.3	77.01	0.3	65.97	0.3	94.76
No 100	0.15	85.24	0.15	7.36	0.15	58.52	0.15	54.19	0.15	91.07
No 200	0.075	74.76	0.075	6.79	0.075	50.07	0.075	44.70	0.075	84.91
HIDROMETRIA	0.029	41.79			0.030336	23.49	0.033368	16.97	0.026327	60.60
	0.020	33.27			0.019840	20.68	0.021871	14.06	0.018240	50.88
	0.012	23.80			0.011922	17.25	0.013082	11.15	0.011773	37.40
	0.009	18.27			0.008696	14.44	0.009452	9.11	0.008776	29.46
	0.007	13.53			0.006308	11.94	0.006774	7.46	0.006413	23.53
	0.003	7.57			0.003187	7.79	0.003384	5.24	0.003244	15.27
	0.001	3.93			0.001382	5.49	0.001468	3.09	0.001415	11.33

No malla	IGNIMBRITA α (inferior)		IGNIMBRITA α (superior)		DEPOSITO ALUVIAL	
	tamaño promedio (mm)	% promedio que pasa	tamaño promedio (mm)	% promedio que pasa	tamaño promedio (mm)	% promedio que pasa
3/8"	9.5	99.84	9.5	99.85	9.5	97.23
No 4	4.75	99.40	4.75	97.77	4.75	92.95
No 8	2.36	97.06	2.36	93.02	2.36	86.00
No 10	2	95.92	2	91.76	2	82.61
No 16	1.18	91.83	1.18	87.81	1.18	70.23
No 30	0.6	84.77	0.6	78.86	0.6	49.46
No 50	0.3	70.12	0.3	64.24	0.3	23.01
No 100	0.15	53.02	0.15	48.26	0.15	17.06
No 200	0.075	36.79	0.075	33.30	0.075	10.45
HIDROMETRIA	0.034	8.30	0.037	6.21		
	0.023	5.01	0.024	3.26		
	0.013	3.13	0.014	1.99		
	0.010	2.27	0.010	1.14		
	0.007	1.72	0.007	0.72		
	0.003	0.78	0.003	0.55		
	0.001	0.47	0.001	0.17		

Tabla No. 3.8.2 Resultados granulométricos para las unidades de la TBJ, Bautista et al, 2016
Fuente: Bautista et al., (2016). "Determinación de la tasa de deterioro en taludes constituidos por materiales piroclásticos en el Área Metropolitana de San Salvador (AMSS)". Tesis, Universidad de El Salvador, (2016).

CAPÍTULO No.4
APLICACIÓN DE LA
METODOLOGÍA

4.1 INTRODUCCIÓN

En el presente capítulo se detalla la aplicación de la metodología de la investigación, para llevar a cabo este trabajo de graduación. En cada sección se irá describiendo el proceso ejecutado para obtener la tasa de erosión de los taludes seleccionados.

La información bibliográfica fue la base para comprender los problemas erosivos que afectan la zona de estudio, y para conocer, los factores que aceleran la erosión de los suelos; esta información sirvió para establecer los criterios que deben de poseer los taludes que serán objeto de estudio.

Para cuantificar los cambios generados en los taludes durante el periodo en estudio, se aplicarán técnicas de cuantificación de erosión.

Por otra parte, se realizaron pruebas de laboratorio que permitieron identificar los depósitos que constituyen los taludes. Dentro de estas, se realizaron ensayos granulométricos, cuyos resultados se compararon con curvas granulométricas obtenidas por otros investigadores, lo que permitió tener un parámetro para identificar con un mejor criterio las unidades de TBJ que constituían cada uno de los taludes en estudio.

Una vez que se obtuvo de cada talud seleccionado: las condiciones iniciales, los ensayos de laboratorio de las unidades, los datos de monitoreo de las técnicas de cuantificación de erosión ejecutadas durante el periodo de estudio, y las lluvias registradas durante este mismo tiempo; se tuvo la información necesaria para obtener la tasa de erosión.

Lo descrito anteriormente se detalla a continuación:

4.2 INFORMACIÓN BIBLIOGRÁFICA

En la investigación bibliográfica llevada a cabo en este trabajo de graduación, se han presentado los aspectos más importantes relacionados con la pérdida de suelo que experimenta la Tierra Blanca Joven (TBJ); en un inicio, se determinó el origen de este material piroclástico, además, se realizó una descripción física de las características que posee, y de acuerdo con los antecedentes, se pudo establecer que este tipo de suelo tiene un alto nivel de erosibilidad, que ocasiona (debido a diversos factores), problemas de erosión en el AMSS.

En cuanto a la erosión hídrica, se ha llevado a cabo una investigación de los tipos de erosión que tienen incidencia en los desprendimientos de tierra y en los cambios geomorfológicos que se presentan en la zona en estudio; de igual manera, se describen diversos factores que en alguna medida controlan la magnitud de los procesos erosivos. Tomando en cuenta, que el principal objetivo de este trabajo es encontrar la pérdida de suelo con respecto a un periodo de tiempo específico (tasa de erosión), se han incluido algunos métodos para la medición de esta, que puedan emplearse bajo las condiciones presentes en el área; y de esta manera obtener la pérdida de material, que ayudará a instituciones gubernamentales en la planificación de obras de mitigación capaces de frenar (en cierta medida) la problemática que vive la zona de estudio actualmente. En la Tabla No 4.2.1 se describe de forma resumida los resultados de la investigación bibliográfica realizada.

TEMÁTICA	DESCRIPCIÓN
Origen de la Tierra Blanca Joven (TBJ)	La Tierra Blanca Joven es el material presente en la zona de estudio, morfológicamente se encuentra dentro de la formación San Salvador, y geológicamente es el producto de la última erupción pliniana de la Caldera de Ilopango en el año 536 D.C.
Estratigrafía de La Tierra Blanca Joven	La Tierra Blanca Joven está compuesta por diversos depósitos de caída y flujos piroclásticos, en la investigación de Hernández W. 2004, los estratos que conforman la TBJ fueron nombrados como se indica a continuación: A, B, C, D, Ignimbrita Alfa, E, Ignimbrita Beta, F, y G; esta es la estratigrafía con la que se trabaja al estudiar este tipo de suelo.
Factores que aceleran los procesos erosivos en la TBJ	<p>Los factores internos y externos que inciden en la erosión de la zona de estudio son mencionados a continuación:</p> <p>Factores internos: la vegetación, la geología, y la topografía</p> <p>Factores externos: el clima, la tectónica, las actividades antrópicas y el nivel base de la quebrada.</p> <p>La TBJ está clasificada geotécnicamente como arena limosa y limos arenosos, sus partículas presentan poca cohesividad comparada con un suelo arcilloso, y presentan un menor peso en comparación a un suelo de grano grueso; tal situación expone a este material a la erosión sin tener fuerzas de oposición alguna.</p>
Tipos de erosión que inciden en la TBJ	La TBJ presenta una baja resistencia a las fuerzas erosivas de la dinámica del agua superficial o subsuperficial; esta situación deja a este material muy susceptible a la denominada erosión hídrica que puede presentarse de varias maneras, como por ejemplo: la erosión por el impacto de las gotas de lluvias, la erosión por surcos, la erosión laminar, la erosión vertical y la erosión horizontal en los cauces de los ríos; el avance de estos tipos de erosión puede provocar el inicio de procesos erosivos de mayor magnitud como la erosión por cárcava.
Antecedentes sobre la problemática que han ocasionado los procesos erosivos en la zona de estudio	De acuerdo a los antecedentes de la zona de estudio (en donde existe presencia de la TBJ) han ocurrido problemas a consecuencia de los procesos erosivos; entre los de mayor magnitud se pueden mencionar: la erosión retrograda en la Zona Franca de San Bartolo en el año 2010 y la generación de una cárcava de grandes dimensiones en el Aeropuerto de Ilopango en el año 2011, sin dejar de lado el desprendimiento continuo de volúmenes de tierra de los taludes que se encuentran en el área.

Tabla No. 4.2.1 Generalidades de la TBJ

Fuente: Realizado por el AUTOR, basado en el CAPÍTULO No.2 del presente trabajo de graduación.

4.3 ESTABLECIMIENTO DE LOS CRITERIOS QUE SE REQUIEREN ENCONTRAR EN LOS TALUDES QUE SERÁN LOS PUNTOS DE ESTUDIO PARA LLEVAR A CABO LA INVESTIGACIÓN

La pérdida de suelo en la TBJ desde un punto de vista cuantitativo no tiene un comportamiento igual en todas las zonas; las variables erosivas en el sistema actúan con una mayor magnitud en los lugares más vulnerables. Por lo cual, para obtener resultados representativos de la zona de estudio se deben considerar los lugares que sean más susceptibles, encontrarlos, dependerá de ciertos criterios que para el autor de este trabajo de investigación y con ayuda de los asesores, son los que influyen de forma directa en la intensidad de la pérdida de suelo. Además, se debe tener en cuenta algunas condiciones relacionadas con los requerimientos de las técnicas de erosión en campo, estas condiciones influirán en la selección de los puntos de estudio, ya que, serán parte de los criterios. Los taludes que reúnan la mayor cantidad de criterios que aquí se presentan, tendrán una mayor posibilidad de ser analizados.

4.3.1 CRITERIOS ESTABLECIDOS

- Debe de estar conformado por depósitos de Tierra Blanca Joven (TBJ).
- Debe de estar sometido al impacto directo de la corriente de agua del río que pasa por el pie del talud, de preferencia en los cambios de dirección de esta.
- Debe existir una o más obras civiles a una distancia próxima al talud, o también, alguna actividad antrópica que afecten sus condiciones naturales.
- Presencia de una capa vegetal en la cresta y en el cuerpo del talud que lo proteja de los procesos erosivos
- Debe presentar evidencia del deterioro por fenómenos erosivos
- Existencia de sobrecargas en el talud
- Influencia de vibraciones por los medios de transporte
- Debe poseer fácil acceso a la parte superior del talud para realizar los monitoreos respectivos
- Debe de estar ubicado en una zona relativamente segura, ante los problemas sociales que afronta el país
- Factibilidad para obtener el permiso, de colocar el equipo en el talud

4.4 SELECCIÓN PRELIMINAR DE PUNTOS DE INVESTIGACIÓN

La zona de estudio se encuentra ubicada en el municipio de Ilopango, es reconocida con el nombre de Quebrada El Arenal Seco; limita al Norte con la Carretera de Oro a la altura del Cementerio Los Cipreses, al Sur-Oriente con la Zona Franca de San Bartolo y al Poniente con el Aeropuerto de Ilopango.

Actualmente la zona experimenta la pérdida de grandes volúmenes de suelo, por lo que ha estado en evaluación por instituciones gubernamentales para determinar y entender su comportamiento

La geomorfología de la zona es muy activa, claro ejemplo de ello son los cambios de nivel del lecho del río, del curso de la corriente del agua, así como, de la evidente ampliación de la sección transversal de la quebrada; fenómeno que puede observarse al comparar las imágenes satelitales de las Figuras No. 4.4.1 y 4.4.2 de la zona de estudio, siendo la primera del año 2005 y la segunda del 2017, claramente se observa que el sector marcado con un círculo rojo tiene un curso de corriente diferente y que ha experimentado una evidente erosión retrograda hasta la fecha. En el sector marcado con círculo amarillo la corriente ha provocado una ampliación de la sección transversal de la quebrada, eliminando meandros y reflejando un nuevo curso de la corriente del agua.



Figura No. 4.4.1 Imagen satelital de la zona de estudio, año 2005
Fuente: EL AUTOR, apoyado en Google Earth

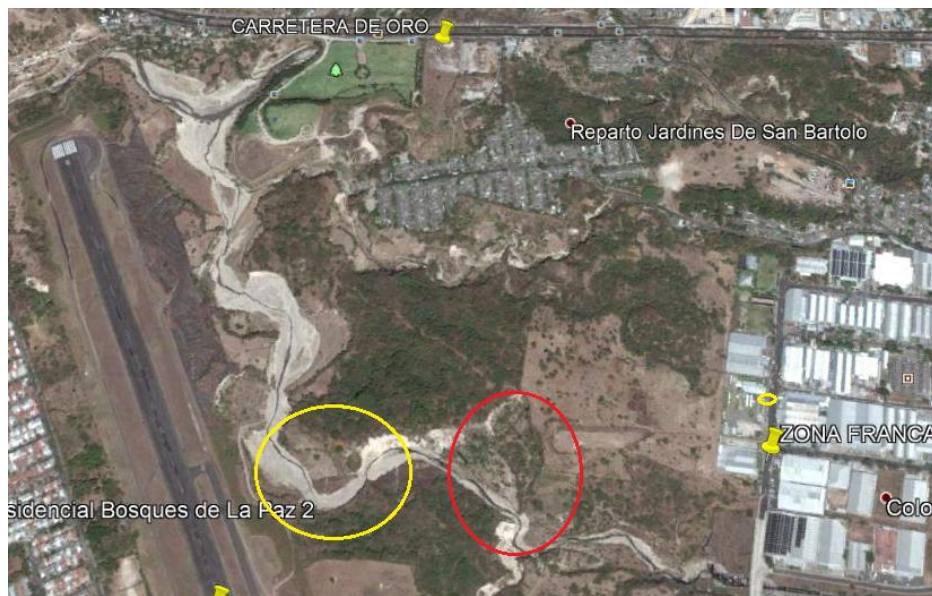


Figura No. 4.4.2 Imagen satelital de la zona de estudio, año 2017
Fuente: EL AUTOR, apoyado en Google Earth

Las causas de estos cambios son diversas; se puede comenzar mencionando que el curso de la corriente del agua en la quebrada El Arenal Seco es de Sur a Norte, ingresa por la Zona Franca de San Bartolo y termina su recorrido por el Cementerio Los Cipreses; ambos lugares poseen

obras civiles que restringen el curso natural del agua, provocando un desequilibrio en el perfil longitudinal de la quebrada; la reacción del sistema, será buscar una acción ponderada que la acerque lo más posible a su equilibrio natural, estas acciones pueden ser por ejemplo el aumento en la energía de la corriente del agua, que resulte en un mayor arrastre de las partículas que se encuentren en el camino; el problema se torna más agudo debido a la poca resistencia que presentan los tipos de suelos presente en el lugar (TBJ), las fallas locales, y también, por las actividades antrópicas que se realizan (explotación descontrolada de la arena del río).

Para conocer más sobre la situación de la zona en estudio, esta se debe de evaluar periódicamente; por lo que, se seleccionarán puntos que sean los más afectados por la erosión. Para ello se deberá realizar una visita preliminar a la zona y verificar las condiciones que presenta. Esta visita constará de un recorrido a lo largo de esta, observando todos los detalles relevantes, como las obras de paso existentes y de mitigación cercanas a los taludes; en estos últimos es necesario observar e identificar si están constituidos por TBJ; Así como de los parámetros, que se establecieron en la sección 4.3 de este capítulo.

Recorrido a la zona en estudio

En la visita preliminar realizada a la zona de estudio, se recorrió la quebrada de Norte a Sur (contraria a la corriente natural) seleccionando 10 puntos preliminares que presentaban los criterios establecidos en la sección 4.3 de este capítulo.

En las Tablas No. 4.4.1 hasta 4.4.10, se describen las características que presentaban los taludes seleccionados preliminarmente, y en base a estas, se seleccionarán de manera definitiva aquellos taludes que reúnan la mayor cantidad de criterios.

PUNTO No 1 TALUD CIPRESES



Figura No. 4.4.3 Talud ubicado frente a cementerio Los Cipreses
 Fuente: EL AUTOR, apoyado en Bautista et al, 2016. "Determinación de la tasa de deterioro en taludes constituidos por materiales piroclásticos en el Área Metropolitana de San Salvador (AMSS)". Tesis, Universidad de El Salvador, 2016

Ubicación: parque memorial los Cipreses, km 17 ½ Autopista Este-Oeste (carretera de oro)

Coordenadas: X (longitud)= 89° 7'16.60" Y(latitud)= 13°42'23.05"



Figura No. 4.4.4 Localización de Talud Cipreses

Fuente: EL AUTOR, apoyado en Google Earth

- Tipo de suelo: TBJ; Ignimbrita Alfa, Unidad D, y Depósito aluvial
- Corriente del agua: la dirección de la corriente del agua es paralela al cuerpo del talud como se puede observar en la Figura No. 4.4.3.
- Sobrecargas: no posee sobrecargas en la parte superior
- Factores antrópicos: frente a este punto existe una obra de protección realizada por el Cementerio Los Cipreses la cual consiste en muros gaviones para frenar la erosión generada en dicho talud.
- Vegetación: la cresta del talud se encuentra recubierta por una vegetación escasa tipo pasto
- Accesibilidad: cuenta con una zona de fácil acceso para realizar el monitoreo en la cresta.
- Permisos: se cuenta con el permiso de instalar el equipo
- Seguridad: el talud está ubicado en una zona de mínima seguridad
- Tipo de erosión: afectado por erosión lateral y vertical. Debido a los gaviones ubicados en el talud del Cementerio Los Cipreses, el curso natural del agua se ve desviado, lo que podría resultar en un aumento de los procesos erosivos en este.

Tabla No. 4.4.1 Información del Punto No. 1 Talud Cipreses

Fuente: EL AUTOR

PUNTO No 2 TALUD AEROPUERTO I



Figura No. 4.4.5 Talud ubicado frente a Aeropuerto de Ilopango
Fuente: EL AUTOR, fotografía tomada 3/02/2017

Ubicación: Zona Franca de San Salvador al costado Nor-Oriente del aeropuerto de Ilopango, San Salvador

Coordenadas: X (longitud)= 89° 7'14.89" Y(latitud)= 13°42'22.69"



Figura No. 4.4.6 Localización de Talud Aeropuerto I
Fuente: EL AUTOR, apoyado en Google Earth

- Tipo de suelo: presencia de TBJ; Unidad E, y Unidad D
- Corriente del agua: la dirección de la corriente del agua es de impacto directo al cuerpo del talud (según lo observado en campo y en la Figura No. 4.4.6 donde hay un cambio de dirección en el curso de la quebrada).
- Sobrecargas: no posee sobrecargas en la parte superior
- Factores antrópicos: es afectado por la extracción de material pétreo (arena) del fondo del lecho de la quebrada.
- Vegetación: la cresta del talud se encuentra recubierta por una vegetación escasa tipo pasto.
- Accesibilidad: posee una zona de fácil acceso para realizar el monitoreo en la cresta.
- Permisos: se cuenta con el permiso de instalar el equipo
- Seguridad: el talud está ubicado en una zona relativamente segura.
- Tipo de erosión: afectado por erosión lateral y vertical. La situación de la extracción de arena en este punto y el posible impacto directo de la corriente de agua en el talud hace a este punto, un lugar que podría brindar información importante del fenómeno erosivo que afecta la zona de estudio.

Tabla No. 4.4.2 Información del Punto No. 2 Talud Aeropuerto I
Fuente: EL AUTOR

PUNTO No 3 TALUD AEROPUERTO II



Figura No. 4.4.7 Talud ubicado frente a Aeropuerto de Ilopango
Fuente: DEL AUTOR, fotografía tomada 3/02/2017

Ubicación: Zona Franca de San Salvador al costado Nor-Oriente del aeropuerto de Ilopango, San Salvador

Coordenadas: X (longitud)= 89° 7'10.93" Y(latitud)= 13°42'11.36"



Figura No. 4.4.9 Localización de Talud Aeropuerto II

Fuente: EL AUTOR, apoyado en Google Earth

- Tipo de suelo: presencia de TBJ; Ignimbrita Alfa, Unidad E, Unidad F y depósito aluvial.
- Corriente del agua: la dirección de la corriente del agua es paralela al cuerpo del talud como se puede observar en la Figura No. 4.4.7.
- Sobrecargas: no posee sobrecargas en la parte superior
- Factores antrópicos: es afectado por las obras civiles realizadas para proteger el talud del Aeropuerto de Ilopango, de los procesos erosivos.
- Vegetación: la cresta del talud se encuentra recubierta por una vegetación escasa tipo pasto.
- Accesibilidad: se encuentra ubicado en una zona de fácil acceso
- Permisos: se cuenta con el permiso de instalar el equipo
- Seguridad: el talud está ubicado en una zona relativamente segura
- Tipo de erosión: afectado por erosión lateral y vertical. En esta zona la erosión ha causado cuantiosas pérdidas de suelo; según los antecedentes del lugar, el talud del Aeropuerto de Ilopango (ubicado al frente), año con año sufre problemas por los procesos erosivos; tal situación, ha obligado a la institución aérea a realizar obras de protección en el talud contiguo a la pista, para minimizar la pérdida de suelo causada por las crecidas de la quebrada en época de invierno.



Figura No. 4.4.8 Obra de protección artesanal para proteger el talud del Aeropuerto de Ilopango

Fuente: EL AUTOR, fotografía tomada 16/11/2017

En este año, el aeropuerto de Ilopango optó por hacer una obra de protección artesanal (barreras que consisten en la colocación de varas de bambú, y plástico) sobre el lecho de la quebrada (ver Figura No. 4.4.8, círculo amarillo), con la idea de frenar el impacto del agua en dicho talud.

Ante tal situación, se prevé una alteración en el curso natural de la corriente de la quebrada, que puede chocar directamente en este punto absorbiendo toda la energía de la corriente en una crecida. Es por ello, que se considera este talud, ya que, podría proporcionar información de relevancia sobre el fenómeno en estudio

Tabla No. 4.4.3 Información del Punto No. 3 Talud Aeropuerto II

Fuente: EL AUTOR

PUNTO No 4 TALUD AEROPUERTO III



Figura No. 4.4.10 Talud ubicado a un costado del Aeropuerto de Ilopango
Fuente: EL AUTOR, fotografía tomada 29/05/2017

Ubicación: Zona Franca de San Salvador al costado Nor-Oriente del aeropuerto de Ilopango, San Salvador

Coordenadas: X (longitud)= 89° 7'7.70" Y(latitud)= 13°42'8.06"



Figura No. 4.4.11 Localización de Talud Aeropuerto III
Fuente: EL AUTOR, apoyado en Google Earth

- Tipo de suelo: presencia de TBJ; Unidad E, Unidad F, y depósito aluvial.
- Corriente del agua: la dirección de la corriente del agua es paralela al cuerpo del talud como se puede observar en la Figura No. 4.4.10
- Sobrecargas: no posee sobrecargas en la parte superior del talud.
- Factores antrópicos: es afectado por las obras civiles realizadas para proteger el talud del Aeropuerto de Ilopango de los procesos erosivos.
- Vegetación: la cresta del talud se encuentra recubierta por una vegetación escasa tipo pasto
- Accesibilidad: no posee una zona de fácil acceso para realizar el monitoreo en la cresta.
- Permisos: se cuenta con el permiso de instalar el equipo
- Seguridad: el talud está ubicado en una zona relativamente segura
- Tipo de erosión: afectado por erosión lateral y vertical.

Tabla No. 4.4.4 Información del Punto No. 4 Talud Aeropuerto III
Fuente: EL AUTOR

PUNTO No 5 TALUD AEROPUERTO IV



Figura No. 4.4.12 Talud ubicado frente a Aeropuerto de Ilopango
Fuente: EL AUTOR, fotografía tomada 3/02/2017

Ubicación: Zona Franca de San Salvador al costado Nor-Oriente del aeropuerto de Ilopango, San Salvador

Coordenadas: X (longitud)= 89° 7'6.38" Y(latitud)= 13°42'9.85"



Figura No. 4.4.13 Localización de Talud Aeropuerto IV
Fuente: EL AUTOR, apoyado en Google Earth

- Tipo de suelo: presencia de TBJ; Unidad E, Unidad F, deposito aluvial.
- Corriente del agua: la dirección de la corriente del agua es paralela al cuerpo del talud como se puede observar en la Figura No. 4.4.13
- Sobrecargas: no posee sobrecargas en la parte superior del talud.
- Vegetación: la cresta del talud se encuentra recubierta por una vegetación escasa tipo pasto.
- Accesibilidad: no posee una zona de fácil acceso para realizar el monitoreo en la cresta.
- Permisos: se cuenta con el permiso de instalar el equipo de monitoreo.
- Seguridad: el talud está ubicado en una zona relativamente segura.
- Tipo de erosión: afectado por erosión lateral y vertical, se observa zona de fallamiento en el talud. Este punto es afectado por disminuir su sección transversal, aumentando la velocidad del flujo de agua y por ende el poder erosivo de esta (generación de flujo turbulento).

Tabla No. 4.4.5 Información del Punto No. 5 Talud Aeropuerto IV
Fuente: EL AUTOR

PUNTO No 6 TALUD AEROPUERTO V



Figura No. 4.4.14 Talud ubicado frente a Aeropuerto de Ilopango
Fuente: EL AUTOR, fotografía tomada 3/02/2017

Ubicación: Zona Franca de San Salvador al costado Nor-Oriente del aeropuerto de Ilopango, San Salvador

Coordenadas: X (longitud)= 89° 7'6.28" Y(latitud)= 13°42'11.78"



Figura No. 4.4.15 Localización de Talud Aeropuerto V
Fuente: EL AUTOR, apoyado en Google Earth

- Tipo de suelo: presencia de TBJ, sin identificación preliminar de los estratos de los que se encuentra constituidos
- Corriente del agua: la dirección de la corriente del agua es paralela al cuerpo del talud como se puede observar en la Figura No. 4.4.14
- Sobrecargas: no posee sobrecargas en la parte superior del talud.
- Vegetación: la cresta del talud se encuentra recubierta por una vegetación escasa tipo pasto.
- Accesibilidad: no posee una zona de fácil acceso para realizar el monitoreo en la cresta.
- Permisos: se cuenta con el permiso de instalar el equipo
- Seguridad: el talud está ubicado en una zona de poca seguridad
- Tipo de erosión: afectado por erosión lateral y vertical.

Tabla No. 4.4.6 Información del Punto No. 6 Talud Aeropuerto V
Fuente: EL AUTOR

PUNTO No 7 TALUD AEROPUERTO VI

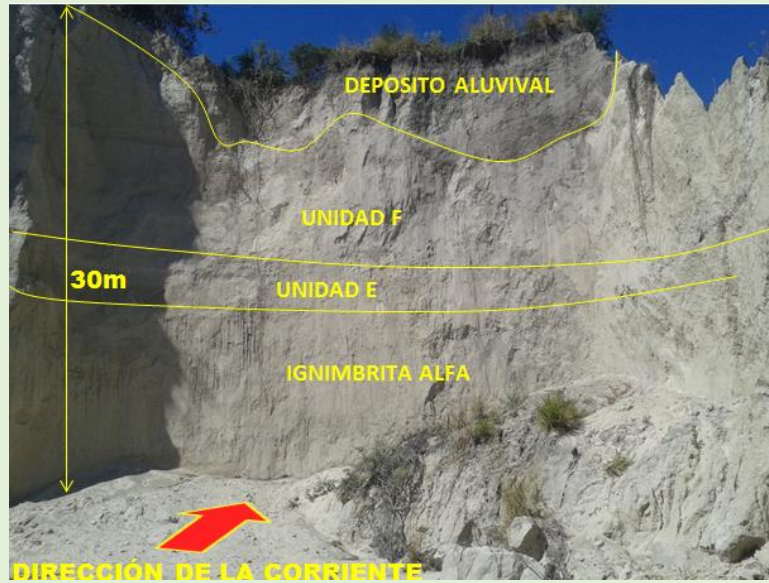


Figura No. 4.4.16 Talud ubicado en zona franca
Fuente: EL AUTOR, fotografía tomada 3/02/2017

Ubicación: Zona Franca de San Salvador al costado Sur-Oriente del aeropuerto de Ilopango, San Salvador

Coordenadas: X (longitud)= 89° 6'58.01" Y(latitud)= 13°42'7.68"



Figura No. 4.4.17 Localización de Talud Aeropuerto VI
Fuente: EL AUTOR, apoyado en Google Earth

- Tipo de suelo: presencia de TBJ; Ignimbrita Alfa, Unidad E, Unidad F y depósito aluvial.
- Corriente del agua: la dirección de la corriente del agua es de impacto directo al cuerpo del talud (según lo observado en campo y lo observado en la Figura No. 4.4.16 donde hay un cambio de dirección en el curso de la quebrada)
- Sobrecargas: no posee sobrecargas en la parte superior del talud.
- Vegetación: la cresta del talud se encuentra recubierta por una vegetación escasa tipo pasto.
- Accesibilidad: no posee una zona de fácil acceso para realizar el monitoreo en la cresta.
- Permisos: se cuenta con el permiso de instalar el equipo de monitoreo
- Seguridad: el talud está ubicado en una zona relativamente segura
- Tipo de erosión: erosión lateral y vertical. Este punto es afectado por el cambio de dirección de la quebrada produciendo un flujo turbulento en el sector.

Tabla No. 4.4.7 Información del Punto No. 7 Talud Aeropuerto VI
Fuente: EL AUTOR

PUNTO No 8 TALUD ZONA FRANCA I



Figura No. 4.4.18 Talud ubicado en Zona Franca de Ilopango
Fuente: EL AUTOR, fotografía tomada 3/02/2017

Ubicación: Zona Franca de San Salvador al costado Sur-Oriente del aeropuerto de Ilopango, San Salvador

Coordenadas: X (longitud)= 89° 6'57.05" Y(latitud)= 13°42'4.69"



Figura No. 4.4.19 Localización de Talud Zona Franca I
Fuente: EL AUTOR, apoyado en Google Earth

- Tipo de suelo: presencia de TBJ, sin identificación preliminar de los estratos de los que se encuentra constituidos
- Sobrecargas: no posee sobrecargas en la parte superior del talud.
- Vegetación: la cresta del talud se encuentra recubierta por una vegetación escasa tipo pasto
- Accesibilidad: no posee una zona de fácil acceso para realizar el monitoreo.
- Permisos: se cuenta con el permiso de instalar el equipo de monitoreo en la cresta.
- Seguridad el talud está ubicado en una zona de mínima seguridad
- Tipo de erosión: erosión lateral y vertical, además exista erosión retrograda, que se observa en las figuras No 4.4.18 y 4.4.19.

Tabla No. 4.4.8 Información del Punto No. 8 Talud Zona Franca I
Fuente: EL AUTOR

PUNTO No 9 TALUD ZONA FRANCA II



Figura No. 4.4.20 Talud ubicado en Zona Franca de Ilopango
Fuente: EL AUTOR, fotografía tomada 3/02/2017

Ubicación: Zona Franca de San Salvador al costado Sur-Oriente del aeropuerto de Ilopango, San Salvador

Coordenadas: X (longitud)= 89° 6'52.58" Y(latitud)= 13°42'7.17"



Figura No. 4.4.21 Localización de Talud Zona Franca II
Fuente: EL AUTOR, apoyado en Google Earth

- Tipo de suelo: presencia de TBJ; Ignimbrita alfa, y Unidad E.
- Corriente del agua: la dirección de la corriente del agua es paralela al cuerpo del talud como se puede observar en la Figura No. 4.4.20.
- Sobrecargas: no posee sobrecargas en la parte superior del talud.
- Factores antrópicos: es afectado por la canalización de la quebrada El Arenal Seco aguas arriba de la zona de estudio.
- Vegetación: la cresta del talud se encuentra recubierta por una vegetación escasa tipo pasto
- Accesibilidad: se encuentra ubicado en una zona de fácil acceso para realizar el monitoreo en la cresta.
- Permisos: se cuenta con el permiso de instalar el equipo de monitoreo.
- Seguridad: el talud está ubicado en una zona relativamente segura para llevar a cabo el monitoreo.
- Tipo de erosión: afectado por erosión horizontal y vertical. La canalización de la quebrada aguas arriba acumula mucha energía, que se libera en esta zona, chocando en las paredes laterales de los taludes.

Tabla No. 4.4.9 Información del Punto No. 9 Talud Zona Franca II
Fuente: EL AUTOR

PUNTO No 10 TALUD ZONA FRANCA III



Figura No. 4.4.22 Talud ubicado en Zona Franca de Ilopango
Fuente: EL AUTOR, fotografía tomada 3/02/2017

Ubicación: Zona Franca de San Salvador al costado Sur-Oriente del aeropuerto de Ilopango, San Salvador

Coordenadas: X (longitud)= 89° 6'50.04" Y(latitud)= 13°42'5.99"N



Figura No. 4.4.23 Localización de Talud Zona Franca III

Fuente: EL AUTOR, apoyado en Google Earth

- Tipo de suelo: presencia de TBJ; Unidad F, Unidad E y un depósito aluvial.
- Corriente del agua: la dirección de la corriente del agua es paralela al cuerpo del talud como se puede observar en la Figura No. 4.4.22.
- Sobrecargas: no posee sobrecargas en la parte superior del talud.
- Factores antrópicos: es afectado por la canalización de la quebrada la quebrada El Arenal Seco aguas arriba de la zona de estudio.
- Vegetación: la cresta del talud se encuentra recubierta por una vegetación escasa tipo pasto.
- Accesibilidad: se encuentra ubicado en una zona de fácil acceso para realizar el monitoreo.
- Permisos: se cuenta con el permiso de instalar el equipo de monitoreo en la cresta.
- Seguridad: el talud está ubicado en una zona relativamente segura para llevar a cabo el monitoreo.
- Tipo de erosión: afectado por erosión horizontal y vertical. Es el primer lugar a donde llega la descarga de agua proveniente de la canalización de la quebrada (aguas arriba de la zona de estudio); la energía acumulada es liberada al llegar a este punto, recibiendo el talud el impacto directo de un flujo turbulento, que resulta en un aumento de la erosión en la zona.

Tabla No. 4.4.10 Información del Punto No. 10 Talud Zona Franca III

Fuente: EL AUTOR

En la Figura No. 4.4.24 se muestran las ubicaciones de forma general de los puntos preliminares en la zona en estudio.



Figura No. 4.4.24 Ubicación en la zona de estudio, de los puntos preliminares seleccionados

Fuente: EL AUTOR, apoyado en Google Earth

A continuación, con la información obtenida de cada punto preliminar, y con el número de criterios que posee cada uno de ellos, se ha podido realizar una tabla resumen donde se presentan la cantidad de criterios que cumplen cada uno de ellos, y en base a esta, se seleccionarán los puntos definitivos, que son los que cumplirán con el mayor número de criterios establecidos para el estudio, lo que, se presenta de manera resumida en la Tabla No. 4.4.11.

CRITERIOS ESTABLECIDOS	PUNTO 1	PUNTO 2	PUNTO 3	PUNTO 4	PUNTO 5	PUNTO 6	PUNTO 7	PUNTO 8	PUNTO 9	PUNTO 10
CONFORMADO POR TBJ	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
IMPACTO DIRECTO DE FLUJOS DE AGUA		1	1				1			
ACTIVIDADES ANTRÓPICAS	1	1	1	1					1	1
PRESENCIA DE COBERTURA VEGETAL	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
PRESENCIA DE PROCESOS EROSIVOS	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
EXISTENCIA DE SOBRECARGAS										
VIBRACIONES POR MEDIOS DE TRANSPORTE										
ZONA RELATIVAMENTE SEGURA		1	1	1	1				1	1
ACCESIBILIDAD PARA MONITOREAR	1	1	1						1	1
PERMISO PARA MONITOREAR	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Σ	6	8	8	6	5	4	5	4	7	7

Tabla No. 4.4.11 Relación entre cada talud seleccionado preliminarmente y criterios establecidos en la sección 4.3 de este capítulo IV.

Fuente: EL AUTOR, 2017

Como se puede observar los puntos preliminares que cumplen con la mayor parte de criterios establecidos en la sección 4.3 de este capítulo son los sombreados con color amarillo; estos puntos tienen la probabilidad de verse más afectados por procesos erosivos durante el periodo de estudio que el resto de los puntos. Por lo cual se ha decidido, que serán seleccionados para la investigación.

En la Tabla No. 4.4.12 se presentan los cuatro taludes seleccionados, y sus respectivas identificaciones. Posteriormente, en la sección 4.6 de este capítulo se presentarán las condiciones iniciales de estos.

NOMBRE DEL TALUD
❖ PUNTO No. 2 TALUD AEROPUERTO I
❖ PUNTO No. 3 TALUD AEROPUERTO II
❖ PUNTO No. 9 TALUD ZONA FRANCA II
❖ PUNTO No. 10 TALUD ZONA FRANCA III

*Tabla No. 4.4.12 Identificación de los Taludes seleccionados
Fuente: EL AUTOR, 2017*

4.5 INVESTIGACIÓN Y SELECCIÓN DE TÉCNICAS DE CUANTIFICACIÓN DE PERDIDA DE SUELO

Se ha realizado una investigación de las técnicas que presenten una mayor adaptación a las condiciones del área de estudio, tomando en cuenta, la facilidad para obtener el equipo necesario. Posteriormente se presentará un cuadro comparativo donde se muestre las distintas técnicas descritas en esta sección, con sus campos de aplicación, y sus respectivas ventajas.

4.5.1 TÉCNICA “A” TALUDES CON SUPERFICIE APROXIMADAMENTE PLANA EN LA CRESTA Y EXPUESTOS A EROSIÓN LATERAL Y VERTICAL (BAUTISTA ET AL., 2016)

Esta técnica es una modificación del Método de clavos y arandelas (“MANUAL DE MÉTODOS SENCILLOS PARA ESTIMAR EROSIÓN HÍDRICA”, 2005, MANAGUA, NICARAGUA), Las modificaciones realizadas se describen a continuación:

- Se reemplazaron los clavos por varillas de acero corrugado de $\phi=3/8"$.
- Se sustituyeron las arandelas por una marca en la parte superior de las varillas de acero corrugado para su identificación en campo.

La técnica consiste en trazar una cuadrícula con las varillas de acero corrugado como vértices sobre la superficie plana del talud que se desea monitorear. Esta técnica permite llevar un registro de los cambios que experimenta un talud, tanto en horizontal, como vertical (producto de la erosión que experimenta).

Los cambios se evalúan en cada inspección, midiendo tanto, la distancia horizontal (de los puntos de control al borde del talud "X") y vertical (se miden la distancia "Y", desde el borde del talud en la proyección de cada eje hasta el lecho del río) como puede apreciarse en la Figura No. 4.5.1.

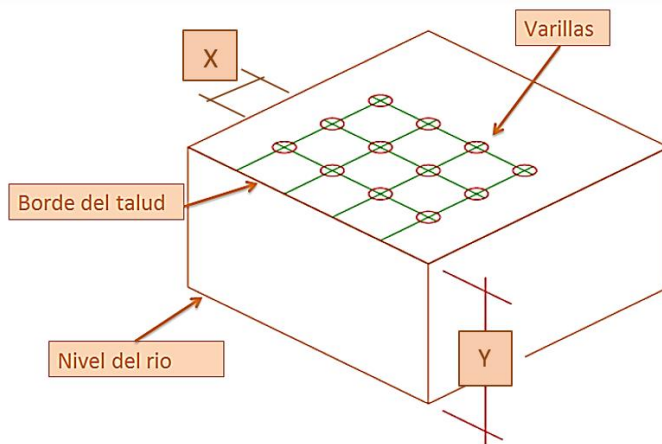


Figura No. 4.5.1 Ejemplo de instalación de cuadrícula utilizando la Técnica "A" en taludes con superficie aproximadamente plana en la cresta y expuestos a erosión lateral y vertical.

Fuente: DEL AUTOR, 2017.

4.5.1.1 UTILIDAD DE LA TÉCNICA

- La técnica "A" se puede utilizar en taludes con superficie aproximadamente plana en la cresta, y solamente para evaluar erosión horizontal y erosión vertical.

4.5.1.2 LIMITACIONES DE LA TÉCNICA

- La técnica no se puede aplicar cuando los cauces de los ríos son muy profundos, ya que en estos casos el registro de los cambios que experimenta el talud, tanto en vertical como en horizontal dadas las dimensiones de este, no sería posible de ejecutar.
- Cuando las varillas se utilizan para medir la erosión horizontal y erosión vertical ocasionada por el cauce del río, estas pueden perderse por el arrastre de sedimentos.

4.5.1.3 VENTAJAS DE LA TÉCNICA

- Es un método sencillo y fácil de instalar
- Los materiales a utilizar son de bajo costo y fáciles de conseguir
- Solamente se necesitan dos personas para la instalación del equipo
- Los materiales pueden reutilizarse

4.5.1.4 DESVENTAJAS DE LA TÉCNICA

- Las varillas pueden ser extraídas por personas que habiten en la zona
- Siempre existe un porcentaje de error en los registros de datos, el cual es atribuible a la precisión del instrumento de medición que se ha utilizado y la forma en que cada persona toma las lecturas de las medidas.

4.5.2 MÉTODO DE TRANSECTO DE CÁRCAVAS

La cárcava a evaluar es medida longitudinalmente y dividida en transectos de igual dimensión. Un transecto es una parte de la longitud de la cárcava y posee dos secciones transversales: La inicial y final (ver Figura No. 4.5.2). La longitud de los transectos depende de la regularidad de la sección, pudiendo variar de 10 a 20 metros. Es decir, si las secciones son bastante irregulares la longitud será más corta.

Los límites de cada transecto son marcados con estacas, que se disponen a una distancia de la orilla de la cárcava de 3.0 - 2.5 m en ambos márgenes. Esto permite mantener la marca para el mismo sitio en dos momentos diferentes del período lluvioso, sin peligro de que un derrumbe las desaparezca. Una distancia mayor sería recomendable si el ancho de la cárcava es mayor de 10m, dada su mayor capacidad de causar derrumbes en los márgenes.

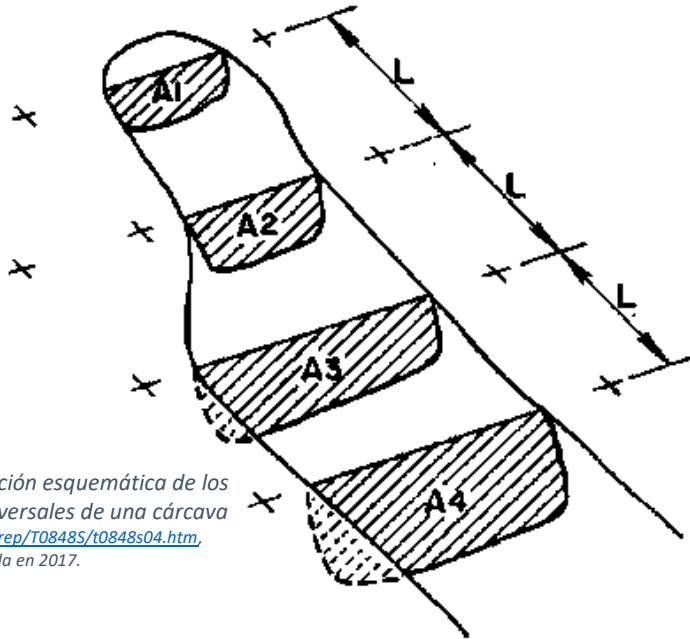


Figura No. 4.5.2 Representación esquemática de los transectos y secciones transversales de una cárcava
 Fuente: <http://www.fao.org/docrep/T0848S/t0848s04.htm>,
 página consultada en 2017.

4.5.2.1 LIMITACIONES DEL MÉTODO

- Para este tipo de método las limitaciones tienen que ver con el nivel de escolaridad del que ejecuta las lecturas, y de poder tener acceso a una calculadora de bolsillo.

4.5.2.2 VENTAJAS DEL MÉTODO

- Para la aplicación de este método se requiere de al menos 3 personas.
- Aproximadamente se puede cubrir en un terreno con poca vegetación o consistente de arbustos y pastizales de 200 a 250 metros lineales por día.
- Los medios para realizar la actividad tanto de campo (estacas, cinta métrica y cuerda) y de gabinete (calculadora), son sencillos y de bajo costo.
- El cálculo es simple y las fórmulas sencillas.

4.5.2.3 RECOMENDACIONES DEL MÉTODO

- Los puntos de referencias deben de estar muy bien ubicados, para poder identificarlos fácilmente después de algunos meses de lluvia, y a una distancia de la cárcava que evite su pérdida por arrastre.
- Se debe de manejar un cuaderno de notas muy ordenado y efectuar los cálculos de las áreas de las secciones inmediatamente después de cada vista de campo, a fin de evitar confusiones de los datos o pérdida.

- Es necesario elaborar un esquema gráfico de la cárcava y de la ubicación de cada transecto, numerándolos, para evitar comparar área inicial y final, de distintos transectos.
- Cuando se utiliza la representación gráfica de la sección transversal de la cárcava, conviene asumir una orientación de la cárcava, utilizando los puntos cardinales a fin de evitar tener gráficas invertidas en la orientación.

4.5.3 MÉTODO DEL GPS DE DOBLE FRECUENCIA

Para la aplicación de esta técnica se medirá una línea base, desde un punto fijo (estación de referencia con coordenadas conocidas) a un punto desconocido (móvil). Es decir, que se utilizará el modo diferencial o relativo, para obtener los cambios que experimentará el área de estudio, a partir de la determinación de las coordenadas de los puntos (iniciales y finales).

La principal diferencia entre los equipos GPS se deben a la precisión que permiten alcanzar. Los GPS de doble frecuencia son los equipos de mayor precisión; Trabajan en tiempo real o en postproceso; alcanzando precisiones del orden de 5mm+1ppm, y disminuyendo los tiempos de observación

Real Time Kinematic (RTK)-GPS en tiempo real

Consiste en la obtención de coordenadas en tiempo real con precisión centimétrica (1 ó 2 cm + 1ppm). Usualmente se aplica este método a posicionamientos cinemáticos, aunque también permite posicionamientos estáticos (es un método diferencial o relativo). El receptor fijo o referencia, estará en modo estático en un punto de coordenadas conocidas, mientras el receptor móvil o “rover”, determina las coordenadas en tiempo real (teniendo la opción de hacerlo en el sistema de referencia local).

4.5.3.1 UTILIDAD DEL MÉTODO

- El método del GPS de doble frecuencia es muy versátil, ya que, se puede utilizar para monitorear erosión laminar, erosión retrograda, erosión en cárcava, erosión lateral y vertical.

4.5.3.2 LIMITACIONES DEL MÉTODO

- Susceptible a interferencia de la señal de los satélites; los resultados del GPS pueden perder precisión.
- Perturbación de la ionosfera
- Fenómenos meteorológicos
- Interferencias eléctricas imprevistas
- El GPS no se puede utilizar durante el levantamiento en zonas subterráneas o lugares donde no se reciban las señales de los satélites.
- Cualquier cambio en el posicionamiento de la constelación de satélites puede afectar a la precisión del GPS.
- Señal multirruta, producida por el rebote de la señal en edificios y montañas cercanos.
- El GPS es incapaz de medir directamente las diferencias en la elevación.

4.5.3.3 VENTAJAS DEL MÉTODO

- Produce resultados precisos con poco esfuerzo.
- Una sola persona puede realizar el trabajo. No es necesario que haya una persona en la estación y otra en el punto medido.
- Se puede trabajar sorteando obstáculos sin necesidad de establecer nuevas estaciones o puntos destacados.
- No hay que realizar cambios de estación continuamente.
- No es necesario realizar comprobaciones continuas cada vez que se estaciona
- Disminuye el número de errores o equivocaciones producidas por la intervención humana.

4.5.4 TÉCNICA FOTOGRAMÉTRICA CON EL USO DE UN VEHÍCULO AÉREO NO TRIPULADO

La fotogrametría determina las propiedades geométricas de los objetos y las situaciones espaciales a partir de imágenes fotográficas. Básicamente es una técnica de medición de coordenadas 3D, que utiliza fotografías u otros sistemas de percepción remota junto con puntos de referencia topográficos sobre el terreno, como medio fundamental para la medición.

La metodología de esta técnica consiste en una serie de pasos que se mencionan a continuación:

- Calibración de la cámara
- Planificación de vuelo.
- Puntos de apoyo
- Obtención de los datos de vuelo
- Proceso de calculo

4.5.4.1 UTILIDAD DE LA TÉCNICA

- La técnica fotogramétrica con el uso de un vehículo aéreo no tripulado es muy versátil, ya que, se puede utilizar para dar seguimiento y evaluar erosión retrograda, erosión en cárcava, erosión lateral y vertical.

4.5.4.2 VENTAJAS DE LA TÉCNICA

- Reducción de tiempo
- Aumento de eficiencia en el acopio de información
- Mejor relación Costo-Calidad
- Mayor eficiencia en la ejecución

4.5.4.3 DESVENTAJAS DE LA TÉCNICA

- Autonomía escasa de los drones. Es fácilmente comprobable que las baterías eléctricas suelen ser uno de los grandes problemas que tienen los drones debido a su escasa capacidad, y por tanto, poca duración de vuelo.
- Existen lugares restringidos, donde estos vehículos no pueden ser sobrevolados.
- Efectos meteorológicos; no se puede utilizar en tiempo malo, ya que afectaría la estabilidad del drone.

En esta sección se han presentado algunas de las técnicas de cuantificación de erosión, que pueden aplicarse, en condiciones similares a las que experimenta la zona en estudio. Para seleccionar la técnica a aplicar, se realizará una tabla resumen (ver Tabla No. 4.5.1) donde se

detallan las ventajas que tiene una técnica con respecto a la otra, y el tipo de erosión que evalúa; este último aspecto es de importancia, ya que, el principal tipo de erosión que se presenta en la zona de estudio es la horizontal y vertical.

En base a la Tabla No 4.5.1 y tomando en cuenta las características, ventajas y tipo de erosión que evalúan cada una de las técnicas descritas en esta sección; se ha decidido que las más adecuadas para realizar el estudio son: Técnica "A" taludes con superficie aproximadamente plana en la cresta, Método del GPS de doble frecuencia y la Técnica fotogramétrica con el uso de un vehículo aéreo no tripulado, Ya que, evalúan la erosión que experimentan los taludes en la zona en estudio.

MÉTODO	CARACTERÍSTICAS	VENTAJAS COMPARATIVAS	TIPO DE EROSIÓN QUE EVALÚA
Técnica "A" taludes con superficie aproximadamente plana en la cresta y expuestos a erosión lateral y vertical (Bautista et al, 2016)	<ul style="list-style-type: none"> • Varillas enterradas en la superficie para medir la lámina de suelo erosionada • La medición es periódica para registrar la variación de la pérdida de suelo 	<ul style="list-style-type: none"> • Es sencillo, fácil de instalar y de registrar datos. • Las varillas pueden instalarse en terrenos aproximadamente planos. Y en terrenos con pendientes fuertes. • Los materiales que se utilizan pueden ser reutilizables 	<ul style="list-style-type: none"> • Erosión horizontal y vertical
Transecto de cárcava	<ul style="list-style-type: none"> • Mide la longitud de la cárcava y se divide en transectos de igual dimensión. • La sección transversal es estimada de acuerdo a la forma de la cárcava: U o V. • La medición se realiza en dos momentos, antes y al final del periodo lluvioso. 	<ul style="list-style-type: none"> • Los materiales que se utilizan son sencillos y de bajo costo. • El cálculo y ecuaciones utilizadas son sencillas 	<ul style="list-style-type: none"> • Erosión en cárcava
Método del GPS de doble frecuencia	<ul style="list-style-type: none"> • Se obtienen las coordenadas en tiempo real de un terreno. • La medición se realiza periódicamente para obtener una variación del deterioro del suelo 	<ul style="list-style-type: none"> • Produce resultados precisos con poco esfuerzo. • Una sola persona puede realizar el trabajo. • Disminuye el número de errores o equivocaciones producidas por la intervención humana 	<ul style="list-style-type: none"> • Erosión horizontal y vertical • Erosión en cárcava • Erosión laminar
Técnica fotogramétrica con el uso de un vehículo aéreo no tripulado (UAV)	<ul style="list-style-type: none"> • Se obtienen planos de un terreno por medio de fotografías aéreas • La medición se realiza en dos momentos, antes y al final del periodo de monitoreo 	<ul style="list-style-type: none"> • Reducción de tiempo • Aumento de eficiencia en el acopio de información • Mejor relación Costo-Calidad • Mayor eficiencia en la ejecución 	<ul style="list-style-type: none"> • Erosión horizontal y vertical • Erosión retrograda • Erosión en cárcava

Tabla No. 4.5.1 Características, ventajas comparativas y tipos de erosión que evalúan las técnicas de cuantificación de erosión.

Fuente: DEL AUTOR, 2017

La técnica A, tiene la ventaja adicional, que el equipo a utilizar es de bajo costo, las técnicas del GPS de doble frecuencia y la fotogramétrica se utilizarán ya que la Universidad de El Salvador y OPAMSS cuentan con estos equipos.

4.6 DESCRIPCIÓN DE CONDICIONES INICIALES DE LOS TALUDES SELECCIONADOS

Esta sección ha sido destinada para describir las condiciones iniciales de los cuatro taludes seleccionados. La información de cada punto de estudio, servirá para determinar las condiciones iniciales, de cada uno (para mayor información sobre condiciones iniciales de los taludes ver Anexo No.1); por lo cual, se debe dejar claro todos los detalles posibles, para que, puedan ser percibidos los cambios que estos presenten, durante el periodo de estudio de este trabajo de investigación.

4.6.1 PUNTO No. 10 TALUD ZONA FRANCA III

Las características iniciales de este talud se presentan en forma resumen en la Tabla No. 4.6.1

PUNTO No. 10 TALUD ZONA FRANCA III			
Ubicación	Zona Franca de San Salvador al costado Sur-Oriente del aeropuerto de Ilopango, San Salvador		
Coordenadas	X= 89° 6'50.04" (Longitud) Y= 13°42'22.99" (Latitud)		
Distancia al centro de emisión	7.32 km aproximadamente		
Nombre de rio de influencia	Quebrada El Arenal Seco		
Altura promedio	7 m		
Pendiente	Aproximadamente vertical		
Longitud en dirección X	65 m		
Longitud en dirección Y	7 m		
Cobertura vegetal	Presencia de pasto, matorrales y arbustos		
Pendiente de la parte superior del talud (corona)	Ondulado 5% - 12%		
Tipo de material presente	Tierra Blanca Joven (TBJ)		
Numero de estratos presentes	3		
Características de los estratos			
Nombre	Altura promedio (m)	Color	Tamaño del grano (mm)
Deposito aluvial	1.3	Gris	5-9
Unidad F	5.3	Beige claro	4-9
Unidad E (deposito húmedo)	0.21	Café oscuro	0.6
Unidad E (deposito seco)	0.20	Café claro	4

Tabla No. 4.6.1 Condiciones iniciales del PUNTO No. 10 TALUD ZONA FRANCA III

Fuente: DEL AUTOR, 2018

El tramo en estudio comprende una longitud de aproximadamente 65 m (ver Figura No. 4.6.1), en donde la corriente del agua actúa de forma lateral al borde del talud.



Figura No. 4.6.1 Esquema del tramo de estudio del PUNTO No. 10 TALUD ZONA FRANCA III.
Fuente: EL AUTOR, apoyado en Google Earth

La parte superior del talud tiene cobertura vegetal, caso contrario es el cuerpo ya que no posee ningún tipo de vegetación (ver Figura No. 4.6.2), exponiendo a este punto a erosión directa por parte de la corriente del agua; las únicas fuerzas opositoras a las fuerzas erosivas son las que pueden presentar las partículas de este tipo de suelo, pero, como se ha explicado anteriormente la TBJ tiene una baja resistencia a las fuerzas erosivas.

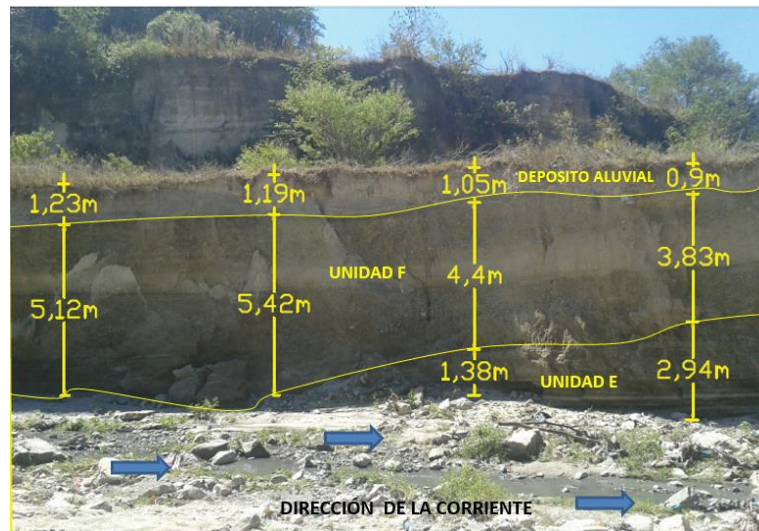


Figura No. 4.6.2 Perfil longitudinal y variación en altura de las diferentes unidades que conforman el TALUD ZONA FRANCA III PUNTO No. 10.
Fuente: EL AUTOR, fotografía tomada el 3/2/2017.

Condición inicial: se colocó en la parte superior del talud una línea de referencia (línea base) aproximadamente a 10 m hacia adentro del borde y con una dirección longitudinal paralela a este; a partir de esta línea a cada 5 m, se trazaron líneas perpendiculares para ubicar el borde del talud (desde eje A hasta el N), se determinaron las longitudes de cada línea, para efecto de control de los cambios horizontales en el periodo de la investigación. Al final de cada línea se midió verticalmente la profundidad hasta el fondo de la quebrada, obteniendo así las condiciones iniciales del talud (ver Figura No. 4.6.3).

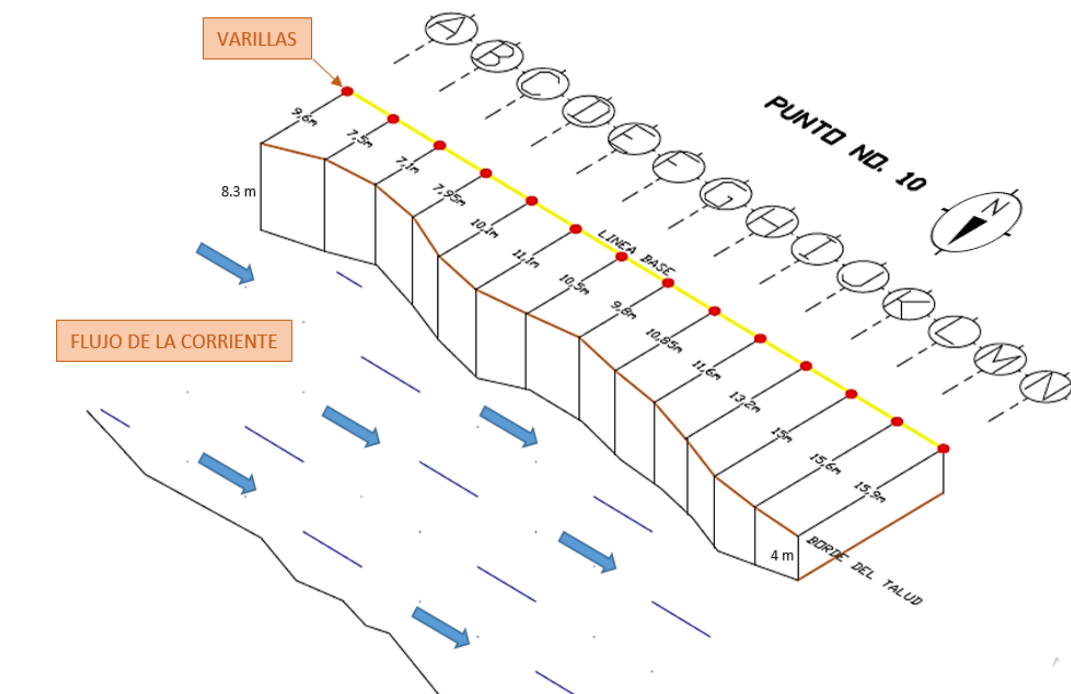


Figura No. 4.6.3 Dimensiones iniciales del PUNTO No. 10 TALUD ZONA FRANCA III
Fuente: DEL AUTOR, 2018

Para comprender con mayor detalle las dimensiones iniciales del PUNTO No. 10 TALUD ZONA FRANCA III, se desglosa la Figura No. 4.6.3 en dos partes (vista en planta y vista de perfil) para presentar las dimensiones horizontales y verticales de este (ver Figura No. 4.6.4).

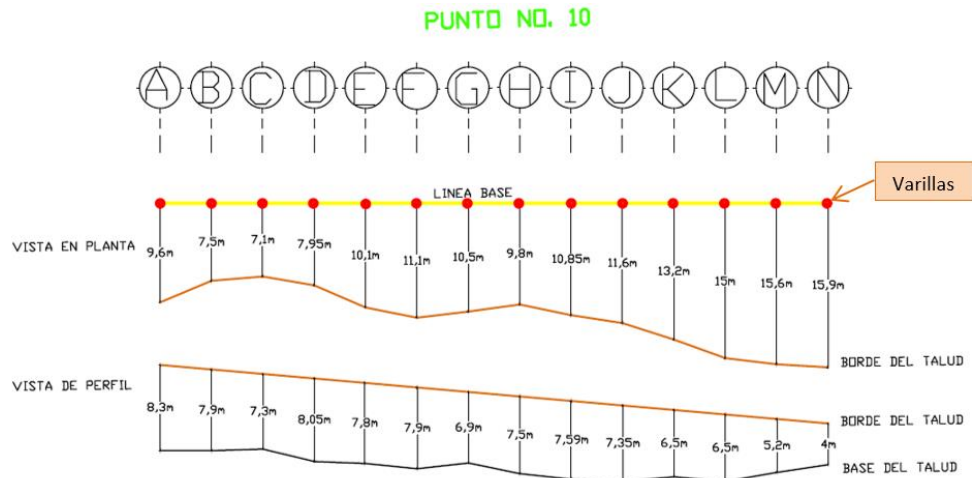


Figura No. 4.6.4 Dimensiones horizontales y verticales iniciales, del PUNTO No. 10 TALUD ZONA FRANCA III
Fuente: DEL AUTOR, 2018

4.6.2 PUNTO No. 9 TALUD ZONA FRANCA II

Las características iniciales de este talud se presentan en forma resumen en la Tabla No. 4.6.2

PUNTO No. 9 TALUD ZONA FRANCA II			
Ubicación	Zona Franca de San Salvador al costado Sur-Oriente del aeropuerto de Ilopango, San Salvador		
Coordenadas	X= 89° 6'52.58" (Longitud) Y= 13°42'7.17" (Latitud)		
Distancia al centro de emisión	7.48 km aproximadamente		
Nombre de río de influencia	Quebrada El Arenal Seco		
Altura promedio	2.76 m talud sur y 6.8 m talud norte		
Pendiente	Aproximadamente vertical		
Longitud en dirección X	20 m		
Longitud en dirección Y	2.76 m talud sur y 6.8 m talud norte		
Cobertura vegetal	Presencia de pasto, matorrales y arbustos		
Pendiente de la parte superior del talud (corona)	Ondulado suave 3% - 4%		
Tipo de material presente	Tierra Blanca Joven (TBJ)		
Numero de estratos presentes	4		
Características de los estratos			
Nombre	Altura promedio (m)	Color	Tamaño del grano (mm)
Deposito aluvial	2.5	Gris	5-9
Unidad Ignimbrita Beta talud sur	1.1	Café claro	0.15-0.3
Unidad E (deposito húmedo)	0.21	Café oscuro	0.6
Unidad E (deposito seco)	0.20	Café claro	4
Unidad Ignimbrita alfa talud sur	0.6	Rosado	4
Unidad Ignimbrita alfa talud norte	2.35	Rosado	4

Tabla No. 4.6.2 Condiciones iniciales del PUNTO No. 9 TALUD ZONA FRANCA II
Fuente: DEL AUTOR, 2018

En este punto de estudio se ha decidido monitorear la erosión causada por la quebrada El Arenal Seco. La sección transversal que posee el cauce oscila los 20 m de longitud y esto permite evaluar la pérdida de suelo que experimentan ambos taludes (talud sur y talud norte), en donde la corriente del agua actúa de forma paralela al borde de cada uno (ver Figura No. 4.6.5).

La parte superior del talud tiene una escasa cobertura vegetal, en cambio el cuerpo no posee ningún tipo de vegetación como se puede apreciar en la Figura No. 4.6.6.



Figura No. 4.6.5 Esquema de la dirección de la corriente del agua con respecto al borde de los taludes; además, del ancho del cauce y las alturas aproximadas de cada talud.
Fuente: EL AUTOR, fotografía tomada el 3/2/2017.

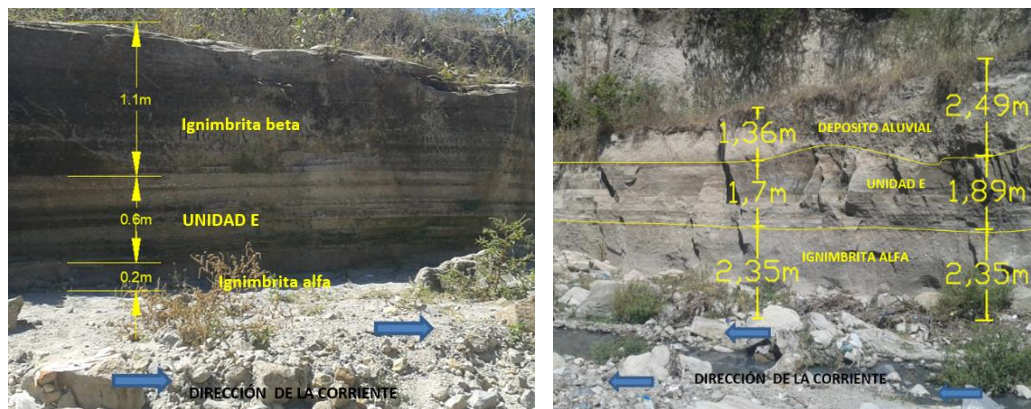


Figura No. 4.6.6 Perfil longitudinal y variación en altura del PUNTO No. 9 TALUD ZONA FRANCA II; imagen del costado izquierdo muestra al talud SUR, mientras que la del costado derecho presenta al talud NORTE.
Fuente: EL AUTOR, fotografías tomadas el 3/2/ 2017

Para tener una condición inicial más detallada, en la parte superior de los taludes se colocó una línea de referencia (línea base, eje N) en la sección transversal de la quebrada, procurando una longitud mínima de 10 m hacia adentro del borde, en cada talud; las condiciones iniciales de este eje son las que se presentan en la Figura No. 4.6.7.

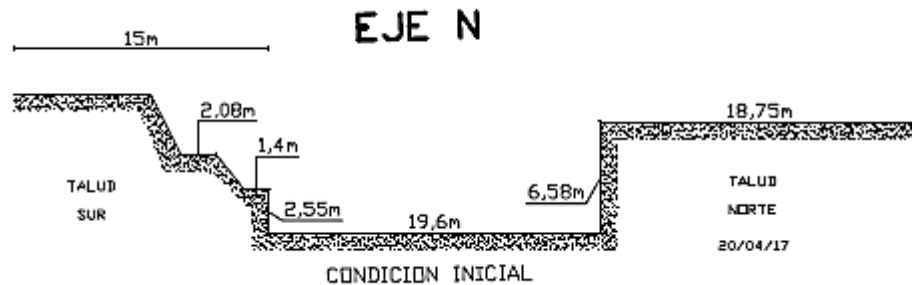


Figura No. 4.6.7 Sección transversal de la quebrada El Arenal Seco en el PUNTO No. 9
TALUD ZONA FRANCA II (eje de línea base).
Fuente: EL AUTOR, 2017

4.6.3 PUNTO No. 3 TALUD AEROPUERTO II

Las características iniciales de este talud se presentan en forma resumida en la Tabla No. 4.6.3

En el talud existe presencia de erosión lateral y erosión vertical, la base del talud presenta suelo desprendido proveniente de este punto, además, tiene evidentes planos de exfoliación que posteriormente se desprenderán. En la parte superior hay presencia de cobertura vegetal, caso contrario es el cuerpo del talud (ver Figura No. 4.6.8), lo que lo expone a la erosión directa por parte de la corriente del agua que pasa por el lugar.

PUNTO No. 3 TALUD AEROPUERTO II			
Ubicación	Zona Franca de San Salvador al costado Nor-Oriente del aeropuerto de Ilopango, San Salvador		
Coordenadas	X=89° 7'10.93" (Longitud) Y=13°42'11.36" (Latitud)		
Distancia al centro de emisión	8.57 km aproximadamente		
Nombre de río de influencia	Quebrada El Arenal Seco		
Altura promedio	11 m		
Pendiente	Aproximadamente vertical		
Longitud en dirección X	55 m		
Longitud en dirección Y	11 m		
Cobertura vegetal	Presencia de pasto, matorrales y cultivo		
Pendiente de la parte superior del talud (corona)	Ondulado suave 3% - 4%		
Tipo de material presente	Tierra Blanca Joven (TBJ)		
Numero de estratos presentes	4		
Características de los estratos			
Nombre	Altura promedio (m)	Color	Tamaño del grano (mm)
Deposito aluvial	1.3	Gris	5-9
Unidad F	5.2	Beige claro	4
Unidad E (deposito húmedo)	0.21	Café oscuro	0.6
Unidad E (deposito seco)	0.20	Café claro	4
Unidad Ignimbrita alfa	2.7	Rosado	2

Tabla No. 4.6.3 Condiciones iniciales del PUNTO No. 3 TALUD AEROPUERTO II
Fuente: DEL AUTOR, 2018

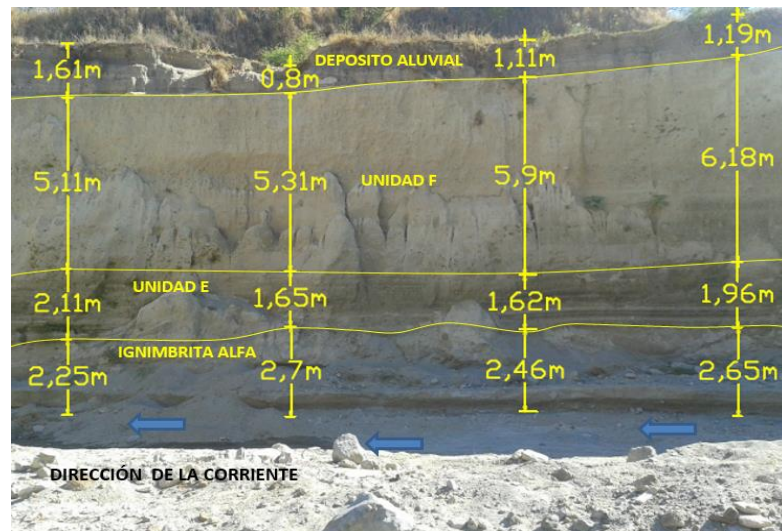


Figura No. 4.6.8 Perfil longitudinal y variación en altura de las unidades que conforman el PUNTO No 3 TALUD AEROPUERTO II
Fuente: EL AUTOR, fotografía tomada el 3/2/2017

Este punto de estudio presenta un posible impacto lateral por la corriente de agua que circula periódicamente en época lluviosa, más sin embargo, para este año el aeropuerto de Ilopango ha realizado una obra de mitigación artesanal, para proteger su talud contra el impacto de la corriente en las crecidas que la quebrada pueda tener; esta obra está compuesta por varas de bambú, y plástico negro, ubicadas en el lecho del cauce (ver Figura No. 4.6.9). Si esta obra de protección llegara a funcionar y frenara el impacto de la corriente, esta sería desviada hacia otra dirección; una posibilidad es que el nuevo curso del agua impacte frontalmente el Punto No. 3 Talud Aeropuerto II; ocasionando un aumento en la tasa de erosión para este. Por tal razón, es importante obtener su topografía inicial para ver la magnitud de los cambios que experimenta este en el lapso de estudio.



*Figura No. 4.6.9 Obras de protección artesanales ubicadas frente al PUNTO No 3 TALUD AEROPUERTO II
Fuente: EL AUTOR, fotografía tomada el 28/07/2017*

Condición inicial: primero en la parte superior del talud se colocó una línea de referencia (línea base) aproximadamente a 10 m hacia adentro del borde y con una dirección longitudinal paralela a este; a partir de esta línea a cada 5 m, se trazaron líneas perpendiculares para ubicar el borde del talud (desde eje A hasta el L), se determinaron las longitudes de cada línea, para efecto de control de los cambios horizontales en el periodo de la investigación. Al final de cada línea se midió verticalmente la altura al fondo de la quebrada (ver Figura No. 4.6.10).

La condición inicial de este punto, se desglosa la Figura No. 4.6.10 en dos partes (vista en planta y vista de perfil) presentando las dimensiones horizontales y verticales iniciales (ver Figura No. 4.6.11).

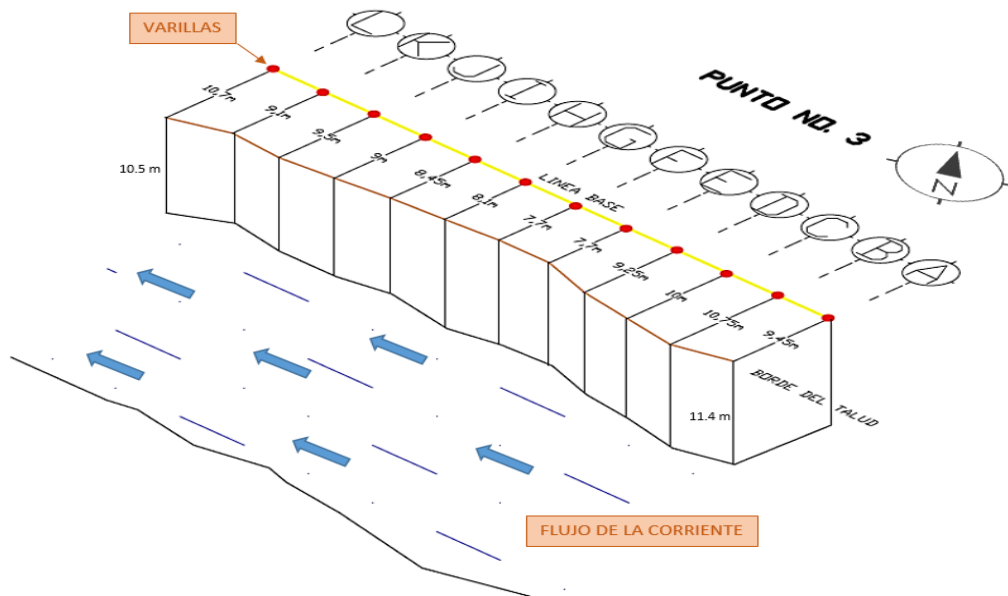


Figura No. 4.6.10 Dimensiones iniciales del PUNTO No. 3 TALUD AEROPUERTO II
Fuente: DEL AUTOR, 2018

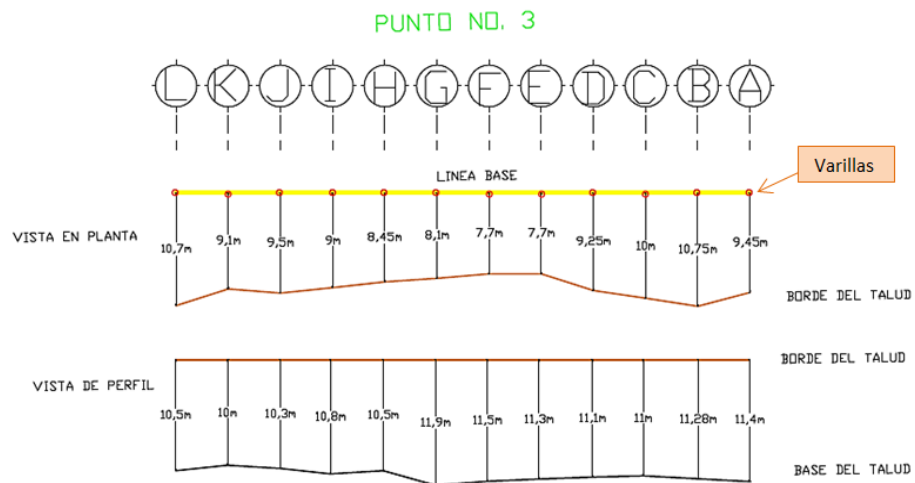


Figura No. 4.6.11 Dimensiones iniciales del PUNTO No. 3 TALUD AEROPUERTO II
Fuente: DEL AUTOR, 2018

4.6.4 PUNTO No. 2 TALUD AEROPUERTO I

Las características iniciales de este talud se presentan en forma resumida en la Tabla No. 4.6.4

PUNTO No. 2 TALUD AEROPUERTO I			
Ubicación	Zona Franca de San Salvador al costado Nor-Oriente del aeropuerto de Ilopango, San Salvador		
Coordenadas	X= 89° 7'14.89" (Longitud) Y= 13°42'22.69" (Latitud)		
Distancia al centro de emisión	9.14 km aproximadamente		
Nombre de río de influencia	Quebrada El Arenal Seco		
Altura promedio	6.65 m		
Pendiente	Aproximadamente vertical		
Longitud en dirección X	50 m		
Longitud en dirección Y	6.65 m		
Cobertura vegetal	Presencia de pasto, matorrales y arbustos		
Pendiente de la parte superior del talud (corona)	Ondulado suave 3% - 4%		
Tipo de material presente	Tierra Blanca Joven (TBJ)		
Numero de estratos presentes	5		
Características de los estratos			
Nombre	Altura promedio (m)	Color	Tamaño del grano (mm)
Deposito aluvial	0.15	Gris	5-9
Unidad Ignimbrita Beta	0.4	Café claro	0.6
Unidad E (deposito húmedo)	0.21	Café oscuro	0.6
Unidad E (deposito seco)	0.20	Café claro	4
Unidad Ignimbrita alfa	2.1	Rosado	2
Unidad D	4.2	Café claro	0.3

*Tabla No. 4.6.4 Condiciones iniciales del PUNTO No. 2 TALUD AEROPUERTO I
Fuente: DEL AUTOR, 2018*

Este punto presentará un impacto directo de la corriente de agua en la parte inferior del talud, debido a que, se encuentra ubicado en un cambio de curso de la corriente; mas sin embargo, la quebrada en esta zona posee una sección transversal de grandes dimensiones, por lo que al existir una crecida, se puede esparcir en toda la sección trasversal, disminuyendo en magnitud su poder erosivo.

La parte superior del talud tiene una escasa cobertura vegetal, caso contrario es el cuerpo del talud, ya que, no posee ningún tipo de vegetación como se puede apreciar en la Figura No. 4.6.12.

En la parte superior plana del talud, se colocó una línea de referencia aproximadamente a 10 m del borde con una dirección longitudinal paralela al borde de este; a partir de esta, a cada 5 m, se levantaron líneas perpendiculares para ubicar el borde (desde la línea A hasta la K). Se determinaron las longitudes de cada línea, para efecto de control del cambio de dimensiones en el periodo de la investigación. Al final de cada línea, se midió verticalmente la altura al fondo de la quebrada, obteniendo así las condiciones iniciales (ver Figura No. 4.6.13).



Figura No. 4.6.12 Perfil Longitudinal del talud y variación en altura de las unidades que conforman el PUNTO No 2 TALUD AEROPUERTO I

Fuente: EL AUTOR, fotografía tomada el 3/2/2017

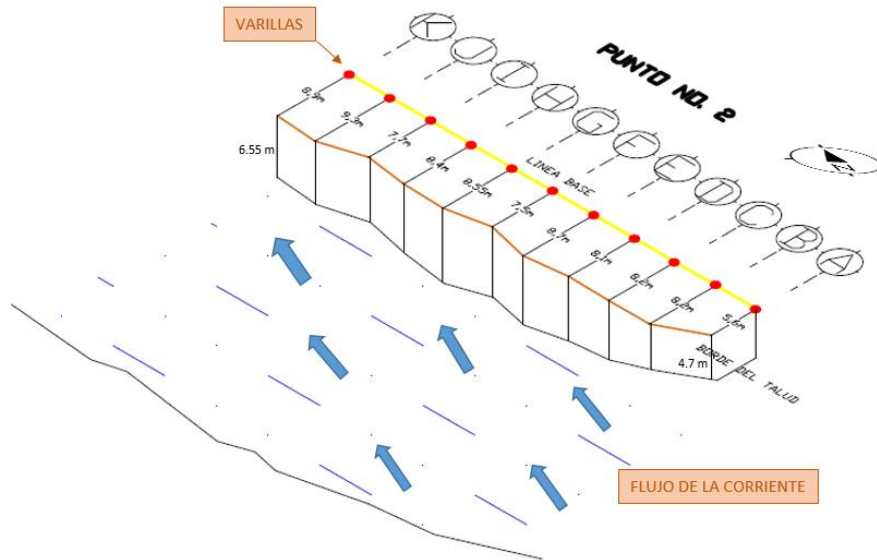


Figura No. 4.6.13 Dimensiones iniciales del PUNTO No. 2 TALUD AEROPUERTO I
Fuente: DEL AUTOR, 2018

El estado inicial del talud, se ha dividido la Figura No. 4.6.13 en dos partes (vista en planta y vista de perfil) para presentar con detalle las dimensiones horizontales y verticales de este punto (ver Figura No. 4.6.14).

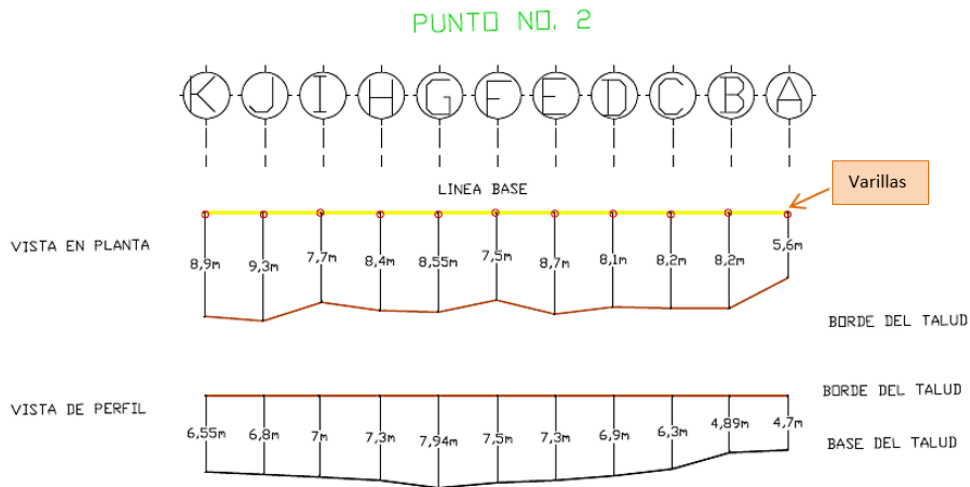


Figura No. 4.6.14 Dimensiones iniciales del PUNTO No. 2 TALUD AEROPUERTO I
Fuente: DEL AUTOR, 2018

4.7 DESCRIPCIÓN DE LA APLICACIÓN DE LAS METODOLOGÍAS DE EVALUACIÓN DE EROSIÓN A UTILIZAR

Según lo expuesto en el apartado 4.5, las técnicas que se aplicarán a cada talud objeto de estudio serán las siguientes:

- TÉCNICA “A” TALUDES CON SUPERFICIE APROXIMADAMENTE PLANA EN LA CRESTA Y EXPUESTOS A EROSIÓN LATERAL Y VERTICAL (BAUTISTA ET AL, 2016).
- TÉCNICA DEL GPS DE DOBLE FRECUENCIA.

Nota: la técnica fotogramétrica con el uso de un vehículo aéreo no tripulado, no será llevada a cabo, debido a que, en el Aeropuerto de Ilopingo (ubicado dentro de la zona de estudio) es una zona con restricciones de vuelo. La normativa de seguridad vigente impide volar drones en las inmediaciones de los aeropuertos para garantizar el desarrollo correcto de los vuelos.

4.7.1 INSTALACIÓN DE EQUIPO DE REFERENCIA PARA TÉCNICA “A” TALUDES CON SUPERFICIE APROXIMADAMENTE PLANA EN LA CRESTA Y EXPUESTOS A EROSIÓN LATERAL Y VERTICAL (BAUTISTA ET AL., 2016).

A continuación, se explicará paso a paso la aplicación de esta técnica:

Paso No 1: Equipo

El equipo necesario para ejecutar esta técnica, se presenta en Tabla No. 4.7.1

MATERIAL O	DESCRIPCIÓN
acero corrugado de $\varnothing=3/8"$	c/u de 40cm de longitud
Spray	1 frasco de color naranja o rojo (evitar color amarillo y verde)
Cinta métrica	Son necesarias 2 cintas cortas (5m) y en lo posible 1 cinta largas (30m)
Tabla de campo	1 con papel bond
Machete	1 para limpiar la zona donde se colocaran las varillas
Almádana	1 de 3 libras
Hilo nylon	1 rollo para el trazo de la cuadrícula
Escalera	1 para acceso a los taludes
Plomadas	Mínimo 3

Tabla No. 4.7.1 Equipo necesario para llevar a cabo la técnica de clavos y arandelas modificada
Fuente: EL AUTOR, 2017

Paso No 2: Selección del sector del talud donde se colocará el equipo

Se tomarán en cuenta ciertos aspectos:

- El lugar del talud en donde se observe que podría existir un impacto directo de la corriente hídrica (ver Figura No. 4.7.1).
- Las condiciones del talud tienen que permitir la instalación del equipo.
- Ser de fácil acceso para llevar a cabo el monitoreo.



*Figura No. 4.7.1 Elección del sector del talud donde se ubicara el equipo.
Fuente: EL AUTOR, fotografía tomada el 6/3/2017*

Paso No 3: Colocación del equipo

- Identificar puntos que puedan servir de referencia antes de realizar cualquier trazo sobre el talud (ejemplo de esto: un árbol, una roca, etc.; debe ser un elemento fijo que no cambien de ubicación)
- Trazar una cuadrícula (auxiliándose de cintas y plomadas), sobre la superficie plana del talud (Ver figura No. 4.7.2) dejando entre cada eje una distancia constante de separación, tanto en dirección longitudinal como en dirección transversal.



*Figura No. 4.7.2 Trazo de la cuadrícula en la superficie del talud.
Fuente: EL AUTOR, fotografía tomada el 6/3/2017*

- Identificar claramente los ejes de la cuadrícula y la orientación que poseen éstos con respecto a la dirección del cauce del río o quebrada.
- En cada intersección de la cuadrícula, utilizando la almadana, colocar una varilla corrugada de acero aproximadamente de 40 cm de longitud y de $\varnothing=3/8"$ de diámetro, dejando una longitud descubierta de aproximadamente 10 o 15 cm. (Ver figura No. 4.7.3).



Figura No. 4.7.3 Colocación de varillas de acero corrugado que funcionarán como vértices de la cuadrícula generada en la superficie del talud.

Fuente: EL AUTOR, fotografía tomada el 6/3/2017

- Esquema del talud con el equipo colocado (Ver figura No. 4.8.5).

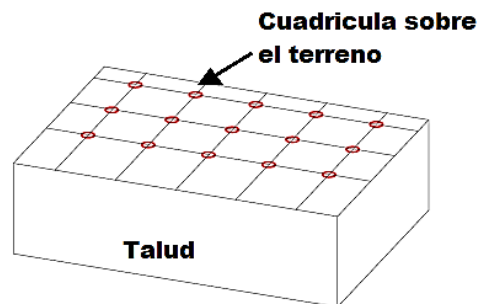


Figura No. 4.7.4 Esquema de ubicación de la cuadrícula para monitorear la erosión en el talud seleccionado.

Fuente: EL AUTOR, 2017

- Registrar en la libreta de campo la longitud que hay entre cada varilla introducida y el borde del talud, distancia "X". Y la profundidad que existe entre cada eje desde el borde hasta el lecho del río "Y". (Ver figura No. 4.7.5). Durante cada monitoreo que se realice en el período de estudio, será necesario dejar registro de la varilla más cercana al borde y de dos varillas que se encuentren detrás de ésta, con el objetivo de tener información de respaldo en caso de perder algún eje de varillas por la ocurrencia de grandes pérdidas de materiales durante alguna precipitación intensa.

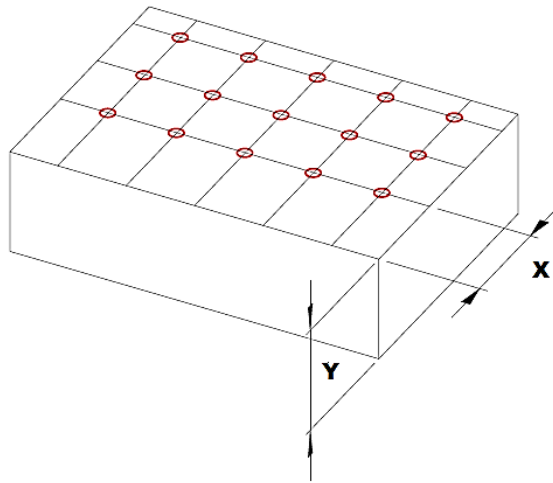


Figura No. 4.7.5 Esquema de la cuadrícula colocada en la cresta del talud para llevar a cabo el monitoreo de erosión, con las respectivas distancias horizontales y verticales que estarán en estudio.

Fuente: EL AUTOR, 2017

- Es importante que las varillas se recubran con spray de un color de fácil identificación para que sea factible su localización cada vez que se realice el monitoreo.
- Para evitar que se dificulte encontrar las varillas, además de cubrirlas con spray, se deben dejar referenciadas con respecto a algún árbol, cerca o alguna roca que sea visible y que se tenga la certeza que no va a cambiar de posición.

Paso No 4: Registro de datos

Como en este caso se estará monitoreando la erosión lateral y los cambios en la profundidad (ya sea por erosión o por azolvamiento: erosión vertical), en cada visita se medirán los cambios que ha sufrido la distancia desde el borde del talud hasta el lugar donde se ha instalado la varilla (para la erosión lateral en el eje "X").

Es por ello que el Δxi de erosión será la diferencia entre la medición registrada en la visita previa X_1 menos la que se realice en la visita posterior X_2 ,

$$\Delta xi \text{ de erosión} = X_1 - X_2$$

Dónde:

Δx_i de erosión = Cambio que ha ocurrido en el talud debido a la erosión en el eje X, entre dos visitas consecutivas al lugar.

X_1 = Distancia registrada entre el borde del talud y la varilla más próxima a éste en una visita de monitoreo.

X_2 = Distancia registrada entre el borde del talud y la varilla más próxima a éste en una visita de monitoreo posterior a la distancia registrada como X_1 .

Para tener una mejor comprensión del registro de datos de las pérdidas de materiales, podemos auxiliarnos del siguiente esquema (Ver figura No.4.7.6).

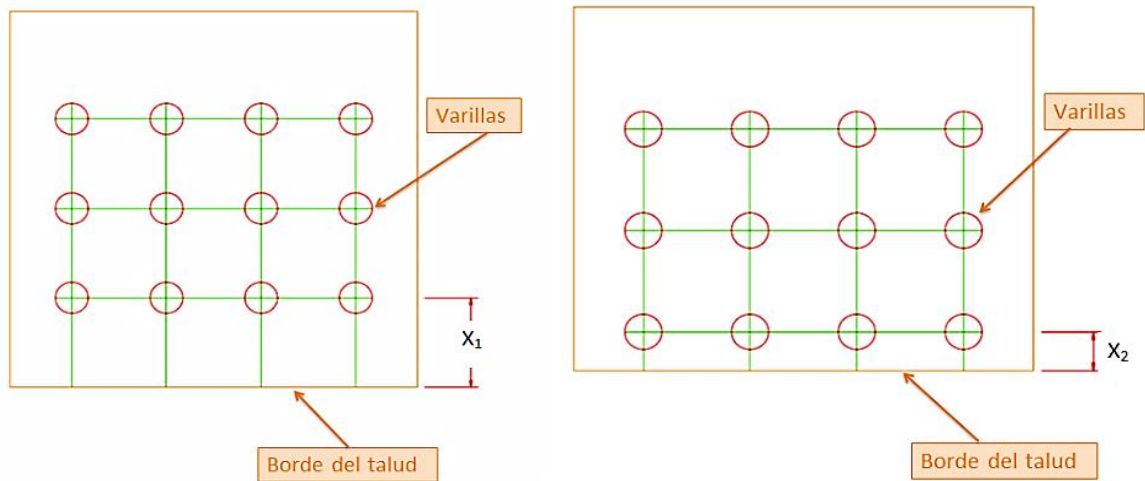


Figura No. 4.7.6 La imagen del costado izquierdo representa la cuadrícula colocada en el talud (en planta), donde la distancia X_1 es la medida del primer eje de varillas hasta el borde del talud en una visita campo y la imagen del costado derecho representa la cuadrícula colocada en el talud (en planta), donde la distancia X_2 es la medida del primer eje de varillas hasta el borde del talud en una visita campo posterior.

Fuente: EL AUTOR, 2017

Para verificar los cambios en el eje "Y" (con respecto a los cambios en la profundidad), se medirá con una cinta métrica con la longitud suficiente para abarcar la profundidad del talud. Estas profundidades se medirán en cada eje de la cuadrícula donde se hayan colocado las varillas, de la siguiente manera:

$$\Delta y_i \text{ de erosión} = Y_2 - Y_1$$

Dónde:

Δy_i de erosión = Cambio que ha ocurrido en el talud debido a la erosión o azolvamiento en el eje Y, entre dos visitas consecutivas al lugar.

Y_1 = Profundidad registrada entre el borde del talud (en la dirección de cada eje de la cuadrícula de varillas) hasta el pie del mismo en una visita de monitoreo.

Y_2 = Profundidad registrada entre el borde del talud (en la dirección de cada eje de la cuadrícula de varillas) hasta el pie del mismo en una visita de monitoreo posterior a la profundidad registrada como Y_1 .

Observaciones:

- Si el resultado obtenido al calcular el **Δy_i de erosión** tiene signo (-), es decir que $Y_1 > Y_2$, significa que entre dos visitas consecutivas, el talud experimentó AZOLVAMIENTO en el eje donde se registró la profundidad inicial (Ver figura No. 4.7.7).

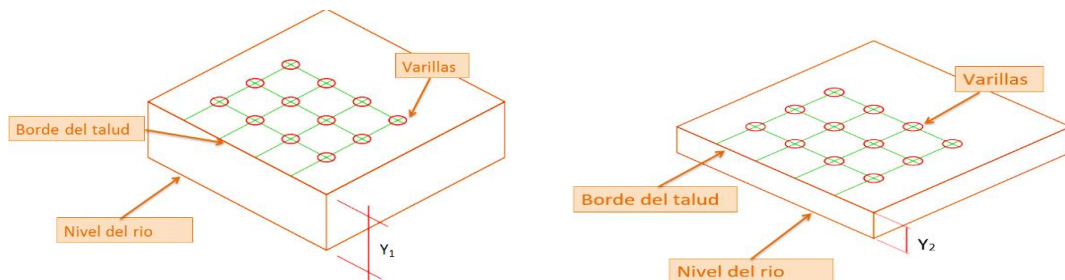


Figura No. 4.7.7 La imagen del costado izquierdo representa la cuadrícula colocada en el talud, donde la distancia Y_1 es la medida del borde del talud hasta el nivel del río en una visita campo y la imagen del costado derecho representa la cuadrícula colocada en el talud, donde la distancia Y_2 es la medida del borde del talud hasta el nivel del río en una visita campo posterior.

Fuente: EL AUTOR, 2017

- Si el resultado obtenido al calcular él **Δy_i de erosión** tiene signo (+), es decir que $Y_1 < Y_2$, significa que entre dos visitas consecutivas, el talud experimentó EROSIÓN en el eje donde se registró la profundidad inicial (Ver figura No. 4.7.8).
- Las visitas a campo para la toma de datos se realizarán aproximadamente cada 15 días o más cercanas entre sí cuando haya ocurrido una precipitación de considerable intensidad o duración durante este intervalo de tiempo. Ya que es preciso evaluar los cambios que ocurren cuando se presentan estos eventos naturales.

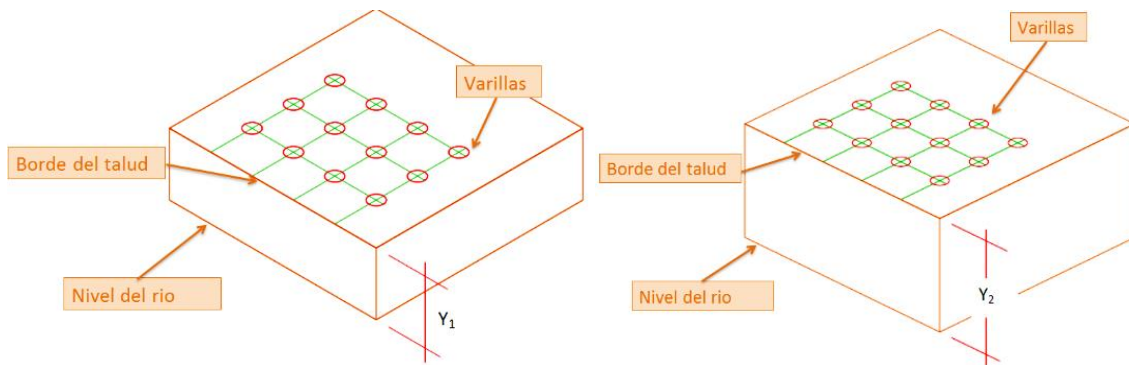


Figura No. 4.7.8 La imagen del costado izquierdo representa la cuadrícula colocada en el talud, donde la distancia Y_1 es la medida del borde del talud hasta el nivel del río en una visita campo y la imagen del costado derecho representa la cuadrícula colocada en el talud, donde la distancia Y_2 es la medida del borde del talud hasta el nivel del río en una visita campo posterior.

Fuente: EL AUTOR, 2017

4.7.1.1 INSTALACIÓN DE CUADRICULAS EN CADA TALUD

La ubicación de los cuatro puntos seleccionados en la zona de estudio se presenta en la Figura No. 4.7.9.

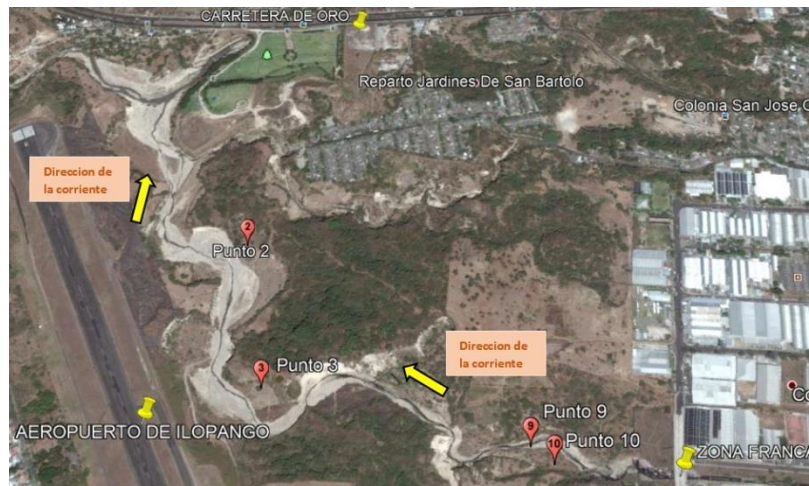


Figura No. 4.7.9 Ubicación de los cuatro puntos seleccionados en la zona de estudio (Quebrada El Arenal Seco).

Fuente: EL AUTOR, apoyado en Google Earth

A continuación, se presentan las cuadrículas que fueron instaladas en puntos seleccionados, la línea base fue referenciada a un punto fijo del lugar, el cual debe tener la menor probabilidad de verse afectado por los procesos erosivos, ya que, este servirá de referencia por si por alguna causa, se pierde algún punto.

➤ **PUNTO No. 10 TALUD ZONA FRANCA III**

La Figura No. 4.7.10 fue tomada desde la obra de protección de la Zona Franca de San Bartolo, en ella se observa el PUNTO No. 10 y el sector donde fue instalada la cuadrícula; en la Figura No. 4.7.11 se presenta un esquema de la cuadrícula ya instalada en el talud.



Figura No. 4.7.10 Vistas de Talud Zona Franca III, En la imagen del costado izquierdo se aprecia el Punto No. 10 Talud Zona Franca III con una vista en dirección Poniente y en la imagen del costado derecho se aprecia el mismo Talud con una vista en dirección Sur
Fuente: EL AUTOR, fotografías tomadas el 28/07/2017

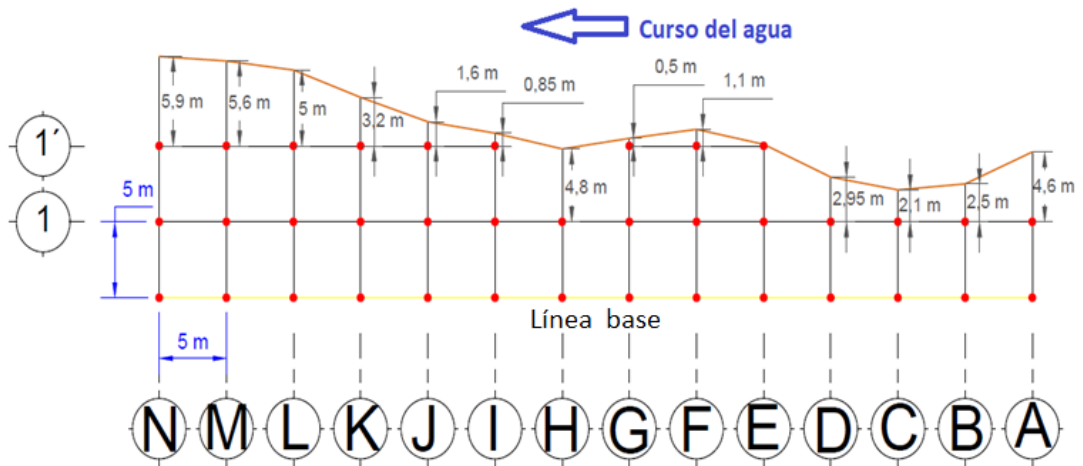


Figura No. 4.7.11 Cuadrícula instalada en el PUNTO No. 10 ZONA FRANCA TALUD III, los puntos rojos representan las varillas colocadas, la línea amarilla representa la línea base y la línea café es el borde del talud.
Fuente: EL AUTOR, 2017

En dirección paralela a la línea base se colocaron 2 ejes más, denominados eje 1 y 1'; en dirección perpendicular a la línea base (a cada 5m) se colocaron 14 ejes nombrados con las letras A, B, C,..., y N respectivamente.

➤ **PUNTO No. 9 TALUD ZONA FRANCA II**

Este talud esta contiguo al TALUD ZONA FRANCA III PUNTO No. 10 y el propósito de monitorear este punto es medir los cambios que presenta la sección transversal del cauce de la Quebrada EL Arenal Seco (ver Figura No. 4.7.12), durante el año 2017.

Tomando como referencia la dirección del flujo del agua se colocaron en la dirección perpendicular 3 ejes nombrados con letras (N, O, y P respectivamente), la línea base está en dirección perpendicular a la corriente de agua (eje N). Cada eje posee una separación entre sí de 10 m, con la finalidad de estudiar una mayor área.

Cada sección de este punto y la distribución de la cuadrícula, se puede apreciar en las Figuras No. 4.7.13, 4.7.14 y 4.7.15.



Figura No. 4.7.12 Sección transversal de la quebrada el Arenal Seco, donde se encuentra ubicado el PUNTO No. 9 TALUD ZONA FRANCA II.

Fuente: EL AUTOR, fotografía tomada el 28/07/2017

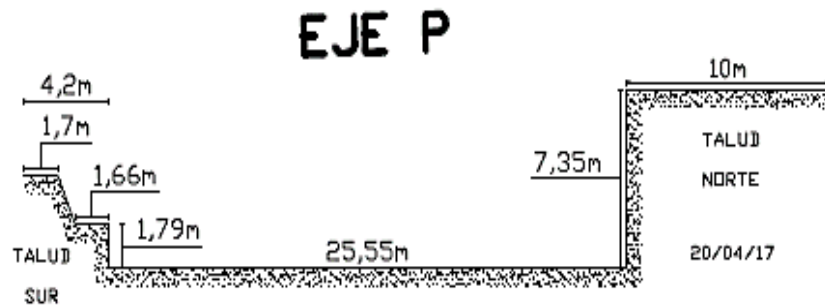
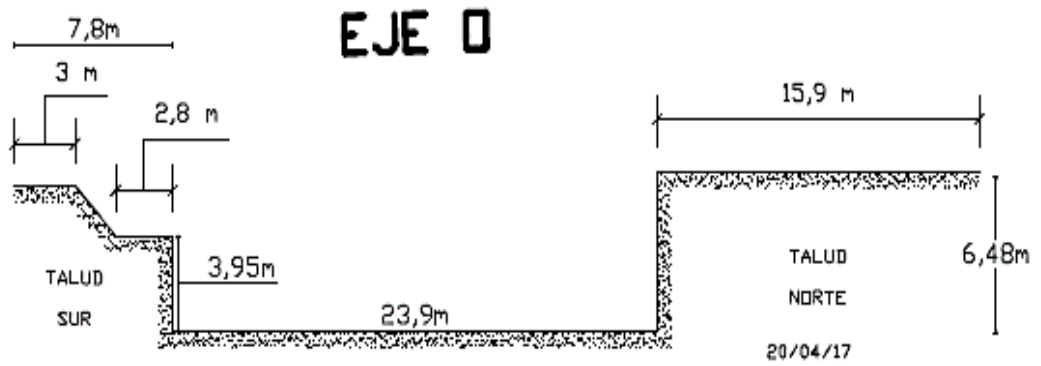
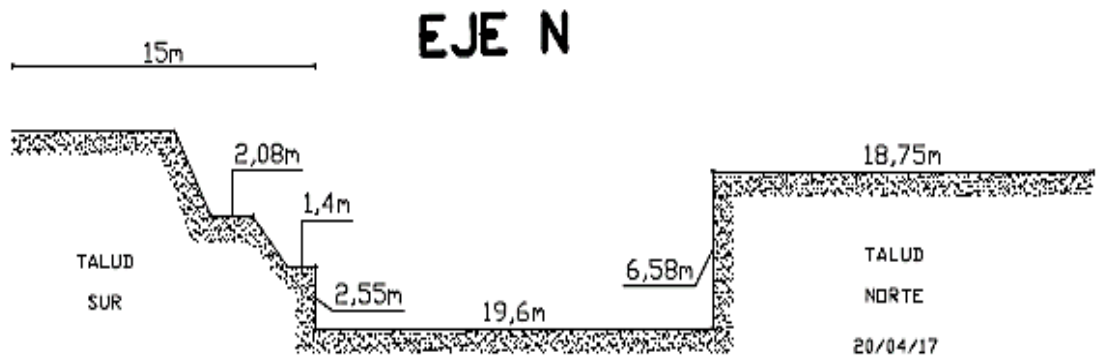


Figura No. 4.7.13, 4.7.14, 4.7.15 Sección transversal del PUNTO No. 9 TALUD ZONA FRANCA II
Fuente: EL AUTOR, 2017

➤ **PUNTO No. 3 TALUD AEROPUERTO II**

Tomando como referencia la dirección del flujo del agua y el borde del talud, se colocaron 2 ejes paralelos, en donde, resalta una línea que para esta investigación se denominará línea base (ver Figura No. 4.7.17) y el eje restante fue denominado eje 1. En la dirección perpendicular al flujo se colocaron 12 ejes nombrados con letras (A, B, C,..., y L respectivamente).



Figura No. 4.7.16 Imagen del costado izquierdo muestra una vista frontal del PUNTO No. 3 TALUD AEROPUERTO II y la imagen del costado derecho muestra una vista superior del mismo talud.
Fuente: EL AUTOR, fotografías tomadas el 28/07/2017

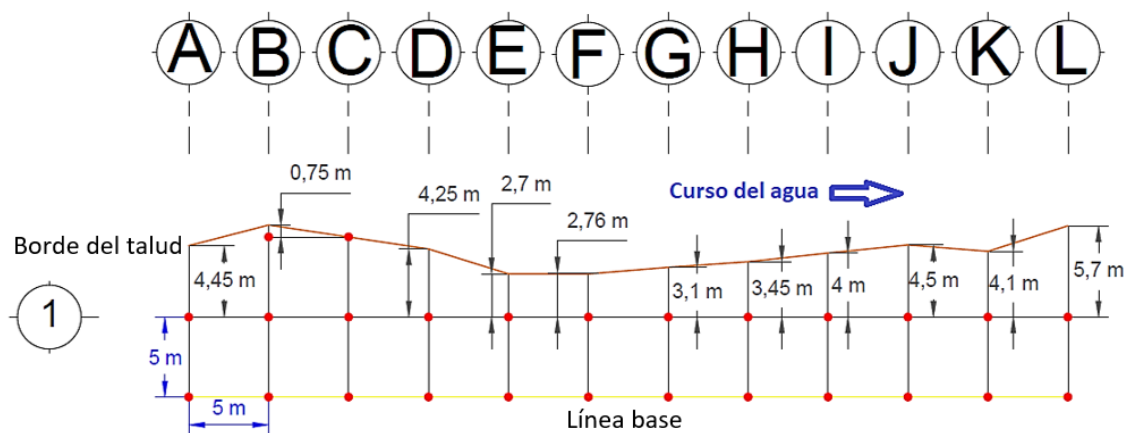


Figura No. 4.7.17 Cuadrícula instalada en el PUNTO No. 3 TALUD AEROPUERTO II, los puntos rojos representan las varillas colocadas, la línea amarilla representa la línea base y la línea café es el borde del talud.
Fuente: EL AUTOR, 2017

➤ **PUNTO No. 2 TALUD AEROPUERTO I**

La Figura No. 4.7.18 muestra el sector del talud donde fue colocada la cuadrícula, en la dirección del flujo del agua y al borde del talud, se colocaron 2 ejes paralelos, uno de estos es la línea base; los ejes perpendiculares colocados fueron 11 nombrados con letras (A, B, C,..., y K respectivamente). (Ver Figura No. 4.7.19).



Figura No. 4.7.18 Imagen del costado derecho muestra una vista frontal del PUNTO No. 2 TALUD AEROPUERTO I
Fuente: EL AUTOR, fotografía tomada el 11/07/2017

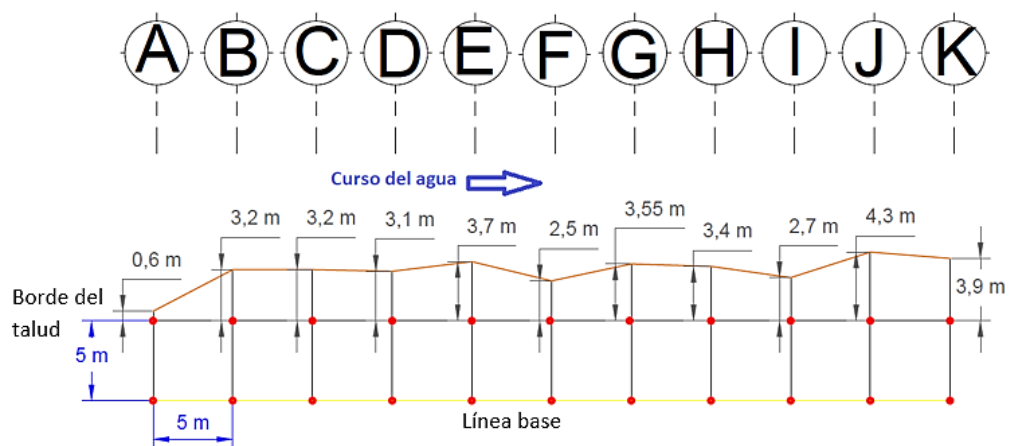


Figura No. 4.7.19 Cuadrícula instalada en el PUNTO No.2 TALUD AEROPUERTO I, los puntos rojos representan las varillas colocadas, la línea amarilla representa la línea base y la línea café es el borde del talud.
Fuente: EL AUTOR, 2017

4.7.2 INSTALACIÓN DE EQUIPO DE REFERENCIA PARA TÉCNICA DEL GPS DE DOBLE FRECUENCIA

Para esta técnica es necesario obtener un punto fijo de referencia, este debe ser un punto de coordenadas conocidas que será llamado estación de referencia, es recomendable que se encuentre a una altura superior de cualquiera de los puntos a medir y una distancia no mayor de 10 km de ellos. Si no existe un punto con coordenadas conocidas en el lugar, puede llevarse a cabo una medición con el GPS utilizando el método estático relativo estándar, y así, obtener un punto con coordenadas del lugar (Ver Figura No. 4.7.20); que pueda ser utilizado para la técnica de monitoreo del GPS seleccionada (Cinemático en Tiempo Real RTK).



*Figura No. 4.7.20 Colocación del receptor fijo en la estación de referencia de coordenadas conocidas
Fuente: EL AUTOR, fotografía tomada el 31/08/2017*

Además se requerirán, receptores móviles, que serán ubicados en los puntos instalados en cada talud y también en el borde de los mismos (Ver Figura No. 4.7.21).



*Figura No. 4.7.21 Colocación del receptor móvil en los puntos ubicados en cada talud y en el borde de estos.
Fuente: EL AUTOR, fotografía tomada el 31/08/2017*

4.8 ESTUDIO DE LAS CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DE LOS MATERIALES PRESENTES EN LOS TALUDES

En la Tabla No. 4.8.1, se presentan los ensayos que serán realizados a las muestras de suelo obtenidas de los taludes, para determinar sus propiedades físicas; además, se menciona el tipo de muestra necesaria para llevar a cabo el ensayo de laboratorio correspondiente.

Tipo de ensayo	Norma	Tipo de muestra	Descripción
Contenido de humedad natural	ASTM D-2216	Alterada	Se utiliza para conocer la humedad de los materiales piroclásticos in situ.
Determinación del tamaño de las partículas de suelos	ASTM D-422	Alterada	Se utiliza con la finalidad de clasificar el suelo mediante el sistema SUCS
Determinación de la gravedad específica de los sólidos del suelo	ASTM D- 854	Alterada	Utilizada para calcular las relaciones gravimétricas y granulométricas de un material y para el análisis hidrométrico
Determinación de límites de Atterberg	ASTM D-4318	Alterada	Se utiliza para identificar los estratos que conforman a los taludes en estudio, que poseen plasticidad o no
Peso volumétrico de los suelos	ASTM D- 7263	Inalterada	Se utiliza para determinar la forma en que fueron depositados los distintos estratos que se están investigando (si fue por oleaje o de caída)

Tabla No. 4.8.1 Ensayos de laboratorio que se desarrollarán para obtener las propiedades físicas de los suelos
Fuente: EL AUTOR, 2017

4.8.1 OBTENCIÓN DE MUESTRAS

Las muestras extraídas fueron alteradas e inalteradas y a continuación se presenta el proceso llevado a cabo.

4.8.1.1 MUESTRAS INALTERADAS

Con ayuda de los ingenieros asesores de la Universidad de El Salvador se hizo una selección del lugar más adecuado para extraer las muestras de suelo; en cada talud se delimitaron las unidades de TBJ presentes, y de cada una de ellas se obtuvo una muestra.

En la Figura No. 4.8.1 se muestra el proceso para extraer la muestra de suelo inalterada de cada talud, teniendo siempre en cuenta tomar la altura en que esta fue tomada.



Figura No. 4.8.1 Proceso aplicado para la obtención de muestras inalteradas; en la imagen del costado izquierdo se muestra la selección de la zona del talud donde se extraerá la muestra, en la imagen central se muestra el proceso de tallado para dar una forma regular a la muestra, y en la imagen del costado derecho se aprecia la forma en que se debe de extraer la muestra para evitar alterar las características de esta.

Fuente: EL AUTOR, fotografía tomada el 11/07/2017

4.8.1.2 MUESTRAS ALTERADAS

Por parte de los asesores fueron seleccionados los lugres más adecuados en cuanto a la accesibilidad y representatividad, para extraer este tipo de muestras. No es necesario que la muestra tenga todas las propiedades que posee en situ, por lo que, la muestra se puede obtener de una manera más sencilla como la que se aprecia en la Figura No. 4.8.2.



Figura No. 4.8.2 Obtención de muestra alterada

Fuente: EL AUTOR, fotografía tomada el 11/07/2017

4.8.2 RESULTADOS DE LABORATORIO

Esta sección se ha destinado a presentar los resultados, de los ensayos de laboratorios que se llevaron a cabo en esta investigación.

4.8.2.1 PUNTO No. 10 TALUD ZONA FRANCA III

Se presentan los resultados de los parámetros analizados al **PUNTO No. 10 ZONA FRANCA III** (ver Tabla No. 4.8.2, 4.8.3, 4.8.4, y 4.8.5. Además en las Figuras No. 4.8.3 y 4.8.4 se pueden ver las curvas granulométricas de las diferentes unidades que constituyen este talud.

PUNTO No. 10 TALUD ZONA FRANCA III									
Estrato/Unidad	%ω natural			Gravedad específica			LL	LP	IP
	%ω1	%ω2	%ωprom	G _{s1}	G _{s2}	G _{sprom}			
Deposito aluvial	9.58	10.30	9.94	2.66	2.65	2.66	NP	NP	NP
UF	23.85	23.71	23.78	2.35	2.35	2.35	NP	NP	NP
	24.97	24.78	24.88	2.35	2.2*		NP	NP	NP
Uβ	20.27	20.15	20.21	2.41	2.40	2.41	NP	NP	NP
	21.68	21.86	21.77	2.36*	2.41		NP	NP	NP
UE _{DEPOSITO SECO}	5.71	5.48	5.60	2.40	2.39	2.40	NP	NP	NP
UE _{DEPOSITO HUMEDO}	11.73	11.80	11.76	2.44	2.41	2.43	NP	NP	NP

Tabla No. 4.8.2 Resultados de humedad natural, gravedad específica y límites de Atterberg de cada unidad presente en el TALUD ZONA FRANCA III

Fuente: EL AUTOR, 2017

Estrato/Unidad	Peso volumétrico húmedo (g/cm ³)	Peso volumétrico húmedo promedio (g/cm ³)	Peso volumétrico seco (g/cm ³)	Peso volumétrico seco promedio (g/cm ³)
Deposito aluvial	1.15	1.15	1.08	1.08
UF	1.65	1.5	1.33	1.2
	1.34		1.07	
Uβ	2.09	2.1	1.74	1.7
	2.02		1.66	
UE _{DEPOSITO SECO}	1.25	1.25	1.18	1.18
UE _{DEPOSITO HUMEDO}	1.67	1.67	1.49	1.49

Tabla No. 4.8.3 Resultados de pesos volumétricos húmedos y secos de cada unidad presente en el TALUD ZONA FRANCA III

Fuente: EL AUTOR, 2017

Unidades / No de malla	Deposito Aluvial		UNIDAD F				UNIDAD BETA			
	DA		F1		F2		β1		β2	
	Tamaño (mm)	% que pasa	Tamaño (mm)	% que pasa	Tamaño (mm)	% que pasa	Tamaño (mm)	% que pasa	Tamaño (mm)	% que pasa
3/4"	19	100	19	95.3	19	98.5	19	-	19	-
3/8"	9.5	96.87	9.5	88.6	9.5	96.7	9.5	-	9.5	-
4	4.75	92.34	4.75	80.8	4.75	90.2	4.75	100.0	4.75	-
8	2.36	80.57	2.36	72.5	2.36	83.5	2.36	99.8	2.36	-
10	2	80.57	2	70.3	2	81.5	2	99.6	2	100.0
16	1.18	68.12	1.18	65.5	1.18	78.0	1.18	98.9	1.18	99.9
30	0.6	41.57	0.6	57.2	0.6	70.9	0.6	96.6	0.6	99.6
50	0.3	14.65	0.3	46.5	0.3	61.4	0.3	90.9	0.3	98.0
100	0.15	4.59	0.15	37.3	0.15	51.2	0.15	81.8	0.15	90.6
200	0.075	2.63	0.075	29.9	0.075	44.4	0.075	65.9	0.075	74.4
HIDROMETRÍA			0.03454040	5.8	0.034403083	9.4	0.035390894	15.0	0.034422500	26.3
			0.02213594	5.1	0.022657719	8.0	0.022717262	12.2	0.022140382	23.1
			0.01318282	3.5	0.013422933	5.6	0.013163598	10.8	0.013076651	16.8
			0.00947491	2.5	0.009633118	4.6	0.009375277	9.4	0.009304693	15.2
			0.00679618	1.9	0.006958276	3.7	0.006678005	6.8	0.006581799	13.8
			0.00333299	1.1	0.003287326	3.1	0.00325859	5.0	0.003213950	10.4
			0.00142057	0.8	0.001415389	2.2	0.001385107	3.9	0.001381673	7.3

Tabla No. 4.8.4 Resultados granulometricos de unidades presentes en TALUD ZONA FRANCA III, (metodo mecanico y húmedo)

Fuente: EL AUTOR, 2017

unidades / No de malla	UNIDAD E _(deposito seco)		UNIDAD E _(deposito húmedo)	
	UE _(deposito seco)		UE _(deposito húmedo)	
	tamaño (mm)	% que pasa	tamaño (mm)	% que pasa
3/4"	19	99.4	19	-
3/8"	9.5	96.3	9.5	-
4	4.75	90.0	4.75	-
8	2.36	79.8	2.36	-
10	2	76.3	2	-
16	1.18	69.1	1.18	100.0
30	0.6	50.5	0.6	93.5
50	0.3	22.0	0.3	81.4
100	0.15	8.7	0.15	74.7
200	0.075	7.0	0.075	70.6
HIDROMETRÍA	0.035876388	0.5	0.033740181	27.6
	0.022826440	0.5	0.021599938	24.6
	0.013164257	0.5	0.012717699	20.2
	0.009341254	0.4	0.009095942	17.2
	0.006643920	0.3	0.006506302	14.4
	0.003261334	0.2	0.003173569	11.2
	0.001379266	0.2	0.001370835	6.8

Tabla No. 4.8.5 Resultados granulometricos de unidades presentes en TALUD ZONA FRANCA III, (metodo mecanico y húmedo)
Fuente: EL AUTOR, 2017

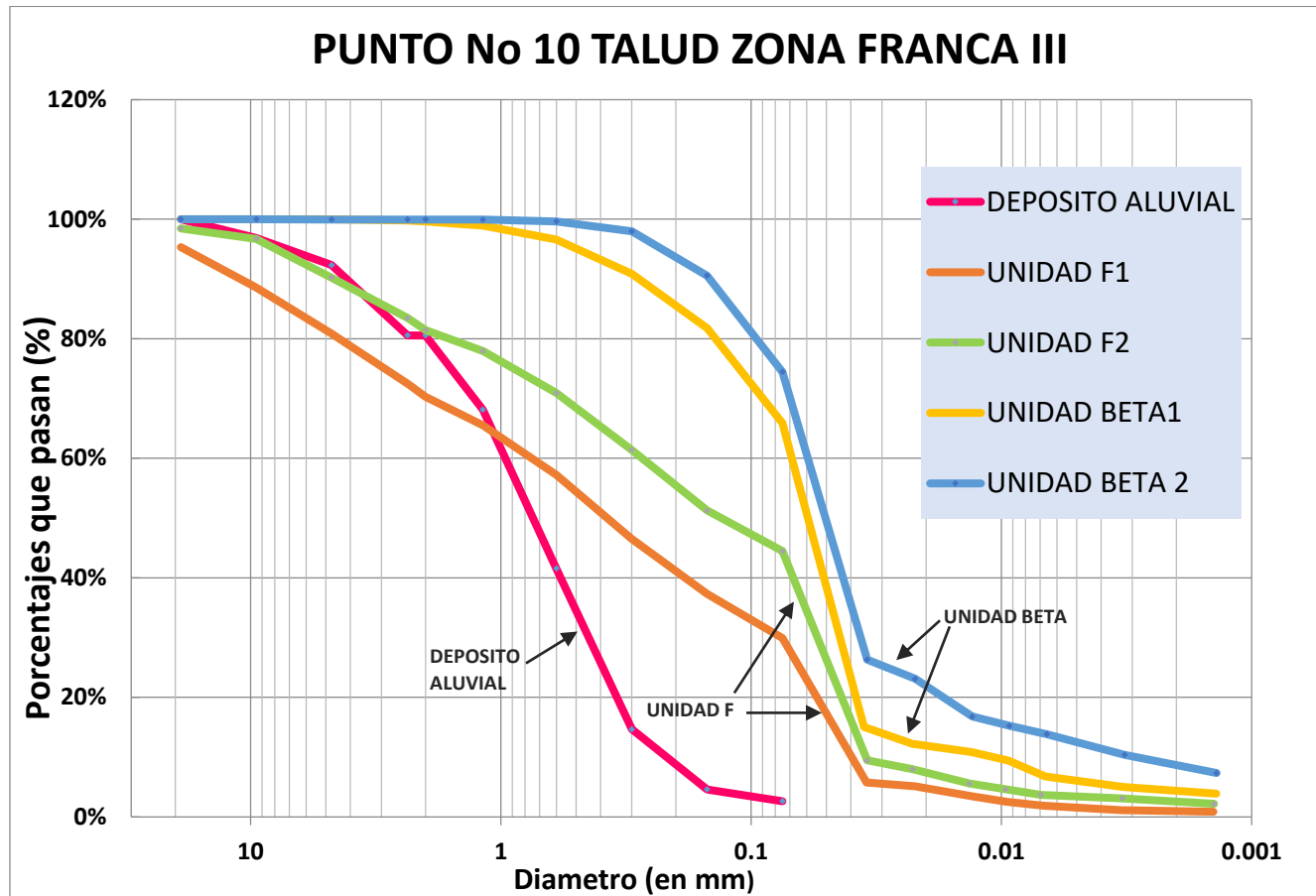


Figura No. 4.8.3 Curvas granulométricas de las unidades F, Beta y Deposito aluvial
 Fuente: EL AUTOR, 2017

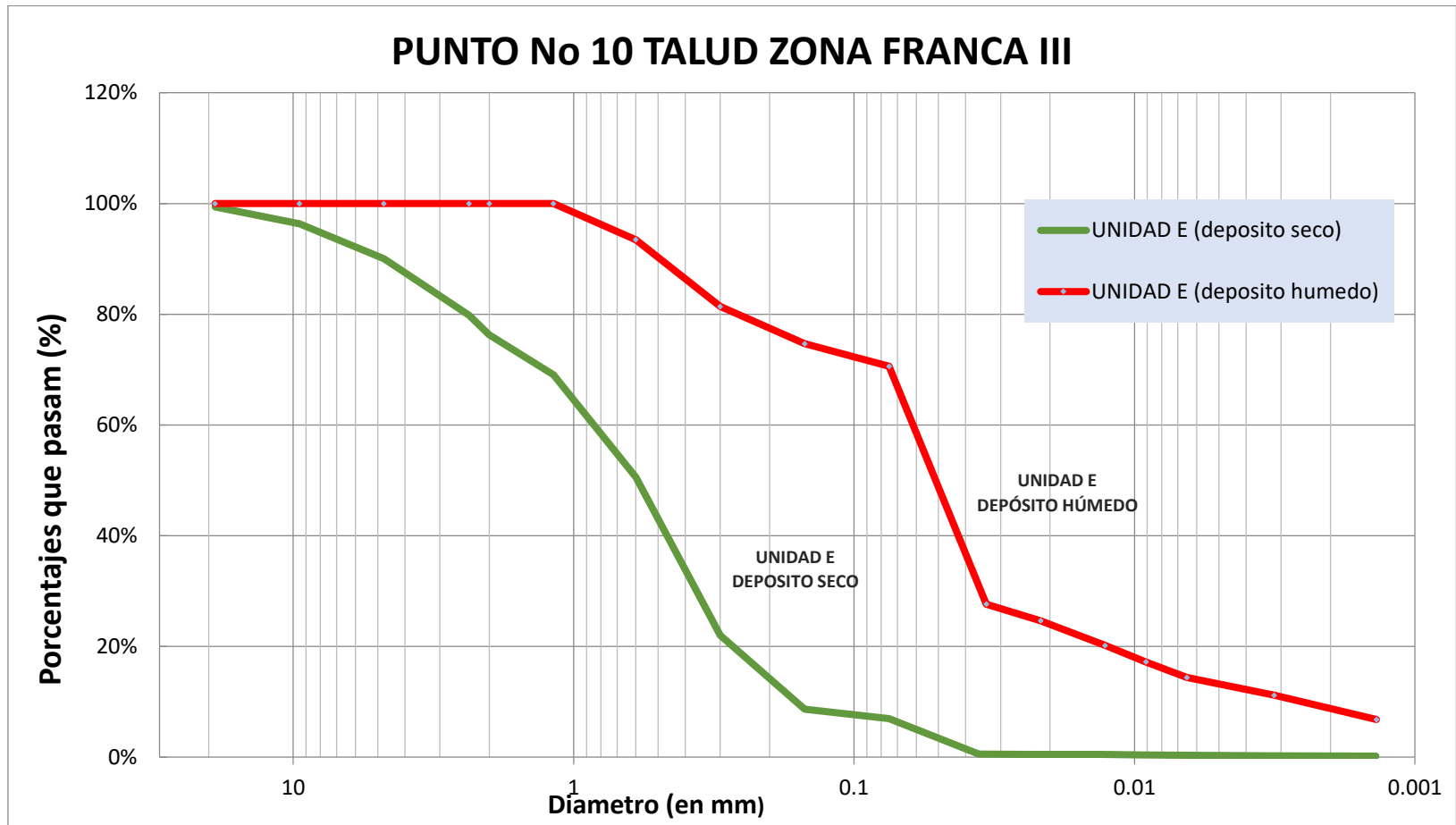


Figura No. 4.8.4 Curvas granulométricas de las unidades E (deposito seco) y E (deposito húmedo)

Fuente: EL AUTOR, 2017

4.8.2.2 PUNTO No. 9 TALUD ZONA FRANCA II

Se presentan los resultados de los parámetros analizados al **PUNTO No. 9 ZONA FRANCA II** (ver Tabla No. 4.8.6, 4.8.7, y 4.8.8. Además, se pueden ver las curvas granulométricas de las diferentes unidades de este talud, en la gráfica de la Figura No. 4.8.5).

PUNTO No. 9 TALUD ZONA FRANCA II									
Estrato/Unidad	%ω natural			Gravedad específica			LL	LP	IP
	%ω1	%ω2	%ωprom	G _{s1}	G _{s2}	G _s prom			
Deposito aluvial	9.58	10.30	9.94	2.66	2.65	2.66	NP	NP	NP
U_EDEPOSITO SECO	7.43	7.17	7.30	2.42	2.40	2.41	NP	NP	NP
U_EDEPOSITO HUMEDO	11.98	12.08	12.03	2.50	2.51	2.51	NP	NP	NP
U_α	10.65	10.00	10.32	2.32	2.33	2.33	NP	NP	NP

Tabla No. 4.8.6 Resultados de humedad natural, gravedad específica y límites de Atterberg de cada unidad presente en el TALUD ZONA FRANCA II

Fuente: EL AUTOR, 2017

Estrato/Unidad	Peso volumétrico húmedo (g/cm ³)	Peso volumétrico seco (g/cm ³)
Deposito aluvial	1.15	1.05
U_EDEPOSITO SECO	1.25	1.16
U_EDEPOSITO HUMEDO	1.67	1.49
U_α	1.75	1.59

Tabla No. 4.8.7 Resultados de pesos volumétricos húmedos y secos de cada unidad presente en el TALUD ZONA FRANCA II

Fuente: EL AUTOR, 2017

Unidades / No de malla	Deposito Aluvial		UNIDAD E _(deposito seco)		UNIDAD E _(deposito húmedo)		UNIDAD ALFA	
	DA		UE _(deposito seco)		UE _(deposito húmedo)		U α	
	tamaño (mm)	% que pasa	tamaño (mm)	% que pasa	tamaño (mm)	% que pasa	tamaño (mm)	% que pasa
3/4"	19	100	19	99.4	19	-	19	99.2
3/8"	9.5	94.0	9.5	96.3	9.5	-	9.5	97.5
4	4.75	90.1	4.75	90.0	4.75	-	4.75	93.0
8	2.36	81.1	2.36	79.8	2.36	-	2.36	87.5
10	2	77.9	2	76.3	2	-	2	85.6
16	1.18	64.5	1.18	69.1	1.18	100.0	1.18	81.0
30	0.6	38.1	0.6	50.5	0.6	93.5	0.6	68.4
50	0.3	13.1	0.3	22.0	0.3	81.4	0.3	51.3
100	0.15	4.3	0.15	8.7	0.15	74.7	0.15	36.3
200	0.075	2.5	0.075	7.0	0.075	70.6	0.075	29.5
HIDROMETRÍA			0.035876388	0.5	0.033740181	27.6	0.035779111	4.2
			0.022826440	0.5	0.021599938	24.6	0.022884396	3.6
			0.013164257	0.5	0.012717699	20.2	0.013372697	2.9
			0.009341254	0.4	0.009095942	17.2	0.009591988	2.3
			0.006643920	0.3	0.006506302	14.4	0.006806400	2.0
			0.003261334	0.2	0.003173569	11.2	0.003338999	1.5
			0.001379266	0.2	0.001370835	6.8	0.001416226	1.3

Tabla No. 4.8.8 Resultados granulometricos de unidades presentes en TALUD ZONA FRANCA II, (metodo mecanico y húmedo)
Fuente: EL AUTOR, 2017

PUNTO No. 9 TALUD ZONA FRANCA II

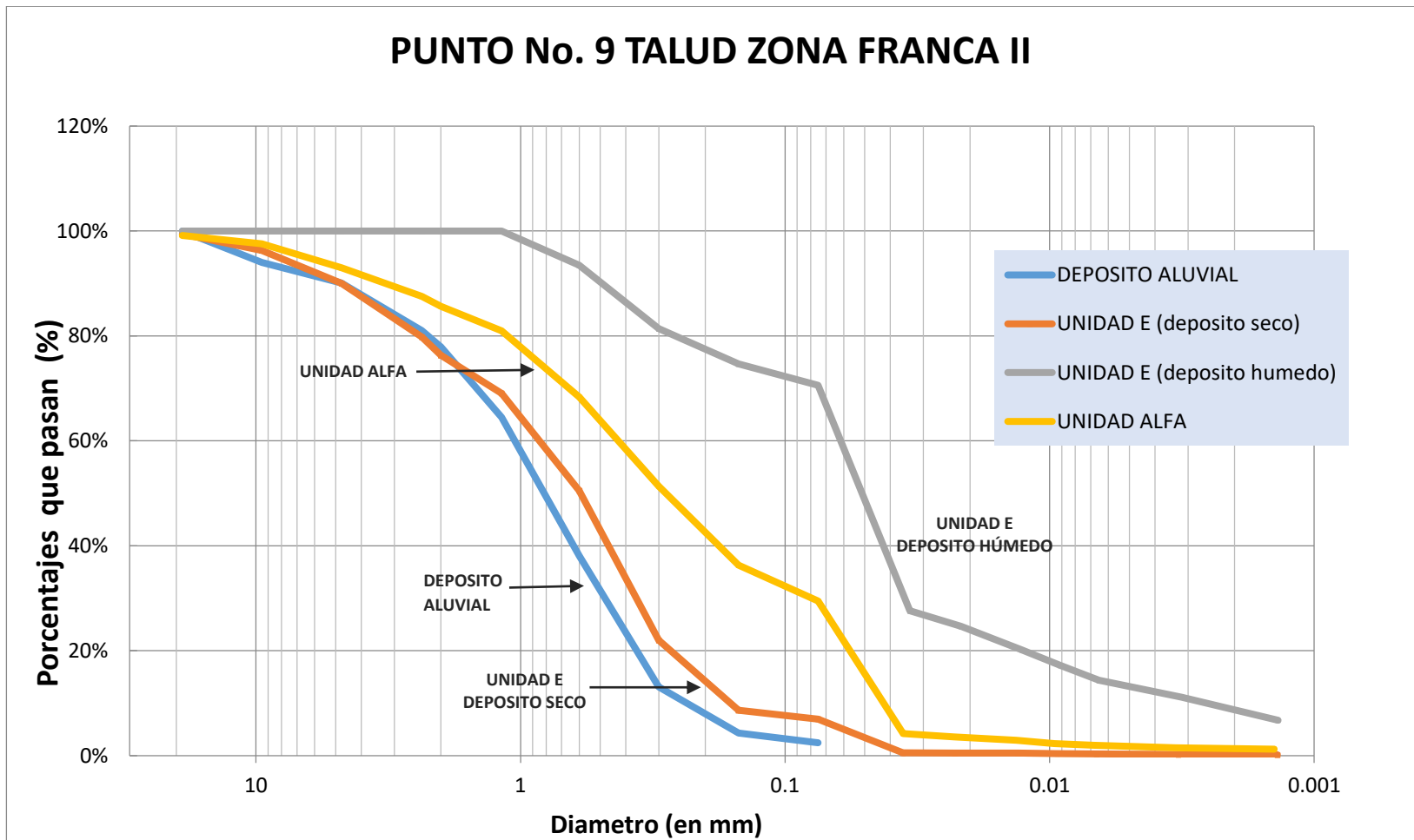


Figura No. 4.8.5 Curvas granulométricas de las unidades Alfa, E (deposito seco), E (deposito húmedo) y Deposito aluvial
Fuente: EL AUTOR, 2017

4.8.2.3 PUNTO No. 3 TALUD AEROPUERTO II

Se presentan los resultados de los parámetros analizados al **PUNTO No. 3 TALUD AEROPUERTO II** (ver Tablas No. 4.8.9, 4.8.10, y 4.8.11. Además, se pueden ver las curvas granulométricas de las diferentes unidades de este talud, en las gráficas de las Figuras No. 4.8.6 y 4.8.7).

PUNTO NO. 3 TALUD AEROPUERTO II									
Estrato/Unidad	%ω natural			Gravedad específica			LL	LP	IP
	%ω1	%ω2	%ωprom	G _{s1}	G _{s2}	G _s prom			
Deposito aluvial	9.58	10.30	9.94	2.66	2.65	2.66	NP	NP	NP
UF	24.97	24.78	24.88	2.35	2.35	2.35	NP	NP	NP
Uβ	25.18	25.78	25.48	2.45	2.46	2.46	NP	NP	NP
UE_{DEPOSITO SECO}	12.74	12.46	12.60	2.48	2.49	2.49	NP	NP	NP
UE_{DEPOSITO HUMEDO}	24.01	24.43	24.22	2.44	2.41	2.44	NP	NP	NP
Uα	9.69	9.91	9.80	2.32	2.33	2.33	NP	NP	NP

Tabla No. 4.8.9 Resultados de humedad natural, gravedad específica y límites de Atterberg de cada unidad presente en el TALUD AEROPUERTO II

Fuente: EL AUTOR, 2017

Estrato/Unidad	Peso volumétrico húmedo (g/cm ³)	Peso volumétrico seco (g/cm ³)
Deposito aluvial	1.15	1.05
UF	1.65	1.32
Uβ	1.86	1.48
UE_{DEPOSITO SECO}	1.25	1.11
UE_{DEPOSITO HUMEDO}	1.96	1.58
Uα	1.75	1.59

Tabla No. 4.8.10 Resultados de pesos volumétricos húmedos y secos de cada unidad presente en el TALUD AEROPUERTO II

Fuente: EL AUTOR, 2017

Unidades / No de malla	Deposito Aluvial		UNIDAD F		UNIDAD BETA		UNIDAD E		UNIDAD E		UNIDAD ALFA	
	DA		UF		U β		UE _(deposito seco)		UE _(deposito húmedo)		U α	
	tamaño (mm)	% que pasa	tamaño (mm)	% que pasa	tamaño (mm)	% que pasa	tamaño (mm)	% que pasa	tamaño (mm)	% que pasa	tamaño (mm)	% que pasa
3/4"	19	100	19	98.5	19	-	19	99.3	19	-	19	100.0
3/8"	9.5	96.87	9.5	96.7	9.5	100.0	9.5	97.0	9.5	-	9.5	99.4
4	4.75	92.34	4.75	90.2	4.75	99.9	4.75	91.5	4.75	-	4.75	97.4
8	2.36	80.57	2.36	83.5	2.36	99.5	2.36	82.3	2.36	-	2.36	93.3
10	2	80.57	2	81.5	2	99.1	2	79.3	2	-	2	91.5
16	1.18	68.12	1.18	78.0	1.18	98.5	1.18	72.2	1.18	100.0	1.18	88.3
30	0.6	41.57	0.6	70.9	0.6	92.1	0.6	48.4	0.6	93.5	0.6	71.4
50	0.3	14.65	0.3	61.4	0.3	73.1	0.3	24.4	0.3	81.4	0.3	54.6
100	0.15	4.59	0.15	51.2	0.15	56.2	0.15	12.0	0.15	74.7	0.15	42.2
200	0.075	2.63	0.075	44.4	0.075	49.6	0.075	8.3	0.075	70.6	0.075	32.9
HIDROMETRÍA			0.03440308	9.4	0.03400692	18.6	0.0368512	0.5	0.03374018	27.6	0.035236	5.9
			0.02265772	8.0	0.0217707	16.5	0.0233320	0.5	0.02159994	24.6	0.022553	5.2
			0.01342293	5.6	0.01281824	13.3	0.0135327	0.4	0.01271770	20.2	0.013353	3.7
			0.00963312	4.6	0.00923653	10.1	0.0096358	0.3	0.00909594	17.2	0.009608	2.7
			0.00695828	3.7	0.00664381	7.0	0.0068529	0.2	0.00650630	14.4	0.006884	2.0
			0.00328733	3.1	0.00331601	3.8	0.0033504	0.2	0.00317357	11.2	0.003399	1.0
			0.00141539	2.2	0.00138814	2.8	0.0014130	0.0	0.00137084	6.8	0.001446	0.2

Tabla No. 4.8.11 Resultados granulometricos de unidades presentes en TALUD AEROPUERTO II, (metodo mecanico y húmedo)

Fuente: EL AUTOR, 2017

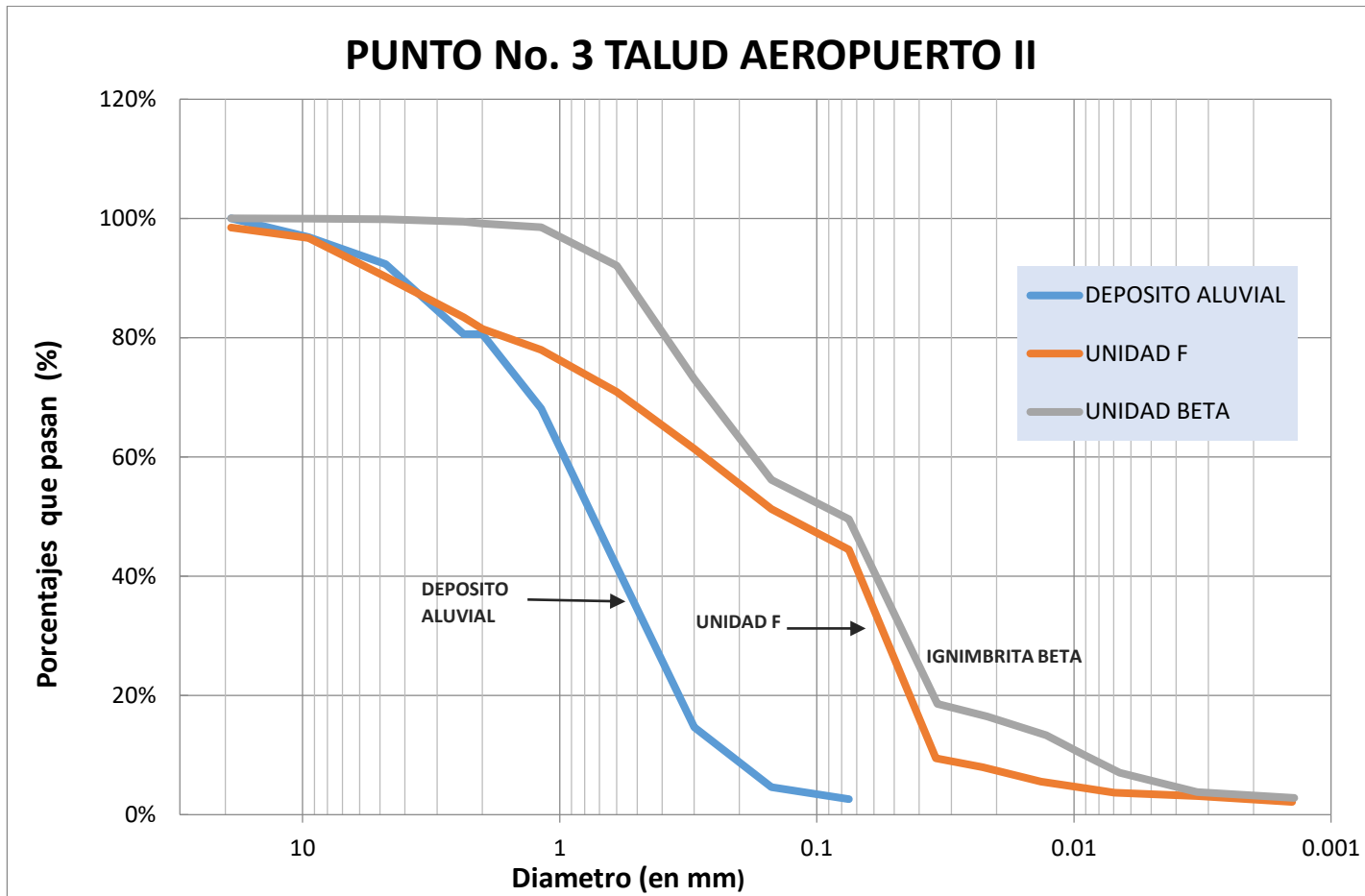


Figura No. 4.8.6 Curvas granulométricas de las unidades F, Beta y Depósito aluvial.

Fuente: EL AUTOR, 2017

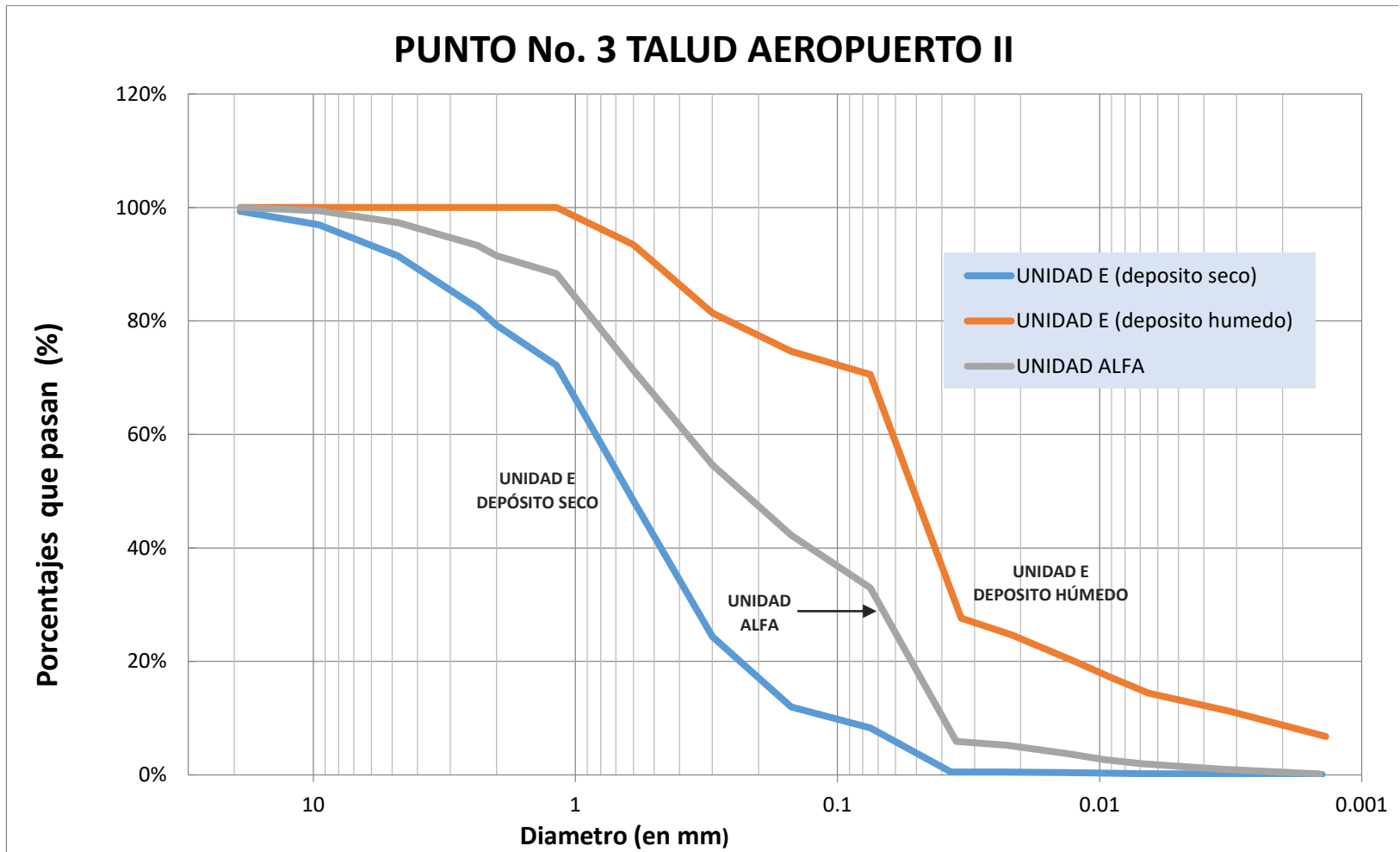


Figura No. 4.8.7 Curvas granulométricas de las unidades E (deposito seco), E (deposito húmedo) e Ignimbrita Alfa
 Fuente: EL AUTOR, 2017

4.8.2.4 PUNTO No. 2 TALUD AEROPUERTO I

Los resultados obtenidos de los ensayos de laboratorio del **PUNTO No. 2 TALUD AEROPUERTO I**, se presentan a continuación en las Tablas No. 4.8.12, 4.8.13, y 4.8.14. Además, se puede ver las curvas granulométricas de las diferentes unidades de este talud, en las gráficas de las Figuras No. 4.8.8 y 4.8.9.

PUNTO No. 2 TALUD AEROPUERTO I									
Estrato/Unidad	%ω natural			gravedad específica			LL	LP	IP
	%ω1	%ω2	%ωprom	G _{s1}	G _{s2}	G _{sprom}			
Uβ	16.92	16.27	16.60	2.41	2.40	2.41	NP	NP	NP
UE_{DEPOSITO SECO}	12.74	12.46	12.60	2.48	2.49	2.49	NP	NP	NP
UE_{DEPOSITO HUMEDO}	24.01	24.43	24.22	2.44	2.41	2.44	NP	NP	NP
Uα	9.69	9.91	9.80	2.32	2.33	2.33	NP	NP	NP
UD	11.43	11.50	11.47	2.32	2.32	2.32	NP	NP	NP
UC	15.33	15.74	15.54	2.37	2.36	2.37	NP	NP	NP

Tabla No. 4.8.12 Resultados de humedad natural, gravedad específica y límites de atterberg de cada unidad presente en el TALUD AEROPUERTO I
Fuente: EL AUTOR, 2017

Estrato/Unidad	Peso volumétrico húmedo (g/cm ³)	Peso volumétrico seco (g/cm ³)
Uβ	1.85	1.59
UE_{DEPOSITO SECO}	1.25	1.11
UE_{DEPOSITO HUMEDO}	1.96	1.58
Uα	1.75	1.59
UD	1.41	1.26
UC	1.37	1.18

Tabla No. 4.8.13 Resultados de pesos volumétricos húmedos y secos de cada unidad presente en el TALUD AEROPUERTO I
Fuente: EL AUTOR, 2017

Unidades / No de malla	UNIDAD BETA		UNIDAD E		UNIDAD E		UNIDAD ALFA		UNIDAD D		UNIDAD C	
	U β		UE _(deposito seco)		UE _(deposito húmedo)		U α		UD		UC	
	tamaño (mm)	% que pasa	tamaño (mm)	% que pasa	tamaño (mm)	% que pasa	tamaño (mm)	% que pasa	tamaño (mm)	% que pasa	tamaño (mm)	% que pasa
3/4"	19	-	19	99.3	19	-	19	100.0	19	100.0	19	100.0
3/8"	9.5	100.0	9.5	97.0	9.5	-	9.5	99.4	9.5	99.9	9.5	99.8
4	4.75	99.9	4.75	91.5	4.75	-	4.75	97.4	4.75	99.8	4.75	99.3
8	2.36	99.5	2.36	82.3	2.36	-	2.36	93.3	2.36	99.7	2.36	98.0
10	2	99.1	2	79.3	2	-	2	91.5	2	99.7	2	97.3
16	1.18	98.5	1.18	72.2	1.18	100.0	1.18	88.3	1.18	99.4	1.18	94.5
30	0.6	92.0	0.6	48.4	0.6	93.5	0.6	71.4	0.6	97.8	0.6	88.4
50	0.3	72.4	0.3	24.4	0.3	81.4	0.3	54.6	0.3	92.1	0.3	77.7
100	0.15	53.8	0.15	12.0	0.15	74.7	0.15	42.2	0.15	81.6	0.15	66.2
200	0.075	47.1	0.075	8.3	0.075	70.6	0.075	32.9	0.075	67.7	0.075	54.6
HIDROMETRÍA	0.03470	14.7	0.036851	0.5	0.0337402	27.6	0.035236	5.9	0.036381	14.9	0.03578	11.8
	0.02214	13.6	0.023332	0.5	0.0215999	24.6	0.022553	5.2	0.023288	11.8	0.02291	9.4
	0.01309	9.6	0.013533	0.4	0.0127177	20.2	0.013353	3.7	0.013687	7.4	0.01346	5.9
	0.00936	7.6	0.009636	0.3	0.0090959	17.2	0.009608	2.7	0.009813	4.4	0.00965	3.5
	0.00671	5.6	0.006853	0.2	0.0065063	14.4	0.006884	2.0	0.006939	4.4	0.00682	3.5
	0.00332	3.6	0.003350	0.2	0.0031736	11.2	0.003399	1.0	0.003425	2.8	0.00337	2.2
	0.00139	1.7	0.001413	0.0	0.0013708	6.8	0.001446	0.2	0.001432	1.4	0.00141	1.1

Tabla No. 4.8.14 Resultados granulométricos de unidades presentes en TALUD AEROPUERTO I, (metodo mecanico y húmedo)

Fuente: EL AUTOR, 2017

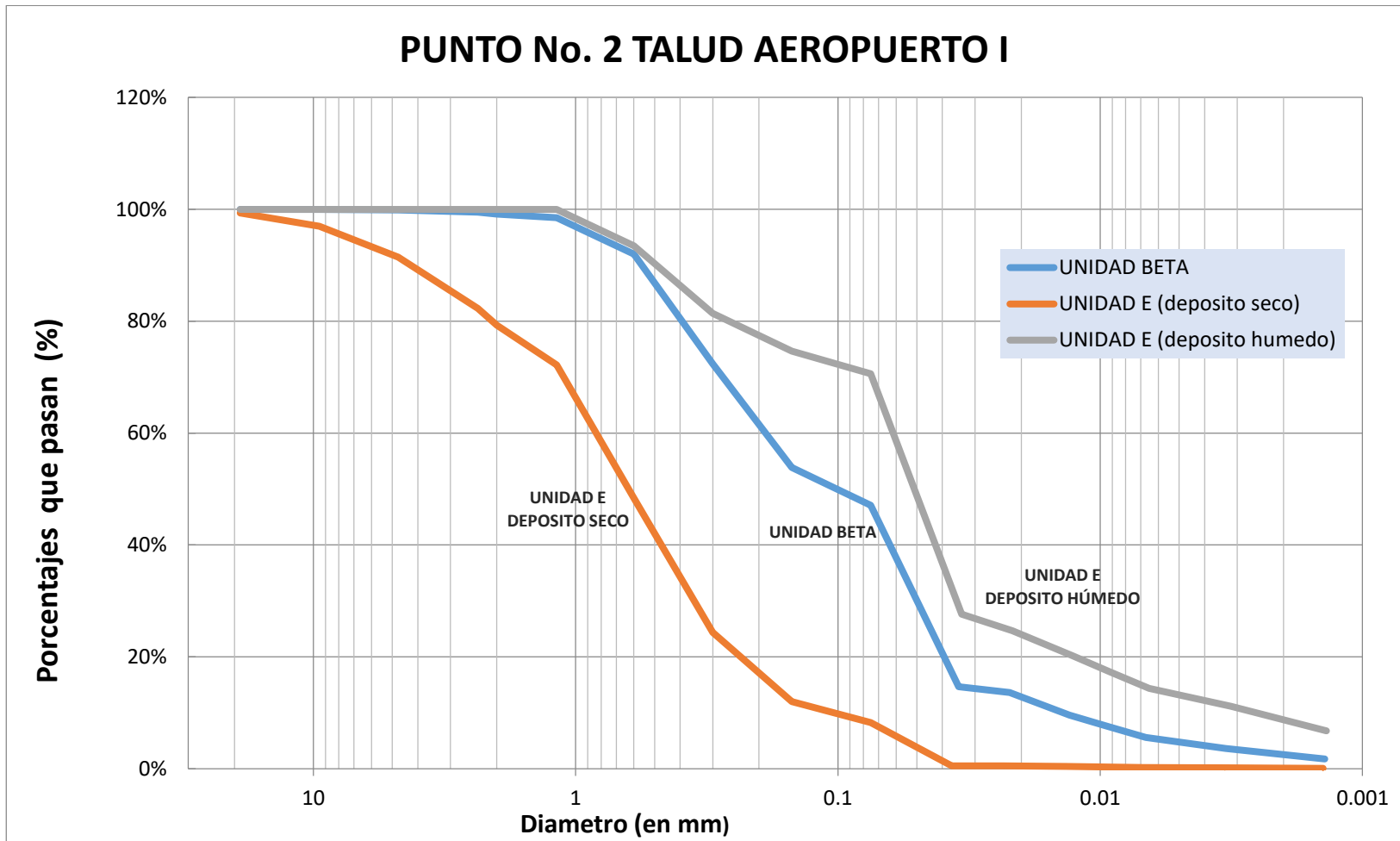


Figura No. 4.8.8 Curvas granulometricas de las unidades E (deposito seco), E (deposito húmedo e Ignimbrita Beta
 Fuente: EL AUTOR, 2017

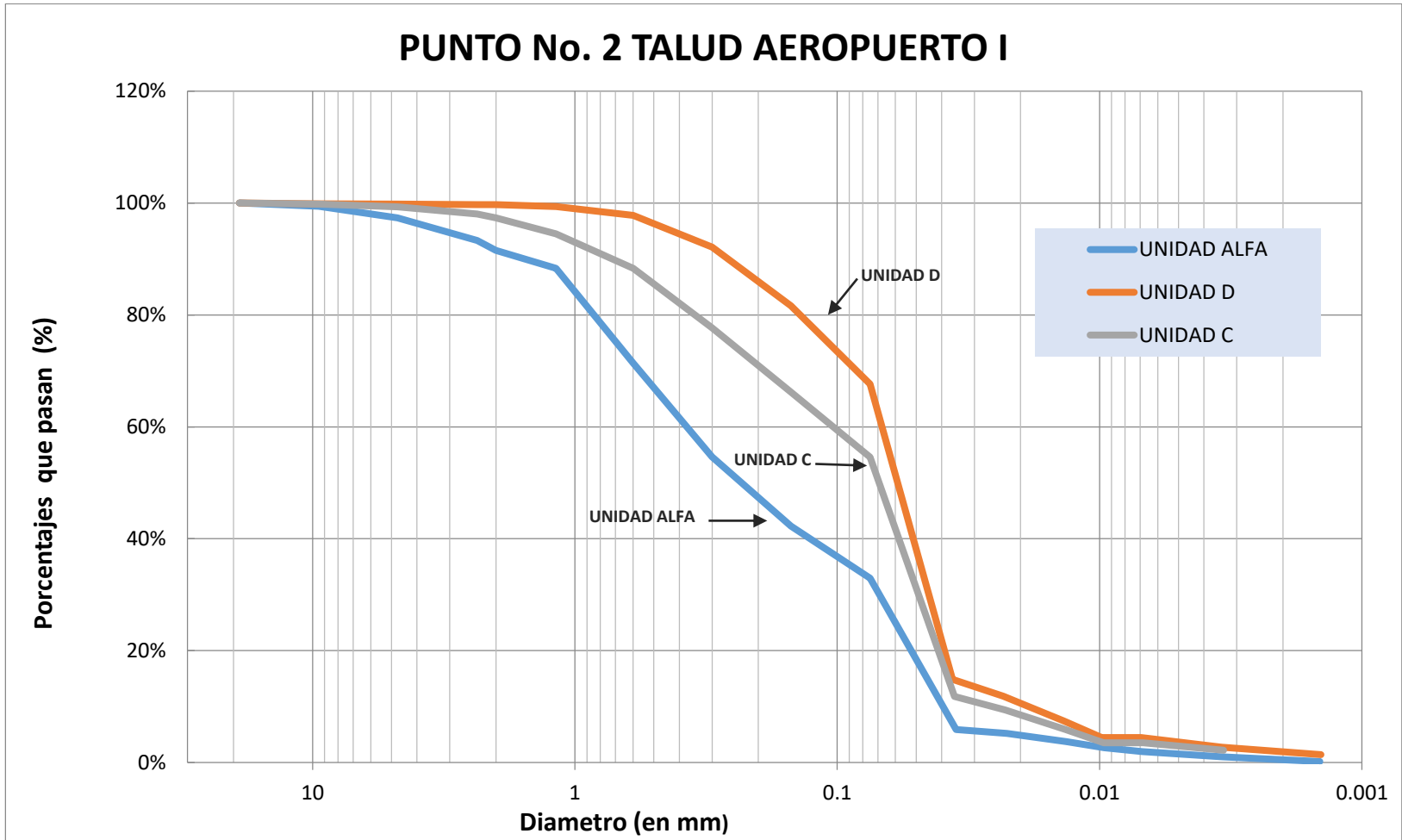


Figura No. 4.8.9 Curvas granulometricas de las unidades C, D e Ignimbrita Alfa
Fuente: EL AUTOR, 2017

4.8.3 COMPARACIÓN DE RESULTADOS GRANULOMÉTRICOS CON OTRAS INVESTIGACIONES

En este apartado se presentan las tablas comparativas en cuanto a la granulometría de las diferentes unidades de la TBJ muestreadas en esta investigación, con las granulometrías realizadas por Walter Hernández en 2004 y Bautista et al, 2016; para las mismas unidades estratigráficas.

Por motivos de abreviación en esta sección se ha designado para los registros granulométricos elaborados por Walter Hernández como WH, y para los registros granulométricos elaborados por Karen & Bautista como KB.

Los resultados granulométricos para este estudio se reportan con el nombre de los taludes en estudio, mientras que para los registros de las granulometrías a comparar (WH y KB) se presentan con el nombre original de dichas investigaciones.

Para la unidad Ignimbrita Beta (β) no hay registros granulométricos; por lo cual, se presentarán solo los datos obtenidos en esta investigación sin compararlos con registros de otro estudio. Esta unidad ha sido determinada por la posición estratigráfica en que fue encontrada y por las propiedades físicas obtenidas en laboratorio. Si se realiza una comparación entre ellas, es notorio la similitud de los registros granulométricos obtenidos en cada talud para esta unidad (Ver Tabla No. 4.13.16).

CUADRO COMPARATIVO DE UNIDADES TBJ, UNIDAD F										
Unidades / No de malla	F1 (WH)		F2 (WH)		F ZF-1 (KB)		TZF III (PUNTO No. 10)		TA II (PUNTO No. 3)	
	tamaño (mm)	% que pasa	tamaño (mm)	% que pasa	tamaño (mm)	% que pasa	tamaño (mm)	% que pasa	tamaño (mm)	% que pasa
3/4"	19	100.0	19	-	19	100.00	19	95.3	19	98.5
3/8"	9.5	90.0	9.5	100	9.5	94.16	9.5	88.6	9.5	96.7
4	4.75	83.0	4.75	97	4.75	78.66	4.75	80.8	4.75	90.2
8	2.36	71.0	2.36	92	2.36	56.96	2.36	72.5	2.36	83.5
10	2	68.5	2	90	2	52.28	2	70.3	2	81.5
16	1.18	61.0	1.18	84	1.18	48.26	1.18	65.5	1.18	78
30	0.6	53.0	0.6	73	0.6	42.23	0.6	57.2	0.6	70.9
50	0.3	36.0	0.3	61	0.3	34.38	0.3	46.5	0.3	61.4
100	0.15	27.0	0.15	45	0.15	27.11	0.15	37.3	0.15	51.2
200	0.075	22.0	0.075	38	0.075	21.1	0.075	29.9	0.075	44.4
HIDROMETRÍA	0.04200	20.0	0.04300	35	0.035792	6.5	0.0345404	5.8	0.03440308	9.4
	0.03000	18.0	0.03000	30	0.023686	4.71	0.02213594	5.1	0.02265772	8
	0.02500	15.0	0.02500	25	0.014099	3.34	0.01318282	3.5	0.01342293	5.6
	0.01500	11.0	0.01800	21	0.010225	2.24	0.00947491	2.5	0.00963312	4.6
	0.01000	8.0	0.01400	17	0.007274	1.46	0.00679618	1.9	0.00695828	3.7
	0.00400	4.0	0.00370	4	0.003175	0.78	0.00333299	1.1	0.00328733	3.1
	0.00170	3.0	0.00170	3	0.001527	0.59	0.00142057	0.8	0.00141539	2.2
							Semejante a F1 WH		Semejante a F2 WH	

Tabla No. 4.8.15 Comparaciones granulométricas de la unidad F de la TBJ obtenidas en esta investigación, con unidad F de Walter Hernandez y Bautista et al. Fuente: EL AUTOR, (2017). Con los resultados obtenidos en el Laboratorio de Suelos y Materiales de la Universidad de el Salvador "Ing. Mario Ángel Guzmán Urbina", Bautista et al., (2016) y Hernández, (2004).

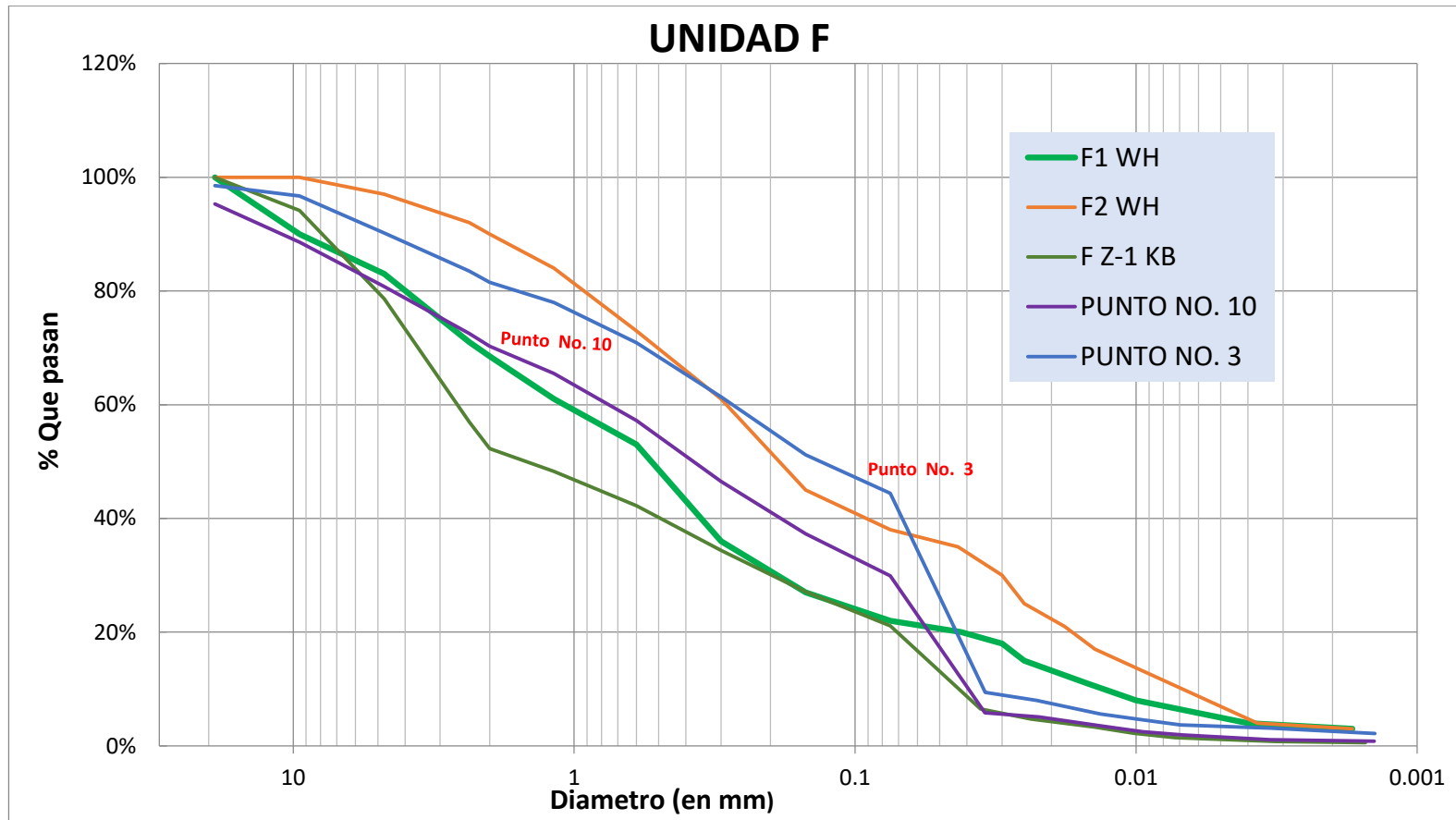


Figura No. 4.8.10 Curvas granulométricas de la unidad F de la TBJ obtenidas en esta investigación, con unidad F de Walter Hernandez y Bautista et al.
Fuente: EL AUTOR, (2017). Con los resultados obtenidos en el Laboratorio de Suelos y Materiales de la Universidad de el Salvador "Ing. Mario Ángel Guzmán Urbina ", Bautista et al., (2016) y Hernández, (2004).

CUADRO COMPARATIVO DE UNIDADES TBJ, UNIDAD β								
Unidades / No de malla	TZF III (PUNTO No. 10)		TZF III (PUNTO No. 10)		TA II (PUNTO No. 3)		TA I (PUNTO No. 2)	
	tamaño (mm)	% que pasa	tamaño (mm)	% que pasa	tamaño (mm)	% que pasa	tamaño (mm)	% que pasa
3/4"	19	-	19	-	19	-	19	-
3/8"	9.5	-	9.5	-	9.5	100.0	9.5	100.0
4	4.75	100.0	4.75	-	4.75	99.9	4.75	99.9
8	2.36	99.8	2.36	-	2.36	99.5	2.36	99.5
10	2	99.6	2	100.0	2	99.1	2	99.1
16	1.18	98.9	1.18	99.9	1.18	98.5	1.18	98.5
30	0.6	96.6	0.6	99.6	0.6	92.1	0.6	92.0
50	0.3	90.9	0.3	98.0	0.3	73.1	0.3	72.4
100	0.15	81.8	0.15	90.6	0.15	56.2	0.15	53.8
200	0.075	65.9	0.075	74.4	0.075	49.6	0.075	47.1
HIDROMETRÍA	0.03539	15.0	0.03442	26.3	0.03400692	18.6	0.0347	14.7
	0.02272	12.2	0.02214	23.1	0.0217707	16.5	0.02214	13.6
	0.01316	10.8	0.01308	16.8	0.01281824	13.3	0.01309	9.6
	0.00938	9.4	0.00930	15.2	0.00923653	10.1	0.00936	7.6
	0.00668	6.8	0.00658	13.8	0.00664381	7.0	0.00671	5.6
	0.00326	5.0	0.00321	10.4	0.00331601	3.8	0.00332	3.6
	0.00139	3.9	0.00138	7.3	0.00138814	2.8	0.00139	1.7

Tabla No. 4.8.16 Comparaciones granulométricas de la unidad β de la TBJ obtenidas en esta investigación
Fuente: EL AUTOR, (2017). Con los resultados obtenidos en el Laboratorio de Suelos y Materiales de la Universidad de el Salvador "Ing. Mario Ángel Guzmán Urbina".

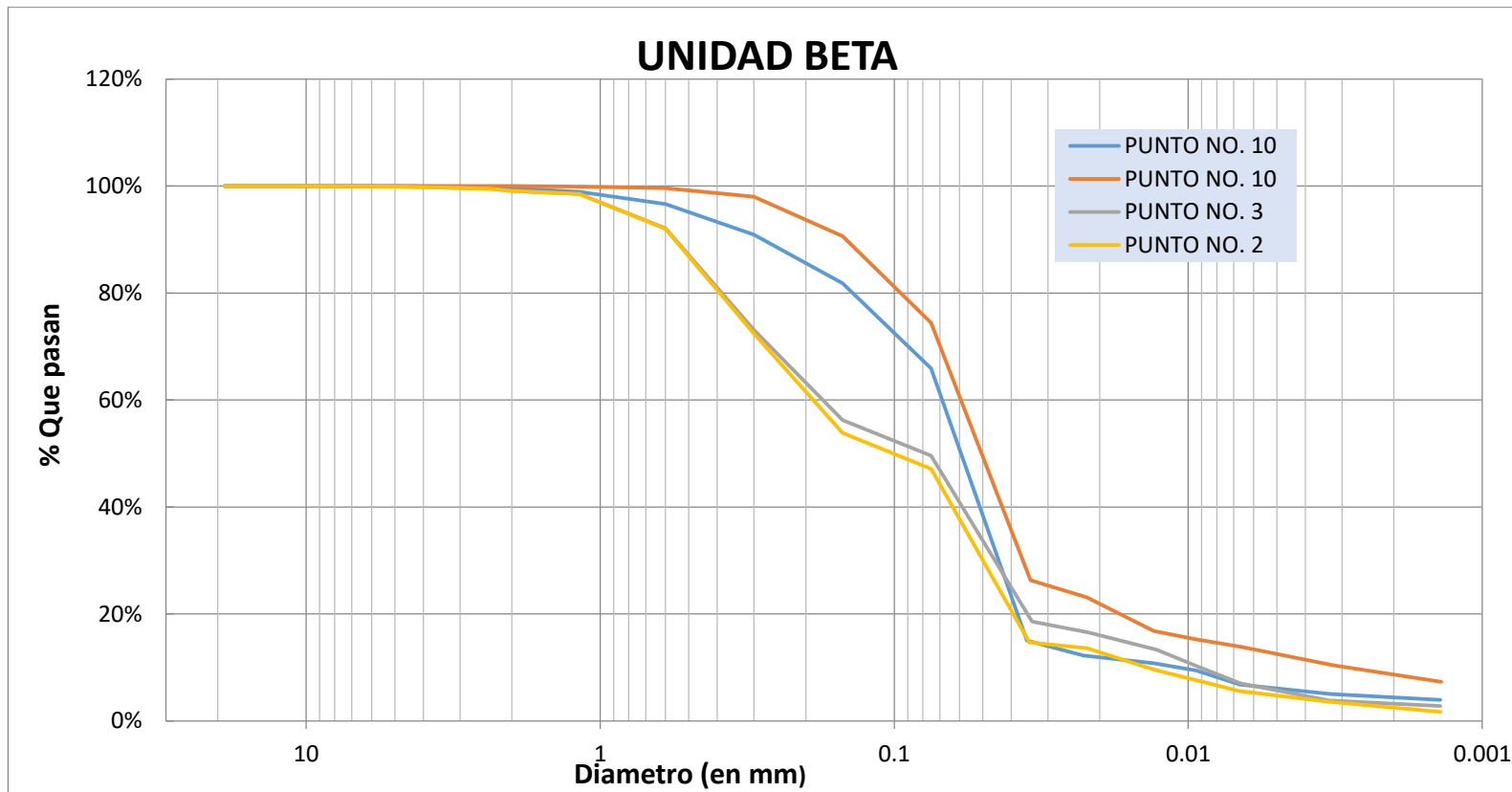


Figura No. 4.8.11 Curvas granulométricas de la unidad F de la TBJ obtenidas en esta investigación.
 Fuente: EL AUTOR, (2017). Con los resultados obtenidos en el Laboratorio de Suelos y Materiales de la Universidad de el Salvador "Ing. Mario Ángel Guzmán Urbina".

CUADRO COMPARATIVO DE UNIDADES TBJ, UNIDAD E (DEPOSITO SECO)												
Unidades / No de malla	E1 WH		E2 WH		E SECO 1 ZONA FRANCA II E1-KB		E SECO 2 ZONA FRANCA II E2-KB		TZF II (PUNTO No. 9)		TA II (PUNTO No. 3)	
	tamaño (mm)	% que pasa	tamaño (mm)	% que pasa	tamaño (mm)	% que pasa	tamaño (mm)	% que pasa	tamaño (mm)	% que pasa	tamaño (mm)	% que pasa
3/4"	19	-	19	-	19	100	19	100	19	99.4	19	99.3
3/8"	9.5	-	9.5	-	9.5	94.6	9.5	97.1	9.5	96.3	9.5	97.0
4	4.75	100.0	4.75	-	4.75	89.2	4.75	91.4	4.75	90.0	4.75	91.5
8	2.36	99.0	2.36	100.0	2.36	75.4	2.36	80.6	2.36	79.8	2.36	82.3
10	2	98.0	2	99.0	2	69.9	2	77.1	2	76.3	2	79.3
16	1.18	97.0	1.18	98.0	1.18	50.6	1.18	63.4	1.18	69.1	1.18	72.2
30	0.6	95.0	0.6	90.0	0.6	23.9	0.6	40.6	0.6	50.5	0.6	48.4
50	0.3	92.0	0.3	72.0	0.3	7.0	0.3	16.0	0.3	22.0	0.3	24.4
100	0.15	84.0	0.15	54.0	0.15	4.5	0.15	8.0	0.15	8.7	0.15	12.0
200	0.075	71.0	0.075	46.0	0.075	3.5	0.075	6.2	0.075	7.0	0.075	8.3

Tabla No. 4.8.17 Comparaciones granulométricas de la unidad E (deposito seco) obtenidas en esta investigación, con unidad E (deposito seco) de Walter Hernandez y Bautista et al.

Fuente: EL AUTOR, (2017). Con los resultados obtenidos en el Laboratorio de Suelos y Materiales de la Universidad de el Salvador "Ing. Mario Ángel Guzmán Urbina ", Bautista et al., (2016) y Hernández, (2004).

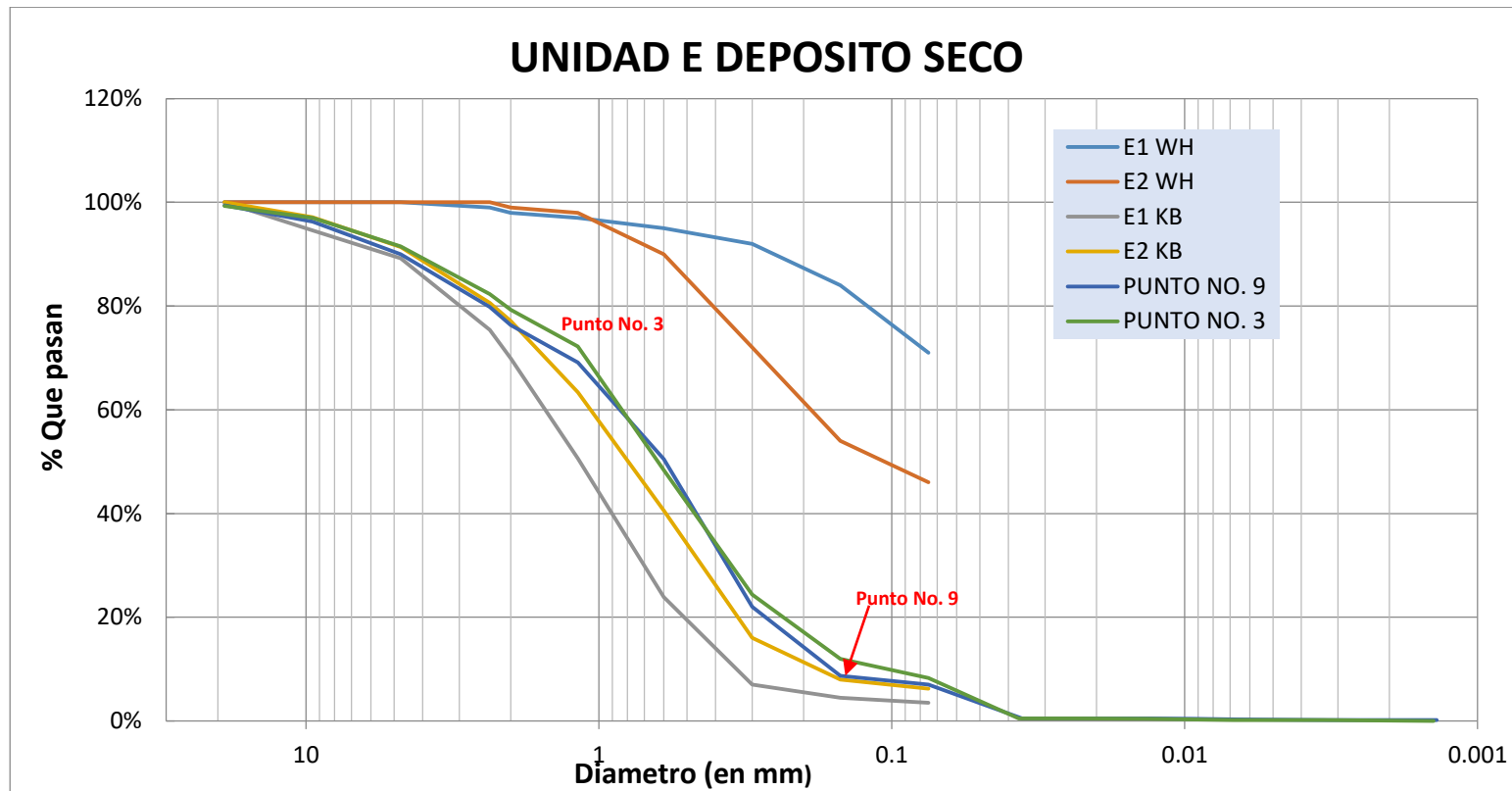


Figura No. 4.8.12 Curvas granulométricas de la unidad E (deposito seco) obtenidas en esta investigación, con unidad E (deposito seco) de Walter Hernandez y Bautista et al.

Fuente: EL AUTOR, (2017). Con los resultados obtenidos en el Laboratorio de Suelos y Materiales de la Universidad de el Salvador "Ing. Mario Ángel Guzmán Urbina", Bautista et al., (2016) y Hernández, (2004).

CUADRO COMPARATIVO DE UNIDADES TBJ, UNIDAD E (DEPOSITO HÚMEDO)				
Unidades / No de malla	E Inferior Húmedo EH-KB		TZF II (PUNTO No. 9)	
	tamaño (mm)	% que pasa	tamaño (mm)	% que pasa
3/4"	19	-	19	-
3/8"	9.5	-	9.5	-
4	4.75	100.0	4.75	-
8	2.36	99.6	2.36	-
10	2	99.4	2	-
16	1.18	98.3	1.18	100.0
30	0.6	93.3	0.6	93.5
50	0.3	77.0	0.3	81.4
100	0.15	58.5	0.15	74.7
200	0.075	50.1	0.075	70.6
HIDROMETRÍA	0.03034	23.5	0.03374	27.6
	0.01984	20.7	0.02160	24.6
	0.01192	17.3	0.01272	20.2
	0.00870	14.4	0.00910	17.2
	0.00631	11.9	0.00651	14.4
	0.00319	7.8	0.00317	11.2
	0.00138	5.5	0.00137	6.8
			Semejante a EH-KB	

Tabla No. 4.8.18 Comparaciones granulométricas de la unidad E (deposito húmedo) de la TBJ obtenidas en esta investigación, con unidad E (deposito húmedo) de Bautista et al.
Fuente: AUTOR, (2017). Con los resultados obtenidos en el Laboratorio de Suelos y Materiales de la Universidad de el Salvador "Ing. Mario Ángel Guzmán Urbina", Bautista et al., (2016).

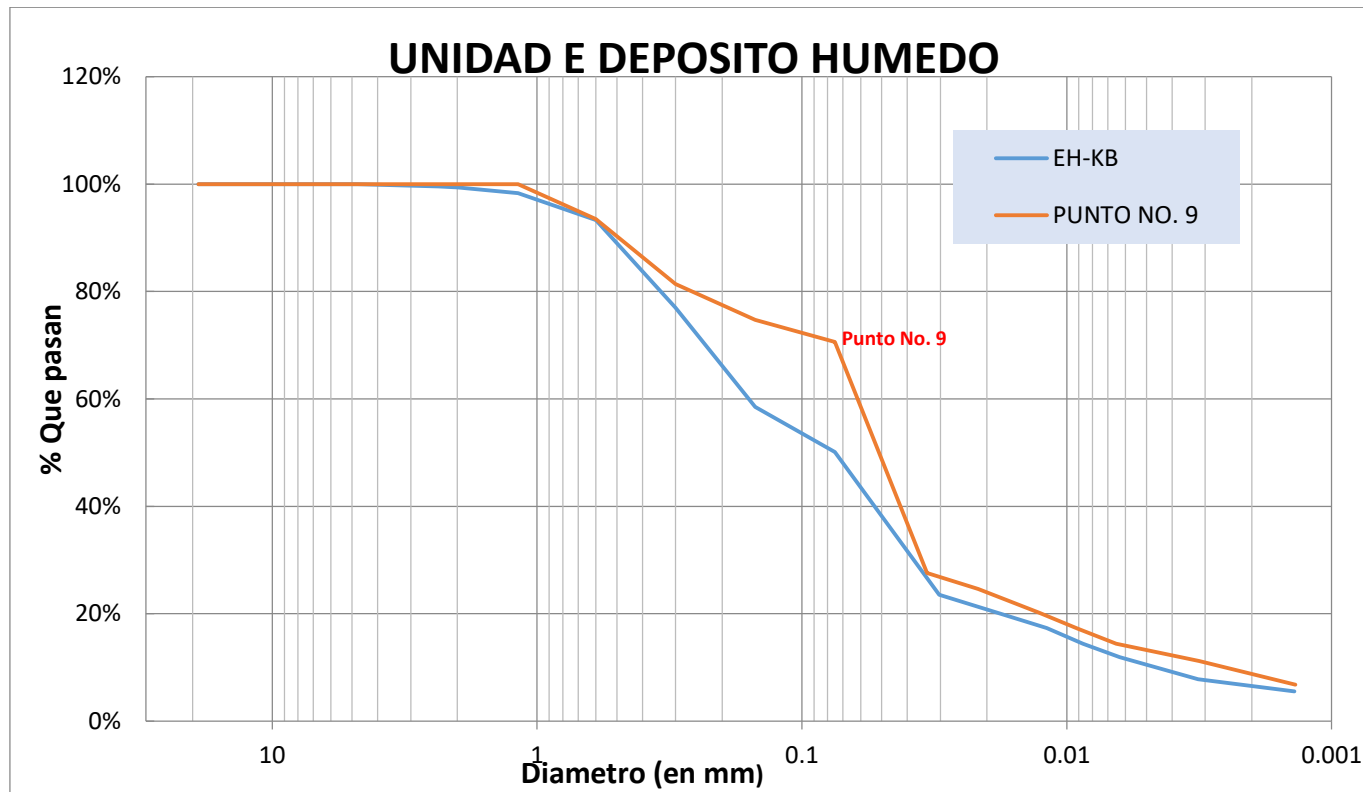


Figura No. 4.8.13 Curvas granulométricas de la unidad E (deposito húmedo) de la TBJ obtenidas en esta investigación, con unidad E (deposito húmedo) de Bautista et al.

Fuente: EL AUTOR, (2017). Con los resultados obtenidos en el Laboratorio de Suelos y Materiales de la Universidad de el Salvador "Ing. Mario Ángel Guzmán Urbina ", Bautista et al., (2016) y Hernández, (2004).

CUADRO COMPARATIVO DE UNIDADES TBJ, UNIDAD α												
Unidades / No de malla	CIPRESES II (INFERIOR) CII-KB		CIPRESES II (SUPERIOR) CIIs-KB		IGNIMBRITA A ZF II ZF-KB		CIPRESES I CI-KB		TZF II (PUNTO No. 9)		TA II (PUNTO No. 3)	
	tamaño (mm)	% que pasa	tamaño (mm)	% que pasa	tamaño (mm)	% que pasa	tamaño (mm)	% que pasa	tamaño (mm)	% que pasa	tamaño (mm)	% que pasa
3/4"	19	100	19	100	19	100	19	100	19	99.2	19	100.0
3/8"	9.5	99.84	9.5	99.85	9.5	98.57	9.5	97.59	9.5	97.5	9.5	99.4
4	4.75	99.40	4.75	97.77	4.75	94.99	4.75	93.71	4.75	93.0	4.75	97.4
8	2.36	97.06	2.36	93.02	2.36	88.10	2.36	86.99	2.36	87.5	2.36	93.3
10	2	95.92	2	91.76	2	86.20	2	85.32	2	85.6	2	91.5
16	1.18	91.83	1.18	87.81	1.18	78.53	1.18	78.08	1.18	81.0	1.18	88.3
30	0.6	84.77	0.6	78.86	0.6	63.88	0.6	63.94	0.6	68.4	0.6	71.4
50	0.3	70.12	0.3	64.24	0.3	46.13	0.3	46.68	0.3	51.3	0.3	54.6
100	0.15	53.02	0.15	48.26	0.15	32.03	0.15	33.23	0.15	36.3	0.15	42.2
200	0.075	36.79	0.075	33.30	0.075	21.70	0.075	22.93	0.075	29.5	0.075	32.9
HIDROMETRÍA	0.034252	8.30	0.03638	6.21	0.036921	3.33	0.037163	3.84	0.0357791	4.2	0.035236	5.9
	0.022582	5.01	0.024140	3.26	0.023880	2.38	0.024021	2.78	0.0228843	3.6	0.022553	5.2
	0.013364	3.13	0.014184	1.99	0.013903	1.74	0.013966	2.32	0.0133726	2.9	0.013353	3.7
	0.009547	2.27	0.010133	1.14	0.009824	1.50	0.009979	1.87	0.0095919	2.3	0.009608	2.7
	0.006796	1.72	0.007213	0.72	0.007007	1.09	0.007104	1.41	0.0068064	2.0	0.006884	2.0
	0.003344	0.78	0.003476	0.55	0.003402	0.59	0.003488	0.91	0.0033389	1.5	0.003399	1.0
	0.001433	0.47	0.001500	0.17	0.001472	0.19	0.001508	0.3	0.0014162	1.3	0.001446	0.2
									Semejante a ZF-KB y CI-KB		Semejante a CII-KB y CIIs-KB	

Tabla No. 4.8.19 Comparaciones granulométricas de la unidad α de la TBJ obtenidas en esta investigación, con unidad α de Bautista et al.
Fuente: EL AUTOR, (2017). Con los resultados obtenidos en el Laboratorio de Suelos y Materiales de la Universidad de el Salvador "Ing. Mario Ángel Guzmán Urbina", Bautista et al., (2016).

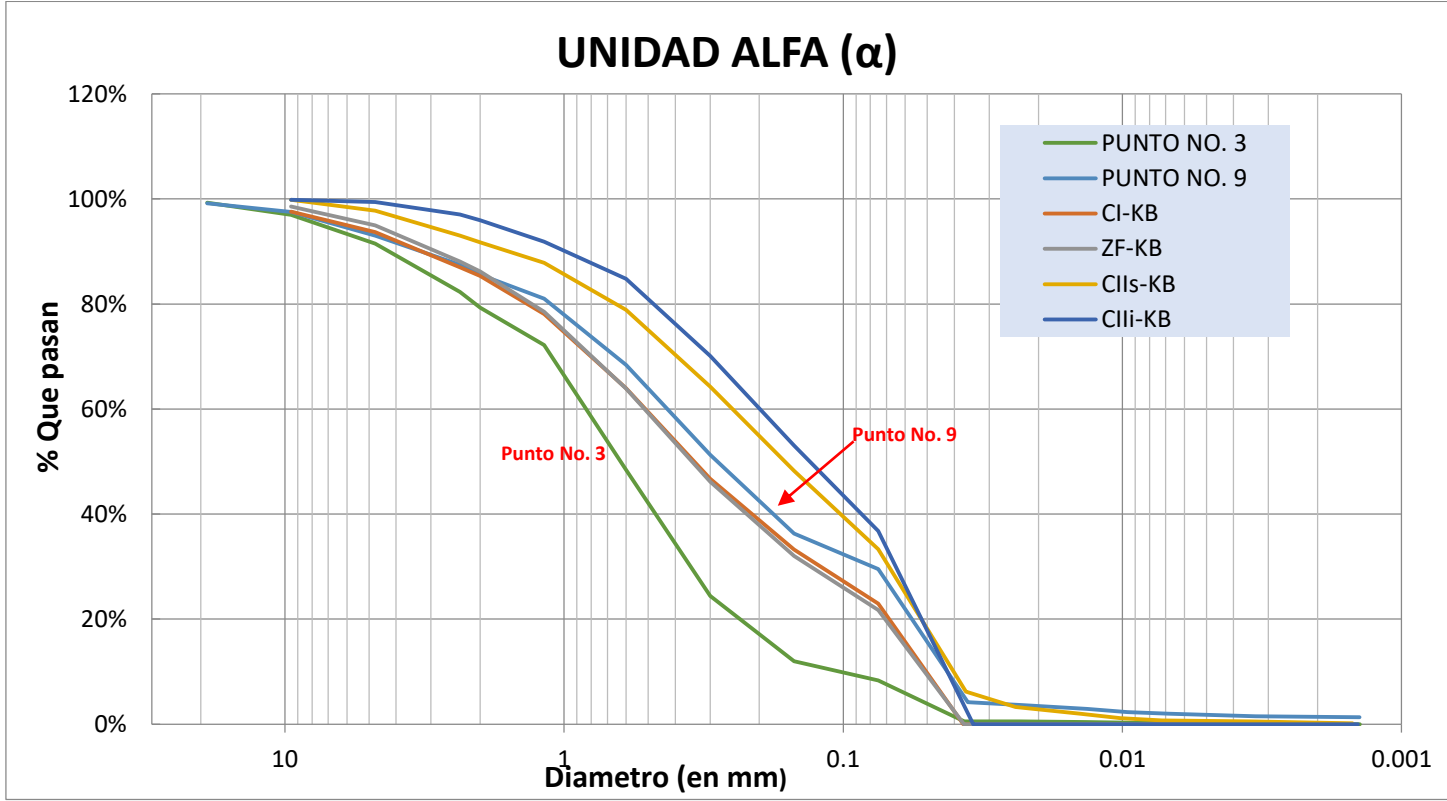


Figura No. 4.8.14 C urvas granulometricas de la unidad α de la TBJ obtenidas en esta investigacion, con unidad α de Bautista et al.
 Fuente: EL AUTOR, (2017). Con los resultados obtenidos en el Laboratorio de Suelos y Materiales de la Universidad de el Salvador "Ing. Mario Ángel Guzmán Urbina ", Bautista et al., (2016).

CUADRO COMPARATIVO DE UNIDADES TBJ, UNIDAD D										
Unidades / No de malla	D2b WH		D1 WH		D2a WH		D CIPRESES I D-KB		TA I (PUNTO No. 2)	
	tamaño (mm)	% que pasa	tamaño (mm)	% que pasa	tamaño (mm)	% que pasa	tamaño (mm)	% que pasa	tamaño (mm)	% que pasa
3/4"	19	-	19	-	19	-	19	100	19	100.0
3/8"	9.5	-	9.5	-	9.5	-	9.5	99.86	9.5	99.9
4	4.75	100.0	4.75	100.0	4.75	100.0	4.75	99.66	4.75	99.8
8	2.36	99.0	2.36	98.0	2.36	99.0	2.36	99.01	2.36	99.7
10	2	98.0	2	98.0	2	99.0	2	98.79	2	99.7
16	1.18	97.0	1.18	97.0	1.18	97.0	1.18	97.41	1.18	99.4
30	0.6	95.0	0.6	95.0	0.6	95.0	0.6	93.44	0.6	97.8
50	0.3	92.0	0.3	92.0	0.3	92.0	0.3	83.60	0.3	92.1
100	0.15	80.0	0.15	78.0	0.15	85.0	0.15	69.83	0.15	81.6
200	0.075	68.0	0.075	68.0	0.075	72.0	0.075	54.59	0.075	67.7
HIDROMETRÍA	0.05000	60.0					0.032297	19.01	0.036381	14.9
	0.03000	50.0					0.021521	13.85	0.023288	11.8
	0.01500	30.0					0.013027	9.04	0.013687	7.4
	0.00900	20.0					0.009332	7.67	0.009813	4.4
	0.00500	10.0					0.006683	5.95	0.006939	4.4
	0.00400	4.0					0.003329	2.75	0.003425	2.8
	0.001890	2.0					0.001454	0.79	0.001432	1.4
									Semejante a D2b WH, D1 WH y D2a WH	

Tabla No. 4.8.20 Comparaciones granulométricas de la unidad D de la TBJ obtenidas en esta investigación, con unidad D de Walter Hernandez y Bautista et al. Fuente: AUTOR, (2017). Con los resultados obtenidos en el Laboratorio de Suelos y Materiales de la Universidad de el Salvador "Ing. Mario Ángel Guzmán Urbina", Bautista et al., (2016) y Hernández, (2004).

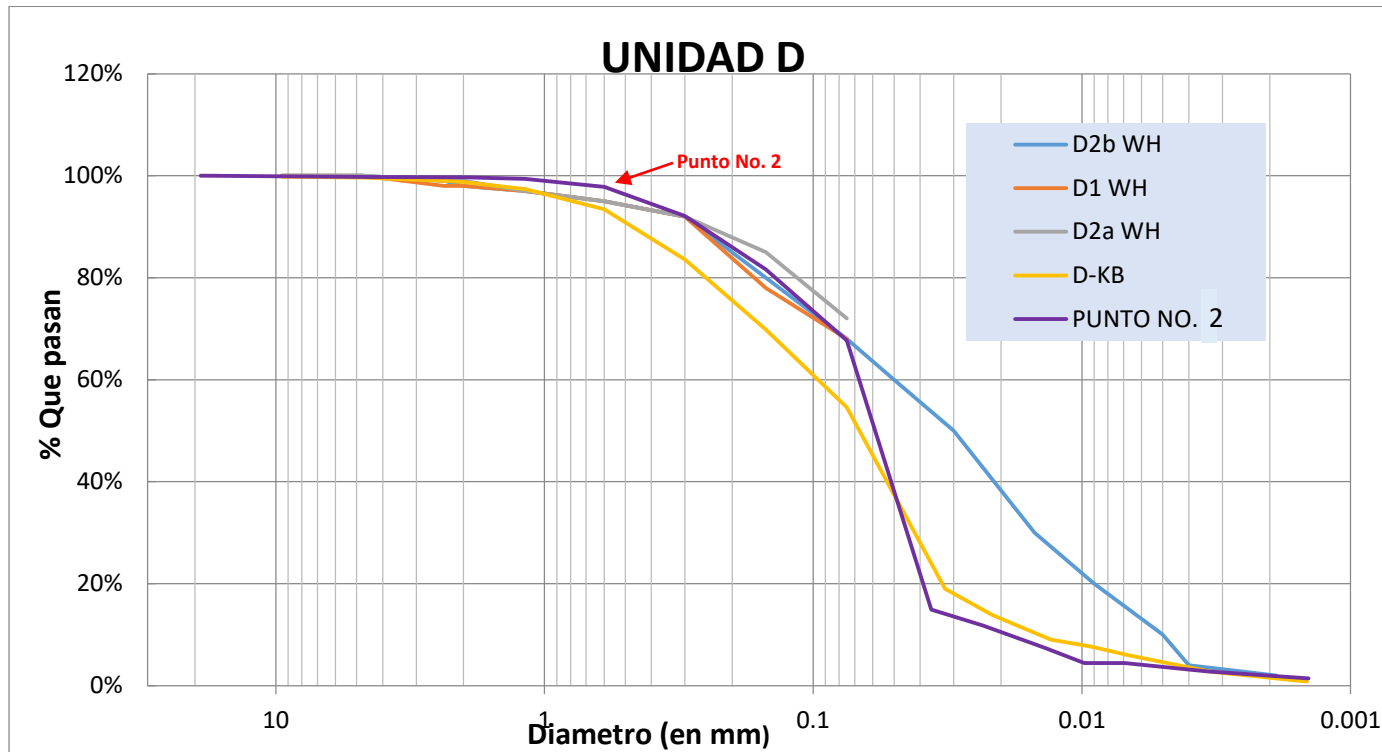


Figura No. 4.8.15 Curvas granulometricas de la unidad D de la TBJ obtenidas en esta investigacion, con unidad D de Walter Hernandez y Bautista et al. Fuente: EL AUTOR, (2017). Con los resultados obtenidos en el Laboratorio de Suelos y Materiales de la Universidad de el Salvador "Ing. Mario Ángel Guzmán Urbina ", Bautista et al., (2016) y Hernández, (2004).

CUADRO COMPARATIVO DE UNIDADES TBJ, UNIDAD C						
Unidades / No de malla	C1 WH		C2 WH		TA I (PUNTO No. 2)	
	tamaño (mm)	% que pasa	tamaño (mm)	% que pasa	tamaño (mm)	% que pasa
3/4"	19	-	19	-	19	100.0
3/8"	9.5	100.0	9.5	100.0	9.5	99.8
4	4.75	97.0	4.75	100.0	4.75	99.3
8	2.36	95.0	2.36	97.0	2.36	98.0
10	2	94.0	2	96.0	2	97.3
16	1.18	87.0	1.18	94.0	1.18	94.5
30	0.6	75.0	0.6	88.0	0.6	88.4
50	0.3	63.0	0.3	72.0	0.3	77.7
100	0.15	50.0	0.15	58.0	0.15	66.2
200	0.075	41.0	0.075	43.0	0.075	54.6
HIDROMETRÍA					0.03578	11.8
					0.02291	9.4
					0.01346	5.9
					0.00965	3.5
					0.00682	3.5
					0.00337	2.2
					0.00141	1.1

Tabla No. 4.8.21 Comparaciones granulométricas de la unidad C de la TBJ obtenidas en esta investigación, con unidad C de Walter Hernadez.
Fuente: AUTOR, (2017). Con los resultados obtenidos en el Laboratorio de Suelos y Materiales de la Universidad de el Salvador "Ing. Mario Ángel Guzmán Urbina ", Bautista et al., (2016) y Hernández, (2004).

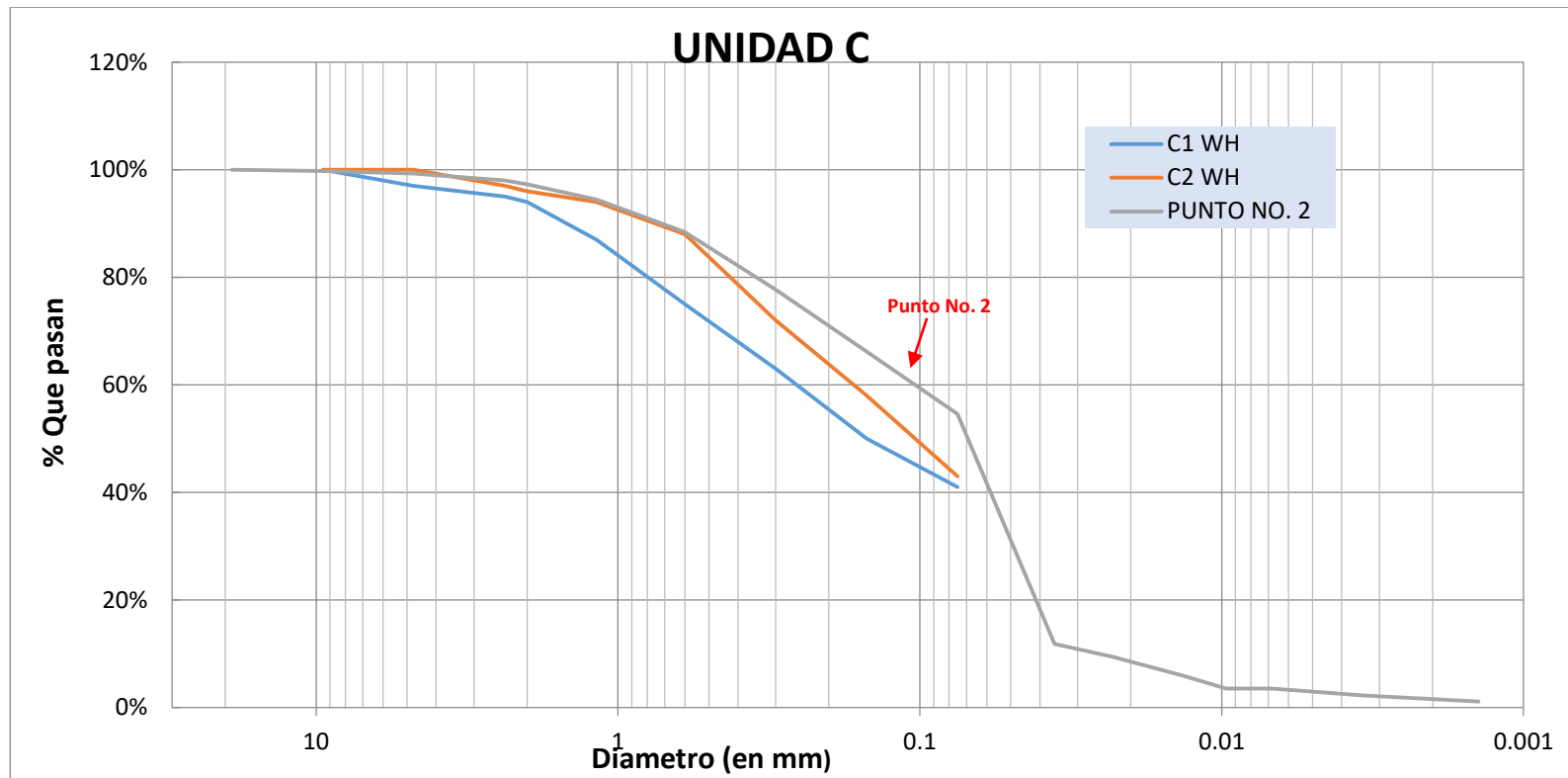


Figura No. 4.8.16 Curvas granulometricas de la unidad C de la TBJ obtenidas en esta investigacion, con unidad C de Walter Hernandez.

Fuente: AUTOR, (2017). Con los resultados obtenidos en el Laboratorio de Suelos y Materiales de la Universidad de el Salvador "Ing. Mario Ángel Guzmán Urbina ", Bautista et al., (2016) y Hernández, (2004).

CAPÍTULO No.5
ANÁLISIS E
INTERPRETACIÓN
DE RESULTADOS

5.1 INTRODUCCIÓN

En el presente capítulo se presenta el análisis de los resultados obtenidos durante el periodo de estudio describiendo los cambios experimentados, que permitieron realizar comparaciones entre de las condiciones iniciales y finales (para mayor detalle se presentan fotografías comparativas de cada talud debido al deterioro por erosión en el Anexo No.6), determinando así los volúmenes erosionados, en cada talud, además, se presenta un resumen de las propiedades físicas de los suelos de cada estrato que componen los taludes.

También, se presentaron los resultados de la aplicación de la técnica empleada para la cuantificación de la erosión, así como el comportamiento de las lluvias acumuladas que fueron registradas por la estación pluviométrica más cercana.

Finalmente se hizo una interpretación de los aspectos ya mencionados, y posteriormente fue determinada la tasa de erosión para cada talud; calculadas a partir del área de influencia, el volumen perdido, la densidad ponderada y el periodo de estudio.

5.2 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS Y CÁLCULO DE LA TASA DE EROSIÓN

En esta sección se hará el análisis de los resultados obtenidos durante el periodo de estudio; presentando de forma ordenada los aspectos relacionados a: sus condiciones iniciales, resultados de pruebas de laboratorios, y cambios obtenidos en los taludes producto de la erosión experimentada (erosión lateral y vertical) debido al efecto que provocaron las lluvias. Con la información descrita anteriormente, será elaborado un análisis de los cambios que experimentaron los taludes, que tendrá como objetivo, conocer el comportamiento ante los procesos erosivos de la zona de estudio.

Los aspectos que serán analizados para cada talud, son los siguientes:

- **CONDICIONES INICIALES Y FINALES**

Se presentarán las condiciones de referencia de los taludes, en lo que respecta a: cobertura vegetal, dimensiones, número de estratos presentes, y el tipo de erosión que experimenta. Adicionalmente se describirán las condiciones finales que presentan los taludes luego del periodo de estudio.

- **PROPIEDADES GEOTECNICAS**

Este apartado ha sido destinado para presentar un resumen geotécnico de las propiedades que caracterizan a cada uno de los estratos que componen los taludes; con el fin de determinar las características físicas que poseen, así como, su clasificación en base al sistema SUCS.

Para la identificación geotécnica de los estratos se basará en el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS), tomando como referencia los rangos de tamaños siguientes (ver Tabla No. 5.2.1):

CLASIFICACIÓN	RANGO DE TAMAÑOS
Gravas	75mm a 4.75mm
Arenas	4.75mm a 0.075mm
Limos	0.075mm a 0.002mm
Arcillas	< 0.002mm

*Tabla No. 5.2.1 Rango de tamaños para la clasificación de suelos según el sistema SUCS
Fuente: Brajas M. Das, 5ta edición (2006), Fundamentos de Ingeniería Geotécnica, editorial Thomson*

Los parámetros C_u y C_c (Según sean de utilidad para cada suelo) se calcularon de la siguiente manera:

- a) Coeficiente de uniformidad

$$Cu = \frac{D_{60}}{D_{10}}$$

b) Coeficiente de curvatura

$$Cc = \frac{D_{30}^2}{D_{60} \times D_{10}}$$

- **RESULTADOS DE LOS CAMBIOS EXPERIMENTADOS EN EL TALUD DURANTE EL PERIODO DE ESTUDIO**

Se presentarán los registros obtenidos en campo de las técnicas de cuantificación de erosión ejecutadas en esta investigación; con tal información, se obtendrán los deltas máximos de erosión vertical u horizontal que servirán para el cálculo del volumen de suelo perdido. Además, se plasmarán los esquemas finales de los taludes que permitan comprender el comportamiento y la magnitud de los cambios que experimentaron los taludes durante el periodo de estudio

- **COMPORTAMIENTO DE LA LLUVIA DURANTE EL PERIODO DE ESTUDIO**

El periodo de estudio para cuantificar la pérdida de suelo en los taludes, estuvo comprendido entre el 3 de febrero al 16 de noviembre del año 2017, época que abarca la estación seca, y lluviosa.

La estación lluviosa inicio en el mes de mayo y llego a su fin en el país, del 11 al 20 de octubre en las zonas occidental-central, iniciando la transición lluviosa a seca 2017-2018, respectivamente.

Para la zona en estudio la estación más cercana es la de Ilopango, esta sirvió para obtener el registro de lluvias diarias y acumuladas. Con los datos recolectados de la estación, la acumulación de lluvia para el 2017 alcanzo 1560 mm; este valor es menor que el promedio histórico (1867 mm, del periodo 1981 a 2010).

La época lluviosa fue irregular en comparación con años anteriores, debido a la influencia del fenómeno del niño, claro ejemplo de ello es el déficit en un 16% del promedio histórico de lluvia anual, condición considerada muy por debajo de lo normal.

En esta sección, se presentarán en forma gráfica los cambios experimentados ($\Delta_{\text{erosión}}$, ya sea vertical u horizontal) versus lluvias instantáneas diarias, para comparar la erosión acumulada que experimento cada talud (por eje), en relación con los registros de lluvias de la estación Ilopango.

- **INTERPRETACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS**

Esta sección está destinada para realizar una interpretación de los resultados obtenidos en las visitas de campo en relación a las lluvias registradas durante el periodo de estudio.

- **CALCULO DE VOLUMEN PERDIDO Y TASA DE EROSIÓN**

- ✓ **Calculo de volúmenes perdidos de suelo de los taludes**

El volumen de suelo perdido de cada talud será obtenido a través de la aplicación de un software especializado en diseño gráfico para obtener datos más precisos.

- ✓ **Calculo de la tasa de erosión de los taludes**

Una vez obtenido el volumen de suelo perdido por el talud, al final del periodo de estudio, y considerando una densidad húmeda ponderada (en base a la densidad de cada estrato y su altura), se determinará el peso total de suelo erosionado, que servirá para calcular la tasa de erosión

5.2.1 TALUD ZONA FRANCA III (PUNTO No. 10)

A continuación, se muestran los resultados de los aspectos planteados anteriormente

- **CONDICIONES INICIALES Y FINALES**

La Tabla No. 5.2.2 presenta un resumen de las condiciones iniciales de este punto, en cuanto a: su topografía, componentes naturales que posee (vegetación) y su composición geotécnica. Además, en ella se puede apreciar el área del cuerpo del talud estudiado, así como también, la distribución de ejes en la cresta de este, que conforman la cuadrícula de referencia para el monitoreo de campo.

CONDICIONES INICIALES	
Nombre del talud	PUNTO No. 10 TALUD ZONA FRANCA III
Altura inicial promedio (m)	7
Longitud del tramo en estudio (m)	65
Área del talud (m ²)	455
Cobertura vegetal	Abundante en la cresta y sin cobertura en el cuerpo
Numero de estratos	3
Unidades presentes	Deposito aluvial, unidad F y unidad E,
Tipo de erosión presente	Horizontal y vertical
Ejes en dirección paralela al borde del rio	línea base, eje 1 y eje 1'
Ejes en dirección perpendicular al borde del rio	A,B,C,D,E,F,G,H,I,J,K,L,M, N

Tabla No. 5.2.2 Condiciones iniciales del PUNTO No. 10 TALUD ZONA FRANCA III
Fuente: EL AUTOR, 2018

La Tabla No. 5.2.3 presenta las condiciones finales del talud, donde se puede observar los cambios en dimensiones, y en número de estratos.

CONDICIONES FINALES			
Altura final promedio (m)	8.4		
Área del talud (m ²)	546		
Numero de estratos	4		
Unidades presentes	Deposito aluvial, unidad F, Ignimbrita Beta (estrato descubierto), y unidad E		
Características de los estratos			
Nombre de unidad	Altura promedio (m)	Color	Tamaño del grano (mm)
Deposito aluvial	1.3	Gris	5-9
F	5.3	Beige claro	4-9
Ignimbrita Beta	0.8	Café claro	0.15-0.3
E (deposito húmedo)	0.21	Café oscuro	0.6
E (deposito seco)	0.20	Café claro	4

Tabla No. 5.2.3 Condiciones finales del PUNTO No. 10 TALUD ZONA FRANCA III
Fuente: EL AUTOR, 2018

- **PROPIEDADES GEOTECNICAS**

En este punto se observaron al final del periodo de estudio 4 estratos, a los que se le determinaron su humedad, gravedad específica, peso volumétrico (seco y húmedo) y su granulometría, lo anterior se detalla a continuación (ver Tabla No. 5.2.4):

DESCRIPCIÓN	DEPOSITO ALUVIAL	UNIDAD F	UNIDAD F	IGNIMBRITA BETA	IGNIMBRITA BETA	UNIDAD E (DEPOSITO SECO)	UNIDAD E (DEPOSITO HÚMEDO)
Gruesos	97.37	70.1	55.6	34.1	25.6	93	29.4
%Grava	7.66	19.2	9.8	0	0	10	0
%Arena	89.71	50.9	45.8	34.1	25.6	83	29.4
Finos	2.63	29.9	44.4	65.9	74.4	7	70.6
%Limos	2.63	28.8	41.3	60.9	64	7	59.4
%Arcilla		1.1	3.1	5	10.4		11.2
Total	100	100	100	100	100	100	100
Cu	5	20	8.57	7	30	5.67	30
Cc	1.01	0.15	0.29	2.89	10.21	0.96	10.21
Plasticidad	NP	NP	NP	NP	NP	NP	NP
Color	Color gris con presencia de finos no plásticos	Color blanco con presencia de pómez	Color blanco con presencia de pómez	Color café claro con presencia de finos no plásticos	Color café claro con presencia de finos no plásticos	Color gris con presencia de arena pumítica	Color café con presencia de arena y finos no plásticos
Clasificación	Arena mal graduada	Arena limosa con grava pumítica	Arena Limosa	Limo Arenoso	Limo Arenoso	Arena mal graduada con Limo	Limo Arenoso
Símbolo del grupo	SP	SM	SM	ML	ML	SP-SM	ML
Gravedad específica promedio	2.66	2.35		2.41		2.40	2.43
Densidad húmeda (T/m³)	1.15	1.5		2.1		1.25	1.67
Densidad seca (T/m³)	1.08	1.2		1.7		1.18	1.49
% w natural	9.94	24.33		21		5.6	11.76
Espesor de la unidad (m)	1.3	5.3		0.8		1.0	
Densidad húmeda ponderada (T/m³)	1.5						

Tabla No. 5.2.4 Identificación geotécnica de estratos del PUNTO No. 10 ZONA FRANCA III

Fuente: EL AUTOR, (2017). Con resultados obtenidos en el Laboratorio de Suelos y Materiales de la Universidad de El Salvador "Ing. Mario Ángel Guzmán Urbina".

Los resultados de estos ensayos, permitieron determinar la clasificación del suelo; en este caso por el sistema SUCS, así como la densidad ponderada, que servirá para el cálculo del peso del material perdido.

- **RESULTADOS DE LOS CAMBIOS EXPERIMENTADOS EN EL TALUD DURANTE EL PERIODO DE ESTUDIO**

En el periodo de estudio se realizaron 13 visitas de campo, de estas, se presentan solo 10 visitas, debido a que las primeras tres no presentaron ningún cambio (6/2/17, 23/2/17 y 6/3/17), ya que se realizaron en la época seca.

En la Tabla 5.2.5 se presentan los cambios horizontales obtenidos (en cm). Cada eje se divide en distancias reales (R), deltas parciales (P), y deltas acumulados (A); las distancias reales son mediciones desde cada eje de la línea base hasta el borde del talud, los deltas parciales representan la diferencia de una distancia real de un monitoreo previo con la distancia real de un monitoreo posterior, y los deltas acumulados son sumatorias de los deltas parciales hasta la fecha en que se esté realizando el respectivo análisis.

En la Tabla 5.2.6 se presentan las distancias verticales (en cm) y estas se dividen en distancias reales (R), deltas parciales (P) y deltas acumulados (A), al igual que las horizontales; con la diferencia de que los deltas parciales (P: diferencia en altura de un monitoreo "x" con uno anterior a este) pueden ser negativos o positivos; positivos indican erosión y los negativos indican azolvamiento.

DISTANCIAS HORIZONTALES (cm)																					
Fecha/Eje	A (R)	A (P)	A(A)	B (R)	B (P)	B(A)	C (R)	C (P)	C (A)	D (R)	D (P)	D (A)	E (R)	E (P)	E (A)	F (R)	F (P)	F (A)	G (R)	G (P)	G (A)
20/03/2017	960	0	0	750	0	0	710	0	0	795	0	0	1010	0	0	1110	0	0	1050	0	0
24/04/2017	960	0	0	750	0	0	710	0	0	785	10	10	1010	0	0	1110	0	0	1005	45	45
29/05/2017	960	0	0	750	0	0	710	0	0	755	30	40	990	20	20	1110	0	0	1000	5	50
03/07/2017	840	120	120	700	50	50	605	105	105	755	0	40	990	0	20	1110	0	0	1000	0	50
11/07/2017	840	0	120	700	0	50	605	0	105	755	0	40	990	0	20	1110	0	0	1000	0	50
28/07/2017	820	20	140	700	0	50	605	0	105	755	0	40	990	0	20	1110	0	0	1000	0	50
31/08/2017	730	90	230	640	60	110	590	15	120	755	0	40	990	0	20	1110	0	0	1000	0	50
02/10/2017	720	10	240	630	10	120	580	10	130	750	5	45	990	0	20	952	158	158	940	60	110
18/10/2017	713	7	247	630	0	120	580	0	130	750	0	45	983	7	27	952	0	158	940	0	110
16/11/2017	713	0	247	630	0	120	580	0	130	750	0	45	983	0	27	952	0	158	940	0	110

Fecha/Eje	H (R)	H (P)	H (A)	I (R)	I (P)	I (A)	J (R)	J (P)	J (A)	K (R)	K (P)	K (A)	L (R)	L (P)	L (A)	M (R)	M (P)	M (A)	N (R)	N (P)	N (A)
20/03/2017	980	0	0	1085	0	0	1160	0	0	1320	0	0	1500	0	0	1560	0	0	1590	0	0
24/04/2017	980	0	0	1085	0	0	1160	0	0	1320	0	0	1370	130	130	1560	0	0	1590	0	0
29/05/2017	980	0	0	1040	45	45	1160	0	0	1310	10	10	1370	0	130	1560	0	0	1590	0	0
03/07/2017	980	0	0	1040	0	45	1160	0	0	1310	0	10	1370	0	130	1560	0	0	1590	0	0
11/07/2017	980	0	0	1040	0	45	1160	0	0	1310	0	10	1370	0	130	1560	0	0	1590	0	0
28/07/2017	980	0	0	1040	0	45	1160	0	0	1310	0	10	1280	90	220	1435	125	125	1580	10	10
31/08/2017	980	0	0	970	70	115	960	200	200	1090	220	230	1190	90	310	1220	215	340	1460	120	130
02/10/2017	963	17	17	952	18	133	910	50	250	963	127	357	950	240	550	1050	170	510	1410	50	180
18/10/2017	963	0	17	941	11	144	897	13	263	963	0	357	942	8	558	713	337	847	1410	0	180
16/11/2017	963	0	17	941	0	144	897	0	263	963	0	357	942	0	558	713	0	847	1410	0	180

Tabla No. 5.2.5 Comportamiento de los cambios experimentados en la dirección horizontal del Punto No. 10 Zona Franca III (Distancias horizontales desde la línea base hasta el borde).

Fuente: EL AUTOR, (2017). Con resultados obtenidos en campo.

DISTANCIAS VERTICALES (cm)																					
Fecha/Eje	A (R)	A (P)	A(A)	B (R)	B (P)	B(A)	C (R)	C (P)	C (A)	D (R)	D (P)	D (A)	E (R)	E (P)	E (A)	F (R)	F (P)	F (A)	G (R)	G (P)	G (A)
20/03/2017	830	0	0	790	0	0	730	0	0	805	0	0	780	0	0	790	0	0	690	0	0
24/04/2017	830	0	0	750	-40	-40	840	110	110	840	35	35	800	20	20	800	10	10	800	110	110
29/05/2017	915	85	85	790	40	0	765	-75	35	855	15	50	800	0	20	715	-85	-75	715	-85	25
03/07/2017	860	-55	30	990	200	200	990	225	260	800	-55	-5	860	60	80	780	65	-10	740	25	50
11/07/2017	860	0	30	990	0	200	990	0	260	800	0	-5	860	0	80	780	0	-10	740	0	50
28/07/2017	1010	150	180	1140	150	350	810	-180	80	770	-30	-35	890	30	110	820	40	30	895	155	205
31/08/2017	1010	0	180	1140	0	350	810	0	80	770	0	-35	890	0	110	820	0	30	895	0	205
02/10/2017	1067	57	237	990	-150	200	952	142	222	1010	240	205	930	40	150	885	65	95	877	-18	187
18/10/2017	1067	0	237	1000	10	210	954	2	224	866	-144	61	883	-47	103	904	19	114	904	27	214
16/11/2017	1067	0	237	1000	0	210	954	0	224	866	0	61	883	0	103	904	0	114	904	0	214

Fecha/Eje	H (R)	H (P)	H (A)	I (R)	I (P)	I (A)	J (R)	J (P)	J (A)	K (R)	K (P)	K (A)	L (R)	L (P)	L (A)	M (R)	M (P)	M (A)	N (R)	N (P)	N (A)
20/03/2017	750	0	0	760	0	0	735	0	0	650	0	0	650	0	0	520	0	0	400	0	0
24/04/2017	700	-50	-50	760	0	0	770	35	35	693	43	43	647	-3	-3	654	134	134	370	-30	-30
29/05/2017	730	30	-20	715	-45	-45	695	-75	-40	650	-43	0	655	8	5	655	1	135	455	85	55
03/07/2017	790	60	40	800	85	40	810	115	75	690	40	40	690	35	40	670	15	150	550	95	150
11/07/2017	790	0	40	800	0	40	810	0	75	690	0	40	690	0	40	670	0	150	550	0	150
28/07/2017	855	65	105	995	195	235	845	35	110	685	-5	35	755	65	105	655	-15	135	465	-85	65
31/08/2017	855	0	105	995	0	235	845	0	110	685	0	35	755	0	105	655	0	135	465	0	65
02/10/2017	838	-17	88	818	-177	58	840	-5	105	766	81	116	798	43	148	865	210	345	547	82	147
18/10/2017	904	66	154	780	-38	20	780	-60	45	710	-56	60	710	-88	60	710	-155	190	547	0	147
16/11/2017	904	0	154	780	0	20	780	0	45	710	0	60	710	0	60	710	0	190	547	0	147

Tabla No. 5.2.6 Comportamiento de los cambios experimentados en la dirección vertical del Punto No. 10 Zona Franca III. (Distancias verticales desde el borde del hasta el lecho del río.)

Fuente: EL AUTOR, (2017). Con resultados obtenidos en campo.

- **ESQUEMA DE CONDICIONES FINALES**

Para poder observar los cambios que experimenta este talud, se pueden comparar las condiciones iniciales y finales; en las Figuras No. 5.2.1 y 5.2.2 se muestra a este talud con su línea base y sus respectivos ejes (eje A hasta el eje N), las distancias reales desde la línea base hasta el borde del talud, la dirección de la corriente con respecto a la posición de la cuadrícula y las alturas respectivas (medidas del borde del talud al lecho del río).

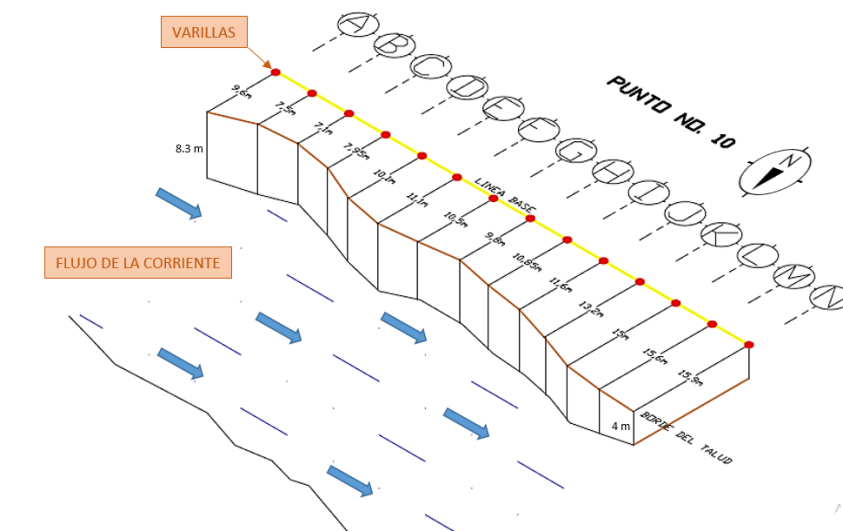


Figura No. 5.2.1 Condiciones verticales y horizontales iniciales del PUNTO No.10 TALUD ZONA FRANCA III
Fuente: EL AUTOR

La condición inicial corresponde al 20/3/2017 y la condición final al 16/11/2017; la Figura No. 5.2.2 presenta a este punto en una vista isométrica para observar al talud como un conjunto. Las dimensiones se pueden ver en la Figura No. 5.2.3 donde se observan las distancias horizontales y verticales (vistas en planta y de perfil).

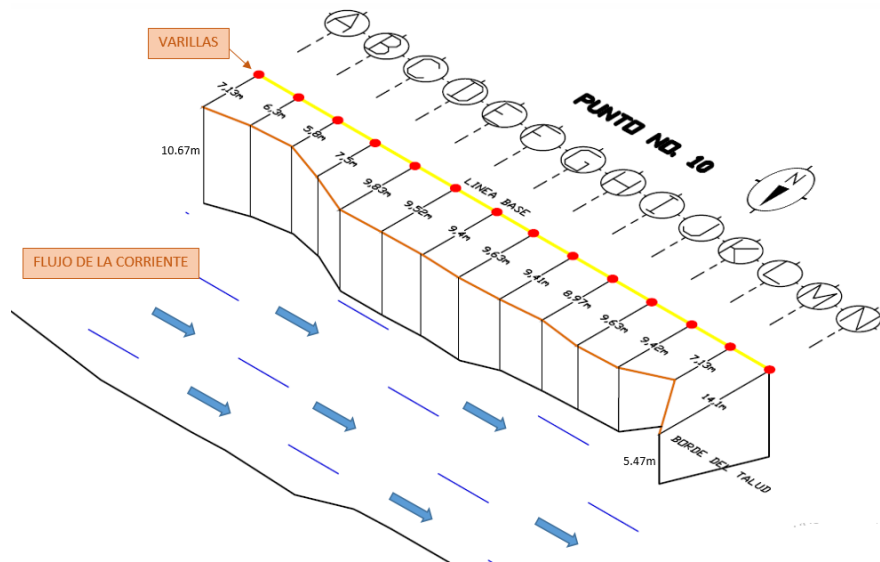


Figura No. 5.2.2 Condiciones verticales y horizontales finales del PUNTO No.10 TALUD ZONA FRANCA III
Fuente: EL AUTOR

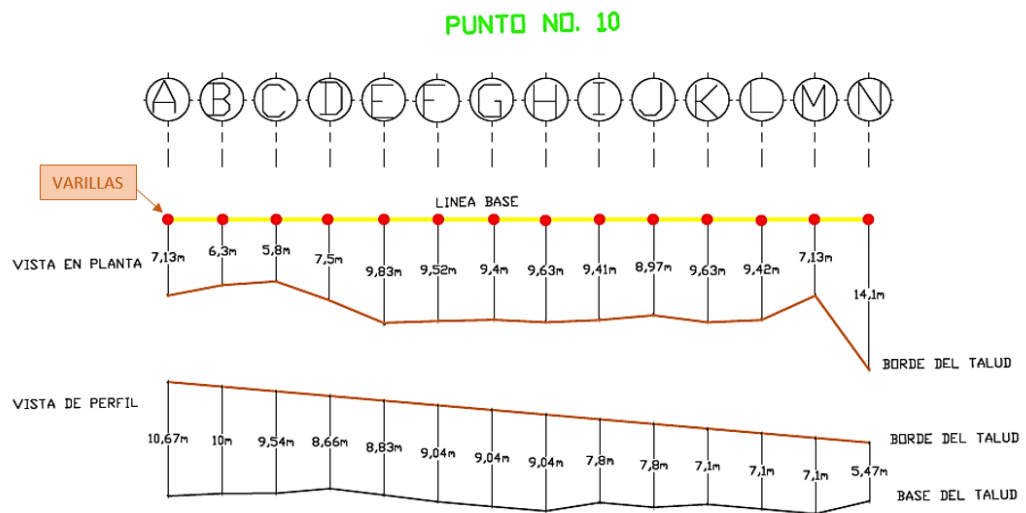


Figura No. 5.2.3 Dimensiones en planta y en altura finales del PUNTO No.10 TALUD ZONA FRANCA III
Fuente: EL AUTOR

Con las condiciones resultantes se puede obtener el área efectiva erosionada, para este talud se presenta en la Figura No. 5.2.4 que resulta ser de 149.24 m².

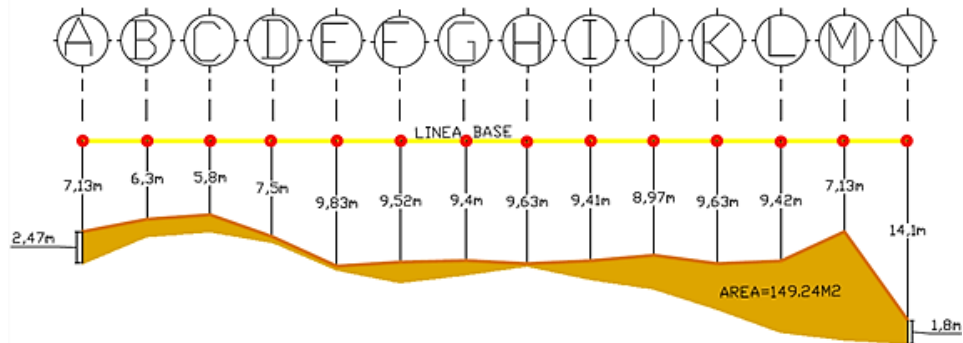


Figura No. 5.2.4 Área final erosionada por parte del TALUD ZONA FRANCA III
Fuente: EL AUTOR

Se presentan también algunas fotografías tomadas al inicio y al final del periodo de estudio, en la Figura No. 5.2.5 se puede observar desde el lecho del río el área del talud en análisis, correspondiente al 3/2/2017 y también en el costado derecho se puede apreciar el mismo sector del talud, correspondiente al 2/10/2017.



Figura No. 5.2.5 Imágenes del PUNTO No.10 TALUD ZONA FRANCA III, figura del costado izquierdo tomada el 3/2/17 y la figura del costado derecho tomada el 2/10/17
Fuente: EL AUTOR

En la Figura No. 5.2.6 se observa el afloramiento de dos unidades de la TBJ (Unidad Ignimbrita Beta y Unidad E), debido a la profundización del lecho del río han sido descubiertas estos estratos.



Figura No. 5.2.6 Imágenes del PUNTO No.10 TALUD ZONA FRANCA III, figura del costado izquierdo tomada el 3/2/17 y la figura del costado derecho tomada el 2/10/17
Fuente: EL AUTOR

Ejemplo de la profundización de este talud se puede apreciar al comparar la caída de nivel que presentaba el río en la fecha de 28/7/17, y el día 18/10/17, apreciándose que para esta última la diferencia en el nivel, ya no existía (ver Figura No. 5.2.7).



Figura No. 5.2.7 Imágenes del PUNTO No.10 TALUD ZONA FRANCA III, figura del costado izquierdo tomada el 28/7/17 y la figura del costado derecho tomada el 18/10/17
Fuente: EL AUTOR

- GRAFICAS DE COMPORTAMIENTO DE LLUVIA - EROSIÓN - AZOLVAMIENTO**
 En las Figuras No. 5.2.8, 5.2.9, 5.2.10 y 5.2.11 se presentan los delta de erosión horizontal acumulados hasta el final del periodo de estudio. Y también, en las Figuras No. 5.2.12, 5.2.13, 5.2.14, 5.2.15, 5.2.16, y 5.2.17 se presentan los delta de variación vertical acumulados. Estos comportamientos se muestran en relación a las lluvias diarias registradas por la estación Ilopango durante todo el periodo de estudio.

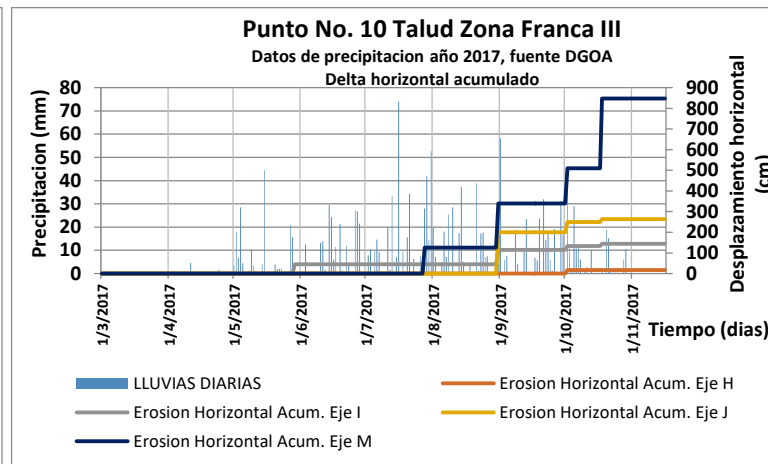
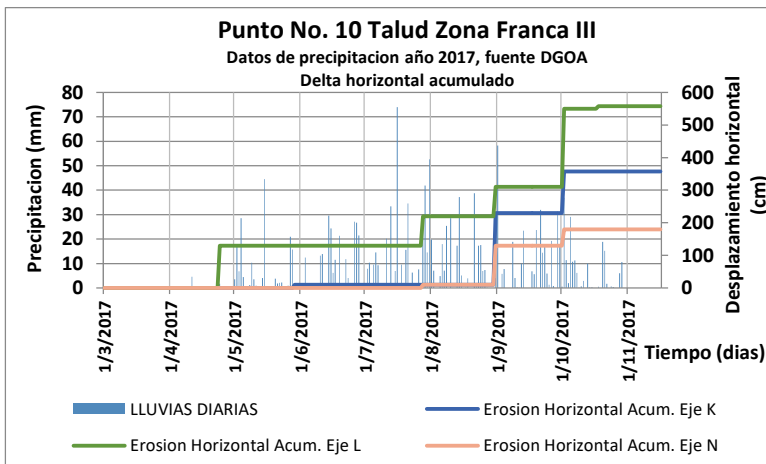
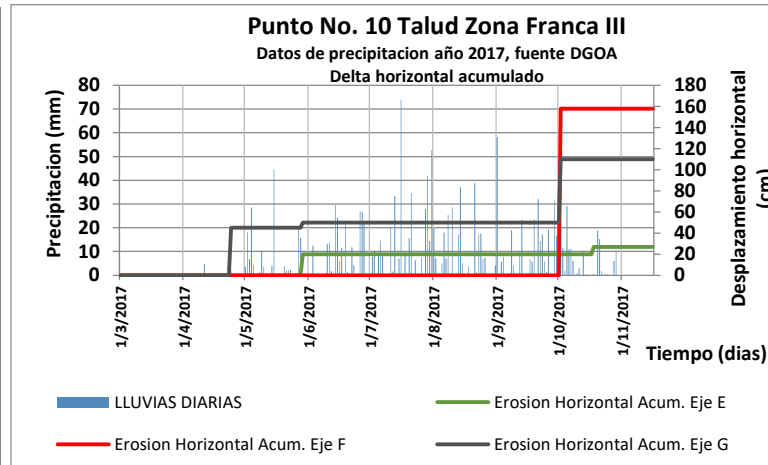
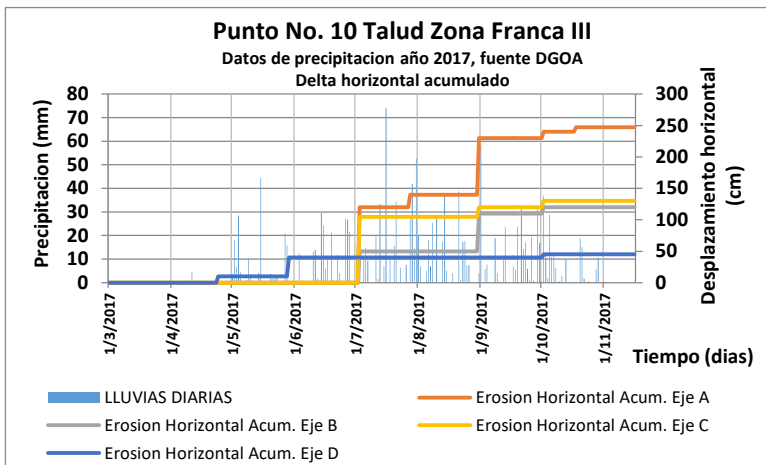


Figura No. 5.2.8, 5.2.9, 5.2.10, y 5.2.11 Gráficos del comportamiento de la lluvia y erosión horizontal acumulada del PUNTO No.10 TALUD ZONA FRANCA III
 Fuente: EL AUTOR

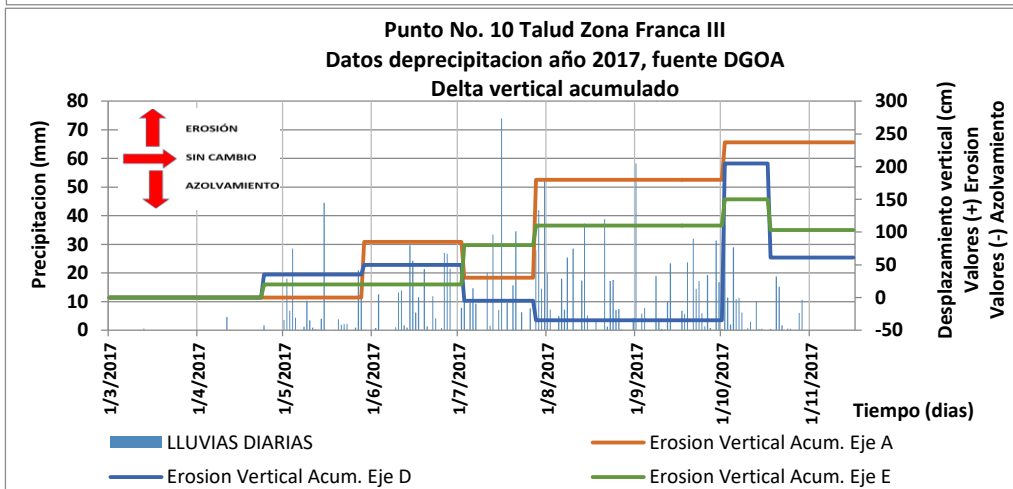
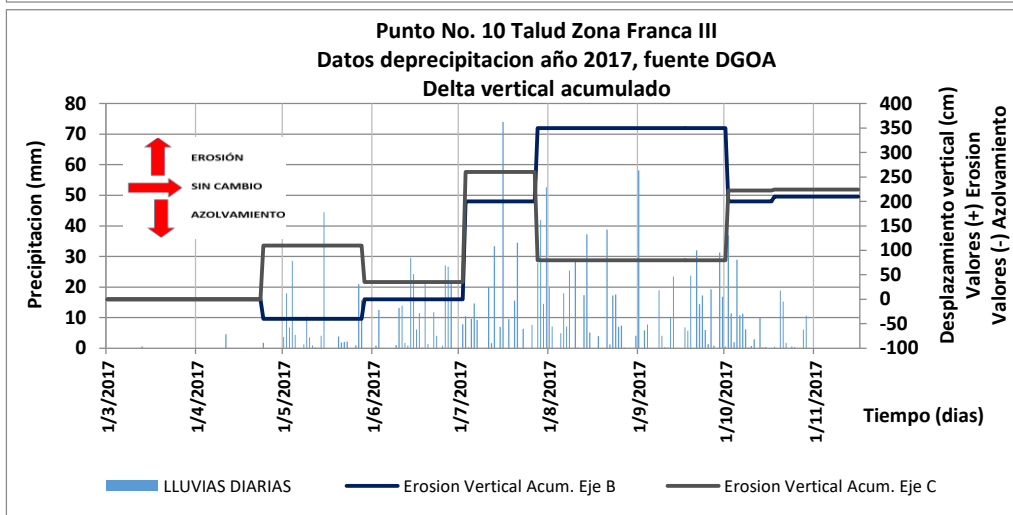
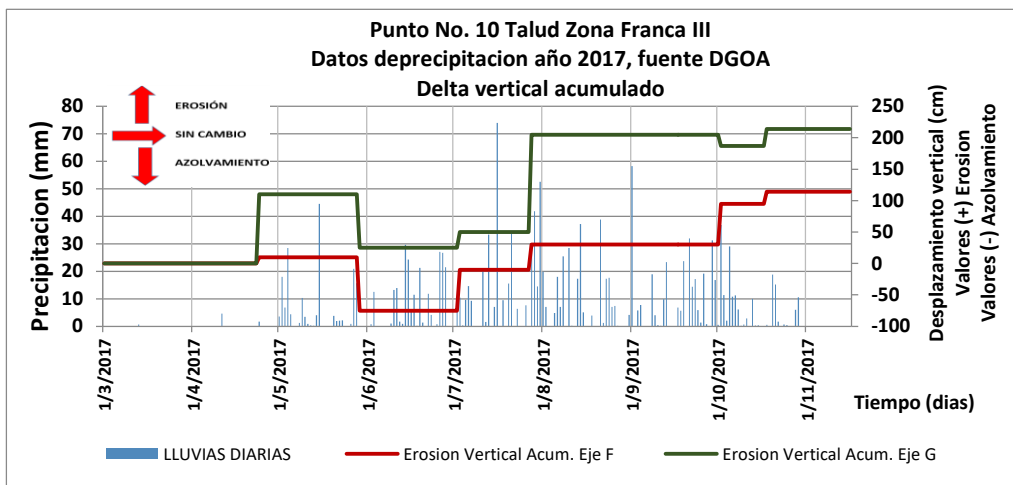


Figura No. 5.2.12, 5.2.13, y 5.2.14 Gráficos del comportamiento de la lluvia y erosión vertical acumulada o Azolvamiento del PUNTO No.10 TALUD ZONA FRANCA III

Fuente: EL AUTOR

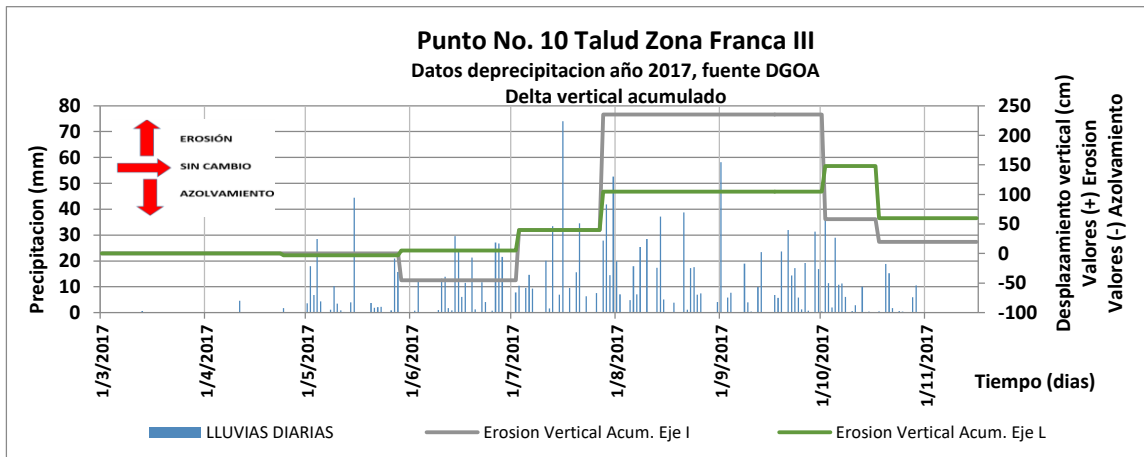
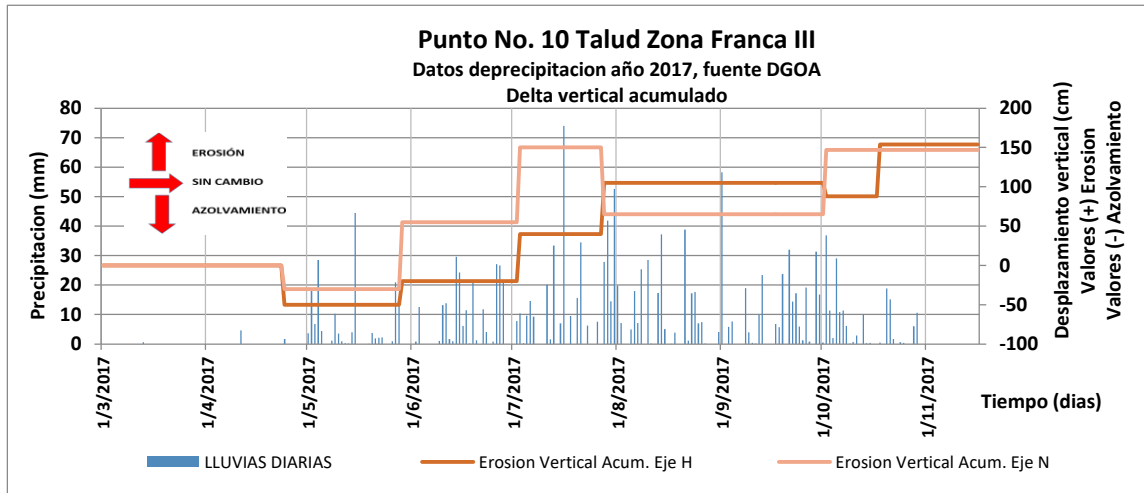
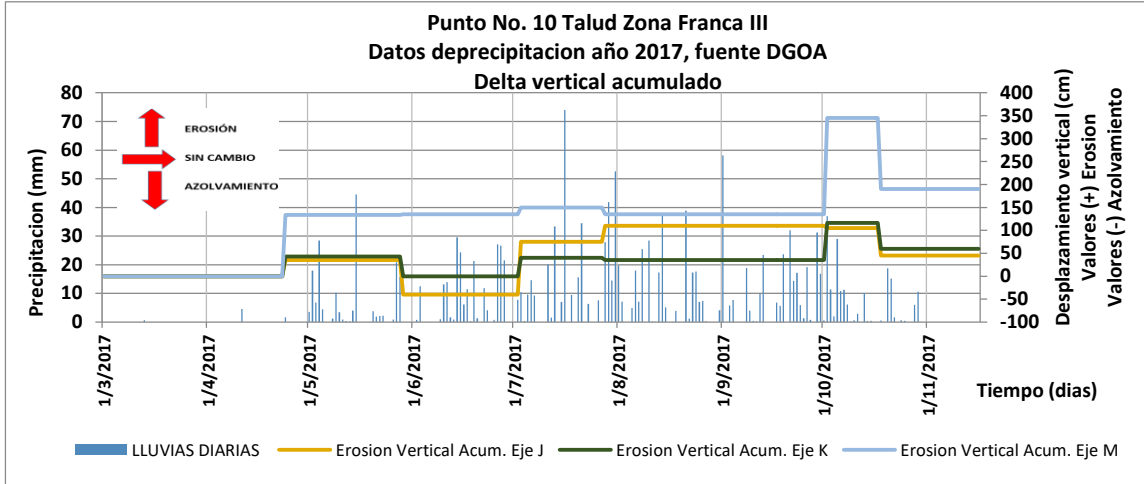


Figura No. 5.2.15, 5.2.16, y 5.2.17 Gráficos del comportamiento de la lluvia y erosión vertical acumulada o Azolvamiento del PUNTO No.10 TALUD ZONA FRANCA III

Fuente: EL AUTOR

- **INTERPRETACION Y ANALISIS DE RESULTADOS**

Para este talud se esperaban grandes cambios, por los factores que tenían incidencia en su comportamiento ante fenómenos erosivos, como la exposición a la quebrada El Arenal Seco, la estructura en gradería (obra de protección) ubicada en Zona Franca, el impacto de la corriente del agua, la pendiente vertical del talud y la falta de cobertura vegetal en el cuerpo. Así como, la influencia de las lluvias en el invierno del 2017.

Los mayores cambios experimentados en dirección horizontal y vertical para este punto se presentan a continuación.

Cambios en dirección **horizontal**:

Los máximos cambios parciales se pudieron observar en las fechas 31/8/17, 2/10/17 y 18/10/17:

- ✓ El 31 de agosto se registraron valores de $\Delta_{MAX PARCIAL}$ de 2.0 m (eje J), y de 2.20 m (eje K) con un acumulado de lluvia de 1077.75 mm (Estación Ilopango).
- ✓ El 2 de octubre se volvieron a ver cambios relevantes de erosión donde se registró un $\Delta_{MAX PARCIAL}$ de 2.4 m (eje L) con un acumulado de lluvia de 1418.75 mm.
- ✓ Además, para el 18 de octubre existieron grandes cambios en el eje M donde se obtuvo un $\Delta_{MAX PARCIAL}$ de 3.37 m con un acumulado de lluvia de 1504.35 mm.

Es relevante conocer las lluvias instantáneas que pudieron haber influenciado en el deterioro de este punto, a continuación se mencionan algunas de ellas:

La lluvia del 15 de mayo (44.5 mm), el periodo del 2 al 31 julio donde se registró una acumulación de 398.5 mm, la del 21 agosto (38.8 mm), la del 1 de septiembre (58.2 mm) y el temporal registrado en los últimos 15 días del mes de septiembre donde la acumulación fue de 175 mm.

Al evaluar el comportamiento de este talud al final del periodo de estudio, se puede decir que solo existieron procesos erosivos obteniéndose las máximas variaciones horizontales en los ejes A, J, K, L y M con valores de $\Delta_{MAX ACUMULADOS}$ superiores a los 2.0 m para la fecha del 16/11/17 en la que se tenía un acumulado de lluvia de 1557.65 mm; de los ejes mencionados anteriormente el que experimento mayores cambios fue el M con un $\Delta_{MAX ACUMULADO}$ de 8.47 m.

Cambios en dirección vertical:

Cabe destacar que las alturas mostradas en la Tabla No. 5.2.6, fueron tomadas desde el borde del talud hasta el nivel del río de cada visita. El comportamiento de los procesos erosivos y de azolvamiento se detalla a continuación:

Los cambios máximos por procesos erosivos se pudieron observar en los ejes B, I, y M:

- El eje B con un valor de $\Delta_{\text{MAX PARCIAL}}$ de 2.0 m en la fecha 3 de julio teniendo un acumulado de lluvia de 429.2 mm,
- El eje I con un valor de $\Delta_{\text{MAX PARCIAL}}$ de 1.95 m en la fecha 28 de julio teniendo un acumulado de lluvia de 700.5 mm, y
- El eje M con un valor de $\Delta_{\text{MAX PARCIAL}}$ de 2.10 m en la fecha 2 de octubre en la que se tenía un acumulado de 1418.75 mm.

Los cambios por procesos de azolvamiento se experimentaron en la mayoría de los ejes durante todo el periodo, sin embargo, los máximos valores fueron obtenidos en los ejes B, C, D, y M:

- El eje C con un valor de $\Delta_{\text{MAX PARCIAL}}$ de 1.80 m en la fecha 28 de julio teniendo un acumulado de lluvia de 700.5 mm,
- Los ejes B e I con valores de $\Delta_{\text{MAX PARCIALES}}$ de 1.5 y 1.77 m respectivamente en la fecha de 2 de octubre, teniendo un acumulado de lluvia de 1418.75 mm, y
- Los ejes D y M con valores de $\Delta_{\text{MAX PARCIAL}}$ de 1.44 y 1.55 m respectivamente para la fecha 18 de octubre en la que se tenía un acumulado de lluvia de 1504.35 mm.

Al evaluar el comportamiento de este talud al final del periodo de estudio, predominaron los procesos erosivos, obteniéndose las máximas variaciones verticales acumuladas ($\Delta_{\text{MAX ACUMULADOS}}$) en los ejes: A (2.37 m), B (2.10 m), C (2.24 m), G (2.14 m), y M (1.9 m); el menor valor fue experimentado en el eje I (0.20 m).

Análisis: con los resultados obtenidos se puede decir que los factores causantes de la erosión horizontal fueron los siguientes: la exposición a la quebrada, las lluvias del invierno de 2017 y la falta de cobertura vegetal en el cuerpo; era común ver fisuras o

discontinuidades provocadas por procesos de exfoliación como la temperatura, lluvias y actividad sísmica, las cuales, se derrumban por lluvias y/o sismos fuertes.

Otra variable a considerar fue la topografía irregular (salientes del talud), ya que el agua impactaba de manera frontal en esta zona, haciéndola vulnerable a ser desprendida por la corriente de la quebrada cuando existían crecidas por las fuertes lluvias.

La dirección de la corriente del agua y la velocidad de esta, fueron los factores que regían la erosión vertical y los procesos de azolvamiento; en el periodo donde se registraban lluvias intensas y flujos de agua con grandes velocidades predominaban los procesos erosivos; mientras que, para lluvias con velocidades de corriente moderadas los procesos de azolvamiento se hicieron presentes.

- **CÁLCULO DE VOLUMEN PERDIDO Y TASA DE EROSIÓN**

El cálculo de la tasa de erosión se basó en las unidades presentadas en la Ecuación Universal de La Perdida de Suelo (USLE), es decir, en toneladas por metro cuadrado por año. La metodología para obtener la tasa de erosión se presenta a continuación:

Paso No 1

Calcular la densidad húmeda ponderada para todo el talud, debido, a que este se encuentra conformado por diferentes estratos. Este valor ya ha sido obtenido en la Tabla No. 5.2.4 de este capítulo.

$$\text{Densidad húmeda ponderada} = 1.5 \text{ T/m}^3$$

Paso No 2

Calcular el volumen perdido de material por todo el talud. El volumen total erosionado será calculado mediante la utilización de un software especializado en diseño gráfico, para obtener más precisión en los resultados; en donde, se dibujarán los deltas máximos de erosión que se obtuvieron en los monitoreos de campo (ver Tabla No. 5.2.5)

$$\text{El volumen total erosionado fue de: } 663.75 \text{ m}^3$$

Los datos obtenidos del GPS fueron procesados en un programa de diseño gráfico para obtener el área efectiva erosionada y el volumen total perdido para el periodo en que

fue utilizada esta técnica; además, fue calculada el área efectiva erosionada y volumen perdido en este mismo periodo para la técnica "A". Los resultados se presentan en la Tabla No. 5.2.7.

RESULTADOS DE TECNICA "A" Y DEL GPS	
Fecha inicial de monitoreo	2/10/2017
Fecha final de monitoreo	16/11/2017
Área efectiva erosionada m ² (GPS)	14.20
Volumen total erosionado m ³ (GPS)	79.67
Área efectiva erosionada m ² (Técnica A)	18.81
Volumen total erosionado m ³ (Técnica A)	104.35

Tabla No. 5.2.7 Resultados de la aplicación de la técnica "A" y del GPS de doble frecuencia
Fuente: EL AUTOR

Paso No 3

Calculo de peso total perdido en toneladas (técnica A):

$$W_{Toneladas} = \text{Densidad humeda ponderda} * \text{Volumen total perdido}$$

$$W_{Toneladas} = 1.5 \times 663.75$$

$$W_{Toneladas} = \mathbf{995.63 \text{ Toneladas}}$$

Calculo de peso total perdido en toneladas (técnica del GPS de doble frecuencia):

$$W_{Toneladas} = \text{Densidad humeda ponderda} * \text{Volumen total perdido}$$

$$W_{Toneladas} = 1.5 \times 79.67$$

$$W_{Toneladas} = \mathbf{119.505 \text{ Toneladas}}$$

Calculo de peso total perdido en toneladas (técnica A, periodo de GPS):

$$W_{Toneladas} = \text{Densidad humeda ponderda} * \text{Volumen total perdido}$$

$$W_{Toneladas} = 1.5 \times 104.35$$

$$W_{Toneladas} = \mathbf{156.525 \text{ Toneladas}}$$

Paso No 4

Calculo de la tasa de erosión (técnica A):

$$TASA \ DE \ EROSION = \frac{W_{Toneladas}}{AREA \ DE \ INFLUENCIA \times PERIODO \ DE \ ANALISIS}$$

$$TASA \ DE \ EROSION = \frac{995.63 \ T}{149.24m^2 \times 1 \ año}$$

$$TASA \ DE \ EROSION = \mathbf{6.67 \frac{T}{m^2 - año}}$$

Calculo de la tasa de erosión (**técnica del GPS de doble frecuencia**):

$$TASA DE EROSION = \frac{119.505 T}{14.20 m^2 \times 0.125 año}$$

$$TASA DE EROSION = 67.33 \frac{T}{m^2 - año}$$

Calculo de la tasa de erosión (**técnica A, periodo de GPS**):

$$TASA DE EROSION = \frac{156.525 T}{18.81 m^2 \times 0.125 año}$$

$$TASA DE EROSION = 66.57 \frac{T}{m^2 - año}$$

5.2.2 TALUD ZONA FRANCA II (PUNTO No. 9)

A continuación, se presenta el resultado de los aspectos planteados para este talud:

- **CONDICIONES INICIALES Y FINALES**

En la Tabla No. 5.2.8 se presentan las condiciones iniciales de este punto de estudio.

CONDICIONES INICIALES	
Nombre del talud	PUNTO No. 9 TALUD ZONA FRANCA II
Altura inicial promedio (m)	2.76 Talud Sur y 6.8 Talud Norte
Ancho inicial promedio del río (m)	23
Longitud del tramo en estudio (m)	20
Área del talud (m ²)	55.2 talud sur y 136 talud norte
Cobertura vegetal	Abundante en la cresta y sin cobertura en el cuerpo
Numero de estratos	4
Unidades presentes	Deposito aluvial, unidad F, Ignimbrita Beta, unidad E, y unidad Alfa
Tipo de erosión presente	Horizontal y vertical
Ejes en dirección paralela al borde del río	Eje 1
Ejes en dirección perpendicular al borde del río	Línea base (N), O, y P

Tabla No. 5.2.8 Condiciones iniciales del PUNTO No. 9 TALUD ZONA FRANCA II
Fuente: EL AUTOR, 2018

Las condiciones finales de este talud se describen en la Tabla No. 5.2.9, donde se puede observar si existen cambios en sus dimensiones, y en el número de estratos.

CONDICIONES FINALES			
Altura final promedio (m)	4.4 Talud Sur y 6.8 Talud Norte		
Ancho final promedio del río (m)	24.77		
Área del talud (m ²)	88 talud sur y 136 talud norte		
Numero de estratos	4		
Unidades presentes	Deposito aluvial, unidad F, Ignimbrita Beta, unidad E, y unidad Alfa		
Características de los estratos			
Nombre de unidad	Altura promedio (m)	Color	Tamaño del grano (mm)
Deposito aluvial	2.5	Gris	5-9
Ignimbrita Beta	1.1	Café claro	0.15-0.3
E (deposito húmedo)	0.21	Café oscuro	0.6
E (deposito seco)	0.20	Café claro	4
Ignimbrita Alfa	2.35	Blanco	4

Tabla No. 5.2.9 Condiciones finales del PUNTO No. 9 TALUD ZONA FRANCA II
Fuente: EL AUTOR, 2018

- **PROPIEDADES GEOTECNICAS**

En este punto se observaron al final del periodo de estudio 4 estratos, a los que se le determinaron su humedad, gravedad específica, peso volumétrico seco y húmedo, y su granulometría; lo anterior se detalla a continuación (ver Tabla No. 5.2.10).

DESCRIPCIÓN	DEPOSITO ALUVIAL	UNIDAD E (DEPOSITO SECO)	UNIDAD E (DEPOSITO HÚMEDO)	IGNIMBRITA ALFA
Gruesos	97.5	93	29.4	70.5
% Grava	9.9	10	0	7
% Arena	87.6	83	29.4	63.5
Finos	2.5	7	70.6	29.5
% Limos	2.5	6.8	59.4	28
% Arcilla		0.2	11.2	1.5
Total	100	100	100	100
Cu	5.5	5.67	31.58	10.24
Cc	1.14	0.96	10.75	0.33
Plasticidad	NP	NP	NP	NP
Color	Color gris con presencia de finos no plásticos	Color gris con presencia de arena pumítica	Color café con presencia de arena y finos no plásticos	Color blanco con presencia de pómez
Clasificación	Arena mal graduada	Arena bien graduada con Limo	Limo Arenoso	Arena Limosa
Símbolo del grupo	SP	SW-SM	ML	SM
Gravedad específica promedio	2.66	2.41	2.51	2.33
Densidad húmeda (T/m³)	1.15	1.25	1.67	1.75
Densidad seca (T/m³)	1.05	1.16	1.49	1.59
% w natural	9.94	7.3	12.03	10.32
Espesor de la unidad (m)	2.5	1.95		2.35
Densidad húmeda ponderada (T/m³)	1.45			

Tabla No. 5.2.10 Identificación geotécnica de estratos del PUNTO No. 3 AEROPUERTO II
Fuente: EL AUTOR, (2017). Con resultados obtenidos en el Laboratorio de Suelos y Materiales de la Universidad de El Salvador
"Ing. Mario ángel Guzmán Urbina".

- **RESULTADOS DE LOS CAMBIOS EXPERIMENTADOS EN EL TALUD DURANTE EL PERIODO DE ESTUDIO**

En la Tabla 5.2.11 se presentan las mediciones horizontales y verticales obtenidas en los 10 monitoreos de campo realizados a la zona de estudio, en estas se presentan los deltas máximos de erosión (deltas acumulados) que presento este talud.

DISTANCIAS HORIZONTALES																		
Fecha/Eje	TALUD SUR									TALUD NORTE								
	N (R)	N (P)	N(A)	O (R)	O (P)	O(A)	P (R)	P (P)	P (A)	N (R)	N (P)	N(A)	O (R)	O (P)	O(A)	P (R)	P (P)	P (A)
20/3/2017	500	0	0	780	0	0	420	0	0	1875	0	0	1590	0	0	1000	0	0
24/4/2017	500	0	0	780	0	0	420	0	0	1875	0	0	1590	0	0	1000	0	0
29/5/2017	450	50	50	780	0	0	420	0	0	1875	0	0	1590	0	0	1000	0	0
3/7/2017	450	0	50	780	0	0	420	0	0	1875	0	0	1590	0	0	910	90	90
11/7/2017	430	20	70	780	0	0	420	0	0	1875	0	0	1590	0	0	910	0	90
28/7/2017	430	0	70	780	0	0	420	0	0	1875	0	0	1580	10	10	910	0	90
31/8/2017	430	0	70	780	0	0	420	0	0	1875	0	0	1580	0	10	910	0	90
2/10/2017	400	30	100	780	0	0	420	0	0	1870	5	5	1510	70	80	700	210	300
18/10/2017	400	0	100	780	0	0	420	0	0	1870	0	5	1510	0	80	653	47	347
16/11/2017	400	0	100	780	0	0	420	0	0	1870	0	5	1510	0	80	653	0	347

DISTANCIAS VERTICALES																		
Fecha/Eje	TALUD SUR									TALUD NORTE								
	N (R)	N (P)	N(A)	O (R)	O (P)	O(A)	P (R)	P (P)	P (A)	N (R)	N (P)	N(A)	O (R)	O (P)	O(A)	P (R)	P (P)	P (A)
20/3/2017	255	0	0	395	0	0	179	0	0	658	0	0	648	0	0	735	0	0
24/4/2017	255	0	0	395	0	0	179	0	0	640	-18	-18	648	0	0	735	0	0
29/5/2017	255	0	0	395	0	0	179	0	0	640	0	-18	648	0	0	735	0	0
3/7/2017	255	0	0	395	0	0	179	0	0	640	0	-18	648	0	0	730	-5	-5
11/7/2017	255	0	0	395	0	0	179	0	0	640	0	-18	648	0	0	720	-10	-15
28/7/2017	300	45	45	395	0	0	330	151	151	700	60	42	650	2	2	730	10	-5
31/8/2017	335	35	80	410	15	15	365	35	186	750	50	92	670	20	22	740	10	5
2/10/2017	400	65	145	430	20	35	410	45	231	750	0	92	640	-30	-8	700	-40	-35
18/10/2017	440	40	185	440	10	45	430	20	251	723	-27	65	640	0	-8	685	-15	-50
16/11/2017	440	0	185	440	0	45	430	0	251	723	0	65	640	0	-8	685	0	-50

Tabla No. 5.2.11 Comportamiento de los cambios experimentados en la dirección horizontal y vertical del Punto No. 9 Zona Franca II.

Fuente: EL AUTOR, (2017). Con resultados obtenidos en campo.

- **ESQUEMAS FINALES**

Para poder observar los cambios de este punto, se presenta para cada eje, tres condiciones (inicial, intermedia y final) que describen la variación horizontal y vertical de los taludes Norte y Sur (ver Figuras No. 5.2.18, 5.2.19 y 5.2.20).

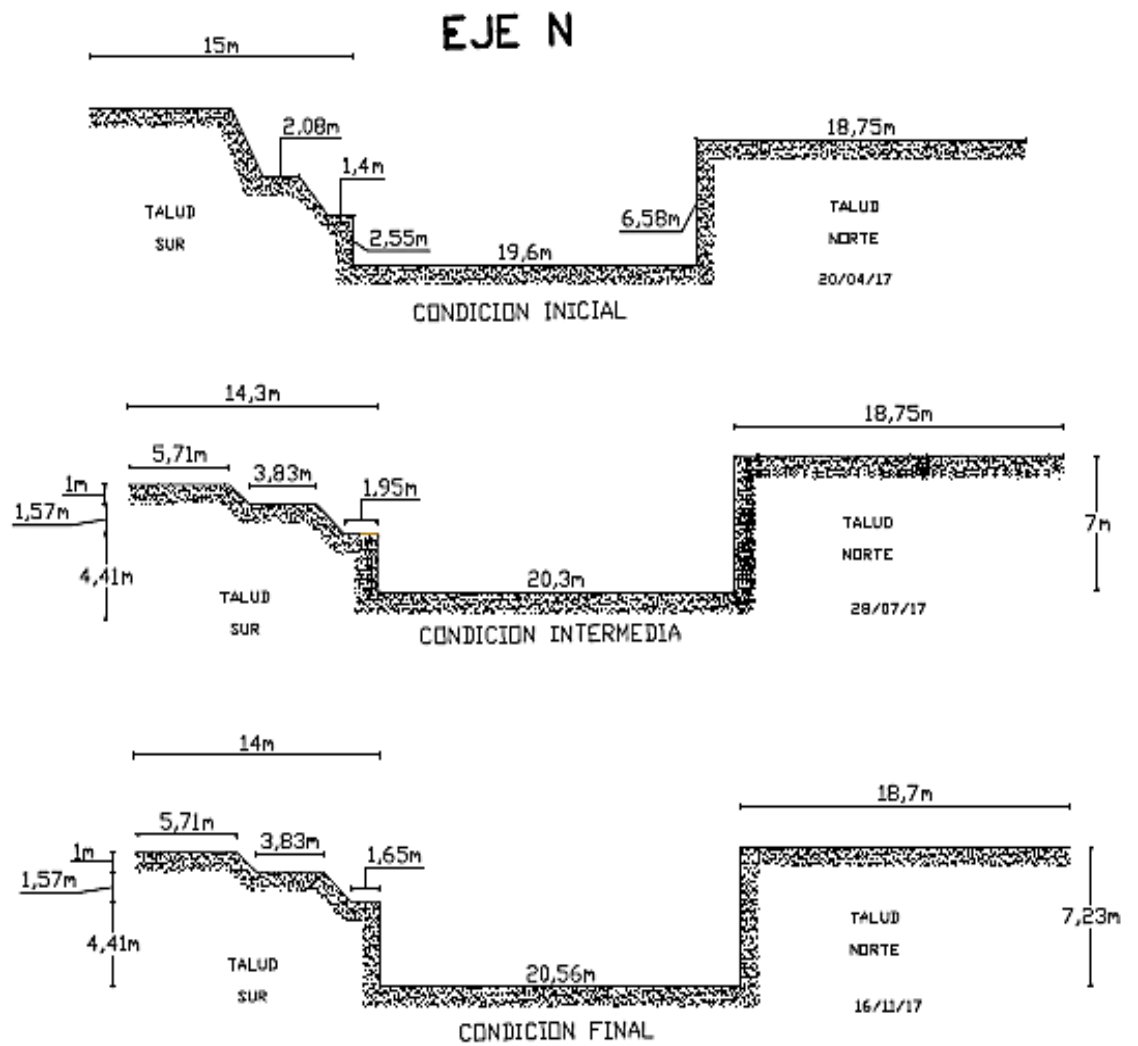


Figura No. 5.2.18 Condición inicial, intermedia y final del eje N del TALUD ZONA FRANCA II
 Fuente: EL AUTOR, 2018

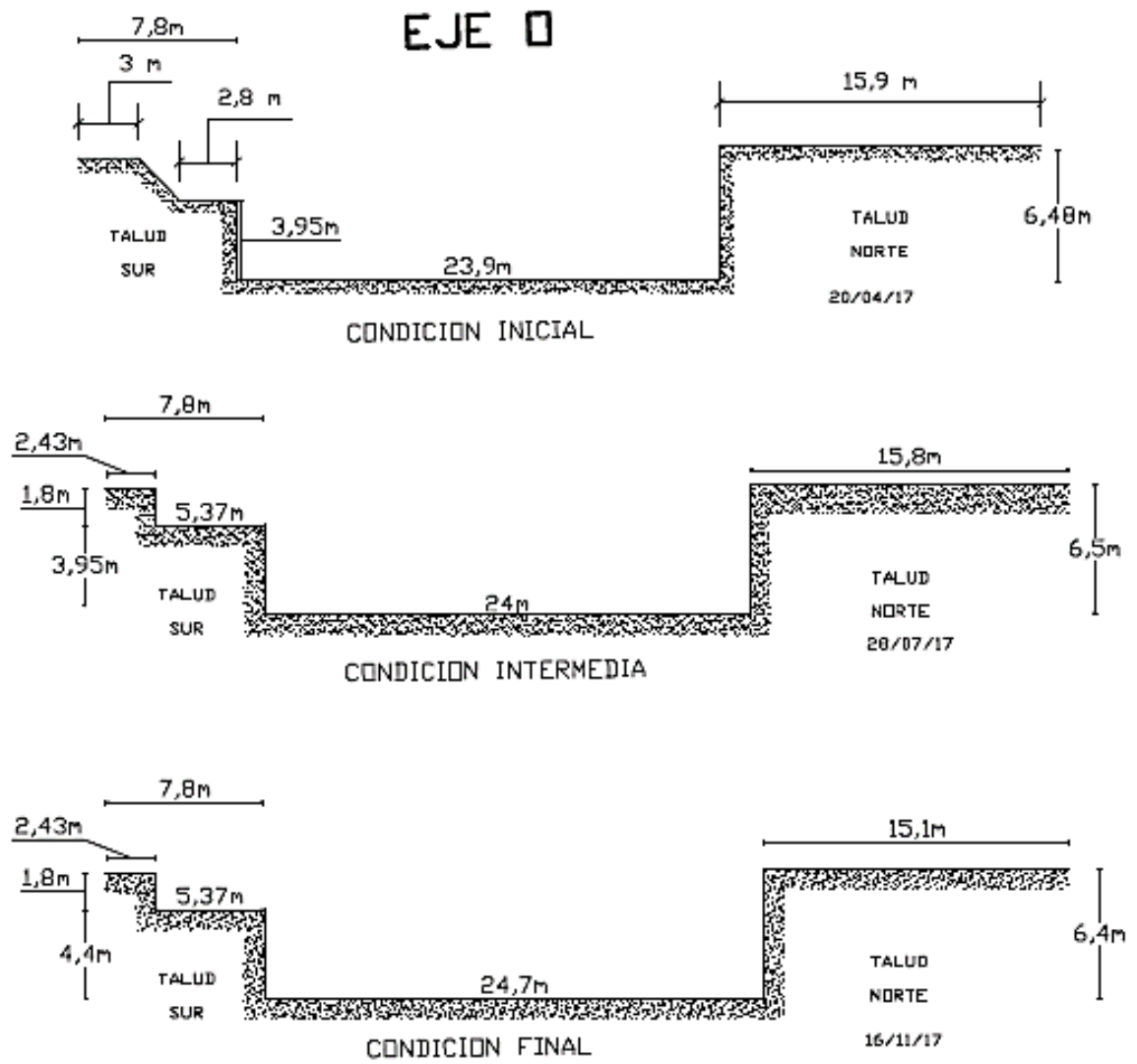


Figura No. 5.2.19 Condición inicial, intermedia y final del eje O del TALUD ZONA FRANCA II
Fuente: EL AUTOR, 2018

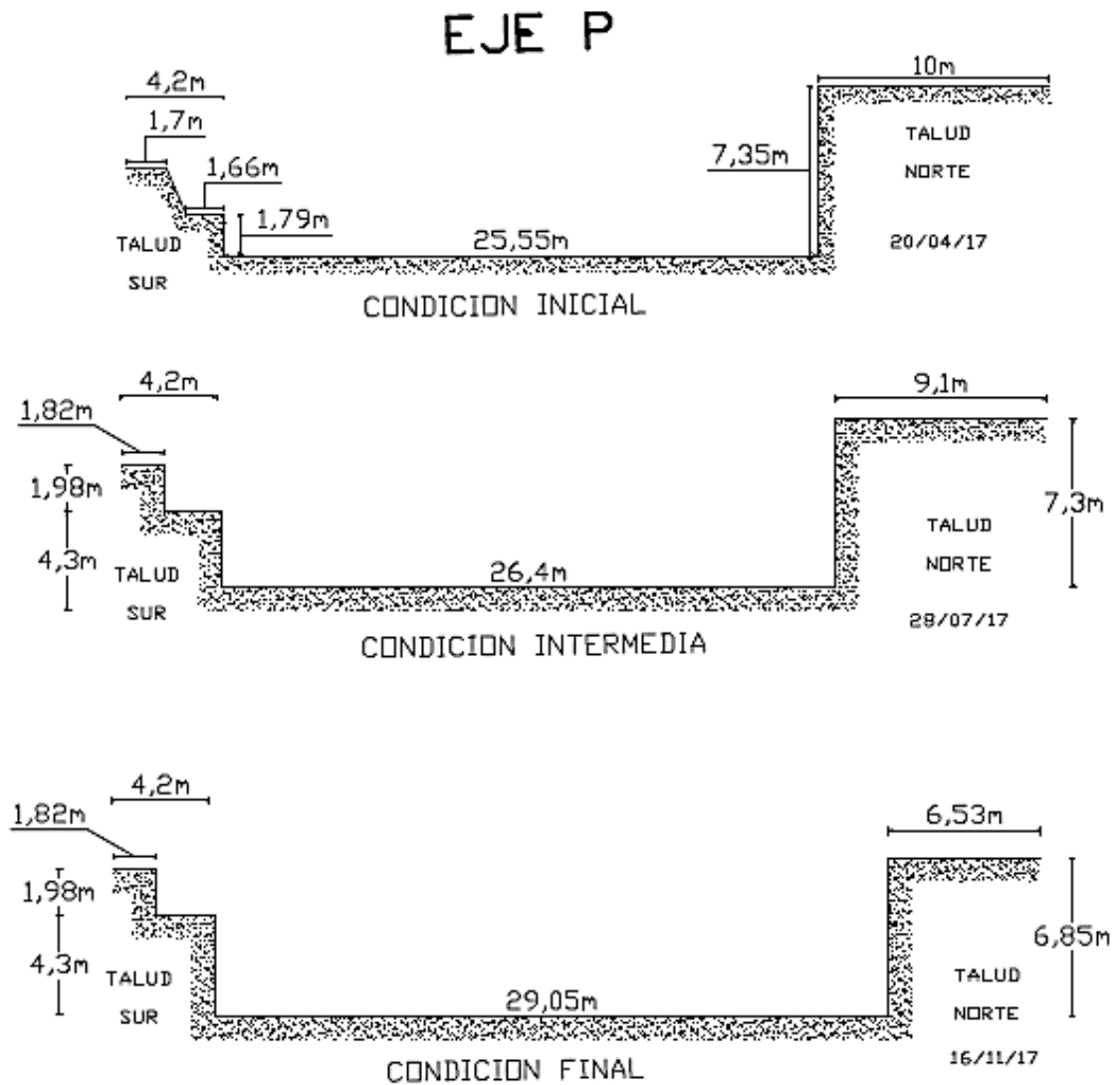


Figura No. 5.2.20 Condición inicial, intermedia y final del eje P del TALUD ZONA FRANCA II
Fuente: EL AUTOR, 2018

Nota: el talud Sur experimento erosión laminar en la superficie (en los ejes N, O, y P), es por ello el cambio en su topografía.

La Figura No. 5.2.21 muestra la vista en planta de la sección de estudio para las condiciones inicial y final.

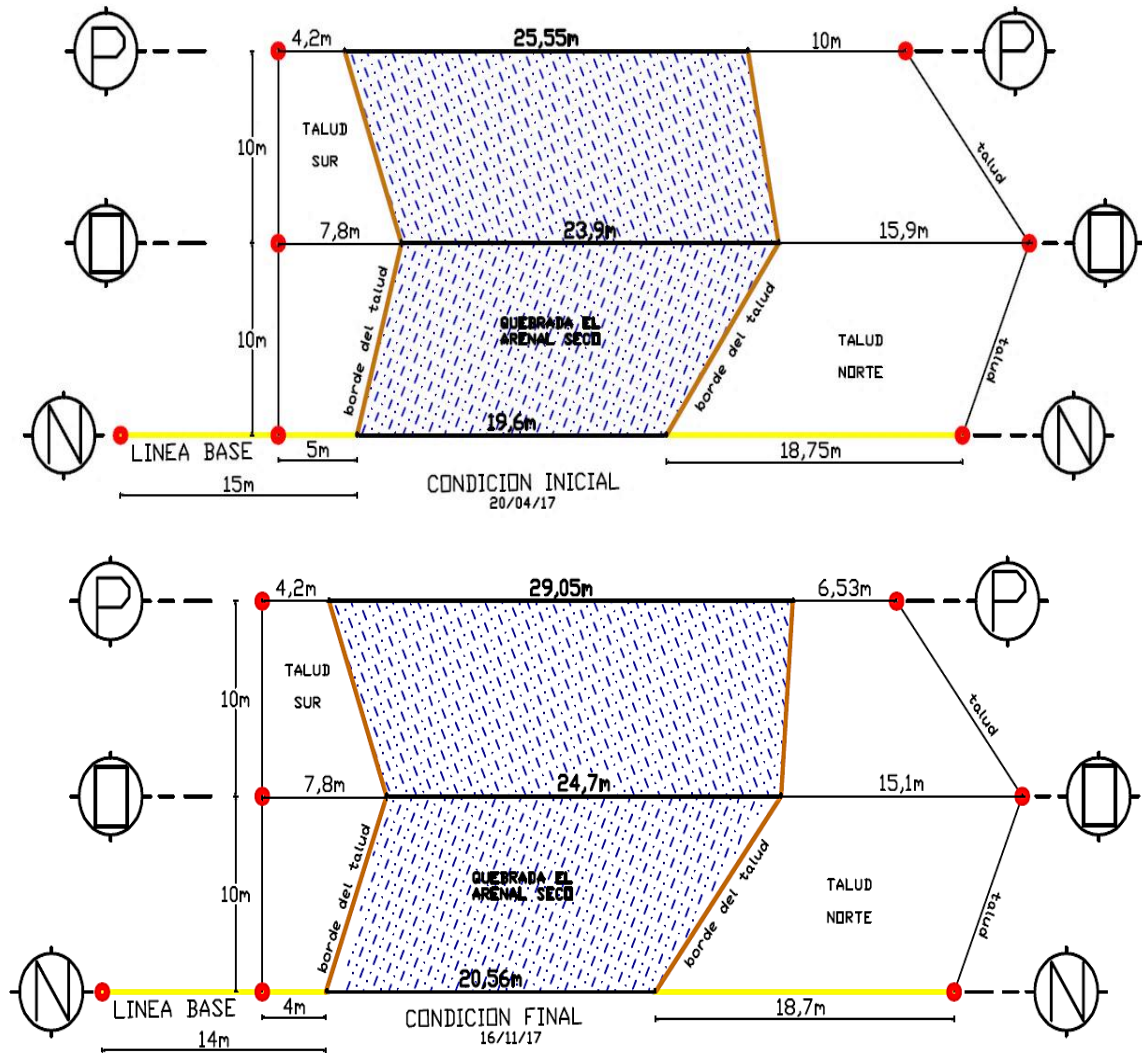


Figura No. 5.2.21 Condiciones iniciales y finales del TALUD ZONA FRANCA II (vista en planta)

Fuente: EL AUTOR, 2018

Con los resultados obtenidos al finalizar el periodo de estudio se puede calcular el área efectiva erosionada para cada talud (talud sur y talud norte). El área para el talud sur

fue de 5.0 m² y para el talud norte fue de 25.61 m², la Figura No. 5.2.22 muestra estos resultados en un esquema.

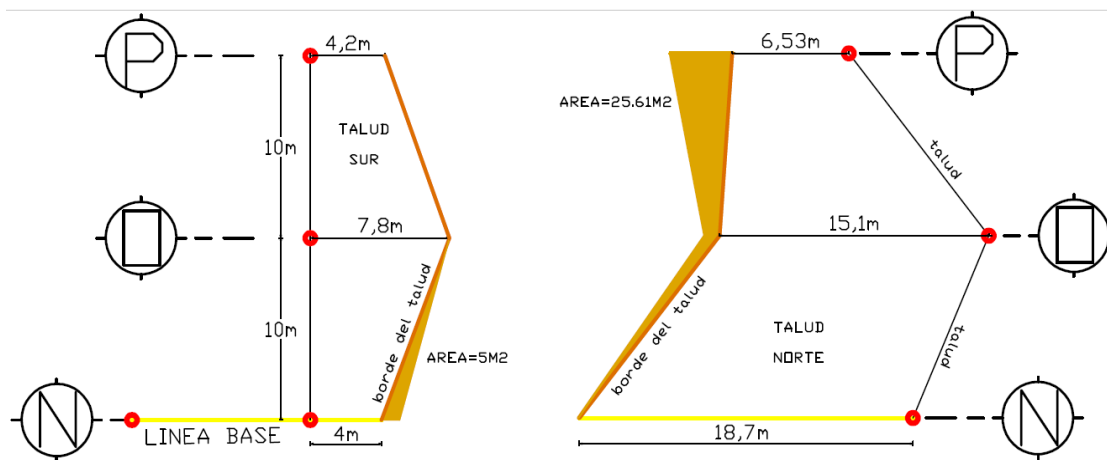


Figura No. 5.2.22 Área erosionada de los taludes Sur y Norte de Talud Zona Franca II
Fuente: EL AUTOR, 2018

• **GRAFICAS DE COMPORTAMIENTO DE LLUVIA - EROSIÓN - AZOLVAMIENTO**

En las Figura No. 5.2.23 se presentan los delta de erosión horizontal acumulados y en las Figuras No. 5.2.24, y 5.2.25 se presentan los delta de erosión vertical acumulados hasta el final del periodo de estudio; ambos casos se encuentran comparados con el registro de lluvias diarias registrada durante el mismo periodo.

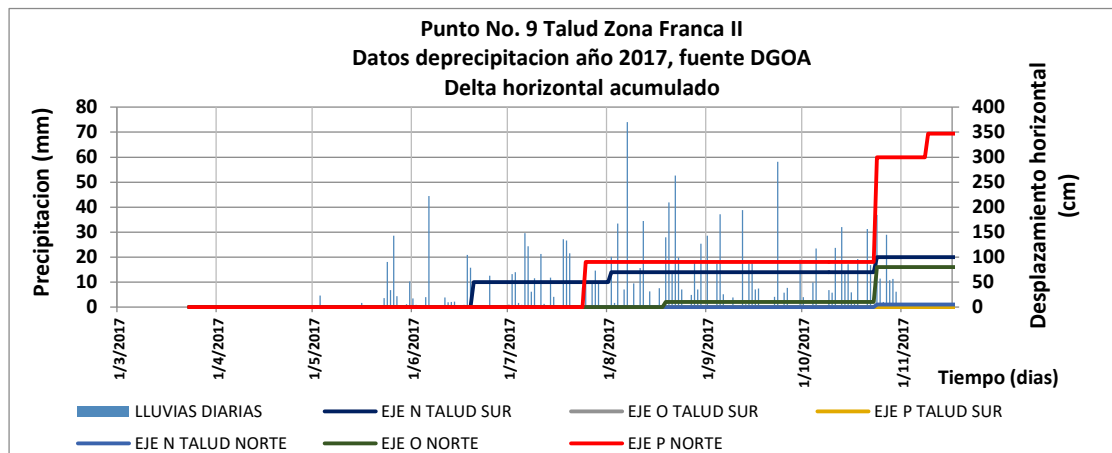


Figura No. 5.2.23 Gráficos del comportamiento de la lluvia y erosión horizontal acumulada del PUNTO No.9 TALUD ZONA FRANCA II
Fuente: EL AUTOR

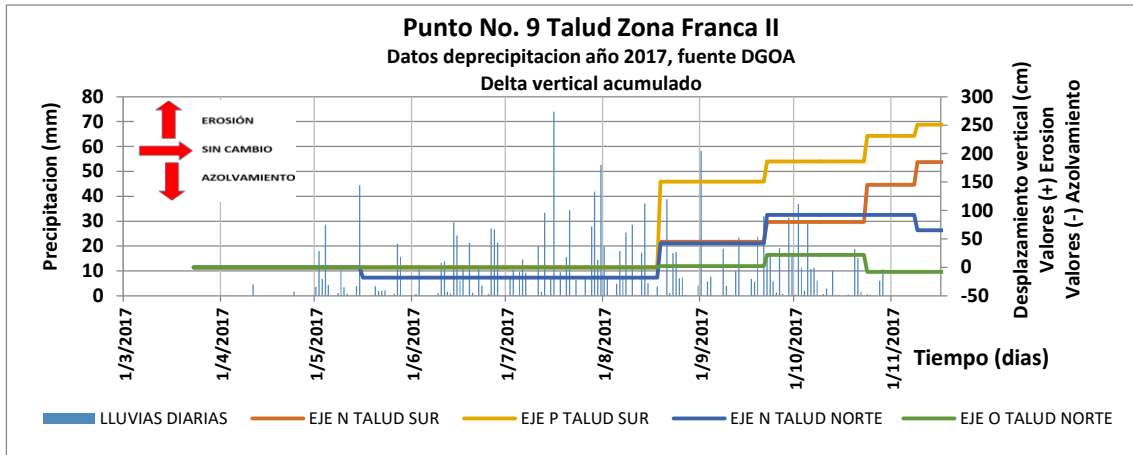


Figura No. 5.2.25 Gráficos del comportamiento de la lluvia y erosión vertical acumulada o Azolvamiento del Punto No.9 Talud Zona Franca II
Fuente: EL AUTOR

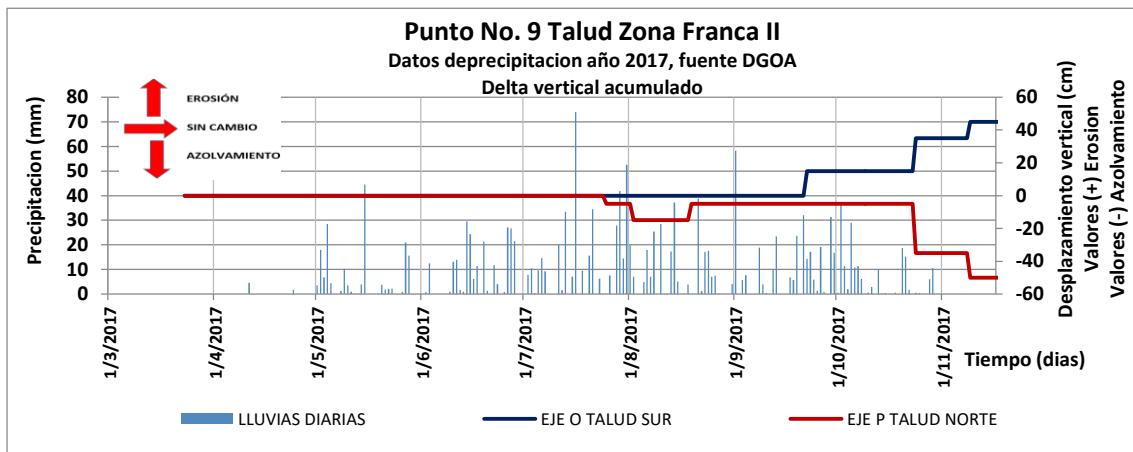


Figura No. 5.2.24 Gráficos del comportamiento de la lluvia y erosión vertical acumulada o Azolvamiento del PUNTO No.9 TALUD ZONA FRANCA II
Fuente: EL AUTOR

- **INTERPRETACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS**

Este punto de estudio se divide en dos taludes (Talud Sur y Talud Norte), a continuación se describen los cambios durante el periodo de estudio para cada uno.

TALUD SUR

Los cambios en dirección **horizontal** no fueron tan grandes como se proyectaban (por los antecedentes), un claro ejemplo, es el cambio máximo parcial registrado en la fecha 29 de mayo con un valor de $\Delta_{MAX PARCIAL}$ de 0.5 m para el eje N teniendo un acumulado de lluvia de 180.7 mm.

Los cambios máximos parciales por proceso erosivos en dirección **vertical** se observan en las fechas 28/7/17 y 2/10/17:

- ✓ En la fecha 28 de julio se registró un valor de $\Delta_{\text{MAX PARCIAL}}$ de 1.51 m para el eje P teniendo un acumulado de lluvia de 700.5 mm,
- ✓ El 2 de octubre volvieron a ver cambios, donde se registró un $\Delta_{\text{MAX PARCIAL}}$ de 0.65 m para el eje N teniendo un acumulado de lluvia de 1418.75 mm.

Es importante destacar que en este talud no existió la presencia de procesos de azolvamiento.

TALUD NORTE

Los cambios en dirección **horizontal** fueron relativamente mayores para este talud comparado con el talud sur, obteniendo el máximo cambio parcial en la fecha 2 de octubre con un valor de $\Delta_{\text{MAX PARCIAL}}$ de 2.10 m teniendo un registro de lluvia acumulada de 1418.75 mm.

En dirección **vertical** hubo presencia de procesos erosivos y de azolvamiento. Los cambios máximos por procesos erosivos se pudieron observar en el eje N con un valor de $\Delta_{\text{MAX PARCIAL}}$ de 0.60 m en la fecha 28 julio teniendo una acumulación de lluvia de 700.5 mm. Los cambios por procesos de azolvamiento se experimentaron en todos los ejes, de ellos, el que registro el máximo cambio fue el eje P con un valor de $\Delta_{\text{MAX PARCIAL}}$ de 0.40 m para la fecha 2 de octubre teniendo un acumulado de lluvia de 1418.75 mm.

Análisis: Al evaluar el comportamiento de este punto se puede decir que los mayores cambios se registraron en el talud norte, porque se encuentra ubicado en una curva, donde la corriente de la quebrada impacta frontalmente.

También es importante describir el comportamiento del ancho del rio; ya que, todos los ejes (N, O, y P) sufrieron un ensanchamiento, de ellos, el que experimento el mayor cambio fue el eje P con un $\Delta_{\text{MAX ACUMULADO}}$ de 3.5 m para la fecha 16 de noviembre con un acumulado de lluvia de 1557.65 mm.

- **CALCULO DE VOLUMEN PERDIDO Y TASA DE EROSIÓN**

Los datos obtenidos de la técnica A, y del GPS fueron procesados en un programa de diseño gráfico para obtener el área efectiva erosionada y el volumen total perdido, durante el periodo en que fueron utilizadas dichas técnicas; los resultados se presentan en la Tabla No. 5.2.12.

TALUD	TECNICA DE MONITOREO	DENSIDAD HÚMEDA PONDERADA (T/m ³)	VOLUMEN PERDIDO (m ³)	PESO TOTAL PERDIDO (T)	ÁREA EFECTIVA EROSIONADA (m ²)	PERIODO DE ESTUDIO (Año)	TASA DE EROSION (T/m ² -año)
Punto 9 Talud Sur	A	1.45	0.31	0.4495	5	1	0.09
Punto 9 Talud Sur	A		0	0	0	0.125	0
Punto 9 Talud Sur	GPS		0	0	0	0.125	0
Punto 9 Talud Norte	A		110.25	159.8625	25.61	1	6.24
Punto 9 Talud Norte	A		13.96	20.242	2.35	0.125	68.91
Punto 9 Talud Norte	GPS		14.75	21.388	2.61	0.125	65.56

Tabla No. 5.2.12 Determinación de las tasas de erosión para el Talud Sur y Norte del PUNTO No. 9 ZONA FRANCA II
 Fuente: EL AUTOR

5.2.3 TALUD AEROPUERTO II (PUNTO No. 3)

A continuación se presentan los resultados de los aspectos planteados para este talud.

- **CONDICIONES INICIALES Y FINALES**

La Tabla No. 5.2.13 presenta un resumen de las condiciones iniciales de este punto.

CONDICIONES INICIALES	
Nombre del talud	PUNTO No. 3 TALUD AEROPUERTO II
Altura inicial promedio (m)	11
Longitud del tramo en estudio (m)	55
Área del talud (m ²)	605
Cobertura vegetal	Abundante en la cresta y sin cobertura en el cuerpo
Numero de estratos	4
Unidades presentes	Deposito aluvial, unidad F, unidad E, y unidad Alfa
Tipo de erosión presente	Horizontal y vertical
Ejes en dirección paralela al borde del rio	línea base, eje 1 y eje 1'
Ejes en dirección perpendicular al borde del rio	A,B,C,D,E,F,G,H,I,J,K,L

Tabla No. 5.2.13 Condiciones iniciales del PUNTO No. 3 TALUD AEROPUERTO II
Fuente: EL AUTOR, 2018

La Tabla No. 5.2.14 presenta las condiciones finales del talud, donde se puede observar si existen cambios en sus dimensiones, y en el número de estratos.

CONDICIONES FINALES			
Altura final promedio (m)	11.3		
Área del talud (m ²)	621.5		
Numero de estratos	5		
Unidades presentes	Deposito aluvial, unidad F, unidad Beta, unidad E, y unidad Alfa		
Características de los estratos			
Nombre de unidad	Altura promedio (m)	Color	Tamaño del grano (mm)
Deposito aluvial	1.3	Gris	5-9
F	3.8	Beige claro	4
Ignimbrita Beta	1.4	Café claro	0.6
E (deposito húmedo)	0.21	Café oscuro	0.6
E (deposito seco)	0.20	Café claro	4
Ignimbrita Alfa	3	Blanco	2

Tabla No. 5.2.14 Condiciones finales del PUNTO No. 3 TALUD AEROPUERTO II
Fuente: EL AUTOR, 2018

- **PROPIEDADES GEOTECNICAS**

En este punto se observaron al final del periodo de estudio 5 estratos, a los que se le determinaron su humedad, gravedad específica, peso volumétrico seco y húmedo, y su granulometría; lo anterior se detalla a continuación (ver Tabla No. 5.2.15).

DESCRIPCIÓN	DEPOSITO ALUVIAL	UNIDAD F	IGNIMBRITA BETA	UNIDAD E (DEPOSITO SECO)	UNIDAD E (DEPOSITO HÚMEDO)	IGNIMBRITA ALFA
Gruesos	97.37	55.6	50.4	91.7	29.4	67.1
% Grava	7.66	9.8	0.1	8.5	0	2.6
% Arena	89.71	45.8	50.3	83.2	29.4	64.5
Finos	2.63	44.4	49.6	8.3	70.6	32.9
% Limos	2.63	41.3	45.8	8.1	59.4	31.9
% Arcilla		3.1	3.8	0.2	11.2	1
Total	100	100	100	100	100	100
Cu	4.75	8.57	19.57	9.44	30	9.75
Cc	1.07	0.29	1.22	1.6	10.21	0.31
Plasticidad	NP	NP	NP	NP	NP	NP
Color	Color gris con presencia de finos no plásticos	Color blanco con presencia de pómez	Color café claro con presencia de finos no plásticos	Color gris con presencia de arena pumítica	Color café con presencia de arena y finos no plásticos	Color blanco con presencia de pómez
Clasificación	Arena mal graduada	Arena Limosa	Arena Limosa bien graduada	Arena bien graduada con Limo	Limo Arenoso	Arena Limosa
Símbolo del grupo	SP	SM	SM	SW-SM	ML	SM
Gravedad específica promedio	2.66	2.35	2.46	2.49	2.41	2.33
Densidad húmeda (T/m³)	1.15	1.65	1.86	1.25	1.96	1.75
Densidad seca (T/m³)	1.05	1.32	1.48	1.11	1.58	1.59
% w natural	9.94	24.88	25.48	12.6	24.22	9.8
Espesor de la unidad (m)	1.3	3.8	1.4	1.8		3
Densidad húmeda ponderada (T/m³)	1.6					

Tabla No. 5.2.15 Identificación geotécnica de estratos del PUNTO No. 3 AEROPUERTO II

Fuente: EL AUTOR, (2017). Con resultados obtenidos en el Laboratorio de Suelos y Materiales de la Universidad de El Salvador "Ing. Mario ángel Guzmán Urbina".

- **RESULTADOS DE LOS CAMBIOS EXPERIMENTADOS EN EL TALUD DURANTE EL PERIODO DE ESTUDIO**

En la Tabla 5.2.16 y 5.2.17 se presentan las mediciones horizontales y verticales obtenidas en los 10 monitoreos de campo.

DISTANCIAS HORIZONTALES (cm)																					
Fecha/Eje	A (R)	A (P)	A(A)	B (R)	B (P)	B(A)	C (R)	C (P)	C (A)	D (R)	D (P)	D (A)	E (R)	E (P)	E (A)	F (R)	F (P)	F (A)	G (R)	G (P)	G (A)
20/3/2017	1945	0	0	2075	0	0	2000	0	0	1925	0	0	1770	0	0	1770	0	0	1810	0	0
24/4/2017	1945	0	0	2075	0	0	2000	0	0	1925	0	0	1770	0	0	1770	0	0	1810	0	0
29/5/2017	1880	65	65	2005	70	70	2000	0	0	1925	0	0	1770	0	0	1770	0	0	1810	0	0
3/7/2017	1540	340	405	1500	505	575	1456	544	544	1500	425	425	1680	90	90	1690	80	80	1633	177	177
11/7/2017	1540	0	405	1500	0	575	1456	0	544	1500	0	425	1680	0	90	1690	0	80	1633	0	177
28/7/2017	1540	0	405	1500	0	575	1370	86	630	1270	230	655	1185	495	585	1255	435	515	1475	158	335
31/8/2017	1510	30	435	1490	10	585	1360	10	640	1230	40	695	1180	5	590	1090	165	680	1050	425	760
2/10/2017	1510	0	435	1420	70	655	1196	164	804	973	257	952	869	311	901	686	404	1084	668	382	1142
18/10/2017	1510	0	435	1420	0	655	1196	0	804	874	99	1051	445	424	1325	465	221	1305	465	203	1345
16/11/2017	1450	60	495	1180	240	895	1060	136	940	874	0	1051	445	0	1325	465	0	1305	465	0	1345

Fecha/Eje	H (R)	H (P)	H (A)	I (R)	I (P)	I (A)	J (R)	J (P)	J (A)	K (R)	K (P)	K (A)	L (R)	L (P)	L (A)
20/3/2017	1845	0	0	1900	0	0	1950	0	0	1910	0	0	2070	0	0
24/4/2017	1845	0	0	1900	0	0	1950	0	0	1910	0	0	2070	0	0
29/5/2017	1845	0	0	1780	120	120	1770	180	180	1910	0	0	2070	0	0
3/7/2017	1535	310	310	1470	310	430	1559	211	391	1720	190	190	2030	40	40
11/7/2017	1535	0	310	1470	0	430	1559	0	391	1720	0	190	2030	0	40
28/7/2017	1535	0	310	1470	0	430	1530	29	420	1720	0	190	2030	0	40
31/8/2017	1165	370	680	1390	80	510	1530	0	420	1640	80	270	1920	110	150
2/10/2017	765	400	1080	852	538	1048	1033	497	917	1117	523	793	1590	330	480
18/10/2017	765	0	1080	680	172	1220	806	227	1144	1036	81	874	1270	320	800
16/11/2017	680	85	1165	605	75	1295	770	36	1180	927	109	983	1056	214	1014

Tabla No. 5.2.16 Comportamiento de los cambios experimentados en la dirección horizontal del PUNTO No. 3 AEROPUERTO II (Distancias horizontales desde la línea base hasta el borde).

Fuente: EL AUTOR, (2017). Con resultados obtenidos en campo.

DISTANCIAS VERTICALES (cm)																					
Fecha/Eje	A (R)	A (P)	A(A)	B (R)	B (P)	B(A)	C (R)	C (P)	C (A)	D (R)	D (P)	D (A)	E (R)	E (P)	E (A)	F (R)	F (P)	F (A)	G (R)	G (P)	G (A)
20/3/2017	1140	0	0	1140	0	0	1100	0	0	1110	0	0	1130	0	0	1150	0	0	1190	0	0
24/4/2017	1140	0	0	1140	0	0	1100	0	0	1110	0	0	1130	0	0	1150	0	0	1190	0	0
29/5/2017	1130	-10	-10	1130	-10	-10	1110	10	10	1130	20	20	1145	15	15	1135	-15	-15	1135	-55	-55
3/7/2017	1188	58	48	1185	55	45	1180	70	80	1180	50	70	1140	-5	10	1140	5	-10	1140	5	-50
11/7/2017	1188	0	48	1185	0	45	1180	0	80	1180	0	70	1140	0	10	1140	0	-10	1140	0	-50
28/7/2017	1160	-28	20	1160	-25	20	1155	-25	55	1170	-10	60	1190	50	60	1210	70	60	1170	30	-20
31/8/2017	1160	0	20	1160	0	20	1155	0	55	1170	0	60	1190	0	60	1210	0	60	1170	0	-20
2/10/2017	1070	-90	-70	1070	-90	-70	1070	-85	-30	1070	-100	-40	1070	-120	-60	1070	-140	-80	1070	-100	-120
18/10/2017	1133	63	-7	1133	63	-7	1133	63	33	1133	63	23	1133	63	3	1133	63	-17	1133	63	-57
16/11/2017	1133	0	-7	1133	0	-7	1133	0	33	1133	0	23	1133	0	3	1133	0	-17	1133	0	-57

Fecha/Eje	H (R)	H (P)	H (A)	I (R)	I (P)	I (A)	J (R)	J (P)	J (A)	K (R)	K (P)	K (A)	L (R)	L (P)	L (A)
20/3/2017	1050	0	0	1080	0	0	1030	0	0	1000	0	0	1050	0	0
24/4/2017	1050	0	0	1080	0	0	1030	0	0	1000	0	0	1050	0	0
29/5/2017	1125	75	75	1100	20	20	1030	0	0	1085	85	85	1080	30	30
3/7/2017	1143	18	93	1195	95	115	1155	125	125	1210	125	210	1110	30	60
11/7/2017	1143	0	93	1195	0	115	1155	0	125	1210	0	210	1110	0	60
28/7/2017	1180	37	130	1150	-45	70	1160	5	130	1150	-60	150	1160	50	110
31/8/2017	1180	0	130	1150	0	70	1160	0	130	1150	0	150	1160	0	110
2/10/2017	1070	-110	20	1070	-80	-10	1070	-90	40	1070	-80	70	1070	-90	20
18/10/2017	1133	63	83	1133	63	53	1133	63	103	1133	63	133	1133	63	83
16/11/2017	1133	0	83	1133	0	53	1133	0	103	1133	0	133	1133	0	83

Tabla No. 5.2.17 Comportamiento de los cambios experimentados en la dirección vertical del PUNTO No. 3 AEROPUERTO II. (Distancias verticales desde el borde del hasta el lecho del río.)

Fuente: EL AUTOR, (2017). Con resultados obtenidos en campo.

- **ESQUEMAS FINALES**

Para poder observar los cambios de este punto, es necesario presentar las dimensiones iniciales (ver la Figura No. 5.2.26), y así, hacer una comparación física de las distancias horizontales y verticales obtenidas al finalizar el periodo de estudio.

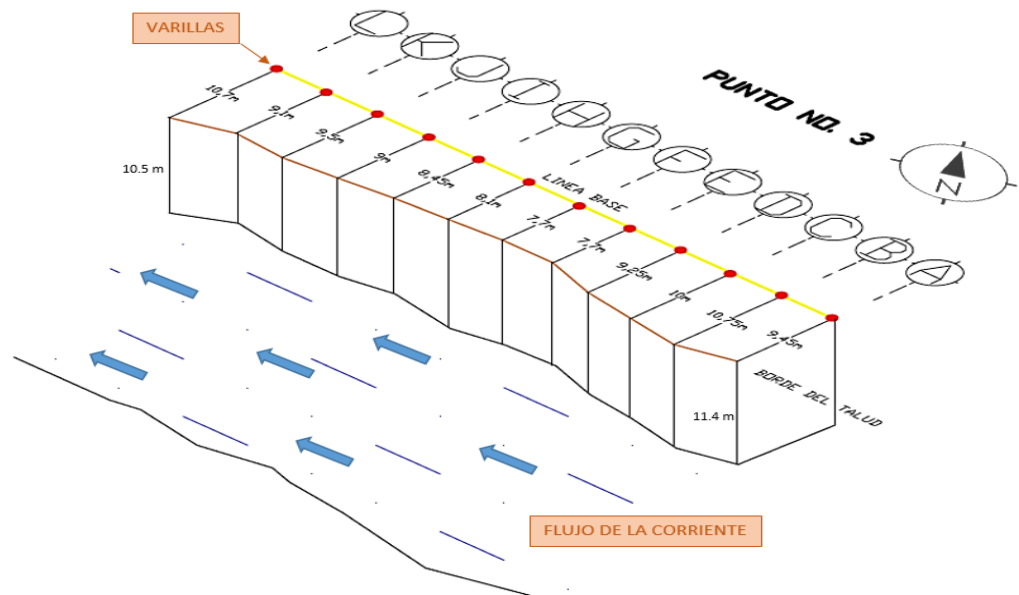


Figura No. 5.2.26 Condiciones verticales y horizontales iniciales del PUNTO No.3 TALUD AEROPUERTO II
Fuente: EL AUTOR

Ahora que se tienen las dimensiones iniciales, es posible presentar la topografía final del talud (ver la Figura No. 5.2.27); se puede apreciar que existen cambios en cada uno de los ejes que integran la cuadrícula (en dirección horizontal y vertical).

Este punto ha presentado una elevada erosión horizontal, a tal grado, que fue necesaria la colocación de una nueva línea base para referenciar las distancias horizontales (línea de color amarillo en la Figura No. 5.2.27), su ubicación es de 10 m hacia atrás de la línea base inicial (línea discontinua de color verde en la Figura No. 5.2.27) y su dirección es paralela al borde del talud.

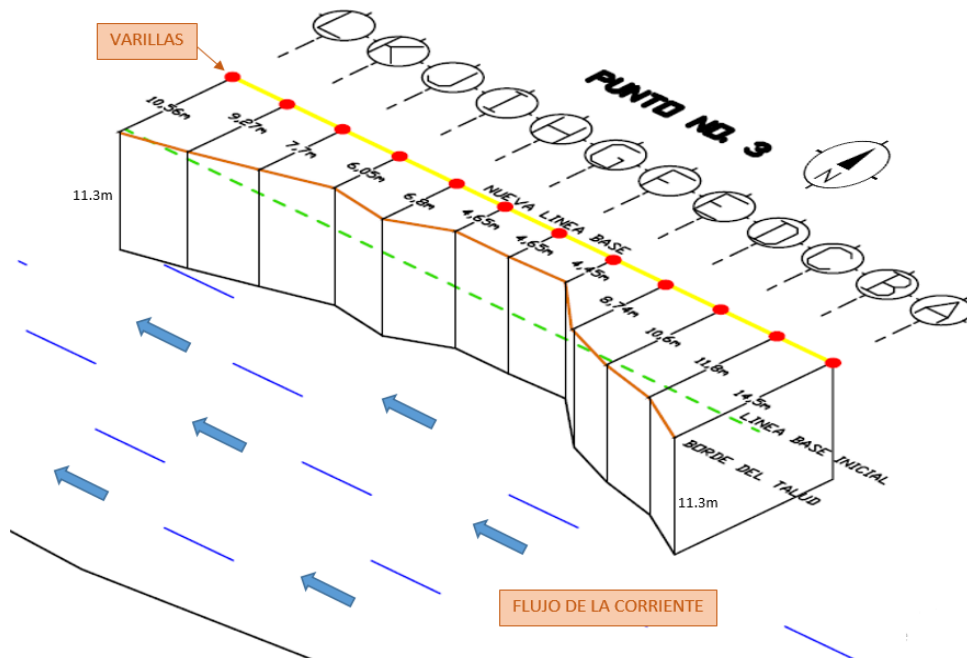


Figura No. 5.2.27 Condiciones verticales y horizontales finales del PUNTO No.3 AEROPUERTO II
Fuente: EL AUTOR

En la Figura No. 5.2.28 se muestran las dimensiones finales de este talud en planta y de perfil, para poder apreciar las alturas correspondientes a cada eje de la cuadrícula.

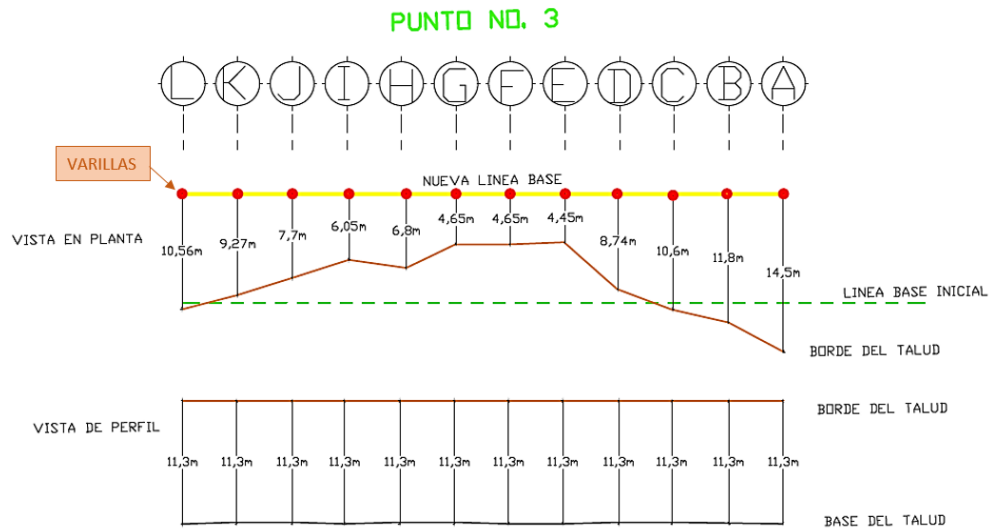


Figura No. 5.2.28 Dimensiones en planta y en perfil finales del PUNTO No.3 TALUD AEROPUERTO II
Fuente: EL AUTOR

Los cambios en este talud reflejaron grandes pérdidas de suelo, y para respaldar los resultados, se agrega un registro fotográfico (ver Figuras No. 5.2.29 y 5.2.30), tomado durante el periodo de estudio, en este se puede apreciar la magnitud de las pérdidas por erosión.



*Figura No. 5.2.29 Fotografías del PUNTO No.3 TALUD AEROPUERTO II; en el costado izquierdo se puede observar para el día 24/4/17 y en el costado derecho afectado por los procesos erosivos el día 2/10/2017.
Fuente: EL AUTOR*



*Figura No. 5.2.30 Vistas desde la cresta del PUNTO No.3 TALUD AEROPUERTO II; la fotografía del costado izquierdo corresponde al día 11/07/2017 y la del costado derecho corresponde al día 16/11/2017.
Fuente: EL AUTOR*

Para cuantificar la pérdida de suelo de este talud es necesario obtener el área efectiva erosionada que servirá para el cálculo de la tasa de erosión, esta se presenta en la Figura No. 5.2.31

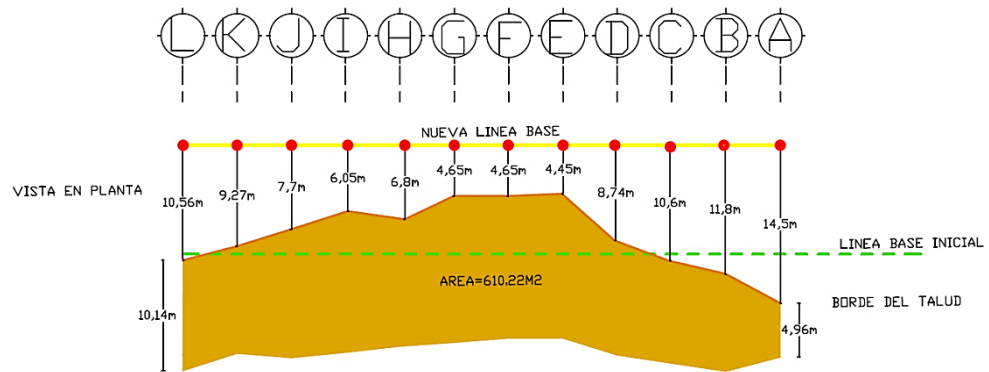


Figura No. 5.2.31 Área efectiva erosionada del TALUD AEROPUERTO II
Fuente: EL AUTOR

- GRAFICAS DE COMPORTAMIENTO DE LLUVIA - EROSIÓN - AZOLVAMIENTO**
 En las Figuras No. 5.2.32, 5.2.33, 5.2.34, y 5.2.35 se presentan los delta de erosión horizontal acumulados y en las Figuras No. 5.2.36, 5.2.37, 5.2.38, 5.2.39, 5.2.40 y 5.2.41 se presentan los delta de erosión vertical acumulados hasta el final del periodo de estudio; ambos casos se encuentran comparados con el registro de lluvias diarias registrada durante el mismo periodo.

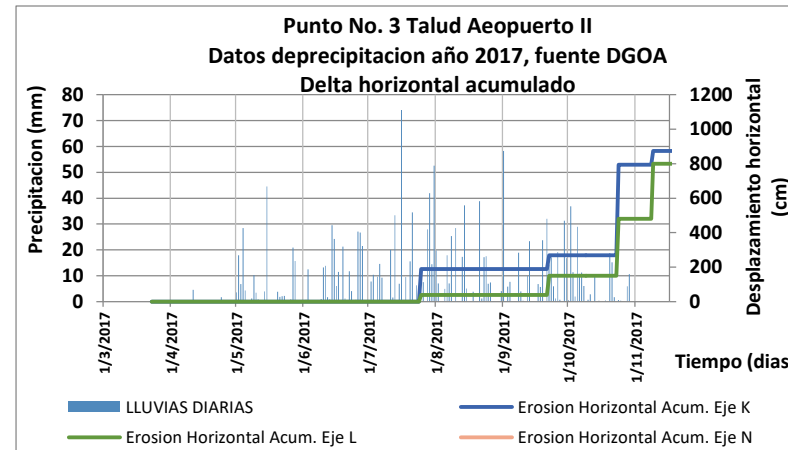
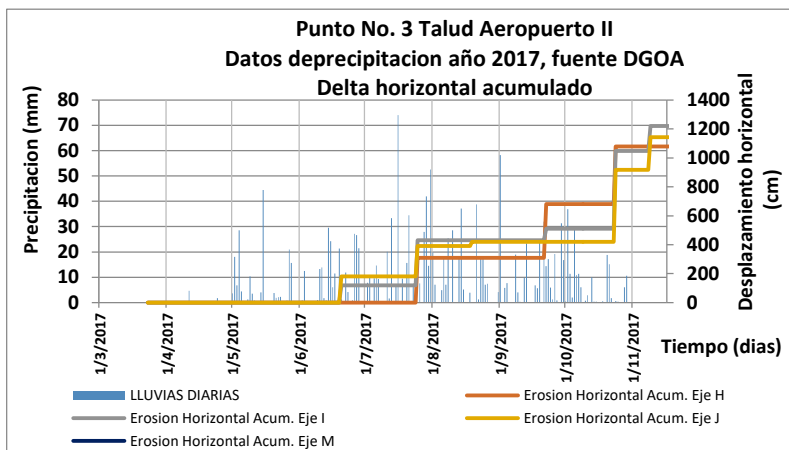
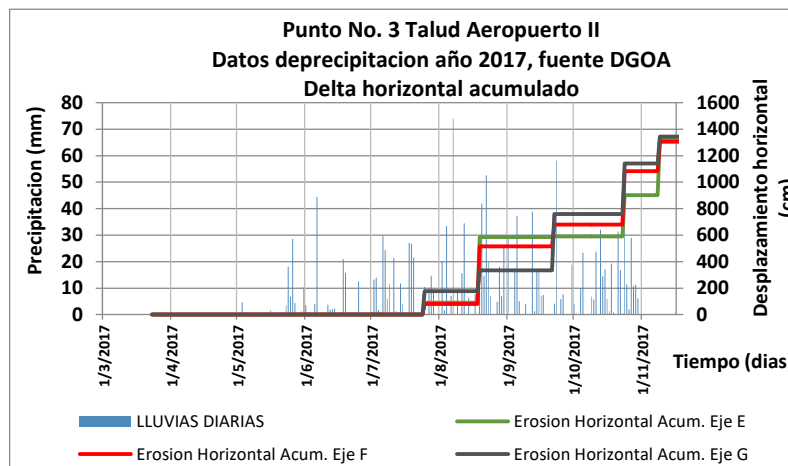
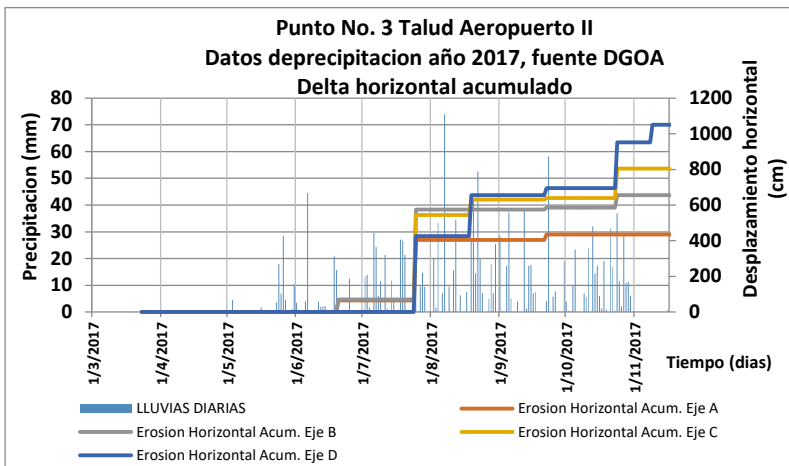


Figura No. 5.2.32, 5.2.33, 5.2.34, y 5.2.35 Gráficos del comportamiento de la lluvia y erosión horizontal acumulada del PUNTO No.3 TALUD AEROPUERTO II
Fuente: EL AUTOR

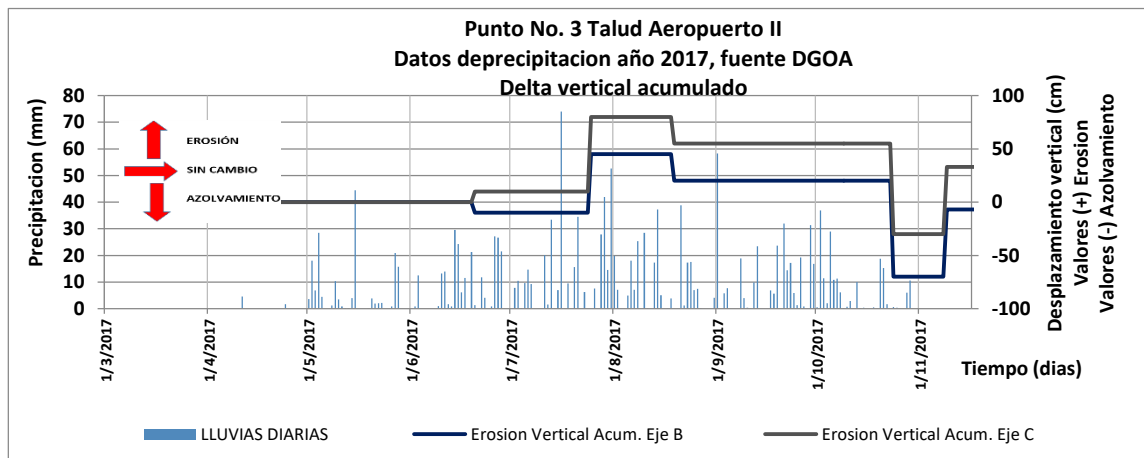
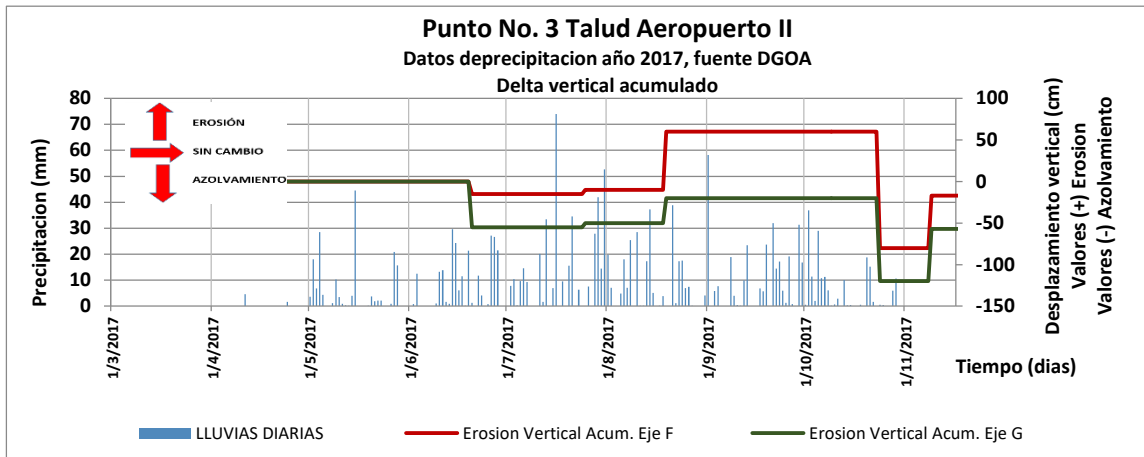
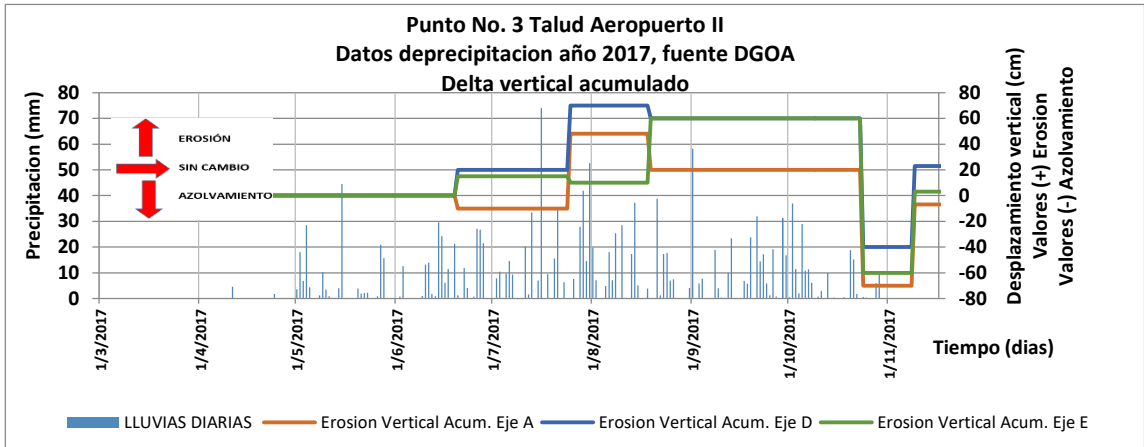


Figura No. 5.2.36, 5.2.37, y 5.2.38 Gráficos del comportamiento de la lluvia y erosión vertical acumulada o Azolvamiento del PUNTO No.3 TALUD AEROPUERTO II
Fuente: EL AUTOR

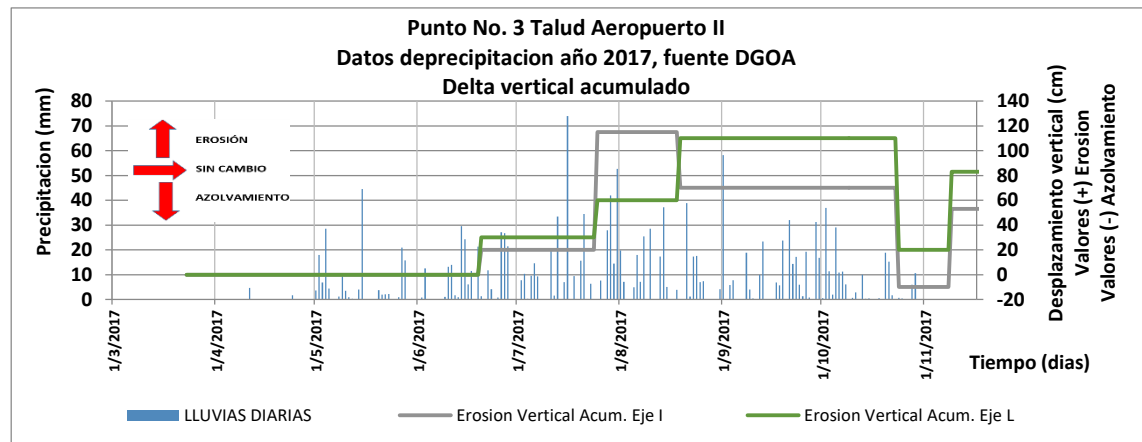
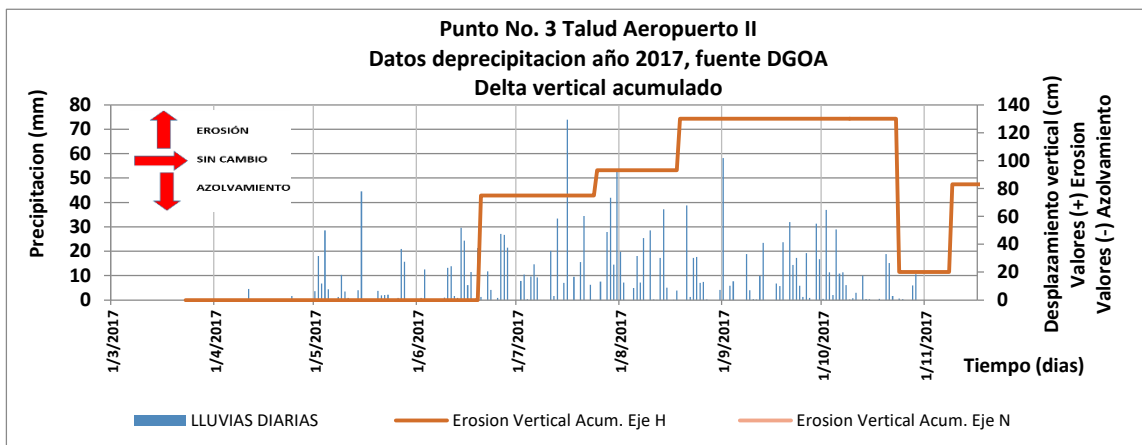
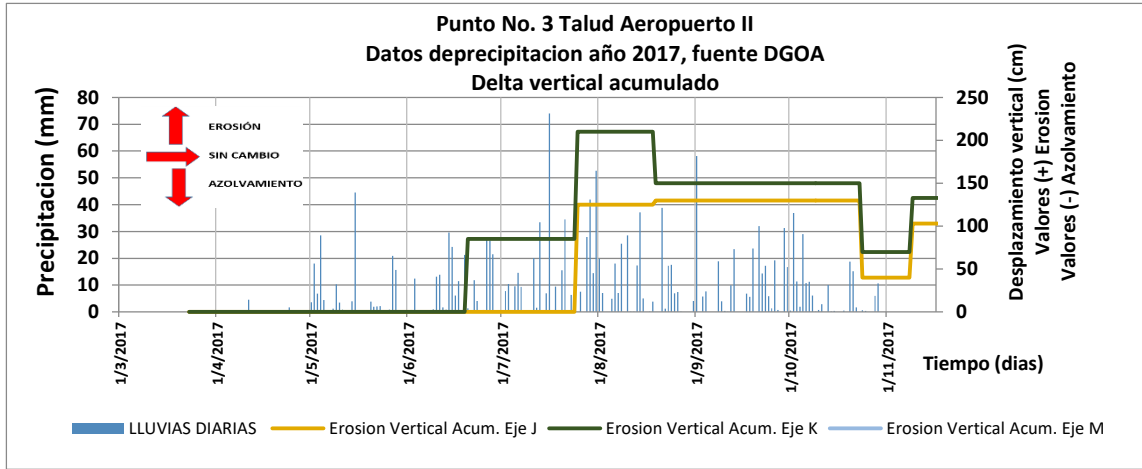


Figura No. 5.2.39, 5.2.40, y 5.2.41 Gráficos del comportamiento de la lluvia y erosión vertical acumulada o Azolvamiento del PUNTO No.3 TALUD AEROPUERTO II

Fuente: EL AUTOR

- **INTERPRETACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS**

En este talud se esperaban cambios importantes, porque reunía varios factores que generan erosión horizontal y vertical, entre los que se encontraban: la exposición a la quebrada El Arenal Seco, la pendiente aproximadamente vertical, el impacto de la corriente al pie y longitud del talud, y la influencia de las lluvias en el invierno del 2017. Un factor que se esperaba tuviera influencia fueron las obras de protección realizadas aguas arriba para proteger el talud opuesto (Aeropuerto de Ilopango), ya que al golpear el agua dichas obras, la corriente choco en el talud estudiado produciendo la erosión registrada. Los máximos cambios que experimento este punto durante el periodo de estudio se presentan a continuación.

Cambios en dirección **horizontal**:

Los máximos cambios parciales se pudieron observar en las fechas 3/7/17, 28/7/17, 31/8/17 y 2/10/17:

- ✓ En la fecha 3 de julio se registraron los primeros $\Delta_{MAX PARCIALES}$ con valores de 3.40 m (eje A), 5.05 m (eje B), y 5.44 m (eje C) teniendo un acumulado de lluvia de 429.2 mm;
- ✓ El 28 de julio nuevamente se registraron cambios de erosión, con valores de $\Delta_{MAX PARCIAL}$ de 4.95 m (eje E) y 4.35 m (eje F) teniendo una acumulación de lluvia de 700.5 mm;
- ✓ Para el 31 agosto el máximo valor de $\Delta_{MAX PARCIAL}$ fue de 4.25 m (eje G) con una acumulación de lluvia de 1077.75 mm
- ✓ El 2 de octubre volvieron a ver cambios de erosión donde se registraron $\Delta_{MAX PARCIAL}$ de 4.0 m (eje H), 5.38 m (eje I), 4.97 m (eje J), 5.23 m (eje K), y 3.30 m (eje L) con una acumulación de lluvia de 1418.75 mm

Los registros de cambios acumulados durante el periodo de estudio fueron de tal magnitud que se vio en la necesidad de colocar una nueva línea base ubicada 10 m atrás de la línea base original, debido a que, para la fecha 2/10/17 el borde del talud había alcanzado algunos puntos de la línea base original.

Al finalizar el periodo de estudio solo existieron procesos erosivos obteniéndose $\Delta_{MAX ACUMULADOS}$ que superaban los 10 m en la mayoría de ejes, entre los que se pueden

mencionar el eje D, E, F, G, H, I, J, y L, de ellos el que experimento mayores cambios fue el eje G con un valor de $\Delta_{\text{MAX ACUMULADO}}$ de 13.25 m teniendo un acumulado de lluvia de 1557.65 mm.

Cambios en dirección vertical:

Los cambios en profundidad de este talud fueron mínimos comparados con los cambios horizontales de este mismo talud. El comportamiento de los procesos erosivos y de azolvamiento de detallan a continuación.

Los máximos cambios por procesos erosivos se pudieron observar en los ejes J, y K con un valor de $\Delta_{\text{MAX PARCIAL}}$ de 1.25 m en la fecha 3 julio teniendo un acumulado de lluvias de 429.2mm.

Los procesos de azolvamiento fueron experimentados en todos los ejes del talud, sin embargo, los máximos valores fueron obtenidos en los ejes D, F, G, y H con $\Delta_{\text{MAX PARCIALES}}$ superiores a 1.0 m para la fecha 2 de octubre con un acumulado de lluvias de 1418.75 mm; de los ejes mencionados anteriormente el que experimento los mayores cambios fue el eje F con un valor de $\Delta_{\text{MAX PARCIAL}}$ de 1.4 m.

Al evaluar el comportamiento de este talud al final del periodo de estudio se puede observar que las profundidades de todos los ejes resultaron con el mismo nivel. El máximo cambio erosivo acumulado fue registrado en el eje K con un valor de $\Delta_{\text{MAX ACUMULADO}}$ de 1.33 m y el máximo cambio por procesos erosivos fue registrado por el eje G con un valor de $\Delta_{\text{MAX ACUMULADO}}$ 0.57m, teniendo para esta fecha un acumulado de lluvia de 1557.65 mm.

Análisis: al observar los resultados se puede decir, que los factores que influyeron en la erosión de este talud fueron los siguientes: Comenzando por la exposición a la quebrada El Arenal Seco, la influencia de las lluvias del invierno del 2017 (crecidas del río), y agregando a esta situación el cambio brusco de dirección que experimenta la corriente del agua al llegar a este punto (esta continua de forma lateral por el talud).

En esta ocasión la situación se complicó debido a las obras de protección que instalo el Aeropuerto de Ilopango para proteger su talud; el flujo de la corriente fue restringido, ya que, una parte de esta encontraba oposición en las obras instaladas en el lecho del

rio, obligando a un cambio de dirección (frontalmente hacia el Talud No. 3), la otra parte circulaba de forma normal (lateralmente al Talud No. 3); el encuentro de los dos flujos, producía que este se convirtiera en turbulento (dando paso a una especie de remolino). La falta de cobertura vegetal en el cuerpo, pie y la inclinación vertical, aceleraron la erosión en la base; esto provoco una falta de estabilidad en la parte superior, que resulto en la caída de grandes bloques de suelo para recuperar dicha propiedad.

Esta situación fue repetitiva durante el periodo de estudio, generándose una erosión retrograda que dejo cambios horizontales muchos mayores a los esperados.

- **CALCULO DE VOLUMEN PERDIDO Y TASA DE EROSIÓN**

Los datos obtenidos de la técnica A, y del GPS fueron procesados en un programa de diseño gráfico para obtener el área efectiva erosionada y el volumen total perdido, durante el periodo en que fueron utilizadas dichas técnicas; los resultados se presentan en la Tabla No. 5.2.18.

TALUD	TECNICA DE MONITOREO	DENSIDAD HUMEDA PONDERADA (T/m ³)	VOLUMEN PERDIDO (m ³)	PESO TOTAL PERDIDO (T)	AREA EFECTIVA EROSIONADA (m ²)	PERIODO DE ESTUDIO (Año)	TASA DE EROSIÓN (T/ m ² -año)
Punto 3	A	1.6	2852.21	4563.536	610.22	1	7.48
Punto 3	A		1426.11	2281.78	306.80	0.208	37.32
Punto 3	GPS		1482.06	2371.30	326.16	0.208	34.95

Tabla No. 5.2.18 Cuadro de resultados obtenidos para determinar la tasa de erosión del TALUD AEROPUERTO II
Fuente: EL AUTOR

5.2.4 TALUD AEROPUERTO I (PUNTO No. 2)

A continuación se presentan los resultados de los aspectos planteados para este talud.

- **CONDICIONES INICIALES Y FINALES**

La Tabla No. 5.2.19 presenta un resumen de las condiciones iniciales de este punto.

CONDICIONES INICIALES	
Nombre del talud	PUNTO No. 2 TALUD AEROPUERTO I
Altura inicial promedio (m)	6.65
Longitud del tramo en estudio (m)	50
Área del talud (m ²)	332.5
Cobertura vegetal	Abundante en la cresta y sin cobertura en el cuerpo
Numero de estratos	5
Unidades presentes	Deposito aluvial, unidad Ignimbrita Beta, unidad E, unidad Alfa, y unidad D
Tipo de erosión presente	Horizontal y vertical
Ejes en dirección paralela al borde del rio	línea base, eje 1 y eje 1'
Ejes en dirección perpendicular al borde del rio	A,B,C,D,E,F,G,H,I,J,K,L

Tabla No. 5.2.19 Condiciones iniciales del PUNTO No. 2 TALUD AEROPUERTO I

Fuente: EL AUTOR, 2018

La Tabla No. 5.2.20 presenta las condiciones finales del talud, donde se puede observar si existen cambios en sus dimensiones, y en el número de estratos.

CONDICIONES FINALES			
Altura final promedio (m)	8.70		
Área del talud (m ²)	435		
Numero de estratos	6		
Unidades presentes	Deposito aluvial, unidad Ignimbrita Beta, unidad E, unidad Alfa, unidad D, y unidad C		
Características de los estratos			
Nombre de unidad	Altura promedio (m)	Color	Tamaño del grano (mm)
Deposito aluvial	0.10	Gris	5-9
Ignimbrita Beta	0.4	Café claro	0.6
E (deposito húmedo)	0.21	Café oscuro	0.6
E (deposito seco)	0.20	Café claro	4
Ignimbrita Alfa	2.10	Blanco	2
D	3.5	Café claro	0.3
C	2.05	Blanco	1.18

Tabla No. 5.2.20 Condiciones finales del PUNTO No. 2 TALUD AEROPUERTO I

Fuente: EL AUTOR, 2018

- **PROPIEDADES GEOTECNICAS**

En este punto se observaron al final del periodo de estudio 6 estratos, a los que se le determinaron su humedad, gravedad específica, peso volumétrico seco y húmedo, y su granulometría; lo anterior se detalla a continuación (ver Tabla No. 5.2.21).

DESCRIPCIÓN	DEPOSITO ALUVIAL	IGNIMBRITA BETA	UNIDAD E (DEPOSITO SECO)	UNIDAD E (DEPOSITO HÚMEDO)	IGNIMBRITA ALFA	UNIDAD D	UNIDAD C
Gruesos	97.37	52.9	91.7	29.4	67.1	32.3	45.4
% Grava	7.66	0.1	8.5	0	2.6	0.2	0.7
% Arena	89.71	52.8	83.2	29.4	64.5	32.1	44.7
Finos	2.63	47.1	8.3	70.6	32.9	67.7	54.6
% Limos	2.63	43.5	8.1	56.2	31.9	64.9	52.4
% Arcilla		3.6	0.2	14.4	1	2.8	2.2
Total	100	100	100	100	100	100	100
Cu	4.75	12.67	8.5	30	9.75	3.83	5.5
Cc	1.07	0.88	1.44	10.8	0.31	1.63	1.14
Plasticidad	NP	NP	NP	NP	NP	NP	NP
Color	Color gris con presencia de finos no plásticos	Color café claro con presencia de finos no plásticos	Color gris con presencia de arena pumítica	Color café con presencia de arena y finos no plásticos	Color blanco con presencia de pómez	Color café con presencia de finos no plásticos	Color blanco con presencia de finos no plásticos
Clasificación	Arena mal graduada	Arena Limosa	Arena bien graduada con Limo	Limo Arenoso	Arena Limosa	Limo Arenoso	Limo Arenoso
Símbolo del grupo	SP	SM	SW-SM	ML	SM	ML	ML
Gravedad específica promedio	2.66	2.41	2.49	2.44	2.33	2.32	2.37
Densidad húmeda (T/m³)	1.15	1.85	1.25	1.96	1.75	1.41	1.37
Densidad seca (T/m³)	1.05	1.59	1.11	1.58	1.59	1.26	1.18
% w natural	9.94	16.6	12.6	24.22	9.8	11.47	15.54
Espesor de la unidad (m)	0.1	0.4	0.55		2.1	3.5	2.05
Densidad húmeda ponderada (T/m³)	1.5						

Tabla No. 5.2.21 Identificación geotécnica de estratos del PUNTO No. 2 AEROPUERTO I

Fuente: EL AUTOR, (2017). Con resultados obtenidos en el Laboratorio de Suelos y Materiales de la Universidad de El Salvador "Ing. Mario ángel Guzmán Urbina".

- RESULTADOS DE LOS CAMBIOS EXPERIMENTADOS EN EL TALUD DURANTE EL PERIODO DE ESTUDIO**

En la Tabla 5.2.22 y 5.2.23 se presentan las mediciones horizontales y verticales obtenidas en los 10 monitoreos de campo.

DISTANCIAS HORIZONTALES																		
Fecha/Eje	A (R)	A (P)	A(A)	B (R)	B (P)	B(A)	C (R)	C (P)	C (A)	D (R)	D (P)	D (A)	E (R)	E (P)	E (A)	F (R)	F (P)	F (A)
20/3/2017	560	0	0	820	0	0	820	0	0	810	0	0	870	0	0	750	0	0
24/4/2017	560	0	0	820	0	0	820	0	0	810	0	0	870	0	0	750	0	0
29/5/2017	560	0	0	820	0	0	820	0	0	810	0	0	870	0	0	750	0	0
3/7/2017	560	0	0	820	0	0	815	5	5	810	0	0	805	65	65	750	0	0
11/7/2017	560	0	0	820	0	0	815	0	5	810	0	0	805	0	65	750	0	0
28/7/2017	550	10	10	820	0	0	800	15	20	810	0	0	780	25	90	750	0	0
31/8/2017	550	0	10	820	0	0	800	0	20	810	0	0	780	0	90	750	0	0
2/10/2017	550	0	10	820	0	0	800	0	20	810	0	0	780	0	90	750	0	0
18/10/2017	550	0	10	820	0	0	790	10	30	810	0	0	780	0	90	750	0	0
16/11/2017	550	0	10	820	0	0	790	0	30	810	0	0	780	0	90	750	0	0

Fecha/Eje	G (R)	G (P)	G (A)	H (R)	H (P)	H (A)	I (R)	I (P)	I (A)	J (R)	J (P)	J (A)	K (R)	K (P)	K (A)
20/3/2017	855	0	0	840	0	0	770	0	0	930	0	0	890	0	0
24/4/2017	855	0	0	840	0	0	770	0	0	930	0	0	890	0	0
29/5/2017	855	0	0	840	0	0	770	0	0	930	0	0	890	0	0
3/7/2017	855	0	0	840	0	0	765	5	5	920	10	10	890	0	0
11/7/2017	855	0	0	840	0	0	765	0	5	920	0	10	890	0	0
28/7/2017	820	35	35	820	20	20	765	0	5	920	0	10	860	30	30
31/8/2017	820	0	35	820	0	20	765	0	5	920	0	10	860	0	30
2/10/2017	820	0	35	820	0	20	765	0	5	920	0	10	860	0	30
18/10/2017	820	0	35	820	0	20	765	0	5	906	14	24	860	0	30
16/11/2017	820	0	35	820	0	20	765	0	5	906	0	24	860	0	30

Tabla No. 5.2.22 Comportamiento de los cambios experimentados en la dirección horizontal del PUNTO No. 2 AEROPUERTO I (Distancias horizontales desde la línea base hasta el borde).

Fuente: EL AUTOR, (2017). Con resultados obtenidos en campo.

DISTANCIAS VERTICALES																		
Fecha/Eje	A (R)	A (P)	A(A)	B (R)	B (P)	B(A)	C (R)	C (P)	C (A)	D (R)	D (P)	D (A)	E (R)	E (P)	E (A)	F (R)	F (P)	F (A)
20/3/2017	470	0	0	490	0	0	630	0	0	690	0	0	730	0	0	750	0	0
24/4/2017	470	0	0	490	0	0	630	0	0	690	0	0	730	0	0	750	0	0
29/5/2017	470	0	0	490	0	0	630	0	0	690	0	0	730	0	0	750	0	0
3/7/2017	490	20	20	650	160	160	670	40	40	770	80	80	760	30	30	790	40	40
Inicio de Canalización																		
11/7/2017	490	0	20	650	0	160	670	0	40	770	0	80	760	0	30	790	0	40
28/7/2017	665	175	195	730	80	240	870	200	240	810	40	120	860	100	130	880	90	130
31/8/2017	665	0	195	730	0	240	870	0	240	810	0	120	860	0	130	880	0	130
2/10/2017	665	0	195	730	0	240	870	0	240	810	0	120	860	0	130	880	0	130
18/10/2017	614	-51	144	865	135	375	870	0	240	821	11	131	956	96	226	956	76	206
16/11/2017	614	0	144	865	0	375	870	0	240	821	0	131	956	0	226	956	0	206

Fecha/Eje	G (R)	G (P)	G (A)	H (R)	H (P)	H (A)	I (R)	I (P)	I (A)	J (R)	J (P)	J (A)	K (R)	K (P)	K (A)
20/3/2017	794	0	0	730	0	0	700	0	0	680	0	0	655	0	0
24/4/2017	794	0	0	730	0	0	700	0	0	680	0	0	655	0	0
29/5/2017	794	0	0	730	0	0	700	0	0	680	0	0	655	0	0
3/7/2017	815	21	21	790	60	60	840	140	140	690	10	10	680	25	25
Inicio de Canalización															
11/7/2017	815	0	21	790	0	60	840	0	140	690	0	10	680	0	25
28/7/2017	880	65	86	880	90	150	790	-50	90	790	100	110	830	150	175
31/8/2017	880	0	86	880	0	150	790	0	90	790	0	110	830	0	175
2/10/2017	880	0	86	880	0	150	790	0	90	790	0	110	830	0	175
18/10/2017	956	76	162	956	76	226	956	166	256	819	29	139	819	-11	164
16/11/2017	956	0	162	956	0	226	956	0	256	819	0	139	819	0	164

Tabla No. 5.2.23 Comportamiento de los cambios experimentados en la dirección vertical del PUNTO No. 2 AEROPUERTO I. (Distancias verticales desde el borde del hasta el lecho del río).

Fuente: EL AUTOR, (2017). Con resultados obtenidos en campo.

- **ESQUEMAS FINALES**

Para poder observar los cambios de este punto, es necesario presentar las dimensiones iniciales (ver la Figura No. 5.2.42), y así, hacer una comparación física de las distancias horizontales y verticales obtenidas al finalizar el periodo de estudio.

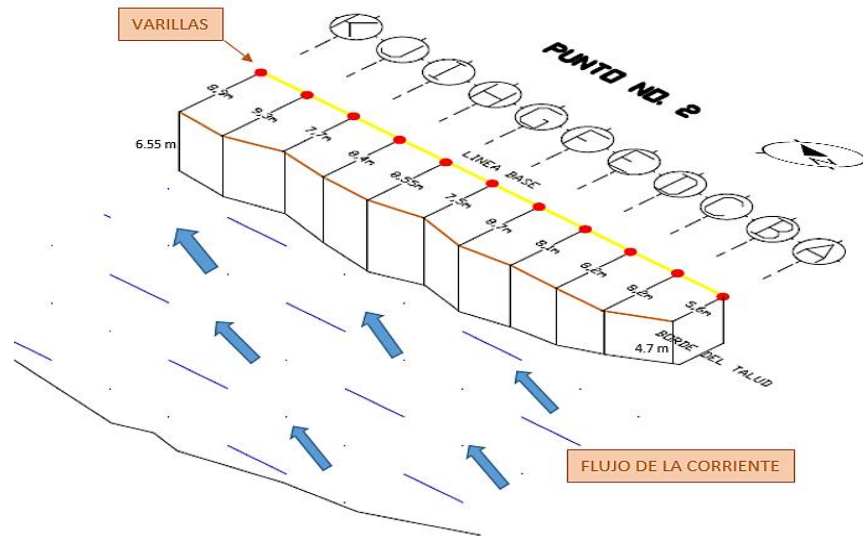


Figura No. 5.2.42 Dimensiones iniciales del PUNTO No. 2 TALUD AEROPUERTO I
Fuente: DEL AUTOR, 2018

La condición inicial corresponde al 20/3/2017 y la condición final al 16/11/2017, las dimensiones de esta última se pueden ver en la Figura No. 5.2.44 donde se observan las distancias horizontales y verticales (vistas en planta y de perfil); la Figura No. 5.2.43 presenta al mismo punto en una vista isométrica para observar al talud como un conjunto.

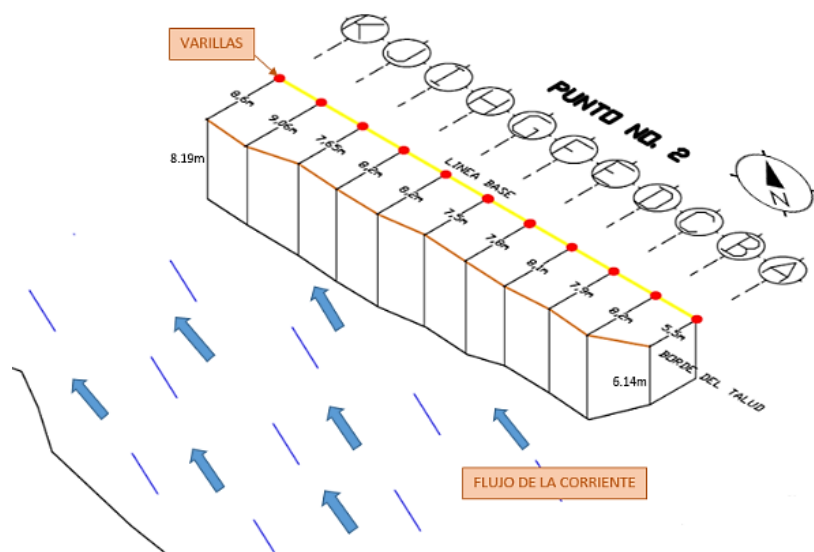


Figura No. 5.2.43 Dimensiones finales del PUNTO No. 2 TALUD AEROPUERTO I
Fuente: DEL AUTOR, 2018

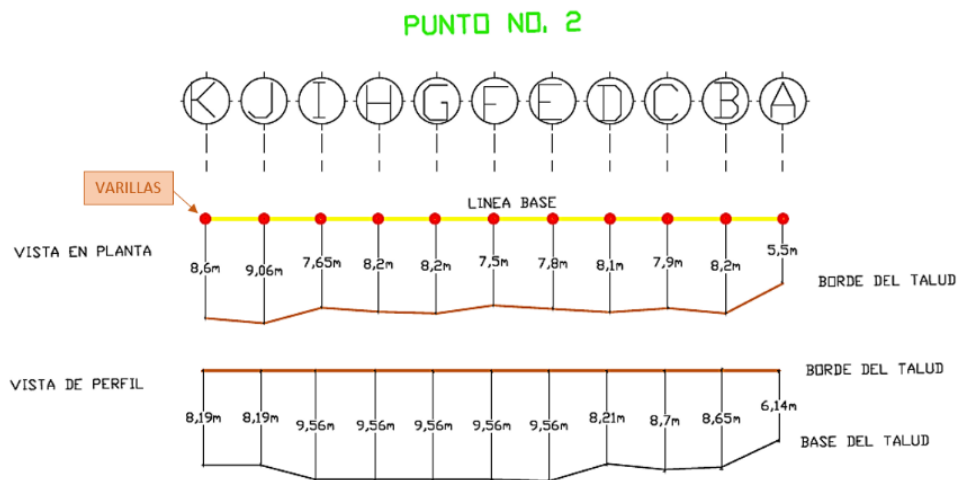


Figura No. 5.2.44 Dimensiones en planta y en altura finales del PUNTO No. 2 TALUD AEROPUERTO I
Fuente: EL AUTOR

Con los resultados obtenidos al finalizar el periodo de estudio se pudo calcular el área efectiva erosionada, para este talud fue de 13.15 m²; la Figura No. 5.2.45 muestra este resultado en un esquema.

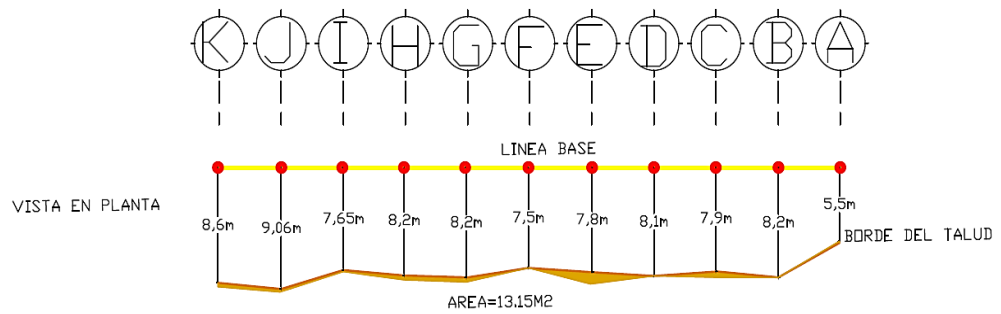


Figura No. 5.2.45 Área erosionada del PUNTO No. 2 TALUD AEROPUERTO I
Fuente: EL AUTOR, 2018

Se presentan también algunas fotografías tomadas al inicio, durante, y en el final del periodo de estudio. En la Figura No. 5.2.46 se puede observar los cambios en el nivel del río, y también la canalización generada en el sector medio de este.



Figura No. 5.2.46 Cambios en el nivel del río del PUNTO No. 2 TALUD AEROPUERTO I; La Figura A es de la fecha 20/3/17, la Figura B y C es de la fecha 28/07/17 y la Figura D es de la fecha 16/11/17.
Fuente: EL AUTOR

Al inicio de los monitoreos (20/3/17) este punto presentaba el mismo nivel del rio en todo su ancho, posteriormente en la fecha 28/07/17 se podía observar un claro cambio de nivel en un sector específico, y para el 16/11/17 era evidente la canalización de este sector, ya que, el cambio de nivel comparada con la inicial era aproximadamente de la altura de un camión arenero (ver Figura No. 5.2.46 D). Esta situación protegió al Punto No. 2 Talud Aeropuerto I, del impacto directo de la corriente de la Quebrada El Arenal Seco, resultando una erosión horizontal mínima.

- GRAFICAS DE COMPORTAMIENTO DE LLUVIA - EROSIÓN - AZOLVAMIENTO**
 En las Figuras No. 5.2.47, y 5.2.48 se presentan los delta de erosión horizontal acumulados y en las Figuras No. 5.2.49, 5.2.50, 5.2.51, y 5.2.52 se presentan los delta de erosión vertical acumulados hasta el final del periodo de estudio; ambos casos se encuentran comparados con el registro de lluvias diarias registrada durante el mismo periodo.

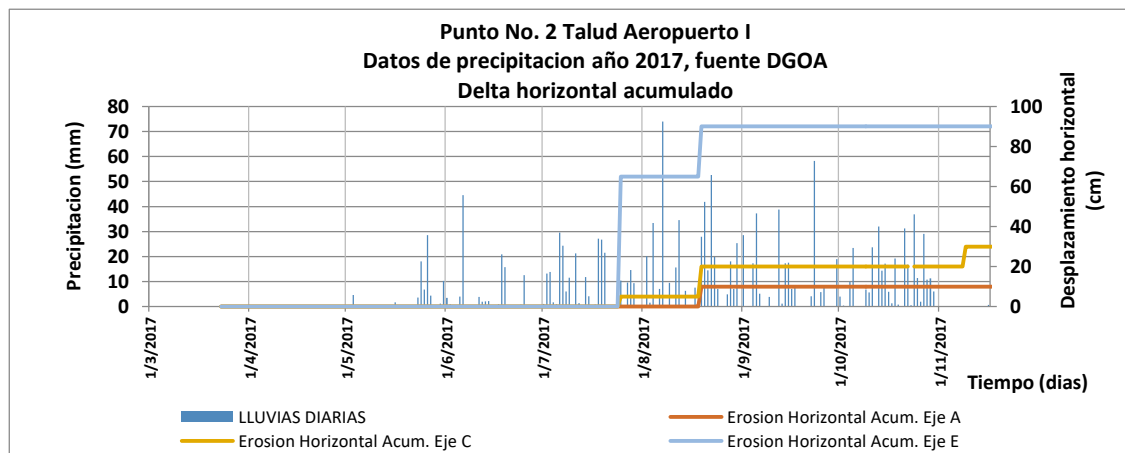


Figura No. 5.2.47 Gráficos del comportamiento de la lluvia y erosión horizontal acumulada del PUNTO No. 2 TALUD AEROPUERTO I
Fuente: EL AUTOR

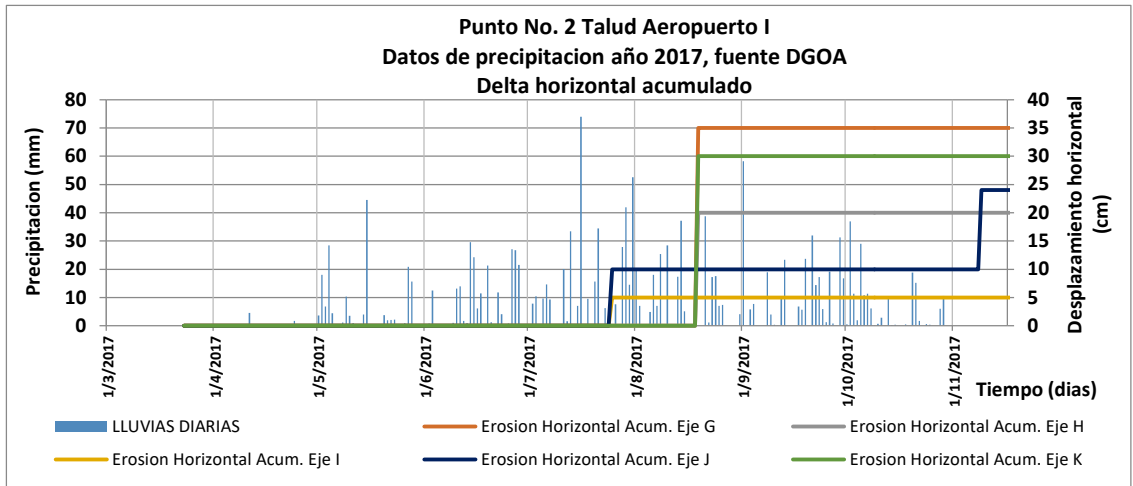


Figura No. 5.2.48 Gráficos del comportamiento de la lluvia y erosión horizontal acumulada del PUNTO No. 2 TALUD AEROPUERTO I
Fuente: EL AUTOR

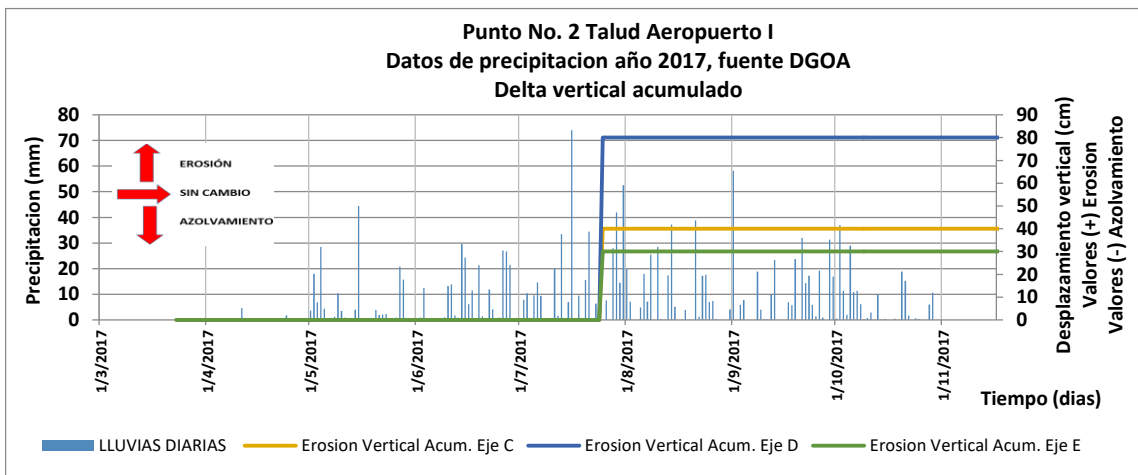


Figura No. 5.2.49 Gráficos del comportamiento de la lluvia y erosión vertical acumulada o Azolvamiento del PUNTO No. 2 TALUD AEROPUERTO I
Fuente: EL AUTOR

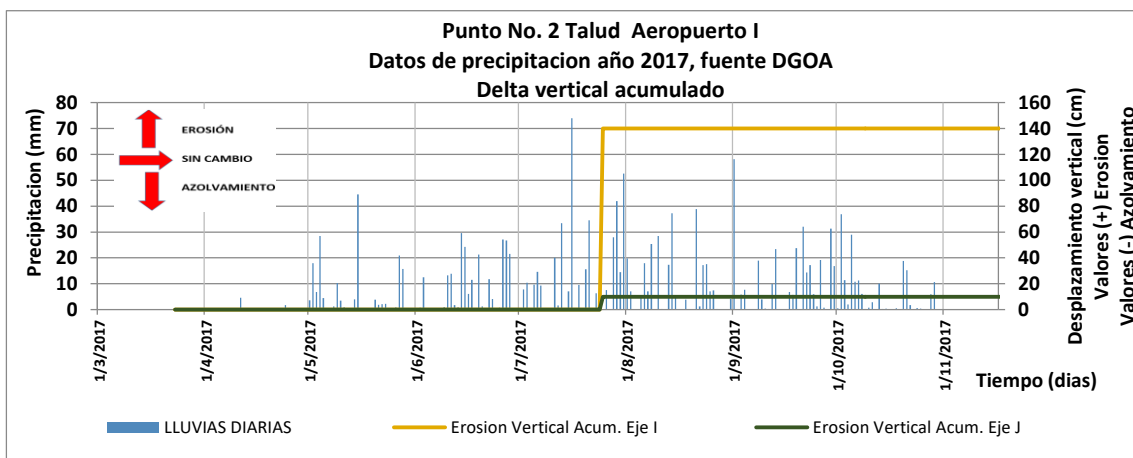
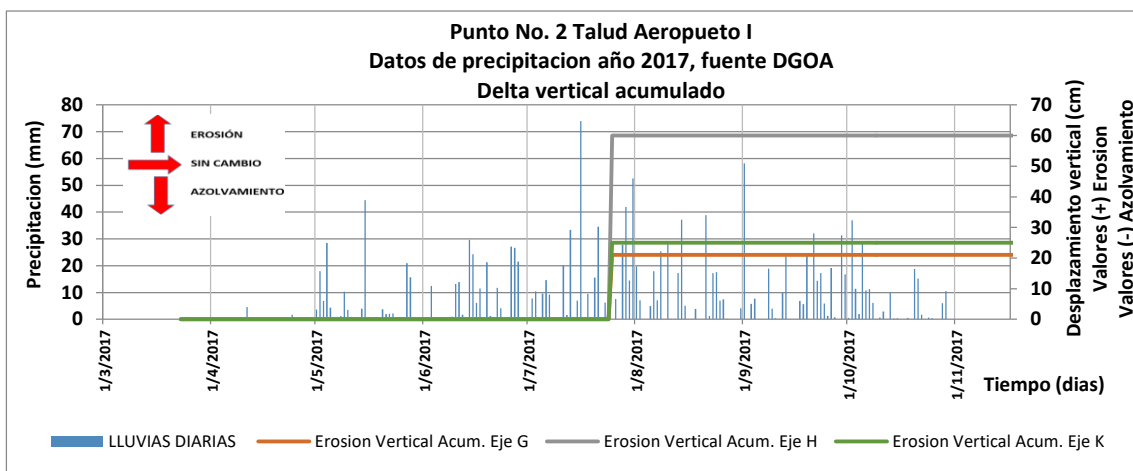
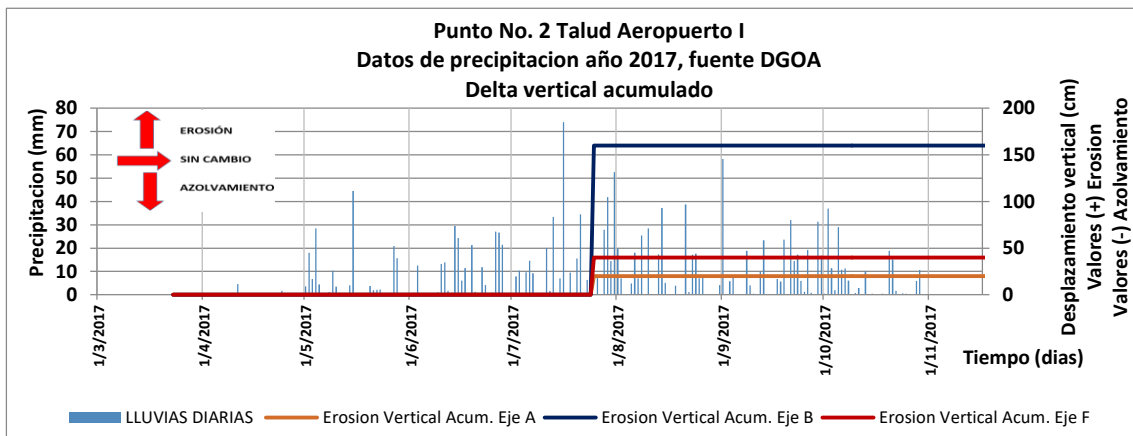


Figura No. 5.2.50, 5.2.51, y 5.2.52 Gráficos del comportamiento de la lluvia y erosión vertical acumulada o Azolvamiento del PUNTO No. 2 TALUD AEROPUERTO I

Fuente: EL AUTOR

- **INTERPRETACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS**

Se esperaban grandes pérdidas de suelo para este talud, debido a que, se encontraba expuesto a varios factores que generan el deterioro por erosión horizontal y vertical, entre estos se encontraban: la exposición a la quebrada El Arenal Seco, la dirección frontal de la corriente, y la ausencia de vegetación en el cuerpo del talud; así como, la influencia de las lluvias en el invierno del 2017 y la extracción descontrolada de arena. A continuación, se describirán los máximos cambios que experimento este punto durante el periodo de estudio.

Cambios en dirección **horizontal**:

Estos cambios fueron mínimos comparados con los demás taludes, un ejemplo de ello, es el cambio máximo parcial con un valor de $\Delta_{MAX PARCIAL}$ de 0.65 m (Eje E), para el día 3 de julio, teniendo un acumulado de lluvia de 429.2 mm.

Al evaluar el comportamiento al final del periodo de estudio, se puede decir que solo existieron procesos erosivos, obteniéndose las máximas variaciones horizontales en los ejes C, E, G, y K con valores de $\Delta_{MAX ACUMULADOS}$ superiores a los 0.3 m; de los ejes mencionados el que experimento mayores cambios fue el eje E con un valor de $\Delta_{MAX ACUMULADO}$ de 0.90m.

Cambios en dirección **vertical**:

Para este talud se registraron procesos erosivos y procesos de azolvamiento mínimos, los cuales se detallan a continuación. Los cambios máximos por procesos erosivos se pudieron observar en los ejes A, B, C, I, y K.

- ✓ En la fecha 3 de julio se registraron valores de $\Delta_{MAX PARCIAL}$ de 1.60 m (Eje B), y de 1.40 m (Eje I) teniendo un acumulado de lluvia de 429.2 mm
- ✓ el 28/7/17 volvieron a ver cambios relevantes de erosión donde se registraron $\Delta_{MAX PARCIALES}$ de 1.75 m (Eje N), 2.0 m (Eje C), y de 1.5 m (Eje K) teniendo un acumulado de lluvia de 700.5 mm.

Los cambios por procesos de azolvamiento fueron mínimos comparados con los erosivos, un ejemplo claro, es que solo tres ejes lo experimentaron (Eje A, I, y K); de

estos el máximo valor de $\Delta_{\text{MAX PARCIAL}}$ fue de 0.51 m (Eje A) en la fecha 18/10/17 teniendo un acumulado de lluvia de 1504.35 mm.

Al evaluar el comportamiento al final del periodo de lluvias se puede decir que predominaron los procesos erosivos por pequeños derrumbes en algunas partes del talud a causa del incremento de peso del suelo al suturarse, obteniéndose los máximos cambios verticales en los ejes B, C, E, F, H, e I con valores de $\Delta_{\text{MAX ACUMULADOS}}$ superiores a los 2 m; de los ejes mencionados anteriormente el que experimento el mayor cambio fue el Eje B con un $\Delta_{\text{MAX ACUMULADO}}$ de 3.75 m.

Análisis: al observar los resultados se puede decir que los factores de mayor impacto para este talud fueron: la extracción de arena y la sección transversal de grandes dimensiones (ancho del cauce mayor a 30 m).

La zona del cauce de la quebrada en donde se extraía la arena sufrió canalización, la cual genero un cambio del nivel de fondo en esa zona. Tal situación, ayudó a que la erosión vertical y horizontal de este talud fuera mínima; la corriente del agua no tuvo impacto directo en el cuerpo del talud porque la canalización formada actuaba como una especie de protección y desviaba hacia otra dirección el flujo. Además, las grandes dimensiones de la sección transversal disminuía la energía con la que se transportaba dicho flujo.

Cabe recalcar que las alturas fueron medidas desde el borde del talud hasta el nivel del río, es por eso que al observar los resultados de monitoreo, los cambios verticales son mayores respecto a los horizontales.

- **CALCULO DE VOLUMEN PERDIDO Y TASA DE EROSIÓN**

Los datos obtenidos de la técnica A, fueron procesados en un programa de diseño gráfico para obtener el área efectiva erosionada y el volumen total perdido. Es importante mencionar que el volumen utilizado para determinar dicha tasa fue obtenido con las alturas del talud antes que comenzara el proceso de canalización en el lecho del río (ver Tabla 5.2.23); los resultados se presentan en la Tabla No. 5.2.24.

TALUD	TECNICA DE MONITOREO	DENSIDAD HUMEDA PONDERADA (T/m ³)	VOLUMEN PERDIDO (m ³)	PESO TOTAL PERDIDO (T)	AREA EFECTIVA EROSIONADA (m ²)	PERIODO DE ESTUDIO (Año)	TASA DE EROSIÓN (T/ m ² -año)
Punto No. 2	A	1.5	51.96	77.94	13.15	1	5.93

Tabla No. 5.2.24 Cuadro de resultados obtenidos para determinar la tasa de erosión del TALUD AEROPUERTO I
Fuente: EL AUTOR

5.3 COMPARACIÓN DE TASAS DE EROSIÓN

A continuación, se presentará una comparación de las tasas de erosión obtenidas con las técnicas utilizadas (Técnica “A” y GPS); y además, se realizará una comparación de las tasas obtenidas, con las tasas de otras investigaciones donde se utilizó la técnica “A”.

❖ Comparación de tasas obtenidas (Técnica “A” y GPS)

Las tasas de erosión obtenidas por estas técnicas fueron determinadas para el mismo periodo de tiempo, estas se presentan en la Tabla No. 5.3.1.

CUADRO COMPARATIVO DE TASAS DE EROSIÓN OBTENIDAS POR MEDIO DE LA TÉCNICA “A” Y DEL GPS DE PRECISIÓN		
Tasas de Erosión (T/m ² -año)		
Nombre del Talud	Técnica “A”	GPS de doble
Zona Franca III (Punto No	66.57	67.33
Zona Franca II (Punto No	68.91	65.56
Aeropuerto II (Punto No 3)	37.32	34.95

Tabla No. 5.3.1 Cuadro comparativo de tasas de erosión obtenidas para la técnica “A” y GPS de precisión
Fuente: EL AUTOR

❖ Comparación de tasas obtenidas, con otras investigaciones (Técnica “A”)

Las tasas de erosión obtenidas en esta investigación se presentan en el cuadro comparativo de la Tabla No. 5.3.2, en ella también, se presentan las tasas de erosión obtenidas en la investigación de Bautista et al, 2016; dichas tasas son de taludes ubicados dentro de la zona de estudio.

CUADRO COMPARATIVO DE TASAS DE EROSIÓN OBTENIDAS POR MEDIO DE LA TÉCNICA "A" TALUDES CON SUPERFICIE APROXIMADAMENTE PLANA EN LA CRESTA Y EXPUESTOS A EROSIÓN LATERAL Y VERTICAL	
Nombre del Talud	Tasa de Erosión (T/m ² -año)
Zona Franca III (Punto No 10)	6.67
Zona Franca II (Punto No 9, Costado Sur)	0.09
Zona Franca II (Punto No 9, Costado Norte)	6.24
Aeropuerto II (Punto No 3)	7.48
Aeropuerto I (Punto No 2)	5.93
Bautista et al, 2016	
ZF-1	5.57
ZF-2 (lado derecho)	4.57
ZF-2 (lado izquierdo)	4.20
Cipreses I	9.81
Cipreses II	8.60

Tabla No. 5.3.2 Cuadro comparativo de tasas de erosión obtenidas en esta investigación, con las obtenidas por Bautista et al., (2016).

Fuente: EL AUTOR

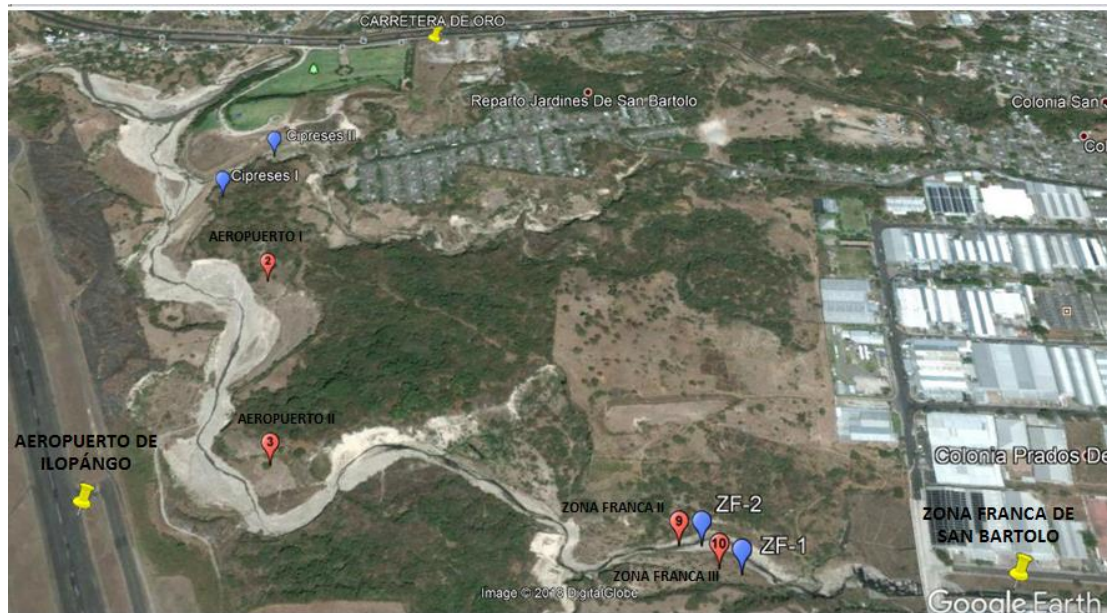


Figura No. 5.3.1 Ubicación de puntos de estudio de esta investigación y la investigación de Bautista et al., (2016).

Fuente: EL AUTOR, apoyado de Google Earth

CAPÍTULO No.6

CONCLUSIONES

6.1 CONCLUSIONES

Esta tesis ha pretendido dar una visión del problema que la erosión presenta en un sector del Área Metropolitana de San Salvador, concluyendo que la mejor manera de solucionar este problema es obteniendo un mejor conocimiento de las causas que pueden provocar este fenómeno.

En esta ocasión se ha realizado un análisis de erosión horizontal y vertical, en depósitos de Tierra Blanca Joven (TBJ); en donde, se observó el comportamiento de este suelo una vez que los procesos erosivos comenzaron.

En este capítulo se presentarán conclusiones en base a la caracterización geotécnica de cada estrato (desde el estrato superior hasta el inferior), monitoreo de erosión y valores de tasas de erosión obtenidos para cada talud estudiado.

Los aspectos mencionados permitirán realizar una planificación efectiva de las medidas preventivas o correctivas, para evitar problemas graves en un futuro.

❖ CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA

TALUD ZONA FRANCA III

En este talud se encuentran presentes las unidades de TBJ siguientes: Deposito aluvial, F, Ignimbrita β , y E, cuyas características geotécnicas son las siguientes:

- Unidad F: clasificada como **Arena Limosa con Grava Pumítica (SM)**, gravedad específica de **2.35** y densidad húmeda de **1.5 T/m³** (humedad: 24.33 %).
- Unidad Ignimbrita β : clasificada como **Limo Arenoso (ML)**, gravedad específica de **2.41** y densidad húmeda de **2.1 T/m³** (humedad: 21.0 %).
- Unidad E (deposito seco): clasificada como **Arena mal graduada con Limo (SP-SM)**, gravedad específica de **2.40** y densidad húmeda de **1.25 T/m³** (humedad: 5.6 %).
- Unidad E (deposito húmedo): clasificada como **Limo Arenoso (ML)**, gravedad específica de **2.43** y densidad húmeda de **1.67 T/m³** (humedad: 11.76 %).

TALUD ZONA FRANCA II

En este talud se encuentran presentes las unidades de TBJ siguientes: Deposito aluvial, Ignimbrita β , E, e Ignimbrita α , cuyas características geotécnicas son las siguientes:

- Unidad Ignimbrita β : clasificada como **Limo Arenoso (ML)**, gravedad especifica de **2.41** y densidad húmeda de **2.1 T/m³** (humedad: 21.0 %).
- Unidad E (deposito seco): clasificada como **Arena bien graduada con Limo (SW-SM)**, gravedad especifica de **2.41** y densidad húmeda de **1.25 T/m³** (humedad: 7.3 %).
- Unidad E (deposito húmedo): clasificada como **Limo Arenoso (ML)**, gravedad especifica de **2.51** y densidad húmeda de **1.67 T/m³** (humedad: 12.03 %).
- Unidad Ignimbrita α : clasificada como **Arena Limosa (SM)**, gravedad especifica de **2.33** y densidad húmeda de **1.75 T/m³** (humedad: 10.32 %).

TALUD AEROPUERTO II

En este talud se encuentran presentes las unidades de TBJ siguientes: Deposito aluvial, F, Ignimbrita β , E, y Ignimbrita α , cuyas características geotécnicas son las siguientes:

- Unidad F: clasificada como **Arena Limosa (SM)**, gravedad especifica de **2.35** y densidad húmeda de **1.65 T/m³** (humedad: 24.88 %).
- Unidad Ignimbrita β : clasificada como **Arena Limosa (SM)**, gravedad especifica de **2.46** y densidad húmeda de **1.86 T/m³** (humedad: 25.48 %).
- Unidad E (deposito seco): clasificada como **Arena bien graduada con Limo (SW-SM)**, gravedad especifica de **2.49** y densidad húmeda de **1.25 T/m³** (humedad: 12.6 %).
- Unidad E (deposito húmedo): clasificada como **Limo Arenoso (ML)**, gravedad especifica de **2.41** y densidad húmeda de **1.96 T/m³** (humedad: 24.22 %).
- Unidad Ignimbrita α : clasificada como **Arena Limosa (SM)**, gravedad especifica de **2.33** y densidad húmeda de **1.75 T/m³** (humedad: 9.8 %).

TALUD AEROPUERTO I

En este talud se encuentran presentes las unidades de TBJ siguientes: Depósito aluvial, Ignimbrita β , E, Ignimbrita α , D, y C, cuyas características geotécnicas son las siguientes:

- Unidad Ignimbrita β : clasificada como **Arena Limosa (SM)**, gravedad específica de **2.41** y densidad húmeda de **1.85 T/m³** (humedad: 16.6 %).
- Unidad E (deposito seco): clasificada como **Arena bien graduada con Limo (SW-SM)**, gravedad específica de **2.49** y densidad húmeda de **1.25 T/m³** (humedad: 12.6 %).
- Unidad E (deposito húmedo): clasificada como **Limo Arenoso (ML)**, gravedad específica de **2.44** y densidad húmeda de **1.96 T/m³** (humedad: 24.22 %).
- Unidad Ignimbrita α : clasificada como **Arena Limosa (SM)**, gravedad específica de **2.33** y densidad húmeda de **1.75 T/m³** (humedad: 9.8%).
- Unidad D: clasificada como **Limo Arenoso (ML)**, gravedad específica de **2.32** y densidad húmeda de **1.41 T/m³** (humedad: 11.47 %).
- Unidad C: clasificada como **Limo Arenoso (ML)**, gravedad específica de **2.37** y densidad húmeda de **1.37 T/m³** (humedad: 15.54 %).

❖ RESULTADOS DE EROSIÓN

Tomando como base los resultados de cambios que experimentaron los taludes, en cuanto a erosión, azolvamiento, y registros de lluvia acumulada durante el periodo de estudio, se puede decir lo siguiente:

TALUD ZONA FRANCA III

- El talud presento erosión horizontal y vertical.
- Los primeros cambios horizontales fueron registrados el día 3 de julio con una lluvia acumulada de 238.1 mm (Estación Ilopango).
- El máximo cambio horizontal fue obtenido el día 18 de octubre, con un valor de 3.35 m (Eje M), para una lluvia acumulada de 1503.85 mm.
- Los máximos cambios verticales por erosión fueron registrados el día 2 de octubre en los ejes D (2.40 m), y M (2.10 m), para una lluvia acumulada de 1381.85 mm.

- Los máximos valores por azolvamiento fueron obtenidos el día 18 de octubre en los ejes D (1.44 m), y L (0.88 m), para una lluvia acumulada de 1503.85 mm.
- Los factores que influyeron en la erosión horizontal y vertical de este talud fueron: el tipo de suelo que lo conforma (TBJ), la pendiente aproximadamente vertical, la formación de discontinuidades originadas por procesos de exfoliación, la interacción con la quebrada El Arenal Seco y las crecidas presentadas en época lluviosa, el aumento de la escorrentía superficial, la influencia de la obra de protección cercana al talud (escalones disipadores de energía, donde la quebrada pasa de estar canalizada a descargar a una zona desprotegida).
- Otros factores, que influyeron fueron la velocidad de la corriente y el tipo de suelo presente; el aumento de esta conlleva a una mayor fuerza de desprendimiento y de transporte (erosión vertical). Caso contrario, con una baja velocidad de transporte, el material desprendido es depositado rápidamente debido a la falta de fuerzas que realicen dicho trabajo.

TALUD ZONA FRANCA II

- Los taludes Sur y Norte presentaron erosión horizontal y vertical.
- Los máximos cambios horizontales fueron registrados en el Talud Norte, en el día 2 de octubre con valores de 0.70 m y 2.10 m en los ejes O, y P respectivamente, para una lluvia acumulada de 1381.85 mm.
- El mayor cambio vertical por procesos erosivos del Talud Norte fue obtenido el día 28 de julio, con un valor de 1.51 m en el eje P, para una lluvia acumulada de 672.6 mm.
- El máximo cambio vertical por procesos de azolvamiento fue registrado el 2 de octubre, en el eje P (0.40 m), para una lluvia acumulada de 1381.85 mm.
- Los factores que influyeron en la erosión horizontal y vertical fueron similares a los del Talud Zona Franca III, con la diferencia que este punto se encuentra ubicado en un cambio de dirección de la quebrada, obteniéndose un impacto directo de la corriente de agua durante las crecidas.

TALUD AEROPUERTO II

- Este talud presento erosión horizontal y vertical.
- La erosión horizontal que registro este talud fue elevada, los mayores cambios tuvieron lugar en el día 2 de octubre, con valores de 0.70 m (Eje B) hasta 5.38 m (Eje I), para una lluvia acumulada de 1381.85 mm.
- Los máximos cambios verticales por procesos erosivos fueron registrados el día 3 de julio en los ejes C (0.70 m), I (0.95 m), J (1.25 m), y K (1.25 m), para una lluvia acumulada de 418.8 mm.
- Los mayores cambios verticales por procesos de azolvamiento se obtuvieron el día 2 de octubre en los ejes E (1.20 m), F (1.40 m), y H (1.10 m), para una lluvia acumulada de 1381.85 mm.
- Los factores que incidieron en la erosión horizontal y vertical de este talud fueron: el tipo de suelo que lo conforma (TBJ), la pendiente aproximadamente vertical, la formación de discontinuidades por procesos de exfoliación, la interacción con la quebrada El Arenal Seco y las crecidas que se presentaron en época lluviosa, el cambio de dirección que presenta la quebrada antes de llegar a este punto, la instalación de obras de protección frente al talud, y el aumento de la escorrentía superficial (eliminación de áreas de infiltración).

TALUD AEROPUERTO I

- El talud presento erosión horizontal y vertical.
- La erosión horizontal en este talud fue pequeña, el mayor cambio registrado tuvo lugar el día 3 de julio, con un valor de 0.65 m (Eje E), para una lluvia acumulada de 418.8 mm.
- El factor que incidió en la erosión vertical de este talud fue, la extracción de arena del lecho del rio.
- Los cambios en dirección vertical fueron provocados únicamente por procesos erosivos, registrándose los mayores cambios el día 28 de julio, en los ejes A (1.75 m), C (2.0 m), E (1.0 m), J (1.0 m), y K (1.50 m), para una lluvia acumulada de 672.6 mm.

❖ TASAS DE EROSIÓN

- Los valores de tasas de erosión obtenidos con la técnica “A” taludes con superficie aproximadamente plana en la cresta y expuestos a erosión lateral y vertical, fueron: ZONA FRANCA III: **6.67 T/m²-Año**, ZONA FRANCA II (Talud Sur): **0.09 T/m²-Año** (valor mínimo), ZONA FRANCA II (Talud Norte): **6.24 T/m²-Año**, AEROPUERTO II: **7.48 T/m²-Año** (valor máximo), AEROPUERTO I: **5.93 T/m²-Año**.
- Al comparar las tasas de erosión obtenidas por la Técnica “A”, con las de otras investigaciones (misma zona de estudio), se observó semejanza en magnitud; por lo que, dichos resultados se ajustan a la realidad.
- Los valores de tasas de erosión obtenidos con la técnica “A” (para el periodo de la técnica del GPS) fueron: Zona Franca III: **66.57 T/m²-Año**, Zona Franca II (Talud Norte): **68.91 T/m²-Año**, Aeropuerto II: **37.32 T/m²-Año**.
- Los valores de tasa de erosión obtenidos con la técnica del GPS de doble frecuencia fueron: Zona Franca III: **67.33 T/m²-Año**, Zona Franca II (Talud Norte): **65.56 T/m²-Año**, Aeropuerto II: **34.95 T/m²-Año**.
- La comparación de las tasas de erosión obtenidas por la técnica “A” y por la del GPS de doble frecuencia (para el mismo periodo), proporciono una leve diferencia entre ellas, resultando los mayores cambios para la técnica “A”.

CONCLUSIONES GENERALES

- ❖ La clasificación geotécnica de las unidades de TBJ encontradas en los taludes investigados fueron:
 - **Unidad F:** Arena limosa con Grava Pumítica (SM), con gravedad específica de 2.35 y densidad seca en el rango de 1.2 a 1.32 T/m³.
 - **Unidad Ignimbrita β:** Arena Limosa (SM) y Limos Arenosos (ML), con gravedades específicas en el rango de 2.41 a 2.46 y densidad seca entre 1.48 a 1.7 T/m³.

- **Unidad E (deposito seco):** Arena bien graduada con Limo (SW-SM) y Arena mal graduada con Limo (SP-SM), con gravedades especificas en el rango de 2.40 a 2.49 y densidad seca entre 1.11 a 1.18 T/m³.
 - **Unidad E (deposito húmedo):** Limo Arenoso (ML), con gravedades especificas en el rango de 2.41 a 2.51 y densidad seca entre 1.49 a 1.58 T/m³.
 - **Unidad ignimbritas α :** Arena Limosa (SM), con gravedad especifica de 2.33 y densidad seca en el rango de 1.50 a 1.59 T/m³.
 - **Unidad D:** Limo Arenoso (ML), con gravedad especifica de 2.32 y densidad seca de 1.26 T/m³.
 - **Unidad C:** Limo Arenoso (ML), con gravedad especifica de 2.37 y densidad seca de 1.18 T/m³.
- ❖ El máximo cambio horizontal fue registrado en el sector medio de la zona de estudio a la altura del TALUD AEROPUERTO II (PUNTO No. 3), con un valor de 13.45 m. este se registró por procesos de socavación al pie del talud, en donde la unidad TBJ que se encontraba como base era la Ignimbrita Alfa.
 - ❖ El máximo cambio vertical fue registrado en la parte baja de la quebrada en el TALUD AEROPUERTO I (PUNTO No. 2), con un valor de 3.75 m (debido a la explotación de la arena del rio).
 - ❖ La mayor tasa de erosión fue obtenida en la parte media de la quebrada a la altura del TALUD AEROPUERTO II (PUNTO No. 3), con un valor de 7.48 T/m²-Año; este sector, registró las mayores pérdidas de suelo con un volumen total de 2852.21 m³ y una área efectiva de erosión de 610.22 m².
 - ❖ En los taludes aguas arriba (zona de estudio) las tasas de erosión resultaron constantes en estos últimos dos años (2016-2017) porque la base de los taludes está conformado por la unidad E de la TBJ (prevalecen las partículas finas, y consolidadas); mientras que la quebrada rio abajo, las tasas se incrementaron porque en las bases de los taludes predominaron unidades arenosas (unidad Ignimbrita Alfa) que son fácilmente erosionadas.

- ❖ La determinación de la tasa de erosión está en función de los dos tipos de erosión (horizontal y vertical), pero tiene una mayor contribución (en magnitud) la de origen vertical, debido a la influencia que el área efectiva de erosión causa en la ecuación del cálculo de la tasa.
- ❖ El perfil longitudinal del río fue afectado por la interacción antrópica, como la instalación de obras de protección en el cauce y la continua extracción de arena en el lecho del río; el sistema como respuesta para obtener nuevamente su equilibrio, ocasionó una erosión remontante o retrograda, progresando gradualmente hacia la cabecera de la cuenca fluvial. Esta situación se pudo observar en el origen de canalizaciones o formaciones de terrazas escalonadas en el lecho del río, que protegieron a los taludes contiguos del impacto de la corriente del agua en época lluviosa.
- ❖ Con la comparación de las técnicas de cuantificación de suelo utilizadas en este trabajo de investigación, se ha determinado que la técnica del GPS de doble frecuencia no es la más práctica para la medición de erosión horizontal y vertical de taludes, debido a la dificultad de la toma de datos en el borde de estos, y en la interferencia de la señal que emiten los satélites al GPS por las paredes de grandes alturas; sumando a esto, el elevado costo del equipo.

6.2 RECOMENDACIONES

- ❖ Seleccionar taludes que tengan (inicio de periodo de estudio) distintos estratos de TBJ en la base, para conocer su comportamiento una vez inicien los procesos erosivos (erosión por socavación en la base).
- ❖ Los puntos de control (cuadrícula, puntos de referencia, etc.) de las técnicas de cuantificación de erosión utilizadas para un posterior estudio, deben ser independientes entre sí; para obtener resultados propios, y que estos, no sean afectados por variables de otras técnicas.
- ❖ Si se utiliza más de una técnica de cuantificación de erosión, se debe procurar que ambas tengan mediciones continuas durante todo el periodo de estudio.
- ❖ Se recomienda utilizar la técnica del GPS de doble frecuencia en terrenos donde no existan grandes desniveles, que afecten la seguridad del equipo y la precisión de la toma de datos.
- ❖ Al momento de seleccionar un talud para evaluar erosión horizontal y vertical, debe de existir fácil acceso al borde de este, para evitar mediciones deficientes.
- ❖ Para la ejecución de la técnica del GPS de doble frecuencia, la estación de referencia debe estar ubicada en un lugar fijo y a una altura superior a todos los puntos a levantar. Además, se debe tener en cuenta que para todos los monitoreos (misma zona de estudio) deben utilizarse las mismas coordenadas geográficas para dicha estación.
- ❖ Colocar puntos de referencia (fijos) en los taludes de estudio, esto para solventar pérdidas de puntos de monitoreo; y también, para evaluar estos taludes en un estudio posterior.
- ❖ Se pudo comprobar un principio para el control de erosión (Toy et al., 2002, p. 201-202), el cual establece que la entrega de sedimentos de la erosión fluvial se controla reduciendo la erosión en el área de origen, también se pueden poner barreras alrededor del área de origen para controlar la entrega de sedimentos cuando el control de erosión no es suficiente. Se recomienda estudiar más a fondo este principio para observar el comportamiento que tiene el afectar el azolvamiento y/o la erosión en un área determinada (como medida de mitigación).

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ❖ Ayala Valdez, O. E., “Aplicación de los modelos constitutivos para representar el comportamiento de tierra blanca joven (TBJ), unidad G”, Trabajo de graduación presentado para optar al grado de Ingeniero Civil en la Universidad de El Salvador, San Salvador, El Salvador, 2013.

- ❖ Balocchi, F., & Brea, J., Procesos de erosión- sedimentación en cauces y cuencas, UNESCO, 2010.

- ❖ Bautista et al., “DETERMINACIÓN DE LA TASA DE DETERIORO EN TALUDES CONSTITUIDOS POR MATERIALES PIROCLÁSTICOS EN EL ÁREA METROPOLITANA DE SAN SALVADOR”, Trabajo de graduación presentado para optar al grado de ingeniero civil en la Universidad de El Salvador, San Salvador El Salvador, 2016.

- ❖ Chávez, J., Hernández, W., & Kopecky, L., Problemática y conocimiento actual de las tefras tierra blanca joven en el Área Metropolitana de San Salvador, El Salvador, Revista Geológica de América Central, 2012.

- ❖ Chavez, J.A., & Šebesta, J., Geomorfología y su Relación con los Movimientos de Ladera, 2010.

- ❖ Chavez, J.A., Šebesta, J., Kopecky, L., López, R., & Landaverde, J., “Unsaturated volcanic tephra and its effect for soil movement in El Salvador”, Earth Science, 2013.

- ❖ Geólogos del mundo, Caracterización de la Inundabilidad en el Área Metropolitana de San Salvador, Dprint, 2010.
- ❖ Gómez, E., Aspectos geomecánicos de los deslizamientos rápidos: modelización y diseño de estructuras de contención, tesis doctoral Madrid, 2005.
- ❖ Hernández, W., Chavez, J.A., & Kopecky, L., PROBLEMÁTICA Y CONOCIMIENTO ACTUAL DE LAS TEFRAS TIERRA BLANCA JOVEN EN EL AREA METROPOLITANA DE SAN SALVADOR, EL SALVADOR, Revista Geológica de América Central, 2012.
- ❖ Hernández, W., Chavez, J.A., & Šebesta, J., Cartografía y evaluación para estudiar los procesos erosivos en el Área Metropolitana de San Salvador, Embajada de la Republica Checa, San José, Costa Rica, 2010.
- ❖ Hernández, W., Gutiérrez, E., ESTRATIGRAFÍA DEL ÁREA METROPOLITANA DE SAN SALVADOR, Congreso geológico de América Central San José, Costa Rica, 2008.
- ❖ Hernández, W., & SNET, G., “Mecanismo de ruptura de taludes en ignimbritas de tierra blanca joven”, Caldera de Ilopango, El Salvador.

- ❖ Kowalski, Z., Graniczny, M., Przylucka, M., Chavez, J.A., & Šebesta, J., Vertical ground motions of the San Salvador metropolitan area (AMSS) seen t ALOS InSAR data, FRINGE 2017 WORKSHOP, 2017.
- ❖ Lexa, J., Šebesta, J., Chavez, J.A., Hernández, W., & Pécskay, Z., Geology and volcanic evolution in the southern part of the San Salvador Metropolitan Area, 2011.
- ❖ Maitre, A., “manual de métodos sencillos para estimar erosión hídrica Managua. PASOLAC-CIAT-UNA, 2005.
- ❖ Mendoza, L., Fenómeno de erosión en los suelos, San Salvador, El Salvador, 2016.
- ❖ Suárez, J., “Control de erosión en zonas tropicales”, Bucaramanga, CO. División Editorial y de Publicaciones Universidad Industrial de Santander, 2001.
- ❖ Rodríguez, M., METODOLOGÍAS PARA LA EVALUACIÓN DE PELIGROSIDAD A LOS DESLIZAMIENTOS INDUCIDOS POR TERREMOTOS, tesis doctoral Universidad de Alcalá, 2008.

ANEXOS

Anexo No. 1: Fichas de recolección de información de campo.

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL DEPARTAMENTO DE GEOTECNIA			
FICHA DE RECOLECCIÓN DE INFORMACIÓN DE ESTADO INICIAL DE TALUDES TRABAJO DE GRADUACIÓN: "OBTENCIÓN DE LA TASA DE EROSIÓN EN LOS TALUDES CONFORMADOS POR TIERRA BLANCA JOVEN (TBJ) EN LA ZONA ORIENTE DEL ÁREA METROPOLITANA DE SAN SALVADOR (AMSS)"			
GENERALIDADES			
Nombre del talud: PUNTO No.10 TALUD ZONA FRANCA III			Fecha: Febrero de 2017
Responsable: Cristian Gómez			
LOCALIZACIÓN			
Ubicación: Zona Franca de San Salvador al costado Sur-Oriente del Aeropuerto de Ilopango, San Salvador			
Coordenadas:		X= 89° 6'50.04" (Longitud)	Y= 13°42'22.99" (Latitud)
Distancia al centro de emisión:		7.32 km aproximadamente	
CONDICIONES DEL ENTORNO Y ELEMENTOS ANTRÓPICOS			
Existencia de ríos o quebradas:		Si (X)	No ()
Nombre del río o quebrada		Quebrada El Arenal Seco	
Existencia de obras de protección		Si (X)	No ()
Existencia de cárcavas		Si ()	No (X)
Presencia de casas		Si ()	No (X)
Presencia de zanjas		Si ()	No (X)
Presencia de postes		Si ()	No (X)
Presencia de otras estructuras		Si ()	No (X)
ESCARPE			
Altura Promedio:		7m	
Pendiente:		Aproximadamente Vertical	
Longitud en la dirección X:		65m	
Longitud en la dirección Y:		7m	
CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DE LA PARTE SUPERIOR DEL TALUD			
Existencia de grietas		Si ()	No (X)
Presencia de cobertura vegetal		Si (X)	No ()
Ubicación de la cobertura vegetal: Solamente posee cobertura vegetal en la cresta			
Tipo de cobertura vegetal		Pasto (X)	Matorral (X)
		Arbustivo ()	Cultivo ()
Afloramiento de aguas		Si	No (X)
Descripción de la pendiente del talud:			
Plano ligeramente inclinado (0-2%) ()		Ondulado suave (3-4%) ()	
Ondulado (5-12%) (X)		Alomado (13-25%) ()	
Accidentado (36-70%) ()		Muy accidentado (>70%) ()	
MATERIALES EXISTENTES			
Tipo de material presente:		Tierra Blanca Joven (TBJ)	
Numero de estratos visualmente identificables:		3	
CARACTERÍSTICAS DE LOS ESTRATOS			
Nombre	Altura (m)	Color	Tamaño del grano (mm)
Deposito aluvial	1.3	Gris	5-9
Unidad F	5.3	Beige claro	4-9
Unidad E (deposito húmedo)	0.21	Café oscuro	0.6
Unidad E (deposito seco)	0.20	Café claro	4
OTROS			
Existe probabilidad de deslizamientos		Si (X)	No ()

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
DEPARTAMENTO DE GEOTECNIA

FICHA DE RECOLECCIÓN DE INFORMACIÓN DE ESTADO INICIAL DE TALUDES
TRABAJO DE GRADUACIÓN: "OBTENCIÓN DE LA TASA DE EROSIÓN EN LOS TALUDES CONFORMADOS POR TIERRA BLANCA JOVEN (TBJ) EN LA ZONA ORIENTE DEL ÁREA METROPOLITANA DE SAN SALVADOR (AMSS)"

GENERALIDADES			
Nombre del talud: PUNTO No.9 TALUD ZONA FRANCA II			Fecha: Febrero de 2017
Responsable: Cristian Gómez			
LOCALIZACIÓN			
Ubicación: Zona Franca de San Salvador al costado Sur-Oriente del Aeropuerto de Ilopango, San Salvador			
Coordenadas:	X= 89° 6'52.58" (Longitud)	Y= 13°42'7.17" (Latitud)	
Distancia al centro de emisión:	7.48 km aproximadamente		
CONDICIONES DEL ENTORNO Y ELEMENTOS ANTRÓPICOS			
Existencia de ríos o quebradas:	Si	(X)	No ()
Nombre del río o quebrada	Quebrada El Arenal Seco		
Existencia de obras de protección	Si	(X)	No ()
Existencia de cárcavas	Si	()	No (X)
Presencia de casas	Si	()	No (X)
Presencia de zanjas	Si	()	No (X)
Presencia de postes	Si	()	No (X)
Presencia de otras estructuras	Si	()	No (X)
ESCARPE			
Altura Promedio:	4 m talud sur y 6 m talud norte		
Pendiente:	Aproximadamente Vertical		
Longitud en la dirección X:	20m		
Longitud en la dirección Y:	4 m talud sur y 6 m talud norte		
CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DE LA PARTE SUPERIOR DEL TALUD			
Existencia de grietas	Si	()	No (X)
Presencia de cobertura vegetal	Si	(X)	No ()
Ubicación de la cobertura vegetal:	Solamente posee cobertura vegetal en la cresta		
Tipo de cobertura vegetal	Pasto (X)	Matorral (X)	Arbustivo () Cultivo ()
Afloramiento de aguas	Si		No (X)
Descripción de la pendiente del talud:			
Plano ligeramente inclinado (0-2%) ()		Ondulado suave (3-4%) (X)	
Ondulado (5-12%) ()		Alomado (13-25%) () Quebrado (26-35%) ()	
Accidentado (36-70%) ()		Muy accidentado (>70%) ()	
MATERIALES EXISTENTES			
Tipo de material presente:	Tierra Blanca Joven (TBJ)		
Numero de estratos visualmente identificables:	4		
CARACTERÍSTICAS DE LOS ESTRATOS			
Nombre	Altura (m)	Color	Tamaño del grano (mm)
Deposito aluvial	2.5	Gris	5-9
Unidad Ignimbrita Beta talud sur	1.1	Café claro	0.15-0.3
Unidad E (deposito húmedo)	0.21	Café oscuro	0.6
Unidad E (deposito seco)	0.20	Café claro	4
Unidad Ignimbrita Alfa talud sur	0.6	Rosado	4
Unidad Ignimbrita Alfa talud norte	2.35	Rosado	4
OTROS			
Existe probabilidad de deslizamientos	Si	(X)	No ()

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
DEPARTAMENTO DE GEOTECNIA

FICHA DE RECOLECCIÓN DE INFORMACIÓN DE ESTADO INICIAL DE TALUDES
TRABAJO DE GRADUACIÓN: "OBTENCIÓN DE LA TASA DE EROSIÓN EN LOS TALUDES CONFORMADOS POR TIERRA BLANCA JOVEN (TBJ) EN LA ZONA ORIENTE DEL ÁREA METROPOLITANA DE SAN SALVADOR (AMSS)"

GENERALIDADES			
Nombre del talud: PUNTO No.3 TALUD AEROPUERTO II			Fecha: Febrero de 2017
Responsable: Cristian Gómez			
LOCALIZACIÓN			
Ubicación: Zona Franca de San Salvador al costado Nor-Oriente del Aeropuerto de Ilopango, San Salvador			
Coordenadas:	X= 89° 7'10.93" (Longitud)	Y= 13°42'11.36" (Latitud)	
Distancia al centro de emisión:	8.57 km aproximadamente		
CONDICIONES DEL ENTORNO Y ELEMENTOS ANTRÓPICOS			
Existencia de ríos o quebradas:	Si (X)	No ()	
Nombre del río o quebrada	Quebrada El Arenal Seco		
Existencia de obras de protección	Si (X)	No ()	
Existencia de cárcavas	Si ()	No (X)	
Presencia de casas	Si ()	No (X)	
Presencia de zanjas	Si ()	No (X)	
Presencia de postes	Si ()	No (X)	
Presencia de otras estructuras	Si ()	No (X)	
ESCARPE			
Altura Promedio:	11m		
Pendiente:	Aproximadamente Vertical		
Longitud en la dirección X:	55m		
Longitud en la dirección Y:	11m		
CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DE LA PARTE SUPERIOR DEL TALUD			
Existencia de grietas	Si ()	No (X)	
Presencia de cobertura vegetal	Si (X)	No ()	
Ubicación de la cobertura vegetal:	Solamente posee cobertura vegetal en la cresta		
Tipo de cobertura vegetal	Pasto (X)	Matorral (X)	Arbustivo () Cultivo (X)
Afloramiento de aguas	Si	No (X)	
Descripción de la pendiente del talud:			
Plano ligeramente inclinado (0-2%) ()		Ondulado suave (3-4%) (X)	
Ondulado (5-12%) ()		Alomado (13-25%) () Quebrado (26-35%) ()	
Accidentado (36-70%) ()		Muy accidentado (>70%) ()	
MATERIALES EXISTENTES			
Tipo de material presente:	Tierra Blanca Joven (TBJ)		
Numero de estratos visualmente identificables:	4		
CARACTERÍSTICAS DE LOS ESTRATOS			
Nombre	Altura (m)	Color	Tamaño del grano (mm)
Deposito aluvial	1.3	Gris	5-9
Unidad F	5.2	Beige claro	4
Unidad E (deposito húmedo)	0.21	Café oscuro	0.6
Unidad E (deposito seco)	0.20	Café claro	4
Unidad Ignimbrita alfa	2.7	Rosado	2
OTROS			
Existe probabilidad de deslizamientos	Si (X)	No ()	

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
DEPARTAMENTO DE GEOTECNIA

FICHA DE RECOLECCIÓN DE INFORMACIÓN DE ESTADO INICIAL DE TALUDES
TRABAJO DE GRADUACIÓN: "OBTENCIÓN DE LA TASA DE EROSIÓN EN LOS TALUDES CONFORMADOS POR TIERRA BLANCA JOVEN (TBJ) EN LA ZONA ORIENTE DEL ÁREA METROPOLITANA DE SAN SALVADOR (AMSS)"

GENERALIDADES			
Nombre del talud: PUNTO No.2 TALUD AEROPUERTO I			Fecha: Febrero de 2017
Responsable: Cristian Gómez			
LOCALIZACIÓN			
Ubicación: Zona Franca de San Salvador al costado Nor-Oriente del Aeropuerto de Ilopango, San Salvador			
Coordenadas:	X= 89° 7'14.89" (Longitud)	Y= 13°42'22.69" (Latitud)	
Distancia al centro de emisión:	9.14 km aproximadamente		
CONDICIONES DEL ENTORNO Y ELEMENTOS ANTRÓPICOS			
Existencia de ríos o quebradas:	Si (X)	No ()	
Nombre del río o quebrada	Quebrada El Arenal Seco		
Existencia de obras de protección	Si ()	No (X)	
Existencia de cárcavas	Si ()	No (X)	
Presencia de casas	Si ()	No (X)	
Presencia de zanjas	Si ()	No (X)	
Presencia de postes	Si ()	No (X)	
Presencia de otras estructuras	Si ()	No (X)	
ESCARPE			
Altura Promedio:	6.65 m		
Pendiente:	Aproximadamente Vertical		
Longitud en la dirección X:	50m		
Longitud en la dirección Y:	6.65 m		
CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DE LA PARTE SUPERIOR DEL TALUD			
Existencia de grietas	Si ()	No (X)	
Presencia de cobertura vegetal	Si (X)	No ()	
Ubicación de la cobertura vegetal:	Solamente posee cobertura vegetal en la cresta		
Tipo de cobertura vegetal	Pasto (X)	Matorral (X)	Arbustivo (X) Cultivo ()
Afloramiento de aguas	Si	No (X)	
Descripción de la pendiente del talud:			
Plano ligeramente inclinado (0-2%) ()		Ondulado suave (3-4%) ()	
Ondulado (5-12%) (X)		Alomado (13-25%) () Quebrado (26-35%) ()	
Accidentado (36-70%) ()		Muy accidentado (>70%) ()	
MATERIALES EXISTENTES			
Tipo de material presente:	Tierra Blanca Joven (TBJ)		
Numero de estratos visualmente identificables:	5		
CARACTERÍSTICAS DE LOS ESTRATOS			
Nombre	Altura (m)	Color	Tamaño del grano (mm)
Deposito aluvial	0.15	Gris	5-9
Unidad Ignimbrita Beta	0.4	Café claro	0.6
Unidad E (deposito húmedo)	0.21	Café oscuro	0.6
Unidad E (deposito seco)	0.20	Café claro	4
Unidad Ignimbrita alfa	2.1	Rosado	2
Unidad D	4.2	Café claro	0.3
OTROS			
Existe probabilidad de deslizamientos	Si (X)	No ()	

Anexo No. 2: Formato utilizado en la determinación del contenido de humedad natural.

**UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
LABORATORIO DE SUELOS Y MATERIALES
"ING. MARIO ANGEL GUZMÁN URBINA"**



**DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO DE HUMEDAD NATURAL ASTM D-2216-98
TRABAJO DE GRADUACIÓN: OBTENCIÓN DE LA TASA DE EROSIÓN EN TALUDES
CONFORMADOS POR TIERRA BLANCA JOVEN (TBJ) EN LA ZONA ORIENTE
DEL ÁREA METROPOLITANA DE SAN SALVADOR (AMSS)**

Fecha: 21/08/2017

Lugar de procedencia de la muestra: Quebrada El Arenal Seco, Ilopango

Laboratorista: Cristian Gómez

Revisó: Ing. Miguel Landaverde

Nombre del talud	Talud Aeropuerto II	
Unidad	Ignimbrita Beta	
Numero de muestra	M1	M2
Identificación de la tara	W30	W0-5
Peso de la tara (g)	11.61	10.88
Suelo húmedo + tara (g)	93.62	75.33
Suelo seco + tara (g)	81.75	66.31
% de humedad	16.92	16.27

Anexo No. 3: Formato utilizado en la determinación de la gravedad específica ASTM D-854.

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
LABORATORIO DE SUELOS Y MATERIALES
"ING. MARIO ANGEL GUZMÁN URBINA"



DETERMINACIÓN DE LA GRAVEDAD ESPECÍFICA DE LOS SÓLIDOS DEL SUELO ASTM D-854
TRABAJO DE GRADUACIÓN: OBTENCIÓN DE LA TASA DE EROSIÓN EN TALUDES
CONFORMADOS POR TIERRA BLANCA JOVEN (TBJ) EN LA ZONA ORIENTE
DEL ÁREA METROPOLITANA DE SAN SALVADOR (AMSS)

Fecha: 5/09/2017

Lugar de procedencia de la muestra: Quebrada El Arenal Seco, Ilopango

Laboratorista: Cristian Gómez

Revisó: Ing. Miguel Landaverde

Unidad	Ignimbrita Alfa	
	M1	M2
Numero de muestra	3A	4A
Numero de matraz	100	100
Pesos secos al horno (g)	192.60	144.9
Pesos matraz	292.8	275.5
Pesos matraz + suelo (g)	100.6	100.4
Peso del suelo seco (g)	748.30	732.20
Peso matraz + agua + suelo a T de ensayo (g)	24.2	24.2
Temperatura de ensayo (°C)	690.65	674.70
Peso matraz + agua aforado (g)	2.34	2.34
Gravedad especifica		

Anexo No. 4: Formato utilizado en la determinación de la densidad de los suelos ASTM D-7263.

**UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
LABORATORIO DE SUELOS Y MATERIALES
"ING. MARIO ANGEL GUZMÁN URBINA"**



**DETERMINACIÓN DE LA DENSIDAD DE LOS SUELOS ASTM D-7263
TRABAJO DE GRADUACIÓN: OBTENCIÓN DE LA TASA DE EROSIÓN EN TALUDES
CONFORMADOS POR TIERRA BLANCA JOVEN (TBJ) EN LA ZONA ORIENTE
DEL ÁREA METROPOLITANA DE SAN SALVADOR (AMSS)**

Fecha: 21/8/2017

Lugar de procedencia de la muestra: Quebrada el Arenal Seco, Ilopango

Laboratorista: Cristian Gómez

Revisó: Ing. Miguel Landaverde

Unidad: Ignimbrita Beta

cara	L ₁ (cm)	L ₂ (cm)	L ₃ (cm)	L ₄ (cm)	L ₅ (cm)	L ₆ (cm)	L _{prom} (cm)	Área h _i (cm ²)	h _{prom} (cm)	Volumen (cm ³)
1	10.14	10.095	9.92	10.13	10.14	10.05	10.08	103.12	11.53	1188.89
2	9.965	10.06	10.02	10.37	10.45	10.50	10.23			

Peso de tara + espécimen húmedo (g)	93.62
Identificación de la tara	W30
Peso de la tara (g)	11.61
Peso de tara + espécimen secado al horno (g)	81.75
% ω	16.92
Densidad húmeda (T/m ³)	1.85
Densidad seca (T/m ³)	1.59

Anexo No. 5: Formato utilizado en la determinación del tamaño de las partículas de suelos ASTM D-422.

**UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
LABORATORIO DE SUELOS Y MATERIALES
"ING. MARIO ANGEL GUZMÁN URBINA"**



DETERMINACIÓN DEL TAMAÑO DE LAS PARTÍCULAS DE SUELOS

(Basada en ASTM D-422-63, Reaprobada en 1998)

**TRABAJO DE GRADUACIÓN: OBTENCIÓN DE LA TASA DE EROSIÓN EN TALUDES
CONFORMADOS POR TIERRA BLANCA JOVEN (TBJ) EN LA ZONA ORIENTE
DEL ÁREA METROPOLITANA DE SAN SALVADOR (AMSS)**

Fecha: 19/09/2017

Lugar de procedencia de la muestra: Quebrada el Arenal Seco, Ilopango

Laboratorista: Cristian Gómez

Calculo: Cristian Gómez

Revisó: Ing. Miguel Landaverde

Nombre del talud: TALUD AEROPUERTO II

Descripción del suelo: Color blanco con presencia de pómez

Unidad: Ignimbrita Alfa

Condición de la muestra: Secada al horno

PROCESO MECÁNICO

MASA	
MASA SECA RETENIDA EN LA 10 (g)	267.97
MASA SECA RETENIDA EN LA 10 LAVADA Y SECADA (g)	255.93
MASA SECA QUE PASA LA 10 (g)	2596
MASA SECA TOTAL QUE PASA LA 10 (g)	2608.04
MASA TOTAL DE ENSAYO (g)	2863.97

Malla (pulga)	Abertura (mm)	Masa Retenida (g)	Masa Retenida Compensada (g)	% Retenido Parciales	% Retenido Acumulados	% Que Pasa
3/4	19	0	0	0.00	0.00	100.00
3/8	9.5	16.83	16.83	0.59	0.59	99.41
Nº4	4.75	58.54	58.54	2.04	2.63	97.37
Nº8	2.36	115.15	115.67	4.04	6.67	93.33
Nº10	2	51.36	51.36	1.79	8.46	91.54
Pasan Nº10		13.53	13.53			
Σ		255.41	255.93			
Pasan Nº10		2621.57				

COMPENSACION DE MASA QUE SE RETIENE EN EL PROCESO DE TAMIZADO	0.52 (g)
---	----------

MASA SECA QUE PASA LA 10 DESPUES DEL PROCESO DE TAMIZADO	13.53 (g)
MASA COMPENSADA EN EL PROCESO DE TAMIZADO	255.93 (g)

PROCESO HIDROMÉTRICO

PORCENTAJE QUE PASA LA 200 (MASA TOTAL)	32.93 %
MASA UTILIZADA EN HIDROMETRIA	100 (g)
GRAVEDAD ESPECIFICA Gs	2.33

CORECCION POR DEFLOCULANTE (Cd)	
lec inf menisco con agua	-1
lec inf defloculante + agua	7
Cd	8
CORECCION POR MENISCO (Cm)	
lec inferior menisco	0
lec superior menisco	-1
Cm	1

a	1.091
---	-------

Fecha	Tiempo transcurrido (min)	Temperatura (°C)	Lectura real del hidrómetro (Rr)	Lectura Corregida del hidrómetro Rc	Porcentaje que pasa (%)	Porcentaje que pasa ref muestra total (%)	Lectura Corregida por menisco R	Profundidad efectiva (L, cm)	√L/t	K	D
19/9/2017	2	25.5	23	16.48	17.97	5.92	24	12.4	2.4900	0.014197	0.03535024
19/9/2017	5	25.5	21	14.475	15.79	5.20	22	12.7	1.5937	0.014197	0.02262629
19/9/2017	15	25.3	17	10.405	11.35	3.74	18	13.3	0.9416	0.014227	0.01339657
19/9/2017	30	25.4	14	7.44	8.12	2.67	15	13.8	0.6782	0.014212	0.00963905
19/9/2017	60	25.5	12	5.475	5.97	1.97	13	14.2	0.4865	0.014197	0.00690661
19/9/2017	250	26.4	9	2.79	3.04	1.00	10	14.7	0.2425	0.014062	0.00340985
20/9/2017	1440	25.4	7	0.44	0.48	0.16	8	15	0.1021	0.014212	0.00145051

Anexo No. 6: Fotografías comparativas del deterioro por erosión que experimentaron los taludes en estudio



*Zona Franca de San Bartolo, 3/2/2017
Fuente: DEL AUTOR*



*Zona Franca de San Bartolo, 2/10/2017
Fuente: DEL AUTOR*



TALUD ZONA FRANCA III, 3/2/2017
Fuente: DEL AUTOR



TALUD ZONA FRANCA III, 2/10/2017
Fuente: DEL AUTOR



TALUD ZONA FRANCA II, 3/2/2017
Fuente: DEL AUTOR



TALUD ZONA FRANCA II, 16/11/2017
Fuente: DEL AUTOR



TALUD EROPUERTO II, 3/2/2017
Fuente: DEL AUTOR



TALUD AEROPUERTO II, 16/11/2017
Fuente: DEL AUTOR



TALUD AEROPUERTO I, 3/2/2017
Fuente: DEL AUTOR



TALUD AEROPUERTO I, 16/11/2017
Fuente: DEL AUTOR