



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Civil

**ESTIMACIÓN DE INTENSIDAD DE LLUVIA PARA EL DESARROLLO DE UN SISTEMA DE
ALERTA TEMPRANA ANTE RIESGO POR REMOCIÓN DE MASA, EN UN SECTOR DE LA
COMUNIDAD EL CAMPANERO EN LA ZONA 8 DE MIXCO**

Nelson Abraham Ramírez López

Asesorado por el Ing. Omar Gilberto Flores Beltetón

Guatemala, enero de 2019

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**ESTIMACIÓN DE INTENSIDAD DE LLUVIA PARA EL DESARROLLO DE UN
SISTEMA DE ALERTA TEMPRANA ANTE RIESGO POR REMOCIÓN DE
MASA, EN UN SECTOR DE LA COMUNIDAD EL CAMPANERO EN LA ZONA
8 DE MIXCO**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

NELSON ABRAHAM RAMÍREZ LÓPEZ
ASESORADO POR EL ING. OMAR GILBERTO FLORES BELTETÓN

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO CIVIL

GUATEMALA, ENERO DE 2019

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL I	Ing. José Francisco Gómez Rivera
VOCAL II	Ing. Mario Renato Escobedo Martínez
VOCAL III	Ing. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Br. Luis Diego Aguilar Ralón
VOCAL V	Br. Christian Daniel Estrada Santizo
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

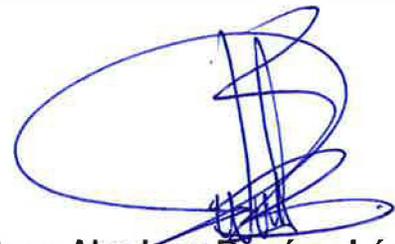
DECANO	Ing. Murphy Olympto Paiz Recinos
EXAMINADOR	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
EXAMINADOR	Ing. Luis Manuel Sandoval Mendoza
EXAMINADOR	Ing. Alan Geovani Cosillo Pinto
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

**ESTIMACIÓN DE INTENSIDAD DE LLUVIA PARA EL DESARROLLO DE UN
SISTEMA DE ALERTA TEMPRANA ANTE RIESGO POR REMOCIÓN DE
MASA, EN UN SECTOR DE LA COMUNIDAD EL CAMPANERO EN LA ZONA
8 DE MIXCO**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Civil, con fecha 11 de abril de 2018.

A handwritten signature in blue ink, consisting of several overlapping loops and lines, positioned above the name of the signatory.

Nelson Abraham Ramírez López

Guatemala 11 de septiembre de 2018

Ing. Guillermo Francisco Melini Salguero
Departamento de Planeamiento
Escuela de Ingeniería Civil, USAC.

Señor Director:

Tengo el agrado de informarle que he revisado el trabajo de graduación titulado **ESTIMACIÓN DE INTENSIDAD DE LLUVIA, PARA EL DESARROLLO DE UN SISTEMA DE ALERTA TAMPRANA ANTE RIESGO POR REMOCIÓN DE MASA, EN UN SECTOR DE LA COMUNIDAD EL CAMPANERO EN LA ZONA 8 DE MIXCO**, realizado por el estudiante universitario Nelson Abraham Ramírez López, quien contó con la asesoría del suscrito.

Considero que el trabajo realizado por el estudiante Ramírez López cumple con los objetivos para los que fue planteado, por lo que recomiendo su aprobación.

Agradezco a usted la atención que se sirva prestar a la presente.

Atentamente,


Omar Gilberto Flores Belletón
Ingeniero Civil, Colegiado No. 3145
INGENIERO CIVIL
Asesor Colegiado No. 3145



USAC
TRICENTENARIA
Universidad de San Carlos de Guatemala
FACULTAD DE INGENIERÍA

<http://civil.ingenieria.usac.edu.gt>

ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL



Guatemala,
22 de octubre de 2018

Ingeniero
Hugo Leonel Montenegro Franco
Director Escuela Ingeniería Civil
Facultad de Ingeniería
Universidad de San Carlos

Ingeniero Montenegro.

Le informo que he revisado el trabajo de graduación **ESTIMACIÓN DE INTENSIDAD DE LLUVIA, PARA EL DESARROLLO DE UN SISTEMA DE ALERTA TEMPRANA ANTE RIESGO POR REMOCIÓN DE MASA, EN UN SECTOR DE LA COMUNIDAD EL CAMPANERO EN LA ZONA 8 DE MIXCO** desarrollado por el estudiante de Ingeniería Civil Nelson Abraham Ramírez López, quien contó con la asesoría del Ing. Omar Gilberto Flores Beltetón.

Considero este trabajo bien desarrollado y representa un aporte para la ingeniería nacional y habiendo cumplido con los objetivos del referido trabajo doy mi aprobación al mismo solicitando darle el trámite respectivo.

Atentamente,

ID Y ENSEÑADA TODOS


Ing. civil Guillermo Francisco Melini Salguero
Jefe Del Departamento de Planeamiento



FACULTAD DE INGENIERIA
DEPARTAMENTO
DE
PLANEAMIENTO
U S A C

/mrrm.



Más de 138 años de Trabajo y Mejora Continua



USAC
TRICENTENARIA
Universidad de San Carlos de Guatemala
FACULTAD DE INGENIERÍA

<http://civil.ingenieria.usac.edu.gt>

ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL



El director de la Escuela de Ingeniería Civil, después de conocer el dictamen del Asesor Ing. Omar Gilberto Ramírez López y Coordinador del Departamento de Planeamiento Ing. Guillermo Francisco Melini Salguero, al trabajo de graduación del estudiante Nelson Abraham Ramírez López ESTIMACIÓN DE INTENSIDAD DE LLUVIA PARA EL DESARROLLO DE UN SISTEMA DE ALERTA TEMPRANA ANTE RIESGO POR REMOCIÓN DE MASA, EN UN SECTOR DE LA COMUNIDAD EL CAMPANERO EN LA ZONA 8 DE MIXCO da por este medio su aprobación a dicho trabajo.


Ing. Hugo Leonel Montenegro Franco



Guatemala, enero 2019

/mmm.

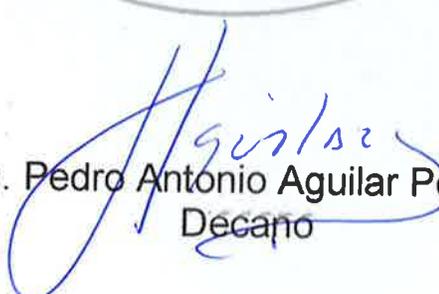


Más de 138 años de Trabajo y Mejora Continua



El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Civil del trabajo de graduación titulado: **“ESTIMACIÓN DE INTENSIDAD DE LLUVIA PARA EL DESARROLLO DE UN SISTEMA DE ALERTA TEMPRANA ANTE RIESGO POR REMOCIÓN DE MASA, EN UN SECTOR DE LA COMUNIDAD EL CAMPANARIO EN LA ZONA 8 DE MIXCO”** presentado por el estudiante universitario: **Nelson Abraham Ramírez López** y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, se autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE.


Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
Decano



Guatemala, Enero de 2019

ACTO QUE DEDICO A:

- Dios** Por permitirme la vida y darme la oportunidad de crecer personal y profesionalmente; porque por tu amor y misericordia alcanzo tu bondad, a ti sea toda la gloria, honra y honor.
- Mis padres** Augusto Feliciano Ramírez y Joventina López Pérez, por su amor y apoyo incondicional. Por ser parte de mi vida, de mis anhelos, por estar conmigo en mis victorias y derrotas.
- Mis hermanos** Sonia Ramírez López, Eduardo Ramírez López, Karina Ramírez López, Lilian Ramírez López, por su apoyo y amor sincero.
- Mis sobrinos** Lucrecia Morataya, Ximena Morataya, Edgar Ramírez, Cristofer Ramírez, Mónica España, Jackeline España, Ruth España, Nicole García, por ser mi motivación de vida y por inspirarme a lograr mis metas.
- Mi familia** Porque de ellos vengo, por lo que soy y porque los amo.
- Mis amigos** Por apoyarme en todo momento y enseñarme lo bello de la vida.

AGRADECIMIENTOS A:

Dios	Por permitirme culminar una etapa profesional más en mi vida.
Universidad de San Carlos de Guatemala	Por ser mi hogar en el mundo del saber. Por permitirme experiencias académicas y de aprendizaje.
Facultad de Ingeniería	Por formarme en el ámbito académico y profesional.
Mi asesor de tesis	Omar Gilberto Flores Beltetón, por su paciencia, dedicación y apoyo en la elaboración de la presente investigación.
Mis asesores y amigos	Adriana Orozco, Dulce Leal y Juan Pablo Oliva, por su apoyo y contribución con sus conocimientos.
Mi aliado	Por apoyarme en mi proceso de crecimiento.
Mis demás amigos y compañeros de trabajo	Por su motivación y apoyo en cada momento y todo aspecto de mi vida.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	VII
LISTA DE SÍMBOLOS	XI
GLOSARIO	XIII
RESUMEN.....	XV
OBJETIVOS.....	XVII
INTRODUCCIÓN	XIX
1. MARCO TEÓRICO Y CONCEPTUAL.....	1
1.1. Gestión del riesgo.....	2
1.1.1. Conceptos básicos de la gestión de riesgo	3
1.1.1.1. Amenaza.....	3
1.1.1.2. Vulnerabilidad.....	3
1.1.1.3. Riesgo	4
1.1.1.4. Susceptibilidad.....	4
1.1.1.5. Exposición	4
1.1.1.6. Desastre	5
1.1.1.7. Evaluación de riesgo	5
1.1.1.8. Cambio climático	5
1.2. Elemento climatológico e hidrológico	6
1.2.1. Precipitación o lluvia.....	6
1.2.2. Intensidad de la precipitación o intensidad de lluvia	7
1.2.3. Medición de la precipitación o lluvia	8
1.2.4. Instrumentos de medición.....	8

1.2.5.	Precipitación o lluvia como activador de los movimientos de ladera	10
1.3.	Intensidad crítica de lluvia o umbral de lluvia	11
1.3.1.	Métodos estadísticos.....	12
1.3.2.	Métodos físicos o determinísticos	13
1.3.3.	Consideraciones metodológicas.....	14
1.3.4.	Consideraciones metodológicas a nivel local	14
1.3.4.1.	Estaciones meteorológicas.....	15
1.3.4.2.	Base de datos por eventos de remoción de masa	15
1.3.4.3.	Geomorfología y geología a nivel local.....	16
1.3.4.4.	Ensayos de laboratorio.....	16
1.4.	Elemento geológico.....	17
1.4.1.	Inestabilidad en laderas.....	18
1.4.2.	Movimiento de laderas	18
1.4.3.	Caracterización	19
1.4.3.1.	Elementos de una ladera.....	19
1.4.3.2.	Elementos de un movimiento de ladera	21
1.4.4.	Clasificación de movimientos de ladera	22
1.4.4.1.	Caída.....	23
1.4.4.2.	Inclinación o volteo	24
1.4.4.3.	Reptación	25
1.4.4.4.	Deslizamiento.....	26
1.4.4.5.	Esparcimiento lateral.....	27
1.4.4.6.	Flujos.....	28
1.4.4.6.1.	Flujos en roca.....	29
1.4.4.6.2.	Flujos de detritos.....	29

	1.4.4.6.3.	Flujos de tierra.....	29
	1.4.4.6.4.	Flujos de lodo	30
	1.4.4.6.5.	Avalanchas.....	30
1.4.5.		Procesos de inestabilidad y deterioro	31
	1.4.5.1.	Lavado superficial o erosión	32
	1.4.5.2.	Manifestaciones de la erosión hídrica..	33
		1.4.5.2.1. Erosión pluvial	33
		1.4.5.2.2. Erosión laminar.....	33
		1.4.5.2.3. Surcos	34
		1.4.5.2.4. Cárcavas	34
	1.4.5.3.	Formación de flujos por erosión.....	34
	1.4.5.4.	Índices como factor de riesgo por erosión.....	35
		1.4.5.4.1. Índice de concentración de precipitaciones (ICP)	35
		1.4.5.4.2. Índice de Fournier (IF) ..	37
		1.4.5.4.3. Índice de Fournier modificado (IFM).....	37
1.5.		Monitoreo y Sistemas de Alerta Temprana (SAT) por deslizamientos.....	39
	1.5.1.	Definición SAT	39
	1.5.2.	Componentes SAT	40
		1.5.2.1. Conocimiento de los riesgos.....	40
		1.5.2.2. Seguimiento y alerta	40
		1.5.2.3. Difusión y comunicación	40
		1.5.2.4. Capacidad de respuesta.....	41
	1.5.3.	Funcionamiento general de un SAT	41
	1.5.4.	Tipos de SAT	41

1.5.5.	Sistema de Alerta Temprana (SAT) por deslizamiento	42
1.5.6.	SAT en Guatemala.....	43
2.	CARACTERIZACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO	45
2.1.	Monografía	45
2.1.1.	Ubicación y localización	45
2.1.2.	Clima	46
2.2.	Aspectos de infraestructura.....	47
2.2.1.	Tipología constructiva	47
2.2.2.	Servicios.....	48
2.3.	Aspectos sociales y económicos.....	48
2.3.1.	Población.....	48
2.3.2.	Origen de la comunidad	49
2.3.3.	Actividad económica	49
2.3.4.	Organización comunitaria.....	49
2.3.5.	Antecedentes de impactos por fenómenos naturales.....	50
3.	METODOLOGÍA	51
3.1.	Líneas de trabajo	52
3.1.1.	Evaluaciones de campo	52
3.1.2.	Trabajo de gabinete	53
3.2.	Desarrollo de línea de trabajo	55
3.2.1.	Recopilación de datos antecedente	55
3.2.2.	Caracterización del sitio	55
3.2.3.	Zonas de arranque y puntos susceptibles por erosión.....	57
3.2.4.	Identificación de trayectos de material	57

3.2.5.	Evaluación de zonas de depósito	57
3.2.6.	Mapeo geológico de la zona de estudio	60
3.2.7.	Toma de muestras y ensayo de laboratorio.....	62
3.2.8.	Comparación de zona de estudio con mapa de amenaza por deslizamiento	64
3.2.9.	Análisis histórico de lluvias	66
3.2.10.	Tendencia de las precipitaciones.....	67
3.2.11.	Índice de concentración de precipitaciones (ICP)...	72
3.2.12.	Índice de Fournier modificado (IFM)	75
3.3.	Determinación intensidades críticas de lluvia	75
3.3.1.	Determinación de tormentas.....	76
3.3.2.	Inventario de intensidades.....	82
3.3.3.	Identificación de tormentas asociadas a procesos de erosión y escorrentía.....	84
3.3.4.	Definición de modelo matemático para la clasificación de intensidades	90
4.	ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS	95
4.1.	Resultados del estudio	95
4.1.1.	Del modelo matemático	95
4.1.2.	Intensidades de lluvia crítica para la emisión de alerta.....	96
4.1.3.	Interpretación de intensidades.....	98
4.2.	Integración de intensidades al monitoreo del Sistema de Alerta Temprana (SAT).....	99
4.2.1.	Pluviógrafo.....	99
4.2.2.	Sistema de medición del pluviógrafo	101
4.2.3.	Envío de notificaciones.....	101
4.2.4.	Instalación de la instrumentación de monitoreo....	102

4.2.5.	Forma de operación del Sistema de Alerta Temprana (SAT).....	103
--------	---	-----

CONCLUSIONES.....	105
RECOMENDACIONES	107
BIBLIOGRAFÍA.....	109
ANEXOS.....	115

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Elementos de una ladera	20
2.	Elementos de un movimiento de ladera	21
3.	Tipo caída	23
4.	Inclinación o volteo.....	24
5.	Reptación	25
6.	Deslizamiento.....	27
7.	Esparcimiento lateral.....	28
8.	Tipo flujo.....	30
9.	Avalancha	31
10.	Ubicación del sector de estudio	46
11.	Esquema metodológico para la obtención de intensidades	54
12.	Identificación de problemática del área de estudio	56
13.	Evaluación en zonas de depósito.....	58
14.	Identificación de zonas de arranque y trayectos de escorrentía superficial.....	59
15.	Mapa geológico definido mediante recorrido en el área de estudio.....	61
16.	Ensayo de permeabilidad del suelo.....	63
17.	Imagen extraída de mapas de amenaza por deslizamiento para Guatemala.....	65
18.	Gráfico de lluvias acumuladas mensuales en mm, mayo a octubre. La línea roja discontinua, presenta la tendencia general de precipitaciones para un registro de 1990 a 2016	69

19.	Gráfico de lluvias acumuladas mensuales en mm, de mayo a octubre. Línea roja discontinua, presenta tendencia general de las precipitaciones para un registro de 1990 a 2016	71
20.	Gráfico intensidad y duración de tormentas identificadas.....	83
21.	Descripción de la ley de Darcy	87
22.	Gráfico intensidad y duración de tormentas que generan escorrentía superficial.....	89
23.	Gráfico intensidad y duración de tormentas que definen modelo matemático de intensidades.....	93
24.	Pluviógrafo instalado en la comunidad	100
25.	Ubicación fuente de energía para abastecimiento del pluviógrafo.....	102
26.	Ubicación de pluviógrafo.....	103

TABLAS

I.	Definición de elementos de una ladera.....	20
II.	Definición de elementos de movimiento de una ladera.....	22
III.	Clasificación del índice de concentración de la precipitación (ICP).....	36
IV.	Clasificación del índice de Fourier modificado (IFM)	38
V.	Datos meteorológicos para estación “Suiza Contenta”	47
VI.	Datos de precipitaciones mensuales acumuladas en mm	68
VII.	Datos de precipitaciones mensuales acumuladas en mm	70
VIII.	Obtención y clasificación de índices de concentración de precipitación (ICP) anual.....	73
IX.	Frecuencias relativas para los ICP anuales: estación “Suiza Contenta”.....	74

X.	Frecuencias relativas para los ICP anuales: estación “Insivumeh”.....	74
XI.	Determinación de tormentas, época de lluvia del año 2011 (mayo a octubre).....	77
XII.	Resultados del ensayo de permeabilidad, método de cabeza variable.....	85
XIII.	Coeficiente de permeabilidad y tasa de infiltración (Lee 1996)	88
XIV.	Determinación de intensidades para emisión de alerta.....	97
XV.	Interpretación de intensidades	98

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
cm	Centímetro
cm/h	Centímetro por hora
cm/s	Centímetros por segundo
K	Coeficiente de permeabilidad hidráulica
D	Duración
α	Factor de ajuste de ecuación de intensidad
h	Hora
I	Intensidad
m	Metros
m/s	Metros por segundo
mm	Milímetros
mm/h	Milímetros por hora
min	Minutos
β	Pendiente de curva de intensidades
P_j	Precipitación acumulada anual del año j
p_{ij}	Precipitación acumulada del mes i en año j
P_{med}	Precipitación media anual
P_i	Precipitación media mensual
P_{max}	Precipitación mes más lluvioso
P_{lg}	Pulgada
Σ	Sumatoria
t	Tiempo

GLOSARIO

CESEM	Centro de Estudios Superiores de Energía y Minas.
COLRED	Coordinadora Local para la Reducción de Desastres.
CONRED	Coordinadora Nacional para la Reducción de Desastres.
Frecuencia absoluta	Número de veces que aparece un determinado valor en un estudio estadístico.
Frecuencia relativa	Cociente entre frecuencia absoluta de un determinado valor y número total de datos.
GIS	Sistema de información geográfica.
GPS	Global positioning system.
ICP	Índice de concentración de precipitaciones.
IF	Índice de Fournier.
IFM	Índice de Fournier modificado.
INSIVUMEH	Instituto Nacional de Sismología Vulcanología Meteorología e Hidrología.

ISDR	International Strategy for disaster Reduction.
JICA	Japan International Cooperation Agency.
ONU	Organización de las Naciones Unidas.
PADF	Pan American Development Foundation.
PLUVIÓGRAFO	Instrumento que registra gráficamente cantidad de lluvia de un lugar en un tiempo determinado.
PLUVIÓMETRO	Instrumento para medir la cantidad de lluvia de un lugar en un tiempo determinado.
Remoción de masa	Proceso asociado a la inestabilidad y movimiento de ladera.
SAT	Sistema de Alerta Temprana. Serie de procesos encaminado a generar aviso temprano de un evento bajo un parámetro medible.
UNESCO	United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization.
UNISDR	United Nations Office for Disaster Risk Reduction.

RESUMEN

El presente trabajo de graduación es el resultado de la investigación técnico-científica que el Centro de Estudios Superiores de Energía y Minas (CESEM) de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, desarrolló dentro del marco del proyecto de preparación comunitaria denominado, “implementación de Sistema de Alerta Temprana (SAT) ante riesgo por remoción de masa en comunidad El Campanero, zona 8 del municipio de Mixco”. Este fue promovido por la Organización no Gubernamental (ONG), Fundación Panamericana para el Desarrollo (PADF) en Guatemala.

Dicha investigación consistió en la formulación de un modelo matemático que permite determinar intensidades de lluvia que podrían generar procesos de remoción de masa en el lugar, mismo que es considerado, a su vez, como parámetro medible para la emisión de alerta del mencionado sistema.

Su desarrollo se fundamentó en el análisis del comportamiento de lluvias del sector, mediante la discretización, datos puntuales de lluvia asociados a inestabilidad de laderas dentro de una ventana de tiempo. Dicha ventana fue definida a partir de criterios de selección basados en la caracterización del sitio. Los datos utilizados corresponden a la estación más próxima al área de estudio, estación Lo de Coy, perteneciente a la red instalada por el Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología (INSIVUMEH).

La base metodológica utilizada se fundamenta en modelos determinísticos dados por Caine en 1980 y por Cepeda en 2010, con cierta variación a partir de criterios de adaptación al caso de estudio, debido a la naturaleza del fenómeno y limitantes encontradas durante su desarrollo.

Si bien el alcance de esta investigación se limita a la presentación del proceso para la obtención de intensidades de lluvia, aspectos particulares relacionados a la problemática de afectación de laderas en el sector, conllevaron ampliar las conclusiones y recomendaciones con el objetivo de observar sus premisas en la utilización de la metodología propuesta en otras zonas de estudio.

OBJETIVOS

General

Estimar intensidades de lluvia asociadas a la generación de procesos de remoción de masa que afecta un sector de la comunidad El Campanero, zona 08 del municipio de Mixco; los cuales puedan ser utilizados como parámetro de medición y aviso en el Sistema de Alerta Temprana (SAT) desarrollado en el lugar.

Específicos

1. Observar la caracterización del sitio e incidencia del comportamiento histórico de lluvias en el sector, que permita definir criterios para el establecimiento de las intensidades buscadas.
2. Determinar un inventario de tormentas (eventos puntuales de lluvia con inicio y final aparente de la precipitación) a partir de registros pluviográficos y criterios obtenidos del análisis histórico de precipitación.
3. Identificar del inventario de tormentas, aquellas asociadas a la generación de procesos de remociones de masa en el sector.
4. Definir el modelo matemático que permita establecer las intensidades de lluvia a utilizar como parámetro de medición en el Sistema de Alerta Temprana (SAT) ante riesgo por remoción de masa.

INTRODUCCIÓN

La inestabilidad y movimientos de ladera, son fenómenos naturales que ocurren de manera recurrente en nuestro medio y afectan en gran manera el desarrollo económico y humano. En gran parte de los casos, los movimientos de ladera ocasionan pérdidas de vidas humanas y daños materiales significativos, principalmente en zonas donde el tipo de vida es precario.

Este es el caso de un sector de la comunidad El Campanero, zona 08 del municipio de Mixco, departamento de Guatemala, en donde se ha suscitado durante épocas de lluvias, un fenómeno de desplazamiento de material proveniente de la parte alta de la ladera en la que se asienta.

Con el paso del tiempo, esta condición ha generado depósitos de material en la parte baja de la ladera, acumulándose en alturas de hasta 4,00 m conllevando a que las viviendas ubicadas en estas áreas queden soterradas. Esta situación ha obligado a sus habitantes a movilizarse a otros sitios. De igual manera, en su trayecto, la escorrentía y material desplazado, genera condiciones de erosión en el terreno y daño significativo en viviendas.

A partir de esta condición, la Fundación Panamericana para el Desarrollo en Guatemala (PADF, por sus siglas en inglés) se interesó en apoyar acciones encaminadas a la mitigación y prevención de riesgos a desastres de dicha comunidad. Por un lado, la planificación y ejecución de obras de mitigación que contrarresten los daños ocasionados en el sector; y por otro, fortalecer la preparación comunitaria mediante el involucramiento de sus residentes y autoridades municipales de Mixco.

Dentro del eje de preparación comunitaria, PADF ha contemplado el desarrollo de un Sistema de Alerta Temprana (SAT) ante riesgos por remoción de masa, de manera que los comunitarios puedan evacuar de forma preventiva ante el desencadenamiento o descenso de material.

En su planificación, considera la inclusión del Centro de Estudios Superiores de Energía y Minas (CESEM) de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, para generar, con bases técnicas y científicas, la investigación pertinente para el desarrollo de dicho sistema.

Por su parte, CESEM propone llevar a cabo un estudio encaminado a la definición de parámetros de medición, factibles de implementar en el sistema de alerta. Esto lo hace mediante el desarrollo de trabajo de graduación de la carrera de Ingeniería Civil; que viabilice la colaboración hacia PADF con las demás entidades aunadas al proyecto.

Determinar la ocurrencia de eventos de remoción de masa, es sumamente compleja; principalmente, cuando estos son superficiales, ya que pueden desencadenarse de manera súbita y el tiempo con el que se dispone para su monitoreo es casi nulo.

Los avances en este tipo de investigaciones generalmente se han encaminado a relacionar los factores detonantes (sismos o saturación de agua en los suelos) con la ocurrencia de fenómenos de remoción de masa.

En este sentido, y partiendo del hecho que, en el presente caso de estudio la problemática está relacionada a eventos frecuentes de erosión y escorrentía a lo largo de la ladera; se determinó desarrollar la relación entre lluvia y la problemática de remoción de masa que afecta al sitio.

Para esto, se definió monitorear las condiciones hidrometeorológicas, con la finalidad de establecer intensidades de lluvia como parámetros probabilísticos que permitan determinar niveles de alerta que requiere el Sistema de Alerta Temprana (SAT).

Las metodologías existentes para analizar estos casos, como por ejemplo Caine en 1980 y Cepeda en 2010, se basan en el registro de lluvias para asociarlos a eventos puntuales de deslizamientos. Tomando en cuenta que la problemática no radica en eventos puntuales de deslizamientos, sino en problemas de erosión y escorrentía, por lo que la metodología empleada, tendrá que adaptarse a la situación que caracteriza la problemática.

De igual manera, se tiene la limitante que, para la utilización de estas metodologías, se debe contar con una amplia información de lluvia en el sitio, que permita establecer la relación lluvia-remoción de masa. Esto representará la valoración en la certeza de los datos obtenidos; lo que se traduce como la confiabilidad de las intensidades a utilizar.

A nivel local, el área de estudio no cuenta con estaciones meteorológicas para el registro de precipitación, por lo tanto, deberá desarrollarse un análisis de lluvias a partir de datos de áreas vecinas, implicando técnicas metodológicas adicionales.

Esto conllevó a construir una propuesta metodológica que incluyera no solo adaptación de datos de estaciones pluviométricas vecinas y análisis de caracterización de erosión del sitio, sino también aspectos de propiedades mecánicas de los materiales presentes en el terreno. Se incluye además análisis de factores antropogénicos, ya que estos, influyen significativamente en la desestabilización de las laderas.

Basados en la observación del comportamiento de las precipitaciones (acumulados de lluvia y su duración) y relacionar las características mecánicas del suelo, se definirá un modelo matemático probabilístico adecuado para la determinación de intensidades de alerta.

Es importante mencionar que, las intensidades de lluvia definidas como parámetro de medición para la emisión de una alerta, son definidas en la literatura científica como umbrales de lluvia. Sin bien, a lo largo de este documento se habla de intensidades de lluvia, se diferencian aquellas que son el resultado de la investigación como intensidades críticas de lluvia.

1. MARCO TEÓRICO Y CONCEPTUAL

Los movimientos de ladera que son activados por lluvia, tienden a ser más comunes que los activados por eventos sísmicos. Esto se debe principalmente a los cambios físicos y químicos que sufre el material al interactuar con esfuerzos inducidos por el agua. Dependiendo de los factores condicionantes del sitio, como pendientes de la ladera, litología, uso de suelo, entre otros, los movimientos pueden ser muy lentos o generarse de manera súbita.

Es imposible predecir con certeza absoluta la ocurrencia de un movimiento de ladera. Sin embargo, los avances en la investigación respecto al tema, han sido significativos. Evidencia de esto, es la aplicación de intensidades de lluvia, en las cuales se establece un nivel probable para la detonación de un deslizamiento. A partir de la medición directa de la precipitación y mediante la relación del comportamiento mecánico y dinámico de los materiales, se obtiene mayor probabilidad.

Al empoderar estos parámetros dentro de un plan organizativo de respuesta a emergencias, se obtiene una preparación temprana, que permite adelantarse así, a la atenuación de los potenciales desastres; es aquí en donde radica la finalidad del desarrollo de la presente investigación.

Para entender el contexto del caso de estudio, es indispensable tener claro las metodologías existentes relacionadas con la obtención de intensidades, así como teoría técnica y científica de las ciencias geológicas, climáticas e hidrometeorológicas con las que se relaciona.

Considerando que parámetros como las Intensidades de lluvia, tienen la finalidad de preparación comunitaria ante los riesgos naturales, es indispensable exponer la conceptualización y funcionamiento de un Sistema de Alerta Temprana (SAT).

Por último, pero no menos importante, es necesario definir ciertos conceptos básicos relacionados con la gestión de riesgo a desastres, ya que solo de esa manera, se obtendrá una comprensión integrada de las ciencias involucradas en la investigación.

1.1. Gestión del riesgo

Desde el punto de vista técnico y científico, la gestión del riesgo a desastres se caracteriza por ser multidisciplinaria, en la que su conceptualización ha evolucionado con el paso del tiempo. Es por ello que la forma de estimación del riesgo, varía de un lugar a otro.

La Oficina de las Naciones Unidas para la Reducción de Riesgo a Desastres (UNISDR, por sus siglas en inglés), en su esfuerzo de promover el entendimiento y utilización común de los conceptos relativos a la reducción de riesgo a desastres, divulga ampliamente una terminología internacional normalizada para el tema, en todos los idiomas manejados por la Organización de las Naciones Unidas (ONU). En su documento titulado *Terminología sobre la Reducción de Riesgo de Desastres* del año 2009, publicado dentro del marco de la Estrategia para la Reducción de Riesgo a Desastres (ISDR por sus siglas en inglés), define que la gestión del riesgo abarca, desde la evaluación y análisis de riesgos, hasta la ejecución de estrategias y acciones para controlar y reducir el mismo. Se recalca que los términos a los que se hace alusión, son definiciones compuestas, como gestión de riesgo o cambio climático.

1.1.1. Conceptos básicos de la gestión de riesgo

Los conceptos básicos que a continuación se definen, son tomados de diferentes bibliografías, de manera tal que su enfoque se encamine a la conceptualización de inestabilidad y movimiento de laderas.

1.1.1.1. Amenaza

Un fenómeno, sustancia, actividad humana o condición peligrosa que puede ocasionar la muerte, daños a la propiedad, la pérdida de medios de sustento y de servicios, o daños ambientales. Para esta investigación, el término “amenaza”, se asume como el fenómeno natural en análisis, caracterizado por una probabilidad de recurrencia con magnitud de manifestación determinada.

1.1.1.2. Vulnerabilidad

Las características y las circunstancias de una comunidad, sistema o bien que los hacen susceptibles a los efectos dañinos de una amenaza. Es un valor muy difícil de obtener, ya que intervienen multitud de variables, desde económicas, hasta sociales y políticas; apoyada para su medición en parámetros como edad, género, estatus económicos y densidad de la población.

1.1.1.3. Riesgo

La combinación de la probabilidad de que se produzca un evento y sus consecuencias negativas durante un período determinado. Puede ser expresado como la relación:

$$R = A \times V$$

Donde R es el riesgo, A es la amenaza y V es la vulnerabilidad (incluye exposición).

1.1.1.4. Susceptibilidad

Facilidad o propensión de determinadas zonas a generar movimientos en masa, a partir de sus condicionantes (pendientes del terreno, litología, uso de suelo, etc). La susceptibilidad, al contrario de la amenaza, no toma en cuenta la frecuencia ni la magnitud del evento. La susceptibilidad es referida a la mayor o menor predisposición que un espacio geográfico sea modificado por eventos naturales.

1.1.1.5. Exposición

La exposición está relacionada directamente con la vulnerabilidad. Es la ubicación sobre el terreno de los elementos, y determina las condiciones para que un elemento pueda verse afectado por la amenaza. Si un elemento está fuera del alcance de la amenaza, la exposición de este, y en consecuencia el riesgo a dicha amenaza, serán nulos.

1.1.1.6. Desastre

Interrupción en el funcionamiento de una comunidad o sociedad que ocasiona una gran cantidad de muertes, pérdidas e impactos materiales, económicos y ambientales, excediendo la capacidad de la sociedad afectada para hacer frente a la situación mediante el uso de sus propios recursos.

1.1.1.7. Evaluación de riesgo

Una metodología para determinar la naturaleza y el grado de riesgo a través del análisis de posibles amenazas y la evaluación de las condiciones existentes de vulnerabilidad que conjuntamente podrían dañar potencialmente a la población, la propiedad, los servicios y los medios de sustento expuestos, al igual que el entorno del cual dependen.

1.1.1.8. Cambio climático

Es el ajuste de los sistemas humanos frente a los estímulos climáticos que, en su sentido más amplio, aplica también para factores no climáticos como erosión del suelo o subsidencia de la superficie.

Luego de la revisión bibliográfica, en este capítulo se señalan, por separado, los elementos climáticos relacionados con la lluvia y humedad del suelo, junto con los no climáticos, como erosión. A partir de esto, podrá relacionarse la interacción de estas conceptualizaciones y definir la estimación de intensidades que persigue la investigación.

1.2. Elemento climatológico e hidrológico

Las propiedades de la atmósfera como la temperatura, presión, humedad, nubosidad, precipitación y evaporación, son las que definen el clima de un determinado lugar. Si se indica el conjunto de condiciones atmosféricas en un tiempo puntual, se conceptualiza como estado del tiempo o fenómeno. Si se establece para un largo periodo, se conceptualiza como clima. Ejemplo de los fenómenos pueden ser las lluvias intensas y tormentas. Los efectos secundarios desencadenados por estos fenómenos, pueden denominarse como el desarrollo de un evento.

1.2.1. Precipitación o lluvia

Se conoce como precipitación, al agua que cae sobre la superficie terrestre debida a las condiciones atmosféricas, ya sea de forma líquida o sólida. El tamaño de las gotas de agua puede variar desde decimas de mm (aerosoles o llovizna) hasta con diámetros entre 5 y 7 mm aproximadamente. El tamaño de las gotas en conjunto con otros factores como intensidad del viento, determinan la velocidad terminal de la precipitación y por ende, la agresividad con la que afecta el terreno.

En términos técnicos, si la velocidad de caída supera los 3 m/s, las gotas de agua incrementan su peso y se provoca la lluvia. Si el peso se hace mayor, la velocidad de caída se intensifica y la lluvia puede transformarse en tormenta. Este último concepto, se adoptará y modificará para fines de obtención de intensidades, en capítulos posteriores.

El tiempo de duración de la lluvia está determinada por las corrientes aéreas ascendentes y descendentes. Estas, básicamente son corrientes de viento verificables. Las corrientes aéreas ascendentes se intensifican, pueden incluso evitar que las gotas de agua más grandes caigan a la corteza terrestre, mientras que, si está precipitando en una corriente descendente, el aguacero puede ser torrencial y durar solamente algunos minutos.

Si bien, la inestabilidad y movimientos de laderas que son activadas por lluvia, se relacionan directamente con la humedad y saturación del suelo, la agresividad con la que cae sobre el terreno, es uno de los aspectos influyentes en los procesos de erosión y delimitación de la escorrentía superficial.

1.2.2. Intensidad de la precipitación o intensidad de lluvia

Parámetro medible que se basa en la observación de cantidad de mm llovidos en un tiempo determinado, generalmente en horas. La lluvia puede clasificarse de acuerdo a la intensidad con la que cae: ligera, moderada o fuerte.

Una lluvia de intensidad ligera, es aquella menor a los 2,5 mm/h. Esta tiene la característica que las gotas de agua pueden diferenciarse unas de otras. En una superficie seca, tarda más de dos minutos en mojarse por completo. En la de intensidad moderada, las gotas no se identifican de manera individual. Lluvia a razón de 2,5 a 7,5 mm/h. Al llover, se forman charcos con gran rapidez. Apenas se logra observar las salpicaduras del agua. En una intensidad fuerte se supera los 7,5 mm/h. No se logra visualizar las gotas y su salpicadura puede identificarse a varios cm del suelo.

1.2.3. Medición de la precipitación o lluvia

La medición de lluvia corresponde únicamente a aquella que llega a la superficie terrestre. Para esto, se establece el término “cantidad de lluvia” y se expresa en unidades de altura acumulada sobre una superficie plana y horizontal, asumiendo que se forma una lámina de agua sin que se filtre en el subsuelo o escurra.

La valoración y medición del agua se denomina como pluviometría. Las dimensionales obtenidas en países como el nuestro se representan en mm; mientras que en países como Estados Unidos es medida en pulgadas y centésimas. Como se ha visto antes, la estimación de la intensidad de la precipitación o intensidad de lluvia se obtiene al relacionar la cantidad de lluvia con el tiempo de su duración.

1.2.4. Instrumentos de medición

La instrumentación utilizada para medir la lluvia se puede encontrar en el mercado en gran variedad, dependiendo de las características que se busque medir. Existe instrumentación capaz de medir la distribución del tamaño de las gotas de lluvia, tiempo llovido o intensidad con la que precipita. En la mayoría de los casos relacionados a la conformación de obras hidráulicas, la intensidad de lluvia es la que más interés representa. La instrumentación más común corresponde a los pluviómetros y pluviógrafos.

Los primeros son instrumentos medidores sin registro automático, consistente en un recipiente simple, abierto en la parte alta, que capta el agua de lluvia en su interior y se encuentra sujeto a observación continua para la obtención manual de los datos.

Los segundos corresponden a aquellos que registran la lluvia de una manera automática y continua, graduados para intervalos definidos (no mayor a una semana). Su diferencia principal radica en que pueden establecer la intensidad y la diferencia en costo es notable. Los pluviógrafos más comunes en el medio, son de recipiente basculante, de balanza y con flotador.

El pluviógrafo de recipiente basculante se conforma por dos compartimientos conectados entre sí que, al llegar a un nivel de lluvia calibrado, hace que pierda el balance y vierta su contenido. Al inclinarse el recipiente, se activa el registro automático de lluvia.

Los de balanza, tienen la particularidad de pesar la lluvia que cae en su interior, por medio de un resorte o controlando el balanceo. Este peso es el que es registrado en una gráfica.

El pluviógrafo de flotador consta de un recipiente en el que el flotador sube verticalmente al acumularse la lluvia. Estos cuentan con un tambor que rota continuamente y registra el movimiento basculante del flotador. El sistema sifón con el que cuentan, permite el desalojo de agua al llegar a un determinado nivel.

Ya sea en los pluviómetros o pluviógrafos, el registro se encuentra sujeto a factores como intensidad y/o dirección del viento, así como efecto de salpicadura. Esta condición influye en gran manera al margen de error que estos puedan tener. Siempre que se controle las salpicaduras, los registros más correctos se obtienen con medidores instalados a nivel de suelo a diferencia de los colocados a una altura determinada.

Existen algunos tipos de medidores que tienen la característica de almacenamiento para todo un periodo de un mes o una estación del año, que por lo general son utilizados para lugares en donde se complica las lecturas debido a su deficiencia en acceso.

1.2.5. Precipitación o lluvia como activador de los movimientos de ladera

Al hablar de los movimientos de masa que han sido detonados por el factor lluvia, puede englobarse dos explicaciones puntuales de los mecanismos de falla que conllevan a la ladera al colapso: disminución de la resistencia de corte del suelo debida al incremento de la presión de poro, así como también puede atribuirse a la afectación por erosión causada en la superficie del suelo. Este último se establece como un factor de deterioro que puede conllevar a la falla.

La presión de poro, a su vez, es controlada por la cantidad de agua que pueda infiltrarse en el material, ya que depende de la ubicación del nivel freático. De acuerdo al régimen de aguas subterráneas, la presión de poro puede ser positiva o negativa.

La primera genera licuefacción en el material, conllevando a movimientos de masa superficiales, mientras una presión negativa se asocia a movimientos de ladera más profundos, debido a que la falla ocurre por reducción de la succión y el material se rigidiza. Es importante tomar en cuenta que los esfuerzos de corte pueden inducirse también de manera superficial a causa de arrastre de material durante una escorrentía potencial, como ocurre en un proceso de erosión.

Las lluvias como factor detonante de los deslizamientos se encuentran relacionadas con la intensidad y duración, conllevando a establecer en nuestro caso de estudio que, un proceso de remoción de masa, puede desencadenarse bajo dos condiciones: precipitaciones de poca intensidad desarrollados en periodos largos de lluvia y precipitaciones de gran intensidad desarrollados en periodos cortos de lluvia (21).

Es importante recordar que, la lluvia como factor detonante es el agente estimulador y activador para cierta condición que depende de la geología, geomorfología, aspectos físicos y antrópicos de un determinado lugar.

1.3. Intensidad crítica de lluvia o umbral de lluvia

Partiendo de un concepto general, la palabra umbral se utilizan para indicar un nivel mínimo o máximo de alguna cantidad a partir de la cual ocurre un proceso. Al hablar de deslizamientos detonados por lluvia, la comunidad científica denomina umbral de lluvia, como aquella precipitación (estimada como intensidad) que genera procesos de remoción de masa. Para propósitos del presente trabajo, se utilizará el término intensidad de lluvia crítica como sinónimo umbral.

El umbral de lluvia o intensidad crítica de lluvia, hace referencia al establecimiento de un nivel mínimo de lluvia por encima del cual, existe la probabilidad de que se desencadene un deslizamiento. Para su obtención, se han generado dos tipos de evaluación: métodos empíricos o estadísticos y determinísticos o físicos.

1.3.1. Métodos estadísticos

La obtención de umbrales de lluvia mediante estos métodos, son generados a partir de datos históricos y estadísticos de lluvia, asociados a la ocurrencia de eventos de remoción de masa, en las que se grafica su distribución y se analiza la probabilidad. Estos métodos son los más conocidos en la integración de los sistemas de alertamiento.

Las variables analizadas en este tipo de metodologías corresponden a lluvias acumuladas, lluvias antecedentes (antes del evento), intensidad y duración de las lluvias. Para definir una intensidad crítica o umbral, generalmente se hace combinación en análisis entre cualquiera de estas cuatro variables.

La estimación de un parámetro como este, puede estar en función de: intensidad típica de lluvia, duración de la lluvia, relación entre intensidad y duración, lluvia acumulada en un periodo determinado, relación entre lluvia antecedente y lluvia diaria, relación entre lluvia acumulada y lluvia promedio anual.

Las relaciones estadísticas entre lluvias y deslizamientos, han sido ampliamente analizadas por diferentes autores, entre los cuales podemos mencionar a Lumb (1975); Campbell (1975); Guidicini e Iwasa (1977); Caine (1980), Ceccarini, Focardi y Zauchi (1981); Canuti, Focardi y Garzonico (1985); Crozier (1986); Capecchi y Focardi (1988). En Colombia, este tema ha sido ampliamente investigado entre los que resaltan Paz y Torres (1989); Gómez y Vélez (1990); Hoyos (1992).

Dentro de los estudios reconocidos para este tipo de metodologías, resalta los umbrales críticos de lluvia propuesto por Campbell en el año 1975, quien analizaba registros acumulativos de lluvia y tiempo de duración de cuatro tormentas, estableciendo bajo evaluación, la probabilidad de ocurrencia de un deslizamiento. Cinco años después, Caine utiliza por primera vez, relaciones empíricas entre la ocurrencia de movimientos de masa y características de precipitaciones de intensidad y duración de lluvia. Cada una de estas metodologías, pueden modelarse en sistemas de información geográfica, mediante superposición de capas para conjunto de datos obtenidos.

1.3.2. Métodos físicos o determinísticos

Los métodos físicos se basan en modelación numérica, integrando los resultados del análisis hidrológico y geotécnico en relación a parámetros influyentes por lluvias, como infiltración y presión de poros.

Suele utilizarse la combinación de análisis geotécnico para determinar la presión de poro y análisis hidrológico, para evaluar la cantidad de lluvia requerida en el aumento su presión. Estos métodos requieren contar con una amplia base de datos en cuanto a hidrología, litología, morfología y propiedades mecánicas del suelo.

1.3.3. Consideraciones metodológicas

La combinación de modelos estadísticos y físicos para la determinación de umbrales puede llegar a ser sumamente más certera y confiable. La integración de las dos metodologías, permite la obtención de intensidades críticas a partir de la susceptibilidad identificada (factores condicionantes), pudiendo establecer una amenaza en términos de probabilidad de ocurrencia en tiempo y espacio. Es importante tomar en cuenta el nivel al cual se estará desarrollando el contexto su determinación, ya sea a nivel global, regional o local.

En ese orden de ideas, las intensidades que se obtienen van de lo general a lo específico. Los umbrales globales, ordinariamente no consideran las condicionantes regionales y locales en cuanto a litología, geomorfología o uso de suelo, basándose principalmente en el análisis hidrológico a nivel de cuenca. Por su parte, los umbrales regionales son utilizados en áreas de estudio de cientos a miles de kilómetros cuadrados, de un área específica, con base en datos geológicos, fisiográficos y meteorológicos a gran escala.

1.3.4. Consideraciones metodológicas a nivel local

Las intensidades críticas de lluvia a nivel local, consideran el régimen climático y geomorfológico específico. A esta escala se habla de unos pocos a cientos de metros cuadrados como máximo. La complejidad para su desarrollo radica en que se requiere de un sustento técnico y científico más a detalle, ya que los datos deben ser más específicos y generalmente se cuenta con poca información. Dentro de las limitantes más importantes se puede mencionar: morfología y geología a nivel local, red meteorológica, registros puntuales de eventos por remoción de masa y registros históricos de la evolución poblacional en el área de estudio.

1.3.4.1. Estaciones meteorológicas

Las metodologías empleadas para la obtención de intensidades de lluvia a nivel local, requieren contar con datos de precipitación históricas y actuales en el área que se esté estudiando. A este nivel, generalmente las redes de estaciones son insuficientes y en algunos casos, inexistentes, limitando en gran medida, la resolución que logre captar la variabilidad espacial. Esto se verá reflejado en los márgenes de error que considere la intensidad.

1.3.4.2. Base de datos por eventos de remoción de masa

Sabiendo que, las metodologías utilizadas para la determinación de intensidad lluvia crítica que generan procesos de remoción de masa, consisten en asociar los eventos de lluvia a deslizamientos puntuales, contar con una base de datos sustentable, es sumamente difícil. Si no se contara con fechas exactas de ocurrencia de los movimientos de ladera, el análisis se limitaría en gran manera a observar únicamente el comportamiento de lluvias.

Para ir conformando la base de datos, podrá revisarse bibliografía extensa en reportes de instituciones relacionadas con vías de comunicación, entidades de respuesta a emergencias, periódicos, etc. En el caso en el que los eventos de remoción de masa, sean atribuidos a flujo de lodo o erosión por escorrentía pluvial, puede fundamentarse a partir de las propiedades de los materiales.

1.3.4.3. Geomorfología y geología a nivel local

Cuando se cuenta con la limitante de no contar con base de datos a detalle de las condiciones de geomorfología, geología y clima local, pueden realizarse adaptaciones con base de datos a mayor escala, mas no se puede desarrollar la analogía directa de esta caracterización de áreas vecinas en la obtención de intensidades críticas de lluvia, debido a las diferencias en condicionantes y la variabilidad climática que pueda existir de un lugar a otro.

En este sentido, si se pretende desarrollar intensidades críticas de lluvia a nivel local, será importante realizar evaluación de campo en la que se identifique aquellos factores condicionantes de geomorfología de las laderas y geología, de manera tal que pueda generarse los datos propios del estudio. Dichas evaluaciones pueden desarrollarse mediante métodos heurísticos, los cuales se basan en el uso de opinión de un experto, en base a sus conocimientos.

1.3.4.4. Ensayos de laboratorio

En la determinación de intensidades críticas a nivel local, es importante también, llevar a cabo ensayos de laboratorios de suelos, con la finalidad de conocer la respuesta de los materiales en interacción con el agua. Datos muy valiosos para este tipo de estudios, pueden ser aquellos resultados del ensayo permeabilidad hidráulica del suelo, el cual permitirá conocer la capacidad que tenga el terreno para infiltrar el agua a través de este, y por ende, el agua que puede escurrir sobre la superficie.

Pueden llevarse a cabo ensayos para la determinación de parámetros de esfuerzos de corte en suelos, como compresión triaxial, corte directo o consolidación, y sustentar el análisis de comportamiento del terreno al momento de la falla. Esto generalmente se llevan a cabo cuando el fenómeno de ocurrencia es por deslizamiento puntual y no como remoción de masa en flujo o erosión, por lo que, en la presente investigación, no se desarrollará este último.

1.4. Elemento geológico

En la evaluación y determinación de intensidades críticas de lluvia que activan deslizamientos, es importante identificar cual es el tipo de remoción de masa al cual se está asociando la problemática. Al tener la certeza del tipo de fenómeno, podrá investigarse su caracterización, las razones por las que se generan, el comportamiento y evolución con el paso del tiempo. Conocer la terminología adecuada, permitirá entender estos aspectos, además de introducir la metodología apropiada para la determinación de intensidades buscadas.

De igual manera, para evaluar la inestabilidad y movimientos de laderas se requiere contar no solo con vocabulario asociado a la gestión de riesgo a desastres, sino también con conocimiento referente a la caracterización de estos. Es importante tener presente la diferencia entre inestabilidad de laderas y fenómeno de movimiento de ladera.

1.4.1. Inestabilidad en laderas

La inestabilidad en laderas puede ser definida como la pérdida en la capacidad del terreno natural para auto sustentarse, manifestándose con reacomodos del material que lo compone y/o colapsos del mismo. Su origen y desarrollo está determinada por factores internos y externos que evolucionan a mecanismos más complejos de movimiento de laderas.

1.4.2. Movimiento de laderas

Los movimientos de ladera son procesos geológicos externos de tipo dinámico donde parte del material superficial de la corteza terrestre (rocas, arenas, suelos, etc.) se mueven sobre la superficie del terreno inclinado, por acción de la gravedad.

Su conceptualización suele ser muy amplia, donde no se especifica el tipo de movimiento, características del material involucrado ni información de la distribución espacial del evento, por lo que es común y apropiado referirse a la ocurrencia de movimientos de ladera como deslizamiento.

Los movimientos de ladera se pueden clasificar utilizando diferentes criterios, tales como velocidad de desplazamiento, profundidad de la superficie de rotura (cuando existe un plano definido de falla) y mecanismo de movilización. A partir de esto, en la literatura, puede encontrarse diversos sistemas de clasificación.

De acuerdo a un artículo científico emitido por la Sociedad Geológica de América, “la clasificación para deslizamientos de Varnes y Hutchinson, son los más aceptados en el mundo anglosajón” (26).

Esta clasificación hace alusión al mecanismo de movilización de los materiales involucrados. La ambigüedad en la terminología, fue mejorada por la propuesta de Cruden y Varnes, que es el que se utilizará en el desarrollo de la presente investigación.

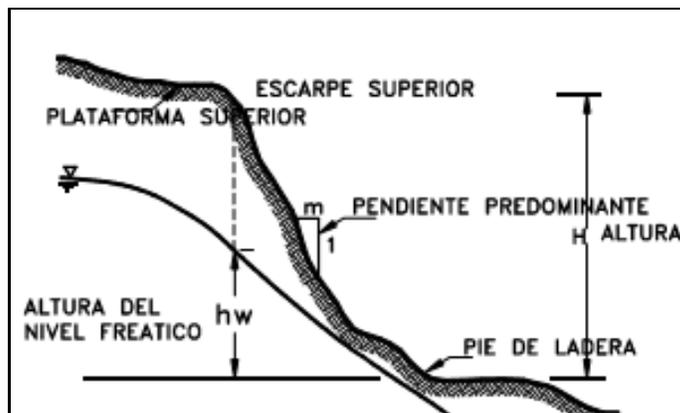
1.4.3. Caracterización

Un deslizamiento corresponde a un movimiento de masa de suelos, rocas, escombros y/o combinado, a lo largo de una ladera. Siendo este un concepto general, se presenta la terminología asignada a una ladera y la asignada a un proceso de movimiento de ladera, previo a ser presentada la clasificación de los deslizamientos. No debe confundirse la definición de ladera con la de talud; ya que este último no corresponde a un terreno natural en pendiente, sino a un cambio brusco dejado por el corte en el terreno, de forma natural o provocado.

1.4.3.1. Elementos de una ladera

La nomenclatura de una ladera y un talud es muy similar. En el presente documento se referencia únicamente componentes de una ladera por ser este, el contexto de la problemática investigada.

Figura 1. Elementos de una ladera



Fuente: SUAREZ, Jaime. *Deslizamientos y estabilidad de taludes en zonas tropicales*. p. 2.

Tabla I. Definición de elementos de una ladera

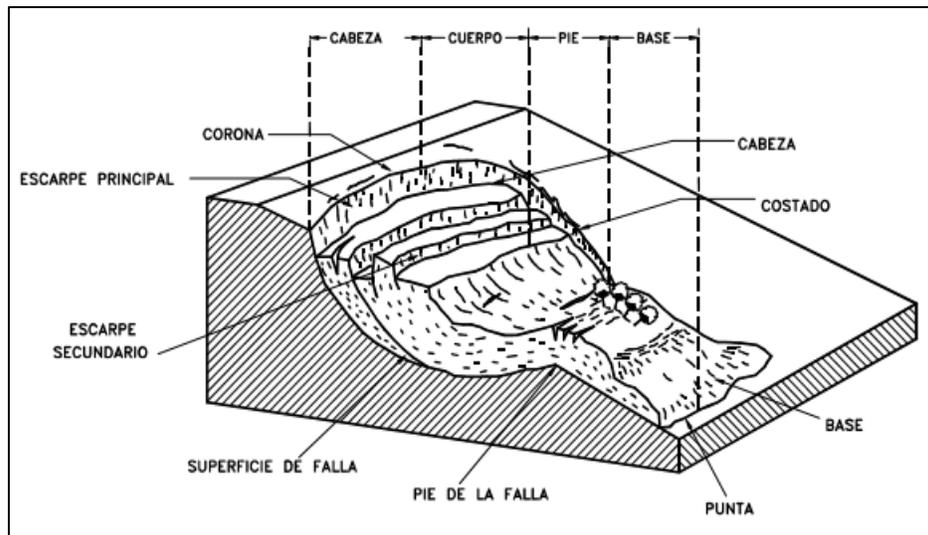
Elemento	Definición
Altura:	Distancia vertical entre el pie y cabeza de ladera.
Pie de ladera:	Sitio conformado por cambio brusco de pendiente en la parte inferior de la ladera.
Cabeza de ladera:	Sitio conformado por cambio brusco de pendiente en la parte superior de la ladera.
Altura de nivel freático:	Distancia vertical desde el pie de ladera hasta el nivel de agua medida debajo de la cabeza de la ladera.
Pendiente:	Inclinación de ladera, medida en grados o porcentaje.

Fuente: SUAREZ, Jaime. *Deslizamientos y estabilidad de taludes en zonas tropicales*. p. 2.

1.4.3.2. Elementos de un movimiento de ladera

Cada uno de los movimientos de ladera cuenta con particularidades que vienen definidas por agentes involucrados, tales como material desplazado y condiciones topográficas del terreno. A excepción de la reptación los movimientos ocurren a través de la superficie de falla de manera en caída, desplazamiento de masa o flujo del mismo. En movimientos complejos, puede darse una combinación de estos. Para fines de ilustración, se presenta la nomenclatura asociada a un movimiento de ladera típico.

Figura 2. Elementos de un movimiento de ladera



Fuente: SUAREZ, Jaime. *Deslizamientos y estabilidad de taludes en zonas tropicales*. p. 3.

Tabla II. **Definición de elementos de movimiento de una ladera**

Elemento	Definición
Escarpe principal:	Superficie casi vertical extendida en todo el contorno del área abarcada por el material desplazado. Su continuidad por debajo este, es la superficie de falla.
Escarpe secundario:	Superficies casi verticales evidentes, generados a partir de los diferenciales dejados por la masa que se movió.
Cabeza:	Partes superiores de material desplazado ubicado en la parte más alta, por debajo del escarpe principal.
Cima:	Punto más alto de la cabeza.
Corona:	Terreno inalterado (original), adyacente a la parte más alta del escarpe principal.
Superficie de falla:	Área debajo del movimiento que delimita el volumen del material desplazado. Debajo de la superficie de falla, el terreno es inalterado (original).
Pie de la falla:	Intersección entre la superficie de falla en su parte más baja y el terreno original.
Base:	Área abajo del pie de la falla, cubierta por el material desplazado (zona de depósito).
Punta:	Punto más lejano de la base, con respecto a la cima.
Constado o flanco:	Lados del movimiento.

Fuente: SUAREZ, Jaime. *Deslizamientos y estabilidad de taludes en zonas tropicales*. p. 3.

Se conoce como superficie original, al área imaginaria que visualiza la proyección del terreno original antes del movimiento. Para describir las partes de un deslizamiento, se suele emplear las palabras derecha e izquierda, referenciados a partir desde la corona hacia el pie, por ejemplo: flanco derecho.

1.4.4. Clasificación de movimientos de ladera

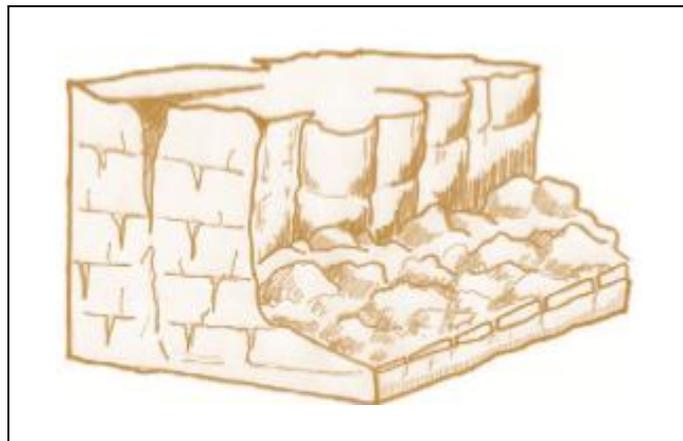
Se tipifican 6 tipos de movimiento de masa de acuerdo a su mecanismo de su movilización, incluyendo ciertas observaciones a los procesos que caracterizan esta clasificación.

1.4.4.1. Caída

Este tipo de movimiento se presenta cuando existe una ruptura brusca y el material cae a gran velocidad. Gran parte de este material se transporta en un medio aéreo, pudiendo existir rodadura de bloques y/o saltos del mismo. Los materiales involucrados generalmente corresponden a macizos rocosos y/o laderas de fuertes pendientes.

Su dinámica es extremadamente rápida, pudiendo ser precedido por movimientos menores secundarios. Se considera como caída cuando la pendiente superficial es mayor de 75 grados. Según el material, se nombra al tipo de caída: caída de roca, caída de residuos o detritos y caída de tierra.

Figura 3. Tipo caída

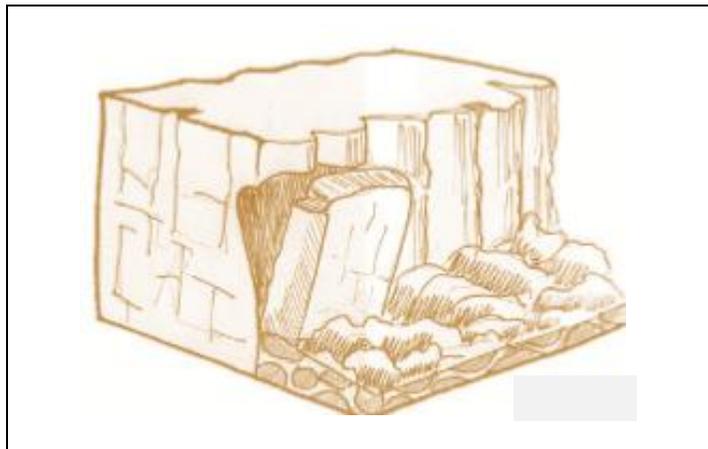


Fuente: MUÑOZ, Angélica. *Inestabilidad de laderas, mapa de amenazas, recomendaciones técnicas para su elaboración*. p. 16.

1.4.4.2. **Inclinación o volteo**

Consiste en una unidad de material rocoso o terreo, sufre una rotación hacia adelante a consecuencia del doblamiento de la parte superior del estrato. Generalmente es causado por acción de la gravedad o efectos sísmicos y el pivoteo de los paquetes; evolucionan durante su dinámica, a deslizamientos al formarse una superficie de ruptura a lo largo de la ladera que, dependiendo de la pendiente del terreno, puede terminar en caída.

Figura 4. **Inclinación o volteo**

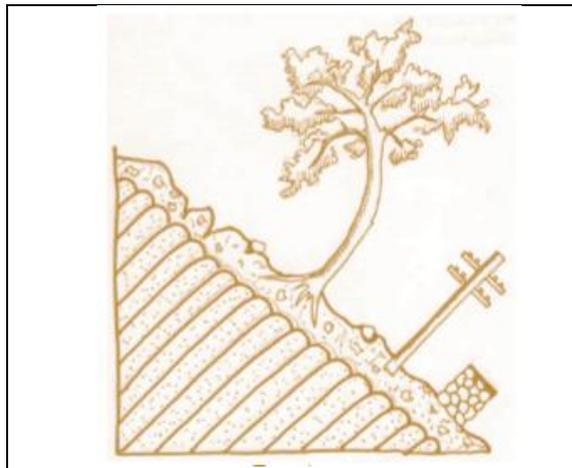


Fuente: MUÑOZ, Angélica. *Inestabilidad de laderas, mapa de amenazas, recomendaciones técnicas para su elaboración*. p. 17.

1.4.4.3. Reptación

Se caracteriza por ser movimiento sumamente lento del terreno subsuperficial, sin que exista una superficie de falla definida. La razón de movimiento, puede ser unos centímetros al año y la extensión del terreno afectado puede ser bastante considerable. Los indicios generalmente se asocian a humedecimiento y secado de suelos e inclinación de árboles, pero es un fenómeno casi invisible a nivel morfológico, pudiendo ser reconocido principalmente en cortes al terreno.

Figura 5. **Reptación**



Fuente: MUÑOS, Angélica. *Inestabilidad de laderas, mapa de amenazas, recomendaciones técnicas para su elaboración*. p. 18.

1.4.4.4. Deslizamiento

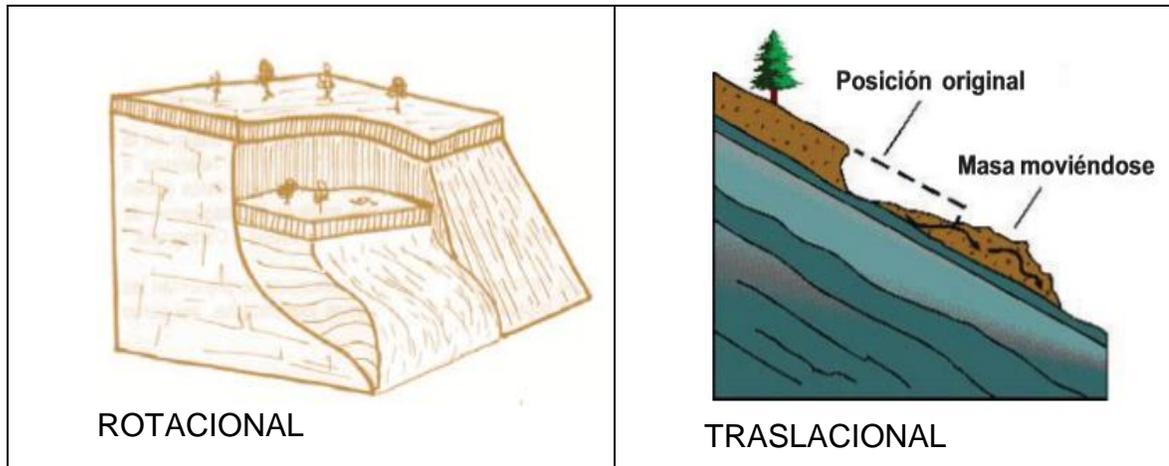
Generalmente se asocia la palabra “deslizamiento” a todo tipo de movimiento de ladera. Pero este término propiamente dicho, corresponde a uno de los tipos de movimiento de masa.

Un deslizamiento se caracteriza por el desplazamiento del material a través de una superficie de falla definida y puede identificarse al observar ondulaciones pequeñas correspondientes a escarpes en la superficie. Existen dos tipos de movimientos: deslizamientos rotacionales y deslizamientos de traslación.

El primero se caracteriza por una superficie de falla de forma curva o similar a una cuchara. Visto en planta, se evidencian agrietamientos dispersos cóncavos en dirección del movimiento. Evidenciar esta condición en campo puede ser no muy notable. Su principal rasgo es que este se auto desestabiliza, produciendo un hundimiento en la parte superior y material desbordado al pie del deslizamiento. El escarpe bajo la corona es de semi-vertical y ocurren en suelos homogéneos.

Los de tipo de traslación, consiste en que la masa se desplaza a través de la superficie de falla relativamente plana. La diferencia principal con el rotacional es que este progresa a su desplazamiento completo al pie de la ladera y, en muchos casos, la masa desplazada puede deformarse y convertirse en flujo.

Figura 6. **Deslizamiento**



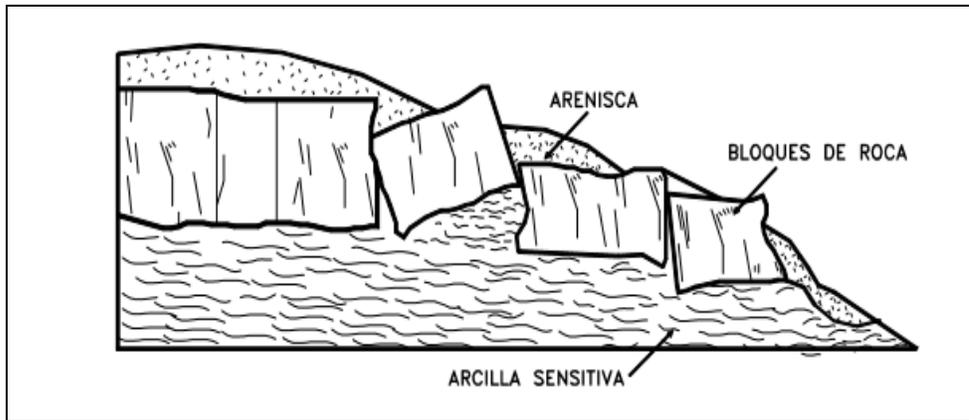
Fuente: MUÑOZ, Angélica. *Inestabilidad de laderas, mapa de amenazas, recomendaciones técnicas para su elaboración*. p. 20 y 21.

1.4.4.5. **Esparcimiento lateral**

Este tipo de movimiento se asocia a una extensión del material, similar a un desbordamiento. Su mecanismo de falla puede incluir elementos no solo de rotación y traslación, sino también de flujos, pero generalmente de manera progresiva. Su incidencia ocurre de manera local y se extiende con el paso del tiempo.

Puede identificarse cuando se observan formaciones geológicas duras situadas encima de formaciones más blandas, propensas a la licuefacción. Este último se presenta cuando el material no consolidado y saturado de agua, pierde su resistencia al esfuerzo cortante a causa una vibración como un sismo, manifestándose como un fluido.

Figura 7. **Esparcimiento lateral**



Fuente: SUAREZ, Jaime. *Deslizamientos y estabilidad de taludes en zonas tropicales*. p. 19.

1.4.4.6. **Flujos**

Son movimientos relativos de partículas, grano o fragmentos inscritos dentro de la masa que se desplaza sobre la superficie de falla. Estos fenómenos se relacionan estrechamente con la saturación de agua en el material.

El origen se da cuando dentro del material saturado se presentan deformaciones internas, dando lugar a que se produzca un movimiento del material similar a un líquido viscoso. En muchos de los casos, el proceso se inicia cuando la ladera es alterada por fracturas o agrietados por un deslizamiento inicial, lo que conduce a la saturación del material y, por ende, a la formación del flujo.

Pueden presentarse de manera muy rápida o muy lenta. Flujos lentos o extremadamente lentos son relacionados a reptación de suelo; solamente que, en este, sí existe una superficie de falla definida. Tienden a tener tres unidades morfológicas definidas: un origen, un canal de flujo y una zona de depósito o acumulación. Su activación dependerá del agente detonante en relación al material del que se trate, pudiendo observar cinco tipos principales de flujos: flujos en roca, flujo de detritos, flujo de tierra, flujos de lodo y avalanchas

1.4.4.6.1. Flujos en roca

Se caracteriza por fracturación del macizo. Esto a consecuencia del grado de meteorización (por fuerzas físicas que desintegran la roca) y/o esfuerzos de lixiviación (alterada químicamente). Las pendientes de la ladera en la que ocurre son generalmente fuertes. Se presentan mayormente en rocas ígneas y metamórficas muy fracturadas. Su velocidad puede ser de rápida a muy rápida.

1.4.4.6.2. Flujos de detritos

Estos son producto de la trituración de materiales en su proceso dinámico de descenso. Por lo general, un flujo de rocas termina en uno de residuos. La extensión que abarca son generalmente extensas y de forma constante a través del canal. Pueden generarse también depósitos de material a los lados del canal.

1.4.4.6.3. Flujos de tierra

Estos pueden ser de velocidad variada, dependiendo del grado de saturación del material, pudiendo ser movimientos lentos, cuando el flujo es seco.

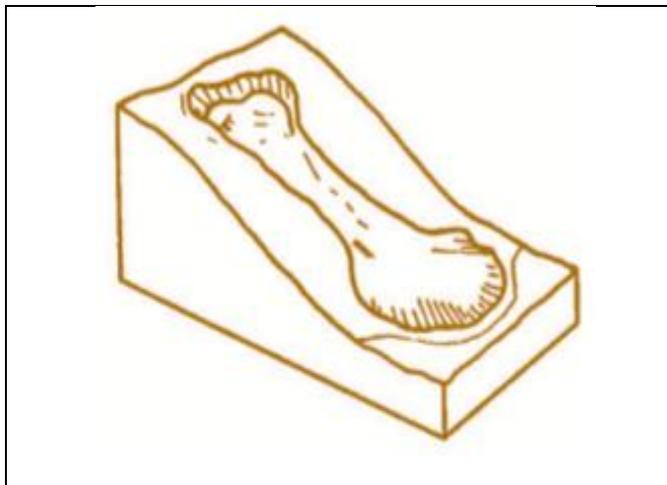
1.4.4.6.4. Flujos de lodo

Es un tipo específico de flujo de tierra, de material de suelo muy fino y saturaciones de agua muy altas. Puede incluso analizarse el término de viscosidad en los materiales desplazados. Dependiendo de su caudal, pueden llegar a ser muy destructores. Los flujos de lodo son los que poseen tres unidades morfológicas definidas: origen, canal y zona de depósito.

1.4.4.6.5. Avalanchas

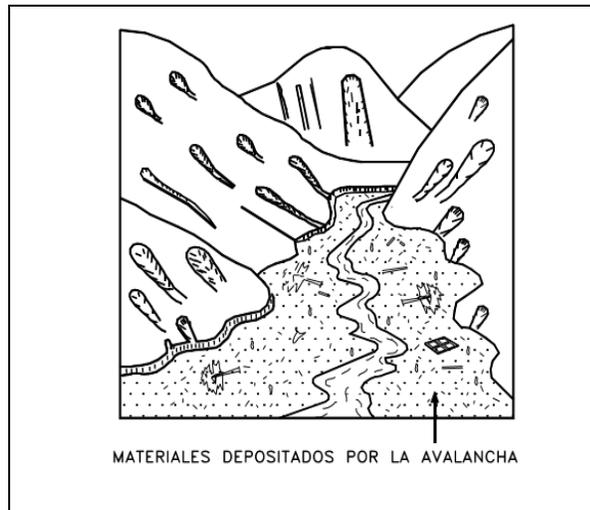
Se asocian fallas progresivas de velocidad muy alta, en el que el flujo desciende similar a un “rio de roca y suelo”. Son relacionados comúnmente con lluvias muy altas. Se genera por aporte de materiales de varios deslizamientos o flujos combinados. Las avalanchas se asocian a flujos turbulentos de granos.

Figura 8. Tipo flujo



Fuente: MUÑOZ, Angélica. *Inestabilidad de laderas, mapa de amenazas, recomendaciones técnicas para su elaboración*. p. 23.

Figura 9. **Avalancha**



Fuente: SUAREZ, Jaime. *Deslizamientos y estabilidad de taludes en zonas tropicales*. p. 23.

1.4.5. Procesos de inestabilidad y deterioro

Se entiende por proceso de inestabilidad y deterioro, aquella etapa previa de ocurrencia de la falla. En su desarrollo, la alteración física y química de los materiales, conlleva al desequilibrio de los esfuerzos de confinamiento que conduce al colapso. Esta alteración es provocada por un agente externo, generalmente por sismicidad o saturación de humedad en el suelo.

Las formas más comunes de deterioro, han sido clasificados en 14 tipos: caída de granos, descascaramiento, inclinación y caída de losas, caídos de bloques, desmoronamiento, caídos de roca, lavado superficial o erosión, desprendimiento de detritos, colapso, disolución, expansión y contracción, agrietamiento cosísmico (a consecuencia de un sismo), deformación por concentración de esfuerzos-fatiga, y agrietamiento por tensión.

El proceso de deterioro, es importante para entender la evolución de inestabilidad que desencadena movimiento de ladera. Al observar las características del fenómeno analizado en la presente investigación, puede aducirse como un deterioro de tipo lavado superficial o erosión.

1.4.5.1. Lavado superficial o erosión

Es el proceso de desagregación, transporte y deposición de materiales del suelo por el agente dinámico de lluvia y el escurrimiento superficial o inundación. Está compuesto por dos procesos: el desprendimiento de las partículas del suelo y su transporte por el agente erosivo. Si no existe suficiente energía, se presenta un tercer proceso: sedimentación.

El concepto anterior, es atribuido al de erosión hídrica; ya que, al hablar de erosión, existen otros tipos clasificados a partir del agente erosivo que los ocasiona, pudiendo ser viento, mareas, cuerpos de agua o glaciación. Dado que, para la presente investigación, los procesos de erosión son generados en la ladera por acción de aguas pluviales y de escorrentía, es propio hablar de este término.

En la erosión hídrica, los materiales que tienden a ser arrastrados son generalmente arcillas y materia orgánica. En materiales volcánicos, partículas de material pomáceo de mayor tamaño, puede ser fácilmente transportado debido al peso del mismo. Las partículas más gruesas y pesadas, son menos propensas a ser arrastradas.

1.4.5.2. Manifestaciones de la erosión hídrica

Conforme la erosión superficial se va intensificando, el mecanismo va evolucionando a fenómenos de inestabilidad y movimiento de laderas. La erosión hídrica puede manifestarse mediante: erosión pluvial, erosión laminar, erosión en surcos y erosión en cárcavas.

1.4.5.2.1. Erosión pluvial

Es la causada por el impacto de las gotas de lluvia sobre el terreno, creando una compactación del suelo que, a su vez, permite arrancar las partículas superficiales, formando así los flujos. Debido a la compactación, se reduce la capacidad del suelo a la infiltración. La característica principal es que los suelos son arrastrados por suspensión, estimulando así otras formas de erosión. Este depende de la agresividad con la que las gotas de lluvia impacten sobre el terreno.

1.4.5.2.2. Erosión laminar

Su principal característica es que, en este, no se forman canales definidos sobre la superficie de la ladera, sino un lavado relativamente uniforme. Los arrastres uniformes de materiales en capas suceden en muy cortas distancias. Es sumamente raro que un flujo de escorrentía por erosión se presente de una forma de laminado uniforme, ya que generalmente se presenta una masa entrelazada en curso de agua, definiendo canales a su paso.

1.4.5.2.3. Surcos

El escurrimiento superficial puede ser de una manera concentrada que va generando pequeños canales paralelos independientes. Si existe obstáculo o cierto tipo de interrupción (ya sea natural o no), el flujo se va generando turbulento, adquiriendo energía para formar los canales. Las velocidades que se generan en el flujo son más significativas que en los otros tipos de erosión.

1.4.5.2.4. Cárcavas

De igual manera, este tipo de escurrimiento es el que se genera por concentración de agua. La diferencia con los surcos, es que se manifiesta en zanjas profundas, atribuidas a aguas y sólidos arrastrados. Generalmente este tipo de fenómeno se asocia a factores antrópicos, como por vertimiento de agua no controlado. También puede ser por aguas pluviales, dependiendo de la dimensión de concentración que se genere.

1.4.5.3. Formación de flujos por erosión

Cuando la lluvia cae directamente sobre la superficie de la ladera, parte de esta se puede infiltrar y otra manifestada mediante escurrimiento. En ambos casos, se genera un flujo, correspondiente a escorrentía y a flujos sub-superficiales respectivamente. Teniendo en cuenta que los procesos erosivos se relacionan directamente con los flujos superficiales (escorrentía), puede definirse que, a más cantidad de agua de escorrentía, las tasas de erosión son mayores.

Esta relación muy básica pero muy significativa, define el inicio del proceso de un flujo de material. Es importante recalcar que, a su vez, esto viene definido por las condiciones de pendiente elevada y propiedades de los suelos.

Premisas como esta, han sido los fundamentos para establecer que el riesgo que genera un flujo, se atribuye a periodos de lluvia intensa, más que en lluvias prolongadas de poca intensidad. Esta aseveración, es muy importante para analizar la susceptibilidad a escorrentía y formación de flujos, que forman parte de la problemática de este caso de estudio.

1.4.5.4. Índices como factor de riesgo por erosión

La capacidad de las lluvias para erosionar las laderas ha sido estudiada por diversos autores. La mayor parte de estos, se han abordado desde el punto de vista de variabilidad temporal de las lluvias, mediante análisis de estaciones pluviométricas y/o pluviográficas. Como resultado, diversas investigaciones consideran indicadores climáticos en sus análisis denominados generalmente como índices de agresividad climática, entre los cuales resaltan, índice de concentración de precipitaciones (ICP), índice de Fournier (IF) e índice de Fournier modificado (IFM).

1.4.5.4.1. Índice de concentración de precipitaciones (ICP)

Permite estimar la agresividad de precipitaciones a partir de la variación que tengan las mismas durante los meses del año. El índice de concentración de las precipitaciones (ICP), el cual viene dado por la siguiente ecuación:

$$ICP_j = 100 * \frac{\sum_{i=1}^{12} P_{ji}^2}{P_j^2} \quad (\text{Ecuación 1})$$

Donde:

ICP= índice de concentración de precipitación en porcentaje, para el año j

P_{ij}= precipitación acumulada del mes i, en año j, expresado en milímetros

P= precipitación acumulada anual del año j, expresado en milímetros

Los porcentajes de ICP varían entre 8,3 % y 100 %, los cuales indican como pueden distribuirse las lluvias mes a mes: si de una manera homogénea, o bien, si estas se concentran en un solo mes. La premisa del ICP es que, cuanto mayor es la concentración en la temporada de lluvias, la dinámica de erosión es más activa.

Tabla III. **Clasificación del índice de concentración de la precipitación (ICP)**

ICP	CLASIFICACIÓN
8,3 – 10	Uniforme
10 – 15	Moderadamente estacional
15 – 20	Estacional
20 – 50	Altamente estacional
50 – 100	Irregular o aislada

Fuente: VELASCO, Inmaculada y CORTÉS, Gely. *Índice de Fournier modificado y de concentración de la precipitación, como estimadores del factor de riesgo de la erosión.* p. 432.

1.4.5.4.2. Índice de Fournier (IF)

Propone que el efecto erosivo de las precipitaciones, se relaciona con la cantidad de sedimentos arrastrados por la escorrentía. Para ello, toma como indicador la capacidad erosiva de las lluvias, aplicable en regiones en donde el régimen de lluvias presenta picos mensuales o con valores muy elevados.

Este se calcula de manera anual mediante la expresión:

$$IF_j = \frac{(P_{\max j})^2}{P_m} \quad (\text{Ecuación 2})$$

Donde:

IF_j = índice de Fournier, para el año j

P_{max j} = precipitación del mes más lluvioso (mm) del año j

P_m = precipitación media anual (mm)

1.4.5.4.3. Índice de Fournier modificado (IFM)

El índice de Fournier se basa en que el mes de mayor precipitación, produce erosión superficial. Otros investigadores han considerado que, en los meses de menores cantidades de lluvia, también se produce erosión. El índice modificado de Fourier (IFM), argumenta que el efecto erosivo, no solo ocurre en el mes más húmedo; si no también en el resto de los meses.

Su estimación se basa en la ecuación:

$$IFM = \sum_{i=1}^{12} \frac{P_i^2}{P_m} \quad (\text{Ecuación 3})$$

Donde:

IFM= índice de Fournier modificado en mm

Pi= precipitación media mensual i en mm

P = precipitación media anual en mm

El cálculo para la determinación del IMF se realiza para cada año y luego se obtiene el promedio respectivo. Este índice caracteriza la agresividad de la precipitación. Su clasificación cuenta con cinco rangos vinculados a una agresividad de muy baja a muy alta.

Tabla IV. **Clasificación del índice de Fourier modificado (IFM)**

IFM	CLASIFICACIÓN
0 – 60	Muy bajo
60-90	Bajo
90-120	Moderado
120-160	Alto
>160	Muy alto

Fuente: VELASCO, Inmaculada y CORTÉS, Gely. *Índice de Fournier modificado y de concentración de la precipitación, como estimadores del factor de riesgo de la erosión*. p. 434.

1.5. Monitoreo y Sistemas de Alerta Temprana (SAT) por deslizamientos

Adelantarse a la ocurrencia de fenómenos que conllevan a la generación de desastres naturales, es una tarea sumamente compleja. La importancia de la búsqueda de un pronóstico efectivo, radica en la preparación que pueda tenerse con antelación.

A lo largo del tiempo se han desarrollado esfuerzos encaminados a salvaguardar la integridad física de las personas (y en la medida de lo posible, los bienes materiales) mediante el desarrollo de procesos sistematizados de planificación y respuesta a emergencias. En el caso específico de los fenómenos por remoción de masa, implica un gran reto ya que, dependiendo del tipo de remoción en masa, pueden ocurrir de manera súbita.

Previo a entender el funcionamiento y componentes de un sistema de alertamiento ante riesgo por deslizamientos, es importante contar la conceptualización general del tema.

1.5.1. Definición SAT

Un Sistema de Alerta Temprana (SAT) es una serie de procesos encaminados a generar un aviso de antelación, bajo un parámetro medible. Es un conjunto de capacidades necesarias para generar y difundir información de alerta que sea oportuna y significativa con la finalidad de permitir que las personas, comunidades y las organizaciones amenazadas se preparen y actúen de forma apropiada y con suficiente tiempo de anticipación para reducir la posibilidad de que se produzcan pérdidas o daños.

1.5.2. Componentes SAT

Para que estos sistemas funcionen de manera eficiente se debe incluir la participación comunitaria en proceso continuo de educación y concientización de los riesgos, así también la afinación de estrategias de comunicación y preparación. Los Sistemas de Alerta Temprana (SAT) se conforman por cuatro componentes: conocimiento de los riesgos, servicio de seguimiento y alerta, difusión y comunicación, capacidad de respuesta.

1.5.2.1. Conocimiento de los riesgos

Este elemento implica la identificación de amenazas y vulnerabilidades del lugar bajo las cuales se desarrolla el sistema de alertamiento. Como parte de ello, se evalúa la información disponible asociada a dichos factores y se generan preparativos estratégicos mediante mapas y planes establecidos.

1.5.2.2. Seguimiento y alerta

Para resolver la estrategia a seguir, se requiere contar con base técnica y científica sólida. Esto permitirá contar con un mayor nivel de confiabilidad en el pronóstico y alerta a emitir. Si en los parámetros bajo los cuales se define el pronóstico son deficientes, la alerta dejará de ser precisa y oportuna.

1.5.2.3. Difusión y comunicación

Debe garantizarse que las alertas sean recibidas por todas las personas que estén en peligro. De igual manera, el mensaje debe ser comprendido con claridad por parte de los receptores.

Aquí se definen los sistemas de comunicación a utilizar, número de canales y designación de portavoz autorizado. Esto reduce la probabilidad de que el mensaje llegue a poca población o de manera deficiente. La comunicación debe ser de acuerdo al nivel académico de la población.

1.5.2.4. Capacidad de respuesta

Se entiende por capacidad de respuesta al desarrollo de planes estratégicos haciendo uso de las capacidades y conocimientos locales de la población. Dichos planes deben ser sometidos a prácticas y pruebas previas que permitan identificar la conducta humana y dinámica de evacuación.

1.5.3. Funcionamiento general de un SAT

Un SAT se caracteriza principalmente por el pronóstico de amenazas a partir de un sustento técnico-científico para la emisión de alerta. Si se desarrolla ampliamente puede tomarse como un facilitador de toma de decisiones para la mitigación de daños. Se define entonces que son cinco etapas las que conforman un SAT: monitoreo, pronóstico, emisión de alerta, comunicación de alerta y evacuación.

1.5.4. Tipos de SAT

Estos sistemas se clasifican a partir del nivel al cual sean operados. Aquellos que son manejados por servicios meteorológicos nacionales se atribuyen a SAT centralizados (automatizados y en tiempo real); mientras que los que son manejados por poblaciones locales, se denominan SAT comunitarios.

La denominación de cada SAT se ha desarrollado a partir del tipo de fenómeno del cual se esté hablando. Así, en Centroamérica podemos encontrar SAT por inundaciones, por huracanes, por deslizamientos y por actividad volcánica. Cuando un sistema de comunicación y alerta cubre diversos fenómenos, suele denominarse como SAT multiamenaza.

1.5.5. Sistema de Alerta Temprana (SAT) por deslizamiento

Como se ha visto en el apartado de inestabilidad y movimientos de ladera, este tipo de fenómenos pueden generarse casi imperceptibles y ocurrir de manera súbita. En la implementación de SAT por deslizamientos, es indispensable analizar los factores que contribuyen a la generación de este tipo de eventualidades (tanto condicionantes como detonantes), dependiendo del tipo de remoción de masa que se esté tratando.

En estos sistemas, el monitoreo generalmente está ligado al factor detonante que origina los deslizamientos (sismicidad o lluvia). Este puede ser asociado para monitorear la inestabilidad de la ladera mediante medición sensitiva del terreno, susceptibilidad de movimiento bajo monitoreo de la saturación del suelo o una combinación de ambos.

Es importante tomar en cuenta que los diferentes factores desestabilizantes y de disparo, pueden ser dinámicos con el paso del tiempo y conllevar a la incerteza del pronóstico, por lo que el monitoreo no deberá limitarse a medir el parámetro establecido, sino también a analizar la evolución de la situación. El avance en este tipo de estudios, han expuesto resultados significativos mediante la definición de umbrales de lluvia que tengan probabilidad de generar un deslizamiento, ligado a un análisis del suelo.

Si bien, a nivel comunitario esto no podrá ser abarcado de manera amplia, el asesoramiento básico de conocimientos de inestabilidad y movimiento de laderas a los pobladores, permitirá que estos fortalezcan el componente de “conocimiento de los riesgos” que caracterizan los SAT.

1.5.6. SAT en Guatemala

En Guatemala, se ha logrado desarrollar y poner en funcionamiento sistemas de alerta temprana a través de la asociación entre INSIVUMEH, CONRED, ONG´s y municipalidades. Si bien, la SE-CONRED es la institución gubernamental encargada del diseño, instalación y operación de los SAT, la asistencia de otras entidades, es indispensable para su ejecución y funcionamiento.

Por su parte, el INSIVUMEH es la entidad técnico-científica estatal que tiene a cargo las redes de las ciencias atmosféricas, geofísicas e hidrológicas del país, y que ha trabajado en el monitoreo y pronóstico de eventualidades asociadas a la ocurrencia de desastres.

De acuerdo al “Inventario y Caracterización de Sistemas de Alerta Temprana (SAT) informe para Guatemala” de la UNESCO, para el año 2011 Guatemala presentaba 29 sistemas distribuidos así: 21 de inundaciones, 3 de actividad volcánica, 2 por deslizamientos, 1 por deslizamiento e inundación y 1 por incendios forestales. Gran parte de estos no reúnen los elementos mínimos que conforman un SAT, ya que se limitan únicamente a sistemas de monitoreo o de comunicación. En el caso específico de los SAT por deslizamiento, se eliminaron 2 debido a que correspondían a la instalación de pluviómetros únicamente.

2. CARACTERIZACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

Con la finalidad de establecer un marco referencial del área analizada, se presenta conceptualización del sector de interés, clasificando en apartados, cada aspecto de su caracterización.

2.1. Monografía

La presente monografía, se realizó considerando aspectos locales que fueron obtenidos a partir de entrevistas verbales a los pobladores e investigación bibliográfica. Debido a que la información monográfica a nivel local es escasa, existirán ciertos datos de referencia que se toman a mayor escala.

2.1.1. Ubicación y localización

El área de investigación corresponde a un sector inscrito dentro de la comunidad El Campanero, en la zona 8 del municipio de Mixco (al sureste de la cabecera municipal). Dicha comunidad, se encuentra a escasos metros de ciudad San Cristóbal (la cual, a su vez corresponde a casi todo el territorio ocupado por la zona 8 de Mixco).

Su ubicación geográfica corresponde a latitud de 14°35'55" Norte y longitud de 90°35'50" Oeste y posee una altitud promedio de 1530 msnm. El área afectada se estableció mediante coordenadas geográficas tomadas en campo con dispositivo tipo GPS; estimando un área de 500 metros cuadrados, aproximadamente (ver figura 10).

Tabla V. **Datos meteorológicos para estación “Suiza Contenta”**

Parámetro	Cantidad	Unidad de medida
Temperatura Máxima	25,8	°C
Temperatura Mínima	13,9	°C
Precipitación promedio	1 031,9	Mm
Humedad relativa	78	%
Evaporación	131	Mm

Fuente: elaboración propia, con datos obtenidos de INSIVUMEH.

2.2. Aspectos de infraestructura

Debido a que el sector analizado es relativamente pequeño, las vías de acceso no son significativas para el desarrollo de la presente investigación. La incidencia de la tipología constructiva y servicios básicos, son factores antrópicos que podrían contribuir a la evolución de la problemática de laderas en el lugar.

2.2.1. Tipología constructiva

La tipología de las viviendas, corresponde a construcciones de block tradicional, madera, lámina y combinados. La mayor parte de las construcciones, son de mampostería tradicional (mampostería reforzada o confinada). Existen ciertas viviendas de hasta 3 niveles de construcción. Para el establecimiento de viviendas, generalmente se han generado cortes y/o rellenos en la ladera, para la conformación de terraplenes. Originalmente, este sector contaba con boscosidad densa. Conforme el asentamiento de viviendas, el nivel de deforestación se ha incrementado significativamente.

2.2.2. Servicios

El sector cuenta con servicios básicos de energía eléctrica y agua mediante red de abastecimiento. No cuentan con sistema de recolección de aguas residuales y sólidos, por lo que, para la disposición de excretas en las viviendas, se han conformado pozos artesanales. Esto es un aspecto importante, ya que la generación de este tipo de auto servicio, podría incidir en problemas de inestabilidad de ladera.

Las aguas grises y pluviales, son generalmente dispuestas sobre la superficie del terreno a lo largo de la ladera. Los comunitarios han generado ciertos elementos para conducción de agua, como zanjas o canales artesanales de cemento. Actualmente, no existen sistemas de captación de agua superficial. Por sus condiciones topográficas, esta comunidad está expuesta a diferentes afectaciones de erosión y escorrentía superficial.

2.3. Aspectos sociales y económicos

Los aspectos socioeconómicos han sido tomados en cuenta en esta investigación, con un enfoque de estimación de su densidad poblacional y el conocimiento que los pobladores tengan de los riesgos a los que están expuestos.

2.3.1. Población

La densidad urbanística de la población es considerable, en relación al área ocupada por la ladera. En el sector, se inscriben 168 viviendas distribuidas a lo largo de la misma. La mayor concentración de casas se encuentra en la parte media y baja. Se estima una población de 900 personas en la comunidad.

2.3.2. Origen de la comunidad

Según los pobladores de la comunidad, durante la visita del Doctor Pedro Cortés y Larra, quienes realizaron visita pastoral entre 1768 y 1770, se anotó que la parroquia de Mixco, pertenecía a la hacienda, El Campanero. Durante este tiempo, este personaje se apoderó del territorio y tras levantar croquis del lugar, se dio el nombre particular de El Campanero. Actualmente, no se ha encontrado documento válido para la afirmación de tal argumento.

2.3.3. Actividad económica

La actividad económica de este sector, puede catalogarse como ciudades dormitorio; es decir que los pobladores salen a trabajar a otros lugares en prácticamente la mayoría del tiempo. La mayor parte de la población considerada como permanente, son amas de casas y niños que cumplen con su jornada estudiantil. Existen ciertas actividades comerciales menores como tiendas de abastecimiento local y consumo de aves de corral.

2.3.4. Organización comunitaria

El proyecto de implementación de SAT en la comunidad, llevado a cabo por PADF, identificó que sus pobladores, no habían recibido algún tipo de capacitación en materia de gestión de riesgo a desastres. En 2016, esta ONG inicia con la preparación comunitaria en situaciones de emergencia o desastres, con apoyo de la alcaldía auxiliar, conllevando a que se generara la Coordinadora Local para la Reducción de Desastres -COLRED-. Los procedimientos operativos ante emergencia, surgen a partir de la necesidad identificada de los riesgos por deslizamiento, erosión y escorrentías de aguas pluviales.

2.3.5. Antecedentes de impactos por fenómenos naturales

Los importantes acontecimientos de origen natural que han afectado a la comunidad, pueden enumerarse de manera cronológica, iniciando con Huracán Mitch en 1998, Tormenta Stan en 2005 y fenómeno Agatha-Pacaya en el 2010. Se tiene memoria que estos eventos generaron deslizamientos en carreteras y en terrenos particulares, daños en tuberías de abastecimiento de agua y colapso o daño en viviendas.

3. METODOLOGÍA

La propuesta metodológica para la determinación de intensidades críticas de lluvia, se basó en la creación de un modelo matemático que permite relacionar el comportamiento de las precipitaciones (acumulados de lluvia y su duración) con la ocurrencia de procesos de remoción de masa. A partir de dicho modelo, se obtiene este parámetro medible a utilizar en el SAT.

Esta propuesta se fundamenta en modelos empíricos para la clasificación de intensidades de predicción de deslizamientos desarrolladas de manera determinística por Caine, quien toma en cuenta datos de lluvia conocidos con certeza, al momento de la ocurrencia de un deslizamiento.

Debido a que la problemática de remoción de masa en el sector analizado no está asociada a eventos puntuales de deslizamientos, sino afectación por erosión con el paso del tiempo, se requirió de cierta variación en la base metodológica empleada. Dicha variación consistió en incluir consideraciones de las características mecánicas del suelo en la generación del modelo matemático. El proceso se conformó entonces por cuatro etapas:

- Determinación de tormentas.
- Inventario de intensidades.
- Identificación de tormentas que podrían generar procesos significativos de erosión y escorrentía.
- Definición del modelo matemático.

Para fines de la presente investigación, se definió como tormenta, el registro de una lluvia acumulada en un tiempo determinado (desde que inicia la lluvia consecutiva, hasta que termina). El tiempo fue definido a partir de criterios deducidos en procesos intermedios, definidos bajo líneas de trabajo.

3.1. Líneas de trabajo

Para la obtención de las intensidades buscadas, fue necesario establecer análisis previos e intermedios que permitieran ir tipificando el modelo matemático. Para el mejor entendimiento del desarrollo de estos análisis, se englobó en dos líneas de trabajo consistentes en: evaluaciones de campo y trabajo en gabinete.

3.1.1. Evaluaciones de campo

Se desarrolló evaluaciones de campo de forma regular a lo largo de la investigación, con la finalidad de:

- Recolección de información histórica local (antecedentes del lugar), relacionados con la problemática existente.
- Caracterización del sitio: pendiente del terreno, condición de uso de suelo y clasificación textural de suelos.
- Identificación de zonas de arranque y puntos visualmente críticos o susceptibles a ser erosionados.
- Identificación de trayectos de materiales desplazados.
- Evaluación en las zonas de depósito.
- Mapeo geológico, mediante la identificación de las unidades litológicas predominantes en el área.
- Muestreo del suelo, para realizar ensayos de laboratorio.

Como un extra y aporte hacia el proyecto desarrollado por PADF, se realizó evaluación técnica de campo para la identificación del lugar idóneo para la colocación de instrumentación de medición de lluvia (pluviógrafo), que formará parte del SAT.

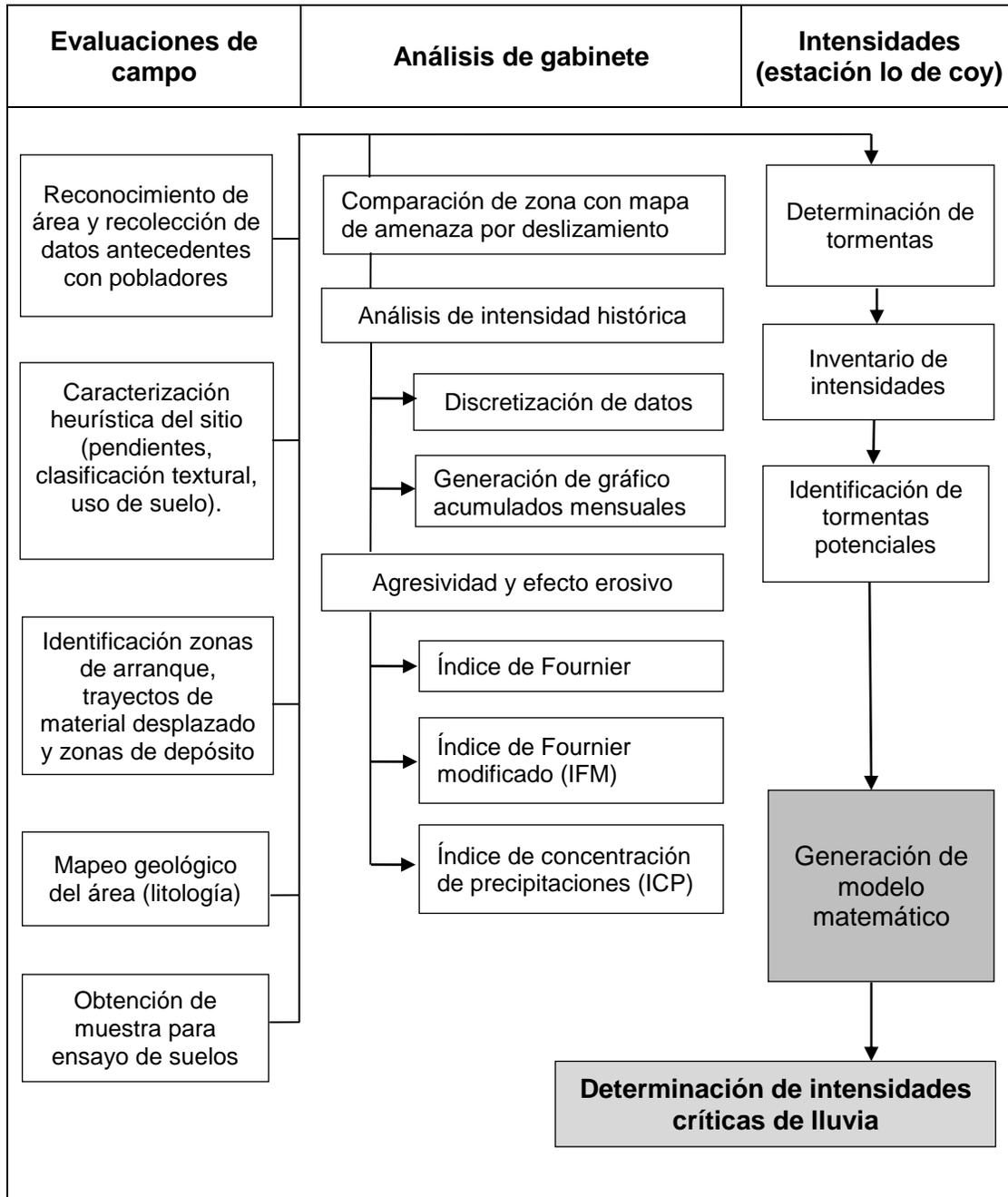
3.1.2. Trabajo de gabinete

Esta línea de trabajo se desarrolló con la finalidad de formular criterios para la clasificación de las tormentas y discretización de datos en el inventario de intensidades; su desarrollo consistió en:

- Comparación del área de investigación, con mapa de amenaza por deslizamientos ya establecido.
- Análisis histórico de la intensidad de lluvia en el área, a partir de información proporcionada por las estaciones meteorológicas instaladas por INSIVUMEH que se encuentran más cercana al sitio analizado.
- Estimación de la agresividad y efecto erosivo de las precipitaciones.

La comparación de la zona de estudio con un mapa de amenaza por deslizamiento ya establecido, permitió definir si el área sobre la cual se asienta la comunidad, tiene potencial de ser afectado por eventos puntuales de movimiento de ladera. La intensidad de lluvia en el sector a lo largo del tiempo, permitió analizar las características del régimen de lluvia y establecer su tendencia, de manera que se identifique en qué periodos, la precipitación genera más daño. Como complemento a esta línea de trabajo, se analizó la agresividad y efecto erosivo sobre el terreno, a partir de parámetros puntuales obtenidos con datos históricos de precipitaciones.

Figura 11. Esquema metodológico para la obtención de intensidades



Fuente: elaboración propia.

3.2. Desarrollo de línea de trabajo

Las consideraciones en el desarrollo de las líneas de trabajo fueron:

3.2.1. Recopilación de datos antecedente

Se contó con partición comunitaria para la recolección de datos antecedentes del lugar, permitiendo crear un panorama más amplio de la afectación de los residentes. Esta información se obtuvo a través de preguntas previamente establecidas.

Dentro de los hallazgos encontrados, puede decirse que la mayor parte de los pobladores, indican que en el área no se ha generado un evento puntual de movimiento de ladera, sino que la problemática de depósito de material en la parte baja de la ladera, ha sido con las temporadas de lluvias a lo largo del tiempo, siendo de forma significativa desde hace unos 10 años a la fecha. Se indicó además que el mayor problema se debe a las bajadas potenciales de agua que, con la falta de obras de canalización, conlleva a la inundación de las áreas y daños por erosión en las cimentaciones de viviendas (figura 12).

3.2.2. Caracterización del sitio

Los factores condicionantes tomados en cuenta durante los recorridos por la zona de estudio fueron pendientes de terreno, uso y tipo de suelo. Se estimó por inspección visual que la pendiente del terreno en la mayoría de los casos, era mayor a 40 grados de inclinación, presentando en ciertos puntos, cambios bruscos de pendiente.

Figura 12. **Identificación de problemática del área de estudio**



Fuente: elaboración propia.

Durante este recorrido, no se identificó indicios de inestabilidad de toda la ladera que pudieran representar evolución a movimiento de masa. Se identificaron 2 puntos en los que, debido a la intervención antrópica (corte en ladera para la conformación de terraplenes), se consideraron como focos potenciales para el desencadenamiento de deslizamientos locales (pequeños deslizamientos). Uno de estos puntos se presenta en el mapa de la figura 14 como bifurcación gradas. En el otro punto, se tuvo intervención por parte de los comunitarios mediante conformación de muro de llantas.

Para la determinación de tipo de materiales predominantes en el área, se utilizó la técnica de clasificación textural de suelos. Se observó que la mayor parte del área corresponde a material pomáceo, la cual se define como la unidad más susceptible a ser erosionada.

3.2.3. Zonas de arranque y puntos susceptibles por erosión

Se realizó un recorrido por el área con la finalidad de identificar zonas de arranque y puntos críticos susceptibles a ser erosionados o inestables. Para ello se tomaron coordenadas geográficas con dispositivo tipo GPS, para que pudieran ser visualizadas en software sistema de información geográfica ArcGIS.

Se identificaron 5 posibles puntos de arranque, en los que, por inspección visual, se consideró inician los problemas de remoción de masa (ver mapa de la figura 14). Dichos puntos se localizaron en la parte media y alta de la ladera. Todos estos estaban asociados a daño superficial del terreno.

3.2.4. Identificación de trayectos de material

Los trayectos de escorrentía sobre la ladera, se definieron a partir de las marcas de agua dejadas a lo largo de la superficie de la ladera (pequeños surcos). Se observó que, en la mayoría de los casos, los trayectos se enmarcaban en las calles de la comunidad, debido a la delimitación de viviendas asentadas sobre la ladera. La condición de erosión, en los sectores menos poblados, se identificó en los cambios bruscos de pendiente.

3.2.5. Evaluación de zonas de depósito

La evaluación en la zona de depósito, se realizó con fines únicos de dimensionar la problemática. El punto indicado en el mapa de la figura 14, definido como “casa doña Berta”, corresponde a la vivienda en la que se considera inicia la zona de depósito de material.

En la parte más baja de la ladera, se encontraron zonas de depósito de hasta 4 metros de altura, tomando como referencia para su determinación, el techo de viviendas ubicadas en esta parte; de las cuales, dos de ellas ya no eran utilizadas por las personas, debido a dicha problemática.

Se observó, además, vegetación poco densa y característica de afloramiento en época de lluvia. Arbustos de pequeña altura, eran alcanzados por los sedimentos en su parte media. Las marcas en muros exteriores de viviendas asentadas en esta parte, evidenciaban el nivel de agua alcanzado por las inundaciones (figura 13).

Figura 13. **Evaluación en zonas de depósito**



Fuente: elaboración propia.

Figura 14. Identificación de zonas de arranque y trayectos de escorrentía superficial



Fuente: elaboración propia, empleando *software* de sistema de información geográfica ArcGis.

Durante los recorridos por el área, se analizaron los puntos idóneos para la colocación de instrumentación de medición de lluvia (pluviógrafo) referenciando sus coordenadas geográficas con dispositivo tipo GPS; considerando factores tales como: inspección visual de topografía, árboles cercanos a los puntos de ubicación, dirección del viento, etc. Estos no son referenciados en el mapa, por no ser aspectos influyentes directamente en la obtención de umbrales críticos de lluvia.

3.2.6. Mapeo geológico de la zona de estudio

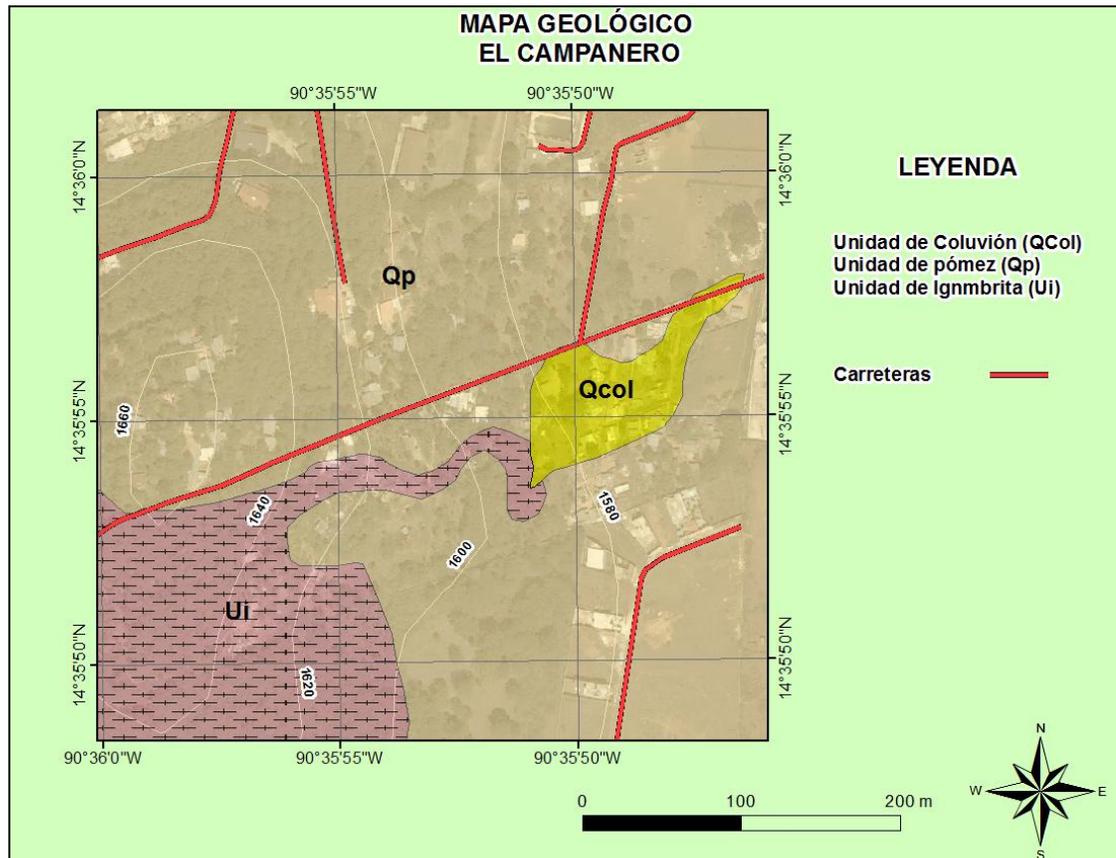
Se procedió a la identificación de las unidades litológicas presentes en el área de estudio, con la finalidad de determinar qué unidad litológica es más competente a ser erosionada.

La recolección de datos se desarrolló a partir de una inspección visual en campo, mediante la identificación de afloramientos de roca. Se referenció con coordenadas geográficas tomadas con dispositivo tipo GPS, las zonas de contacto entre litologías.

Toda esta información, fue comparada con las hojas geológicas a escala 1:50 000 elaboradas por el Instituto Geográfico Nacional (IGN). Dichos mapas sirvieron únicamente como comparación de información, por lo que no se presenta imagen ilustrativa del mismo.

Las unidades encontradas fueron: ignimbrita, pómez y coluvión (ordenadas de la más antigua a la más reciente). La primera corresponde a una roca ígnea (de origen volcánico), de consistencia porosa formada por acumulación de ceniza. La segunda corresponde a una roca ígnea, de poca densidad y altamente porosa. El coluvión, que es formada a consecuencia de la acción erosiva de agentes como el agua. La mayor parte corresponde a una litología pomácea y la unidad más pequeña fue coluvión, definida como la zona de depósito (ver mapa de la figura 15).

Figura 15. Mapa geológico definido mediante recorrido en el área de estudio



Fuente: elaboración propia, empleando *software* de sistema de información geográfica ArcGis.

3.2.7. Toma de muestras y ensayo de laboratorio

Se realizó una exploración directa del suelo, con la finalidad de observar el lugar idóneo para la toma de muestra que fuera ensayada en el laboratorio. En el proceso, se tuvo la consideración de obtener una muestra que fuera representativa en relación a los materiales predominantes del sitio y puntos críticos susceptibles a ser afectados por erosión (zonas de arranque).

La porción de suelo fue de forma cúbica y se extrajo de forma inalterada, es decir, conservando su contenido de agua natural y estructura original. La excavación de la muestra, se realizó en una pared expuesta (pequeño talud) de la parte media-alta de la ladera. Una vez obtenida la muestra, se procedió a conservar sus características mediante su cubrimiento con gasa y parafina, identificando cada una de las caras, conforme a su posición original en el terreno (figura 16).

El ensayo se realizó en el laboratorio de mecánica de suelos del Centro de Investigaciones de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala. El método practicado correspondió al de permeabilidad hidráulica de cabeza variable, con el objetivo de conocer la capacidad que tienen los suelos para permitir el flujo del agua a través de sus poros (coeficiente de permeabilidad). Este último, fue incluido en el establecimiento del modelo matemático que define las intensidades críticas de lluvia.

Figura 16. **Ensayo de permeabilidad del suelo**

 <p>a.</p>	<p>a.) Excavación tipo bóveda para extracción de muestra de suelo en pared.</p>
 <p>b.</p>	<p>b.) Muestra de suelo inalterada de forma cubica.</p>
 <p>c.</p>	<p>c.) Cubierta de muestra (gasa y parafina), para protección de muestra inalterada.</p>

Fuente: elaboración propia.

3.2.8. Comparación de zona de estudio con mapa de amenaza por deslizamiento

Este análisis se realizó con la finalidad de garantizar que el área de estudio, no se encuentre afecto a problemas de inestabilidad total de la ladera. Para ello se procedió a ubicar geográficamente la zona de estudio, con mapas de amenaza por deslizamientos realizados para la ciudad de Guatemala y publicado por INSIVUMEH, en colaboración con la Agencia de Cooperación Internacional del Japón -JICA- en el año 2001.

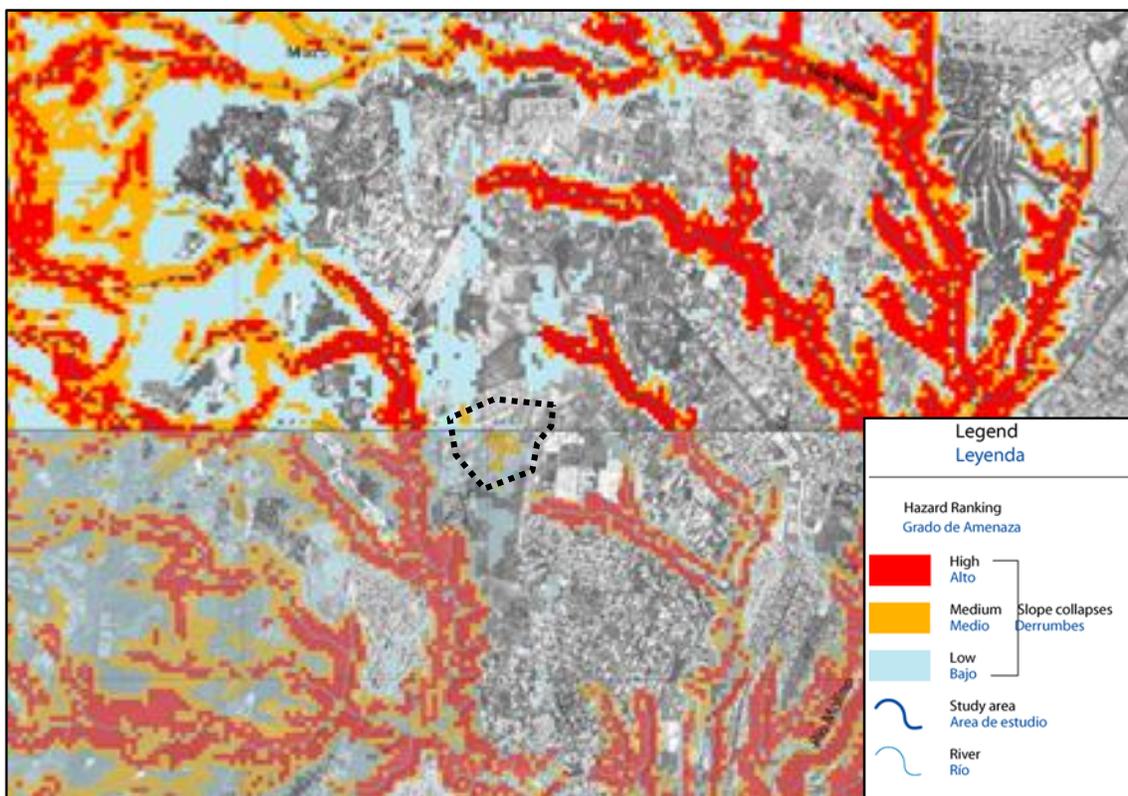
De acuerdo a las especificaciones indicadas en estos mapas, su obtención se desarrolló a partir de inventarios de deslizamientos pasados, factores condicionantes de topografía y geología del área, así como de factores detonantes por sismicidad y lluvias. Si bien la sismicidad no se incluye en el análisis de la presente investigación, los grados de amenaza (bajo, medio o alto) que presenta el mapa, funcionan para descartar la posibilidad de que el área de estudio se encuentre afecta a una inestabilidad y/o potencial a movimiento de ladera.

Debido a que la ubicación del área de estudio en relación a los mapas de amenaza, se encuentra en la interfaz de las dos hojas, 4 y 6 a escala 1:25 000 (Guatemala Noroeste y Suroeste, respectivamente), fue necesaria la utilización de las 2 hojas para el desarrollo del análisis (ver mapas en anexos).

Al realizar un acercamiento en los mapas (figura 17) en relación al área de estudio (área punteada en la imagen), se puede constatar que dicha área se ubica mayormente, en un nivel de amenaza bajo por deslizamiento, teniendo cierta proximidad a un nivel medio de amenaza por deslizamiento.

Lo anterior, confirma entonces, que no existe potencial amenaza por deslizamiento de masa de la ladera, fortaleciendo la premisa que fundamenta la presente investigación: problemas de remoción de masa asociado únicamente a erosión superficial en la ladera.

Figura 17. Imagen extraída de mapas de amenaza por deslizamiento para Guatemala



Fuente: Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología y Agencia de Cooperación Internacional del Japón. Programa de cooperación técnica, 2001.

3.2.9. Análisis histórico de lluvias

Como parte del desarrollo de la propuesta, se realizó previamente un análisis histórico del comportamiento de lluvias en la región, mediante la identificación de concentración de lluvias e intensidad. Estos conceptos se relacionan estrechamente con procesos de erosión en una determinada región.

Se realizó también, la determinación de índices que permitieron identificar la incidencia de afectación por erosión en la zona. Para ello se requirió la introducción de dos nuevos conceptos: concentración de precipitaciones y agresividad climática.

El primero permitió estimar la agresividad de las lluvias, relacionadas con la variabilidad de temporales; es decir, si las lluvias se distribuyen homogéneamente en los meses del año, o se concentran en un solo mes.

El segundo, constituye el efecto erosivo de las precipitaciones en el terreno, partiendo del hecho de que una lluvia agresiva, está relacionada con la cantidad de sedimentos que son arrastrados por la escorrentía.

Los dos anteriores permiten entender la dinámica de erosión en la región, ya que, si una lluvia es muy intensa, el proceso dinámico de erosión es más activo. Si la distribución de las lluvias tiene un comportamiento uniforme o puntual a lo largo del tiempo, podrá establecerse el grado de afectación en el terreno.

Por no contar con estaciones en el área de estudio, se tomó en consideración los datos que proporcionan estaciones aledañas instaladas por - INSIVUMEH-, denominadas como estación “Suiza Contenta” y estación “Insivumeh”; los cuales distan del área de interés a 7,15 y 6,8 km respectivamente, conteniendo registros de al menos 26 años.

3.2.10. Tendencia de las precipitaciones

Se observó el comportamiento de las precipitaciones en la época lluviosa, conforme a los registros de ambas estaciones con datos acumulados mensuales en mm y comprendido del periodo de 1990 a 2016. Es importante recalcar que la época lluviosa para Guatemala, viene definida para los meses comprendidos entre mayo a octubre, por lo que serán estos los meses en los cuales se hará la observancia de datos año con año (tabla VI).

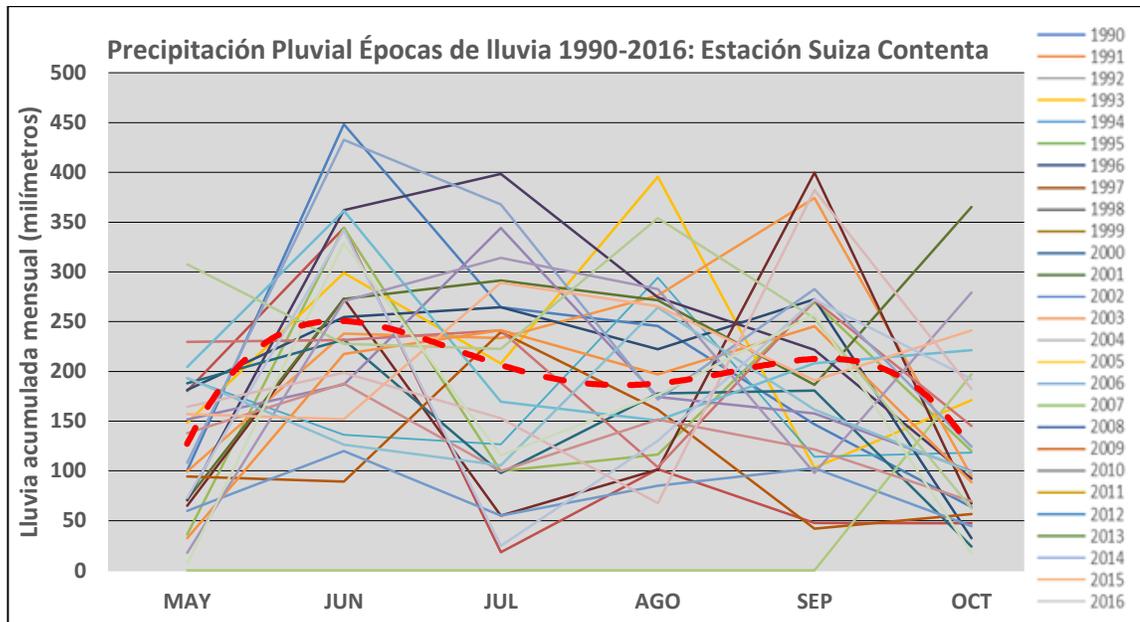
Al graficar los valores sobresale temporadas de lluvia muy marcadas de mayo a julio y de agosto a octubre. El valor de lluvia máxima se presenta al iniciar el mes de junio, disminuyendo en julio e iniciando la segunda temporada de lluvias en agosto, teniendo su pico a finales de septiembre (figura 18).

Tabla VI. Datos de precipitaciones mensuales acumuladas en mm

Estación "Suiza Contenta", ubicada en Finca Suiza Contenta, municipio de san Lucas Sacatepéquez, departamento de Sacatepéquez													
AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
1990	0,0	8,0	0,0	0,0	100,4	448,3	264,4	245,7	146,9	63,8	25,7	0,0	1 303,2
1991	0,0	0,0	0,0	10,6	180,3	344,0	18,4	101,6	47,8	47,3	*****	0,0	750,0
1992	0,0	0,0	59,8	22,2	36,3	344,4	99,8	116,5	269,5	120,1	19,0	0,0	1 087,6
1993	0,0	0,0	2,8	16,2	148,4	299,1	207,8	395,7	102,9	171,0	0,0	0,0	1 363,9
1994	9,3	9,9	52,0	3,7	193,0	136,4	126,6	294,3	114,2	118,4	15,0	8,0	1 080,8
1995	0,0	*****	5,3	43,8	99,5	237,8	233,6	276,2	374,3	94,6	30,6	15,9	1 411,6
1996	24,4	6,6	1,5	93,2	181,4	254,7	264,5	222,2	272,4	32,3	42,2	4,9	1 400,3
1997	11,8	9,1	1,7	24,8	64,9	273,2	55,2	101,3	399,7	67,2	*****	0,0	1 008,9
1998	0,0	0,0	4,3	0,0	71,0	272,8	291,2	271,4	186,5	365,1	298,7	0,0	1 761,0
1999	0,0	0,0	8,0	17,0	70,4	362,0	398,4	274,4	221,5	92,3	3,1	7,4	1 454,5
2000	0,0	0,0	23,5	20,0	188,0	232,0	97,8	177,9	180,8	24,2	2,5	4,4	951,1
2001	0,0	*****	2,3	0,0	94,3	89,2	239,5	161,5	41,8	56,7	11,2	11,3	707,8
2002	0,0	0,0	0,0	0,0	60,0	119,9	55,1	85,0	102,7	44,6	5,0	0,0	472,3
2003	0,0	13,0	2,3	27,5	229,7	231,7	241,0	103,5	271,5	145,3	*****	*****	1 265,5
2004	4,4	6,9	6,9	35,3	*****	*****	*****	*****	*****	197,1	10,0	1,2	261,8
2005	1,5	0,0	4,0	23,0	151,6	186,9	344,1	174,2	157,6	99,9	9,6	11,7	1 164,1
2006	9,3	2,1	2,2	53,7	204,5	361,5	169,5	150,7	208,3	221,2	34,4	18,9	1 436,3
2007	7,7	0,0	0,0	9,3	32,5	217,5	241,6	197,0	245,3	88,7	14,5	4,6	1 058,7
2008	1,3	5,4	4,0	9,5	108,0	432,8	367,9	171,7	282,7	124,5	0,0	0,0	1 507,8
2009	0,0	6,2	1,9	4,7	137,9	187,7	99,8	151,6	121,6	69,5	123,5	38,9	943,3
2010	0,6	0,0	0,3	40,5	307,5	227,6	222,7	353,9	253,4	62,5	19,1	9,0	1 497,1
2011	0,9	5,6	6,9	19,3	17,8	270,7	314,2	282,8	98,0	279,2	20,4	2,1	1 317,9
2012	6,2	15,0	3,7	75,1	193,6	126,3	105,7	264,2	161,5	99,0	3,6	3,6	1 057,5
2013	3,2	3,3	3,9	20,9	157,2	152,0	289,0	265,5	190,8	241,2	0,7	3,2	1 330,9
2014	0,0	0,0	0,0	26,2	72,9	342,0	24,7	130,2	272,0	192,2	7,8	2,2	1 070,2
2015	0,7	2,5	10,9	47,2	164,3	198,6	152,9	67,5	382,3	182,3	103,6	0,7	1 313,5
2016	1,1	2,5	4,5	25,1	6,9	328,6	115,9	176,3	257,4	17,2	*****	9,3	944,8
Σ	82,4	96,1	232,7	668,8	3 272,3	6 677,7	5 041,3	5 212,8	5 363,4	3 317,4	800,2	157,3	

Fuente: elaboración propia.

Figura 18. **Gráfico de lluvias acumuladas mensuales en mm, mayo a octubre. La línea roja discontinua, presenta la tendencia general de precipitaciones para un registro de 1990 a 2016**



Fuente: elaboración propia.

Con los datos de la estación meteorológica “Insivumeh” (tabla VII), tenemos que el comportamiento de las lluvias en esta, es muy parecida a la estación anterior. El pico, en la primera temporada lluviosa, se desarrolla a finales del mes de mayo y el pico en la segunda temporada lluviosa se da en el mes de septiembre. A diferencia de la anterior, la primera declinación de lluvia se genera a inicio del mes de junio, de una forma más pronunciada (figura 19).

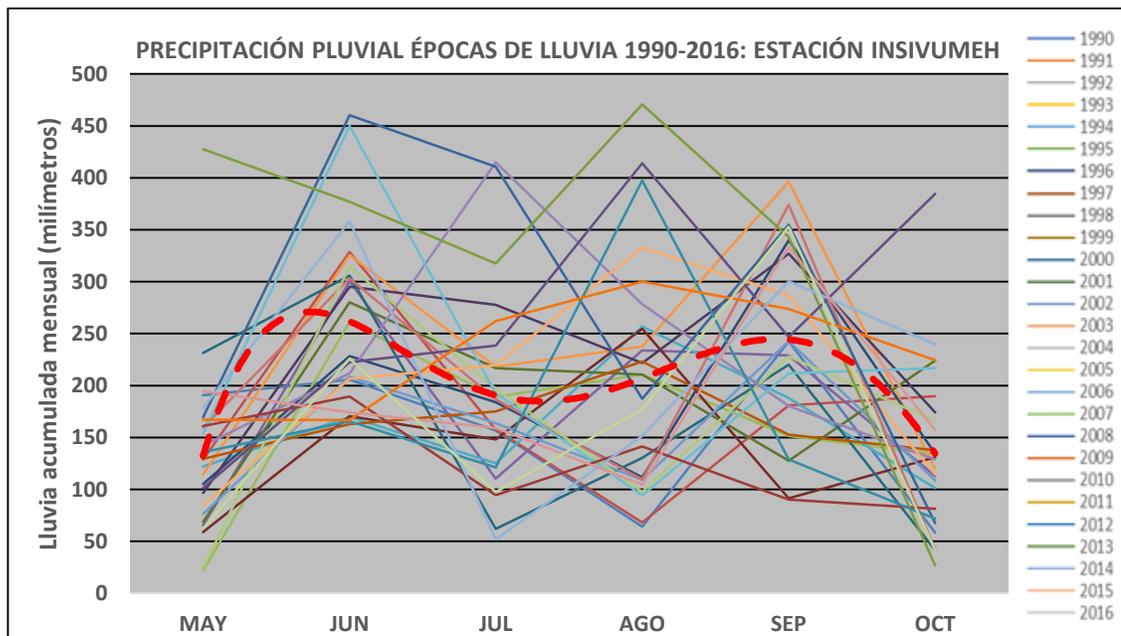
Tabla VII. **Datos de precipitaciones mensuales acumuladas en mm**

Estación Meteorológica "Insivumeh", ubicada en 7a. Avenida 14-57 Zona 13 Ciudad Capital.													
AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
1990	4,5	0,4	0,7	21,9	190,6	205,6	156,6	64,1	242,6	58,5	46,2	6,6	998,3
1991	4,6	0,8	0,0	14,4	128,9	328,6	157,6	68,3	180,8	189,7	161,0	51,8	1 286,5
1992	1,5	0,0	11,7	32,5	21,9	261,3	189,2	210,5	151,5	134,0	21,8	0,6	1 036,5
1993	0,1	0,0	11,4	97,4	65,3	300,4	110,4	233,9	229,0	112,9	29,5	0,2	1 190,5
1994	5,0	0,4	0,9	12,5	122,0	170,0	125,0	256,8	188,0	101,2	3,3	3,1	988,2
1995	0,2	0,8	3,4	72,6	114,4	325,9	217,9	237,5	396,3	120,0	25,2	9,5	1 523,7
1996	14,4	2,0	2,3	80,9	105,3	228,5	184,1	111,6	339,9	134,4	20,6	4,4	1 228,4
1997	10,6	10,7	2,1	13,4	58,9	170,6	148,2	254,6	91,4	130,9	37,0	12,3	940,7
1998	0,1	0,0	21,2	0,0	68,9	280,1	216,9	210,6	127,6	224,0	355,5	3,6	1 508,5
1999	1,0	52,2	0,4	6,4	96,8	295,1	277,8	221,7	326,9	174,3	19,7	3,0	1 475,3
2000	0,4	0,0	0,2	40,9	231,4	306,0	62,1	130,4	220,2	41,5	14,5	1,6	1 049,2
2001	1,1	4,8	2,6	4,1	129,5	162,8	175,1	223,3	152,7	137,6	19,6	1,3	1 014,5
2002	0,0	6,6	0,0	12,7	76,4	208,4	163,7	109,3	242,9	108,6	83,6	0,2	1 012,4
2003	0,9	14,4	20,3	36,8	159,9	303,1	186,8	109,4	374,2	42,1	18,6	2,0	1 268,5
2004	0,2	0,5	23,9	5,2	24,3	314,5	197,2	97,6	228,2	165,9	2,9	0,2	1 060,6
2005	2,0	0,0	6,7	2,6	141,9	211,8	415,1	278,3	180,2	128,7	23,0	2,5	1 392,8
2006	11,3	0,4	6,3	32,6	153,5	449,8	192,6	94,3	211,7	216,9	39,2	9,1	1 417,7
2007	1,4	0,0	0,9	31,2	84,8	206,7	219,6	333,0	287,0	114,4	2,1	1,5	1 282,6
2008	3,3	11,9	3,4	22,4	169,6	460,3	410,6	187,3	354,8	67,4	0,0	0,0	1 691,0
2009	0,0	4,0	0,0	17,3	161,0	189,6	94,4	141,5	90,2	81,2	130,5	29,5	939,2
2010	0,0	1,3	0,0	108,2	427,4	376,9	317,4	470,8	342,9	26,8	6,4	0,0	2 078,1
2011	0,0	7,2	13,4	15,0	101,5	222,6	238,6	414,2	246,8	384,5	14,2	1,5	1 659,5
2012	3,2	5,3	5,1	40,9	135,8	165,5	121,1	397,5	128,9	71,9	3,2	1,1	1 079,5
2013	0,2	2,6	34,2	12,7	167,1	166,9	262,1	300,2	273,7	224,3	4,9	2,0	1 450,9
2014	0,0	2,1	63,7	10,6	178,4	358,3	52,0	151,5	300,4	239,8	6,3	2,3	1 365,4
2015	0,0	0,4	28,9	79,6	194,4	174,3	159,0	104,7	333,4	156,9	69,1	1,8	1 303,1
2016	1,4	0,0	10,0	23,7	62,4	225,8	97,7	177,2	352,7	41,3	4,3	3,0	999,5
Σ	67,7	128,8	273,7	848,5	3 572,3	7 069,4	5 149,1	5 590,1	6 594,9	3 629,7	1 162,2	154,7	

Fuente: elaboración propia.

Al graficar los datos para esta estación, se puede decir que a lo largo del año se presentan para la región, dos fases lluviosas marcadas significativamente: la primera entre mayo y junio; y la segunda entre agosto y octubre. Para ambos casos, el periodo marcado por poca lluvia (punto más bajo en las gráficas) corresponde al mes de julio, en el cual podemos establecerlo de manera general como canícula.

Figura 19. **Gráfico de lluvias acumuladas mensuales en mm, de mayo a octubre. Línea roja discontinua, presenta tendencia general de las precipitaciones para un registro de 1990 a 2016**



Fuente: elaboración propia.

Al observar el comportamiento de las lluvias en la región a lo largo del tiempo, servirá para enfocar los periodos en los que es más susceptible a generarse escorrentía superficial y erosión en el área analizada.

3.2.11. Índice de concentración de precipitaciones (ICP)

El cálculo se realizó para cada año; de 1990 a 2016, para los datos de ambas estaciones y se identificó su tendencia conforme a la clasificación del ICP.

Por la cantidad de datos manejados en su desarrollo, la memoria de cálculo no se presenta. Por lo que, la ecuación del ICP fue definida en el marco teórico de este documento. La tabla VIII presenta únicamente los resultados para cada año y la clasificación asociadas a este.

Una vez se contó con el ICP para cada año y en cada estación, se analizaron las frecuencias relativas de cada estación (tablas IX y X) y se calculó un promedio para obtener la agresividad que generan las precipitaciones.

Tabla VIII. **Obtención y clasificación de índices de concentración de precipitación (ICP) anual**

Índice de concentración de precipitaciones				
	Estación “Suiza Contenta”		Estación “Insivumeh”	
AÑO	ICP/año	Clasificación	ICP/año	Clasificación
1990	21,7	Altamente estacional	17,3	Estacional
1991	29,5	Altamente estacional	15,2	Estacional
1992	19,9	Estacional	17,8	Estacional
1993	18,9	Estacional	16,7	Estacional
1994	16,2	Estacional	17,5	Estacional
1995	17,5	Estacional	17,3	Estacional
1996	15,5	Estacional	16,6	Estacional
1997	25,3	Altamente estacional	16,6	Estacional
1998	16,0	Estacional	16,2	Estacional
1999	20,2	Altamente estacional	16,7	Estacional
2000	18,2	Estacional	20,0	Altamente estacional
2001	21,1	Altamente estacional	16,2	Estacional
2002	18,3	Estacional	16,2	Estacional
2003	16,9	Estacional	19,2	Estacional
2004	58,8	Irregular	20,3	Altamente estacional
2005	17,9	Estacional	18,8	Estacional
2006	15,5	Estacional	18,2	Estacional
2007	19,1	Estacional	18,6	Estacional
2008	20,2	Altamente estacional	20,1	Altamente estacional
2009	13,9	Moderadamente estacional	14,0	Moderadamente estacional
2010	17,5	Estacional	18,0	Estacional
2011	19,6	Estacional	18,1	Estacional
2012	15,8	Estacional	20,8	Altamente estacional
2013	16,8	Estacional	16,2	Estacional
2014	22,0	Altamente estacional	18,1	Estacional
2015	16,6	Estacional	14,9	Moderadamente estacional
2016	24,6	Altamente estacional	22,3	Altamente estacional

Fuente: elaboración propia.

Tabla IX. **Frecuencias relativas para los ICP anuales: estación “Suiza Contenta”**

Estación “Suiza Contenta”	
Variable	Frecuencia relativa
Moderadamente estacional	0,04
Estacional	0,63
Altamente estacional	0,30
Irregular	0,03
SUMA=	1,00

Fuente: elaboración propia.

Tabla X. **Frecuencias relativas para los ICP anuales: estación “Insivumeh”**

Estación “Insivumeh”	
Variable	Frecuencia relativa
Moderadamente estacional	0,07
Estacional	0,74
Altamente estacional	0,19
SUMA=	1,00

Fuente: elaboración propia.

Como se observa, en ambos casos se presenta una distribución de lluvias estacional. Al establecer un promedio para las dos estaciones, se estima una agresividad de lluvias de carácter estacional, con una ponderación de 68,5 %. Esto quiere decir que las lluvias se ven concentradas en unos pocos meses durante el año, en este caso en los meses en los que ocurren los picos de la época de lluvia (es decir a finales de mayo e inicios de junio, así como en el mes de septiembre), lo cual genera condiciones más activas de afectación por erosión para estos meses.

3.2.12. Índice de Fournier modificado (IFM)

Se estimó el valor del índice modificado de Fournier para cada año, utilizando la ecuación 3; con 29 años para la estación “Suiza Contenta” y 24 años para la estación “Insivumeh” (de acuerdo a la disponibilidad de datos).

Las estimaciones se obtuvieron a partir de los datos de precipitación media mensual y precipitación media anual. Se sumaron los valores de cada año y se hizo un promedio por estación, los cuales arrojaron valores de 221 y 224 para la estación “Suiza Contenta” e “Insivumeh”, respectivamente.

Como se ha establecido, dichos valores son superiores a 160, reflejando que el efecto erosivo de las precipitaciones es alto. Estos datos, comparados con el valor del índice de concentración de lluvias (ICP) de tipo estacional, hacen concluir que, en la zona, pueden presentarse eventos puntuales de alta erosión.

3.3. Determinación intensidades críticas de lluvia

Las etapas requeridas para su determinación (determinación de tormentas, inventario de intensidades, identificación de tormentas potenciales que generan erosión y escorrentía y finalmente la definición de modelo matemático), se establecen mediante una secuencia lógica de procedimientos que demanda la base metodológica utilizada. Como se ha mencionado anteriormente, la propuesta determinística desarrollada por Caine tendrá cierto ajuste relacionada con el acoplamiento mecánico del suelo.

3.3.1. Determinación de tormentas

La determinación de tormentas consistió en identificar a partir de datos de precipitación, las lluvias enmarcadas en un tiempo definido; es decir el inicio y final evidente de la precipitación.

A diferencia de un análisis hidrológico (que tiene la particularidad que puede considerarse estaciones no tan cercanas al punto de estudio), el análisis de tormentas, requiere datos a nivel local o en su defecto, lo más cercana posible al sector analizado.

De igual manera, los datos utilizados en el análisis histórico de lluvias se toman como acumulados mensuales, mientras que los necesarios para la determinación de tormentas, requieren que se identifique con exactitud la hora de inicio y terminación de una lluvia específica.

Para este análisis, se consideraron datos obtenidos del pluviógrafo de la estación “Lo de Coy” instalada por -INSIVUMEH-, ubicado en zona 1 del municipio de Mixco, departamento de Guatemala, la cual es la estación más cercana al punto de estudio, con lecturas a cada 15 minutos.

La determinación de tormentas debe definirse dentro de una ventana de tiempo, que no es más que el periodo en el que las lluvias serán analizadas. Dicha ventana de tiempo se centralizó en la época de lluvia (de mayo a octubre) del año 2011; por ser este, el último año con el que se cuenta con registros completos de la temporada. La selección se hizo al comparar las épocas más lluviosas de los últimos seis años, dejando fuera los lapsos secos entre lluvias. Recordemos que, si existen lapsos secos muy largos entre lluvias, la escorrentía superficial será menor.

Se analizó dato por dato y no se tomó en cuenta aquellas lecturas menores o iguales a 1 mm en cualquier tiempo. Cada tormenta fue tratada de manera independiente. En total se contabilizaron 168 tormentas con este tipo de características (tabla XI).

Tabla XI. **Determinación de tormentas, época de lluvia del año 2011 (mayo a octubre)**

Estación Lo de Coy, zona 1 de Mixco				
No.	FECHA	Hora inicio de lluvia	Tormenta (mm)	Duración (h)
1	5/02/2011	02:45:00 a. m.	7,3	1,75
2	5/04/2011	04:15:00 p. m.	3,1	0,75
3	5/09/2011	03:45:00 p. m.	2,9	1,00
4	5/11/2011	01:00:00 a. m.	5,1	3,25
5	5/21/2011	07:15:00 p. m.	1,5	0,75
6	5/26/2011	11:15:00 p. m.	6,9	3,25
7	5/28/2011	05:15:00 a. m.	7,8	2,75
8	5/30/2011	12:00:00 a. m.	1,6	0,50
9	6/07/2011	08:45:00 p. m.	1,4	1,25
10	6/08/2011	08:00:00 p. m.	9,5	2,25
11	6/10/2011	12:15:00 a. m.	8,6	1,75
12	6/10/2011	06:00:00 p. m.	4,3	0,75
13	6/13/2011	03:00:00 p. m.	16,0	1,00
14	6/16/2011	01:00:00 p. m.	9,8	1,25
15	6/18/2011	08:15:00 p. m.	19,1	4,00
16	6/19/2011	12:30:00 a. m.	1,3	1,50
17	6/20/2011	06:45:00 p. m.	4,1	1,50
18	6/21/2011	12:30:00 p. m.	19,5	1,00
19	6/21/2011	04:30:00 p. m.	1,5	0,75
20	6/22/2011	10:30:00 p. m.	2,4	1,00
21	6/23/2011	07:00:00 p.m.	9,1	1,25
22	6/24/2011	01:15:00 a. m.	39,6	5,25
23	6/24/2011	04:15:00 p. m.	22,4	1,75
24	6/26/2011	01:45:00 a.m.	1,1	0,50
25	6/26/2011	02:30:00 a. m.	1,4	0,50

Continuación tabla XI.

Estación Lo de Coy, zona 1 de Mixco				
No.	FECHA	Hora inicio de lluvia	Tormenta (mm)	Duración (h)
26	6/26/2011	06:00:00 a. m.	28,3	2,00
27	6/26/2011	07:30:00 a. m.	1,2	1,25
28	6/26/2011	03:30:00 p. m.	1,9	1,00
29	6/26/2011	05:45:00 p. m.	1,6	2,00
30	6/27/2011	07:30:00 a. m.	2,2	2,00
31	6/27/2011	01:45:00 p. m.	12,8	2,00
32	6/27/2011	08:15:00 p. m.	2,1	2,75
33	6/28/2011	07:15:00 p. m.	2,6	1,00
34	6/29/2011	10:15:00 p. m.	1,2	2,50
35	7/01/2011	10:15:00 p. m.	19,3	1,00
36	7/02/2011	04:00:00 a. m.	4,8	1,50
37	7/02/2011	06:45:00 a. m.	10,4	2,00
38	7/02/2011	10:45:00 p. m.	3,5	1,00
39	7/05/2011	02:00:00 a. m.	17,1	1,75
40	7/05/2011	04:15:00 a. m.	3,8	1,25
41	7/05/2011	02:00:00 p. m.	1,7	0,50
42	7/05/2011	04:00:00 p. m.	8,1	0,75
43	7/07/2011	01:30:00 a. m.	5,5	1,25
44	7/07/2011	02:30:00 a. m.	1,5	0,75
45	7/10/2011	01:15:00 p. m.	11,3	1,00
46	7/10/2011	10:30:00 p. m.	1,2	1,00
47	7/11/2011	02:15:00 a. m.	2,3	2,75
48	7/12/2011	01:30:00 p. m.	12,3	1,75
49	7/13/2011	11:30:00 a. m.	1,7	0,75
50	7/13/2011	04:45:00 p. m.	4,5	2,00
51	7/14/2011	01:00:00 a. m.	9,1	4,75
52	7/14/2011	04:15:00 p. m.	9,6	0,50
53	7/14/2011	05:45:00 p. m.	4,6	1,25
54	7/17/2011	03:00:00 a. m.	6,9	3,50
55	7/17/2011	01:00:00 p. m.	3,5	0,50
56	7/17/2011	01:45:00 p. m.	5,5	0,50
57	7/17/2011	03:15:00 p. m.	1,1	0,25
58	7/17/2011	05:00:00 p. m.	20,9	1,50

Continuación tabla XI.

Estación Lo de Coy, zona 1 de Mixco				
No.	FECHA	Hora inicio de lluvia	Tormenta (mm)	Duración (h)
59	7/17/2011	08:00:00 p. m.	5,7	0,75
60	7/17/2011	10:15:00 p. m.	1,8	1,25
61	7/18/2011	12:45:00 a. m.	4,6	0,75
62	7/26/2011	04:45:00 p. m.	1,8	0,25
63	7/26/2011	05:45:00 p. m.	2,5	0,75
64	7/27/2011	04:45:00 p. m.	2,2	1,50
65	7/28/2011	12:30:00 p. m.	10,4	0,75
66	7/28/2011	02:45:00 p. m.	18,1	1,50
67	7/30/2011	02:15:00 a. m.	23,5	3,00
68	7/30/2011	10:00:00 p. m.	6,9	1,75
69	8/01/2011	12:15:00 a. m.	8,5	3,00
70	8/01/2011	03:15:00 a. m.	2,4	1,25
71	8/01/2011	01:00:00 p. m.	2,3	1,25
72	8/02/2011	03:45:00 p. m.	6,6	1,00
73	8/08/2011	04:00:00 p. m.	18,9	1,75
74	8/09/2011	03:45:00 p. m.	2,2	0,75
75	8/11/2011	09:00:00 p. m.	6,8	1,25
76	8/13/2011	08:00:00 p. m.	1,4	1,00
77	8/13/2011	09:15:00 p. m.	1,7	0,75
78	8/14/2011	12:00:00 a. m.	8,6	1,75
79	8/14/2011	01:45:00 p. m.	1,4	0,50
80	8/14/2011	07:30:00 p. m.	17,7	3,50
81	8/15/2011	03:15:00 a. m.	20,7	1,50
82	8/16/2011	08:15:00 p. m.	4,6	1,00
83	8/17/2011	06:30:00 p. m.	2,0	1,00
84	8/18/2011	04:15:00 p. m.	3,0	0,50
85	8/20/2011	02:30:00 p. m.	3,2	0,50
86	8/20/2011	05:45:00 p. m.	6,0	1,75
87	8/21/2011	05:30:00 p. m.	1,5	0,50
88	8/22/2011	02:30:00 p. m.	22,6	1,75
89	8/22/2011	03:30:00 p. m.	8,5	0,75
90	8/23/2011	10:30:00 p. m.	10,1	3,25
91	8/24/2011	11:30:00 p. m.	40,9	4,50

Continuación tabla XI.

Estación Lo de Coy, zona 1 de Mixco				
No.	FECHA	Hora inicio de lluvia	Tormenta (mm)	Duración (h)
92	8/27/2011	05:15:00 a. m.	5,2	2,00
93	8/28/2011	03:45:00 p. m.	31,9	1,75
94	8/28/2011	07:00:00 p. m.	4,1	3,00
95	8/28/2011	09:00:00 p. m.	1,1	1,75
96	8/30/2011	12:30:00 a. m.	2,4	0,75
97	8/30/2011	05:45:00 a. m.	15,0	5,00
98	9/05/2011	03:00:00 p. m.	1,2	0,25
99	9/05/2011	09:45:00 p. m.	5,3	2,75
100	9/06/2011	10:00:00 p. m.	5,1	1,75
101	9/08/2011	11:30:00 p. m.	4,3	3,50
102	9/10/2011	05:00:00 p. m.	10,1	1,75
103	9/11/2011	07:15:00 p. m.	8,1	1,75
104	9/12/2011	06:45:00 p. m.	5,1	1,00
105	9/12/2011	10:00:00 p. m.	1,5	1,25
106	9/13/2011	03:00:00 p. m.	12,5	1,00
107	9/13/2011	05:30:00 p. m.	3,8	0,75
108	9/15/2011	11:00:00 p. m.	1,2	0,50
109	9/17/2011	08:45:00 p. m.	10,4	1,50
110	9/17/2011	10:45:00 p.m.	2,1	0,50
111	9/18/2011	12:45:00 a.m.	4,8	1,75
112	9/18/2011	06:45:00 p. m.	3,8	2,50
113	9/18/2011	11:15:00 p. m.	5,0	1,75
114	9/19/2011	03:15:00 p. m.	6,2	1,25
115	9/20/2011	03:00:00 p. m.	3,0	0,75
116	9/21/2011	02:15:00 p. m.	3,1	0,75
117	9/21/2011	11:45:00 p. m.	4,9	0,75
118	9/22/2011	04:15:00 a. m.	28,3	3,50
119	9/23/2011	03:45:00 a. m.	19,2	1,75
120	9/23/2011	08:00:00 p. m.	2,4	1,25
121	9/25/2011	01:15:00 p. m.	18,9	1,00
122	9/25/2011	04:00:00 p. m.	1,5	0,75
123	9/27/2011	02:15:00 p. m.	10,4	2,00
124	9/27/2011	07:45:00 p. m.	5,1	1,75

Continuación tabla XI.

Estación Lo de Coy, zona 1 de Mixco				
No.	FECHA	Hora inicio de lluvia	Tormenta (mm)	Duración (h)
125	9/28/2011	12:15:00 a. m.	24,8	3,50
126	9/28/2011	06:45:00 p. m.	18,1	3,00
127	9/29/2011	03:00:00 p. m.	1,8	0,50
128	9/30/2011	10:30:00 p. m.	3,3	3,00
129	10/01/2011	06:30:00 p. m.	3,4	0,50
130	10/01/2011	08:45:00 p. m.	4,3	2,00
131	10/01/2011	10:15:00 p. m.	1,6	1,25
132	10/02/2011	12:00:00 a. m.	1,3	1,50
133	10/03/2011	03:00:00 p. m.	1,1	1,00
134	10/03/2011	05:30:00 p. m.	1,3	0,75
135	10/03/2011	09:15:00 p. m.	24,6	2,50
136	10/03/2011	11:00:00 p. m.	1,8	1,00
137	10/04/2011	04:15:00 a. m.	1,6	1,25
138	10/05/2011	03:45:00 a. m.	1,7	1,00
139	10/05/2011	06:15:00 a. m.	1,6	0,75
140	10/05/2011	12:00:00 p. m.	6,7	0,50
141	10/05/2011	03:15:00 p. m.	1,3	0,75
142	10/06/2011	01:15:00 a. m.	1,2	0,75
143	10/07/2011	10:15:00 p. m.	3,4	0,50
144	10/08/2011	08:45:00 p. m.	14,1	2,75
145	10/10/2011	02:15:00 p. m.	17,3	1,75
146	10/10/2011	08:15:00 p. m.	1,9	0,75
147	10/10/2011	11:30:00 p. m.	5,5	1,50
148	10/11/2011	06:30:00 a. m.	8,0	1,75
149	10/11/2011	03:00:00 p. m.	2,5	1,00
150	10/11/2011	04:30:00 p. m.	1,7	1,25
151	10/12/2011	03:15:00 a. m.	26,7	7,00
152	10/12/2011	05:30:00 a. m.	2,2	0,75
153	10/12/2011	08:00:00 a. m.	2,7	1,25
154	10/12/2011	03:00:00 p. m.	2,7	0,75
155	10/13/2011	11:45:00 a. m.	3,5	2,75
156	10/13/2011	04:10:00 p. m.	1,6	1,00
157	10/13/2011	06:40:00 p. m.	7,0	2,50

Continuación tabla XI.

Estación Lo de Coy, zona 1 de Mixco				
No.	FECHA	Hora inicio de lluvia	Tormenta (mm)	Duración (h)
158	10/14/2011	04:10:00 a.m.	1,9	1,75
159	10/14/2011	08:00:00 a. m.	1,4	2,00
160	10/14/2011	10:50:00 a. m.	11,9	3,75
161	10/14/2011	04:40:00 p. m.	10,4	4,50
162	10/15/2011	04:10:00 a. m.	6,4	7,50
163	10/16/2011	02:30:00 a. m.	69,4	15,50
164	10/17/2011	08:30:00 a. m.	1,4	1,50
165	10/17/2011	02:20:00 p. m.	1,9	1,00
166	10/18/2011	10:50:00 p. m.	2,7	1,50
167	10/19/2011	05:00:00 a. m.	1,9	1,50
168	10/19/2011	08:50:00 a. m.	16,6	5,50

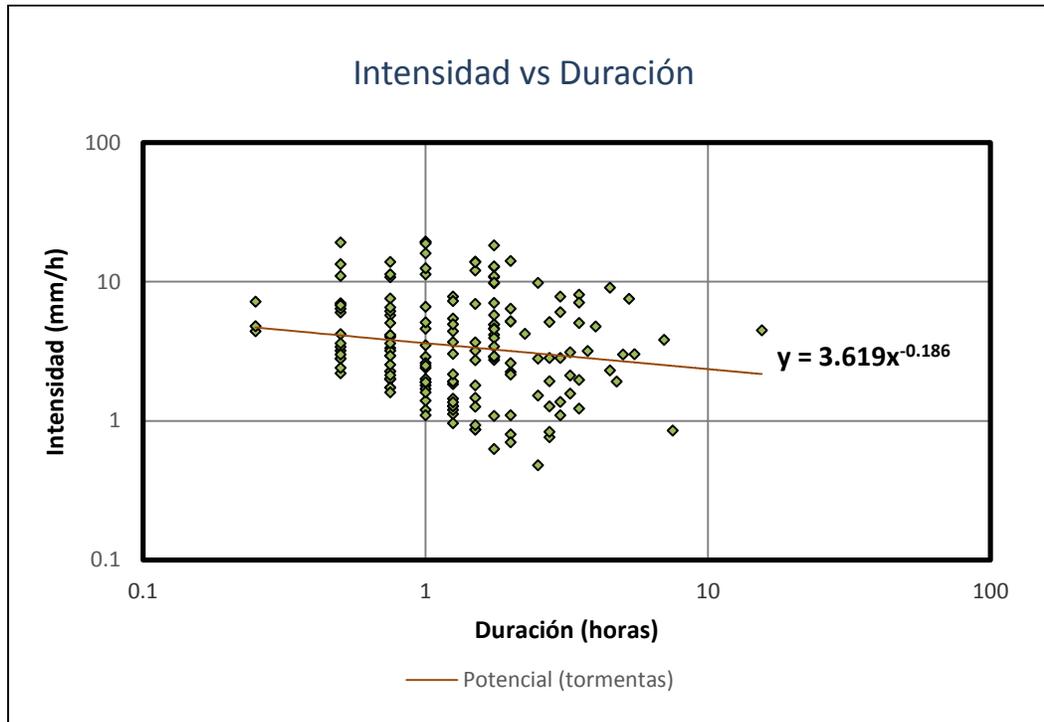
Fuente: elaboración propia.

3.3.2. Inventario de intensidades

Cada tormenta fue dividida por su tiempo de duración y se obtuvieron las respectivas 168 intensidades en milímetros por hora. La intensidad es un parámetro que se obtiene al relacionar la lluvia acumulada (tormentas para este caso), con su tiempo de duración.

Este inventario de intensidades, fue graficada en un espacio log-log con finalidad de reducir a un rango más manejable de datos, debido a la amplia gama de valores encontrados. La distribución se representa con la tendencia de los datos.

Figura 20. **Gráfico intensidad y duración de tormentas identificadas**



Fuente: elaboración propia.

Los valores encontrados para la intensidad varían de los 0,48 a 19,5 mm/h, tiempos de lluvia que van desde los 0,25 a 15,5 h de lluvia continua y acumulados, que varían entre los 1,1 a los 69,4 mm de lluvia.

3.3.3. Identificación de tormentas asociadas a procesos de erosión y escorrentía

Se identificó en el inventario de tormentas, aquellas que provocan escorrentía superficial, ya que la afectación por erosión es en mayor parte, provocada por la escorrentía superficial. Al contar con un modelo matemático que se encuentre en función de este tipo de tormentas, la identificación de tormentas que generan problemas de remoción de masa, será más precisa. Para fines de entendimiento, este tipo de parámetro se definió con el término de “tormentas potenciales”.

Para su determinación, se consideró la definición dada por Horton en el año 1933, quien planteó que, si la intensidad de la precipitación excede la capacidad de infiltración del suelo, se formará escurrimiento superficial; esto despreciando la intercepción por vegetación (25). A esta deducción, se le conoce con el nombre de “exceso de lluvia”.

$$\textit{Escurrimiento} = \textit{Intensidad} - \textit{Infiltración} \quad (\text{Ecuación 4})$$

Este tipo de escurrimiento Hortoniano se consideró para el presente caso de estudio ya que, su aplicabilidad es significativa en superficies impermeables y con baja capacidad de infiltración.

La infiltración por su parte, es el agua que penetra desde la superficie del terreno, hasta el suelo. Los factores influyentes en la tasa de infiltración incluyen la condición de su superficie y cubierta vegetal, porosidad y conductividad hidráulica del suelo y contenido de humedad del mismo.

La condición del suelo en el área analizada, se considera de poca vegetación, ya que la mayor parte de la ladera, ha sido intervenida por la conformación de viviendas. Es por ello que el escurrimiento Hortoniano, es el más adecuado de aplicar.

Para la porosidad del suelo se define por la relación de vacíos del medio poroso entre el volumen de agua que pasa por este. Su valor se encuentra dentro del rango aproximado de 0,25 a 0,75 y depende de la textura del suelo. El contenido de humedad no es más que la cantidad de agua que ocupa en los vacíos.

De estos factores, se consideró como significativo y único, el coeficiente de permeabilidad, ya que este relaciona la facilidad del movimiento del agua a través de medio poroso. Este se obtuvo a partir del ensayo de permeabilidad hidráulica realizado en el Laboratorio de Mecánica de Suelos de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, mediante una muestra de suelo inalterada, obtenida del sitio analizado. Se utilizó para su desarrollo, uno de los dos métodos existentes: permeámetro de cabeza variable. Los resultados obtenidos se presentan en la tabla XII.

Tabla XII. **Resultados del ensayo de permeabilidad, método de cabeza variable**

Ensayo No.	h1 (cm)	h2 (cm)	t (seg)	a (cm ²)	Vin (cm ³)	Vout (cm ³)	T (°C)	KT	$\eta T/\eta_{20}$	K ₂₀ °C
1	193,0	185,0	7200	0,66	5,30	5,30	22	5,59E-07	0,9996	5,586E-07
2	193,0	188,5	3600	0,51	2,30	2,30	22	4,80E-07	0,9996	4,803E-07
3	193,0	188,0	4500	0,74	3,70	3,70	22	6,19E-07	0,9996	6,189E-07
4	193,0	189,2	3600	0,97	3,70	3,70	22	7,72E-07	0,9996	7,712E-07
5	193,0	189,1	3600	0,69	2,70	2,70	22	5,63E-07	0,9996	5,629E-07
Promedio	193,0	187,68	4725	0,72	3,75	3,75	22	6,13E-07	0,9996	6,127E-07
										5,984E-07

Fuente: elaboración propia.

Los resultados del ensayo indicaron que el material corresponde a un suelo clasificado como limo con presencia de arena color café claro. El coeficiente de permeabilidad hidráulica promedio “K” es igual a $5,984 \times 10^{-07}$ cm/s (ver imagen en anexo). Esto evidencia un hallazgo significativo y es que, aunque el suelo es altamente erosionable, es muy poco permeable.

Para comprobar esta premisa, se calculó la velocidad con la que el agua se mueve en el suelo, considerando la ley de Darcy, quien indica que la intensidad de filtración por unidad de área (velocidad del flujo) es directamente proporcional al gradiente hidráulico (14). La ecuación para su obtención, corresponde entonces a:

$$V = K * i \tag{Ecuación 5}$$

Donde:

V= velocidad de Darcy en cm/s

K= coeficiente de permeabilidad del suelo

I= gradiente hidráulico.

A su vez, el gradiente hidráulico viene definido como:

$$i = \frac{\Delta h}{L} \tag{Ecuación 6}$$

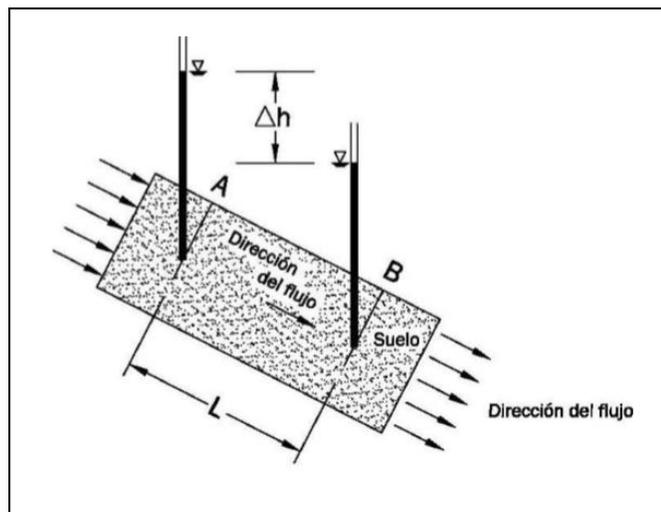
Donde:

i = gradiente hidráulico

Δh = diferencia de carga piezométrica entre las secciones AA y BB

L = distancia entre las secciones AA y BB, las cuales son perpendiculares a la dirección del flujo

Figura 21. Descripción de la ley de Darcy



Fuente: DAS, Braja M. *Principios de ingeniería de cimentaciones*. p. 25.

Al realizar los cálculos respectivos se tiene un gradiente hidráulico promedio i de 0,46 considerando la altura de la muestra igual a 4,58 plg (11,63 cm), el cual es el mismo del molde de compactación utilizado para la realización del ensayo; por ende, se tiene la velocidad del flujo definida por Darcy con un valor correspondiente a $2,737 \times 10^{-07}$ cm/h.

Por otro lado, la tasa de infiltración se refiere a la tasa a la cual entra al suelo en la superficie. Puede expresarse en pulgadas por hora (plg/h) o en centímetros por hora (cm/h). Para su estimación existen diferentes ecuaciones. Entre las más conocidas está, ecuación de Horton y la ecuación de Philip. Estas parten de la suposición de que el agua se encharca sobre la superficie con una profundidad pequeña en el suelo.

Debido a que estos son datos que solo se obtienen *in situ*, se utilizó tasas de infiltración ya establecidas para diferentes suelos, mediante la comparación del coeficiente de permeabilidad obtenido en el ensayo del laboratorio (tabla XII). Considerando que el suelo corresponde a franco limoso (limo con presencia de arena), la tasa de infiltración es de al menos 9,0 mm/h.

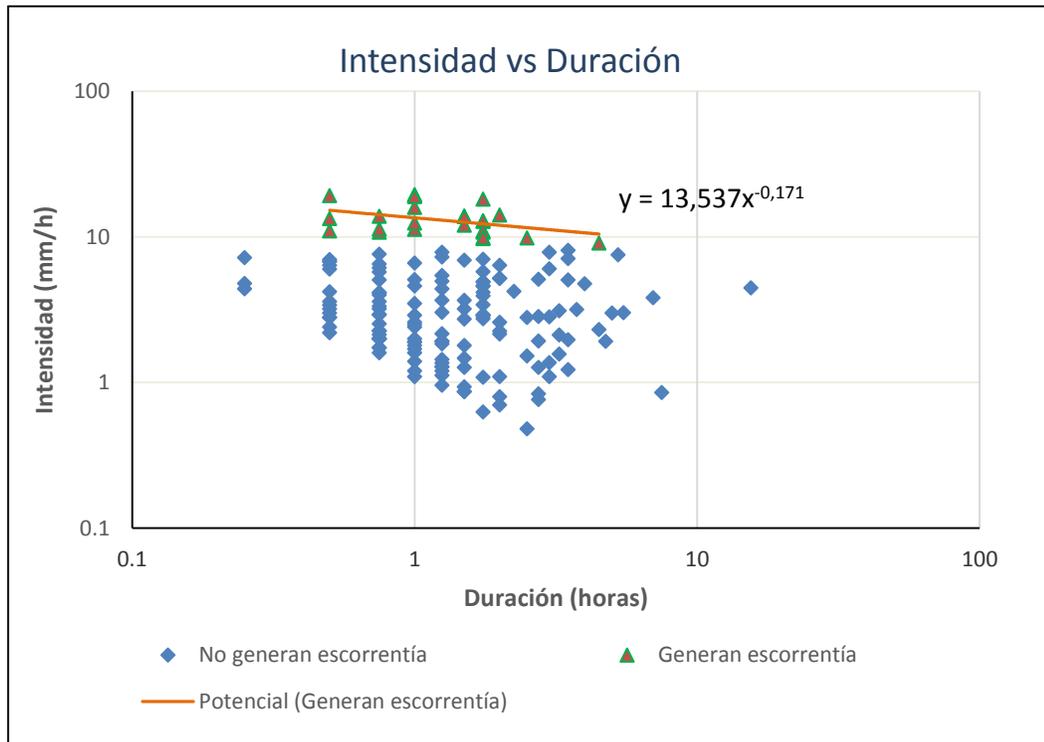
Tabla XIII. **Coeficiente de permeabilidad y tasa de infiltración (Lee 1996)**

Suelo	Coeficiente de permeabilidad K (cm/s)	Capacidad de infiltración (mm/h)
Arcillas	$< 10 \times 10^{-9}$	0,25 a 2,5
Limos	1×10^{-9} a 1×10^{-7}	2,5 a 8
Arenas finas	1×10^{-7} a 1×10^{-5}	8 a 13
Arenas gruesas	1×10^{-5} a 1×10^{-2}	13 a 20
Gravas	$> 1 \times 10^{-2}$	20 a 30

Fuente: SUAREZ, Jaime. *Deslizamientos y estabilidad de taludes en zonas tropicales*. p. 227.

Cada intensidad fue comparada con la tasa de infiltración del suelo. Ambos datos fueron colocados en una tabla y se desarrolló la diferencia respectiva para cada tormenta. Los valores de intensidad versus duración, fueron graficados a una escala tipo Log-Log, identificando para el universo de tormentas, aquellas que generan escorrentía superficial.

Figura 22. **Gráfico intensidad y duración de tormentas que generan escorrentía superficial**



Fuente: elaboración propia.

Es importante recalcar que las tormentas que generan escorrentía superficial, están asociadas a aquellas con alta intensidad y poca duración. Aquellas lluvias de menor intensidad, pero siempre dentro del rango de tormentas que generan escorrentía, se asocian a datos más grandes de duración de lluvia.

3.3.4. Definición de modelo matemático para la clasificación de intensidades

Al contar con el inventario de tormentas, diferenciando las que pueden generar escorrentía superficial y las que no, se planteó un modelo matemático para la determinación de intensidades generadoras de escorrentía.

Las aproximaciones utilizadas para determinar los valores de intensidades se fundamentaron en la ecuación 7, la cual define un umbral inferior a las tormentas que generaron deslizamientos y flujos de lodos, con la finalidad de anunciar con antelación, la ocurrencia de este tipo de evento. Hay que tomar en cuenta que un umbral se refiere a una intensidad específica. Se tiene entonces la función expresada como:

$$I = \alpha D^{\beta} \quad \text{(Ecuación 7)}$$

Donde:

I= intensidad de precipitación (mm/h)

D= duración de la precipitación (h)

β =pendiente del umbral o intensidad en espacio log-log

α = factor de ajuste de datos en el espacio log-log en el que se presenta la intensidad y duración

Esta función empírica ha sido utilizada para determinar intensidades críticas de lluvia a escalas globales, regionales y locales, ya que uno de sus atributos es predecir deslizamientos sin contar con propiedades mecánicas del suelo, y siempre que se cuente con datos a la escala analizada, podrá obtenerse el parámetro. La estimación de este es poco precisa.

Cepeda propone un modelo conceptual que describe niveles de susceptibilidad, a través del desarrollo de curvas de umbrales o intensidades basados en la ecuación 7 pero definidas por diferentes valores de coeficientes del factor de ajuste α ; de tal manera que, si α es más específico, se incrementa la certeza en la susceptibilidad y, por ende, la intensidad obtenida predice eficientemente la ocurrencia de un deslizamiento o flujo de lodo.

El factor de ajuste α por su parte, relaciona lluvia acumulada de n cantidad de días, con el estado de permeabilidad del terreno. Tanto la ecuación 7 y su ajuste, establecen un hecho sumamente importante de aplicabilidad: identificación de las tormentas que generaron deslizamientos.

Como se ha identificado, la principal limitación para este caso es que, los eventos de lluvia (tormentas), no están asociados a la ocurrencia de un determinado deslizamiento; sino que efectos frecuentes de erosión sobre el terreno. Por esta razón, se propone una adaptación de criterios a los modelos anteriores, fundamentado en una característica particular del suelo en el área analizada: suelo poco permeable, pero altamente erosionable.

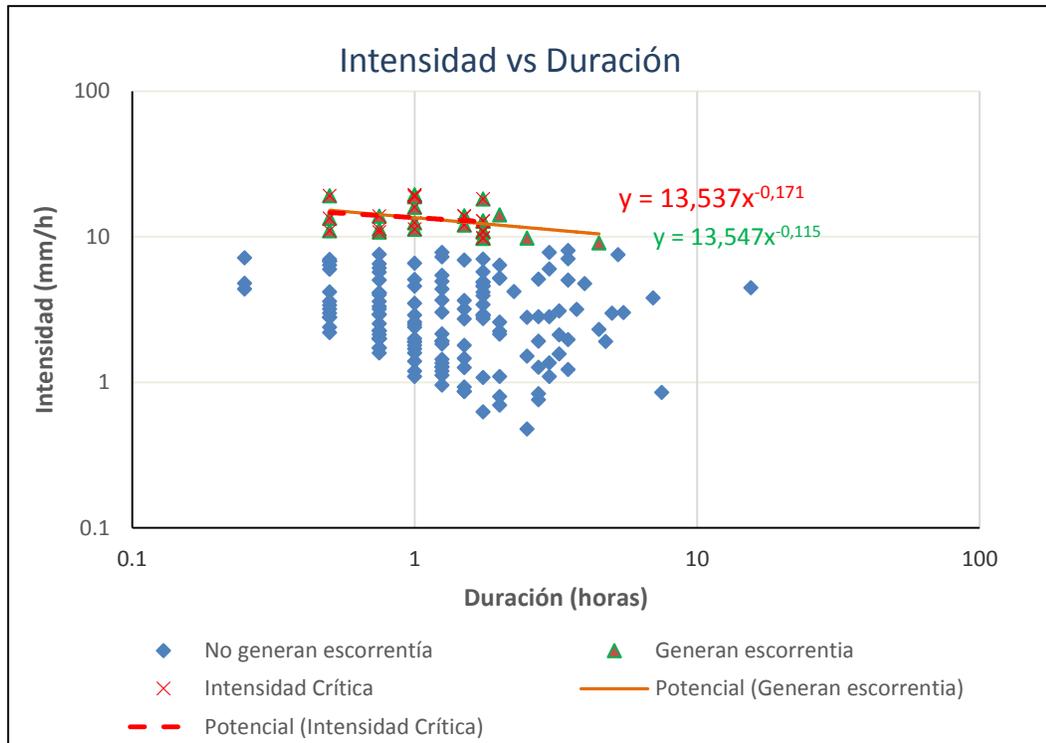
Esto define que el factor de ajuste α debe ir relacionada con la erosión superficial del terreno. Por ello, cuando se incrementa el valor de la precipitación acumulada, se disminuye la permeabilidad del suelo y se potencializa la afectación por erosión.

Este análisis, aunado a la evaluación hidrológica de la zona (comportamiento en el régimen de lluvias), establece entonces que la mayor parte de precipitación fluirá como escorrentía superficial. Las tormentas intensas desarrolladas en una corta duración, creará un efecto erosivo más significativo, que tormentas intensas desarrolladas en un largo periodo. De aquí se define que el modelo matemático irá en función de la intensidad de precipitaciones y la capacidad de infiltración del suelo (escorrentía).

A partir de esto, se planteó la analogía para clasificación de tormentas basados en la premisa de contabilizar las tormentas de corta duración, pero con gran intensidad, en vez de aquellas que generaron deslizamientos. El criterio adoptado fue la identificación de aquellas precipitaciones mayormente intensas, llovidas en menos de dos horas, considerando que el índice de concentración de lluvias, es estacional.

Se recalca que el inventario de estas tormentas, se hacen para aquellos datos de lluvia que generan escorrentía únicamente. Este hecho significativo, permite dar certeza para la definición de las intensidades de lluvia crítica buscada. La tendencia de todos los valores, fue sobrepuesta en la gráfica de la figura 23, permitiendo hacer la comparación de intensidades críticas, con el resto de tormentas. Finalmente, esta línea de tendencia representa la función de las intensidades que generarían eventos de erosión potencial.

Figura 23. **Gráfico intensidad y duración de tormentas que definen modelo matemático de intensidades**



Fuente: elaboración propia.

4. ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

En este capítulo se presenta el análisis de los resultados del estudio, abarcando los criterios considerados para su obtención y estableciendo las premisas para la interpretación de datos.

4.1. Resultados del estudio

Se logró obtener un modelo matemático que identifica intensidades críticas de lluvia que generan afectación por remoción de masa. A partir del modelo, se obtuvieron ocho intensidades posibles a generarse en el sector, mismos que se establecen como parámetros medibles dentro del SAT a desarrollarse en la comunidad.

4.1.1. Del modelo matemático

La función que determina las intensidades de lluvia que pueden generar procesos de remoción de masa, se conforma por dos constantes (pendiente de la curva igual a -0,171 y factor de ajuste igual a 13,537) y la variable correspondiente a la precipitación; definida como:

$$I = 13,537x^{-0,171} \quad (\text{Ecuación 8})$$

Donde:

I= intensidad crítica de lluvia en mm/h, que generaría procesos potenciales de afectación por erosión de masa en el sector

X= duración de la precipitación en h

En el entendido que la intensidad también es la relación entre una lluvia típica y su duración, se tiene:

$$I = \frac{h}{D} \quad \text{(Ecuación 9)}$$

Donde:

I= intensidad de lluvia (mm/h)

D= duración de la precipitación (h)

h= lluvia acumulada

Al reacomodar la ecuación, puede obtenerse entonces, la cantidad de lluvia acumulada (mm) bajo una intensidad y duración específica que, en este caso, corresponde a una intensidad asociada a la generación de afectación por erosión potencial en el área. Este aspecto es importante para el monitoreo de la cantidad de agua llovida registrada por el pluviógrafo, para un tiempo específico.

4.1.2. Intensidades de lluvia crítica para la emisión de alerta

Como se ha establecido en este análisis, la escorrentía se genera no solo con intensidades altas y poca duración, sino también con lluvias constantes en tiempos largos. Sin embargo, el efecto erosivo se presenta en aquellas tormentas de alta intensidad y poca duración.

A partir de esta consideración y del modelo matemático, se obtienen diferentes las intensidades de lluvia que registrará el pluviógrafo automático instalado en la comunidad, con lecturas a cada 15 minutos en menos de dos horas que, al alcanzar su valor, se tomarán como parámetros medibles que indican el nivel de alerta.

Tabla XIV. **Determinación de intensidades para emisión de alerta**

Tiempos de ocurrencia (h)	Intensidad alcanzada (mm/h)	Lluvia acumulada continua (mm)
	$I = 13.537x^{-0.171}$	$I = \frac{h}{D} \Rightarrow h = I * D$
0,25	17,16	4,29
0,50	15,24	7,62
0,75	14,22	10,66
1,00	13,54	13,54
1,25	13,03	16,29
1,50	12,63	18,95
1,75	12,30	21,53
2,00	12,02	24,05

Fuente: elaboración propia.

4.1.3. Interpretación de intensidades

La interpretación de estos datos se resume en la siguiente tabla:

Tabla XV. Interpretación de intensidades

Intensidad (mm/h)	Interpretación
17,16	Si llueve continuamente por 15 min y se alcanza una lluvia acumulada de 4,29 mm o más, la intensidad alcanzada será de 17,16 mm/h y podrá definirse como nivel de alerta.
15,24	Si llueve continuamente por 30 min y se alcanza una lluvia acumulada de 7,62 mm o más, la intensidad alcanzada será del 15,24 mm/h y podrá definirse como nivel de alerta.
14,22	Si llueve continuamente por 45 min y se alcanza una lluvia acumulada de 10,66 mm o más, la intensidad alcanzada será de 14,22 mm/h y podrá definirse como nivel de alerta.
13,54	Si llueve continuamente por 1 h y se alcanza una lluvia acumulada de 13,54 mm o más, la intensidad alcanzada será de 13,54 mm/h y podrá definirse como nivel de alerta.
13,03	Si llueve continuamente por 1 h con 15 min y se alcanza una lluvia acumulada de 16,29 mm o más, la intensidad alcanzada será 13,03 mm/h y podrá definirse como nivel de alerta.
12,63	Si llueve continuamente por 1 h con 30 min y se alcanza una lluvia acumulada de 18,95 mm o más, la intensidad alcanzada será de 12,63 mm/h y podrá definirse como nivel de alerta.
12,30	Si llueve continuamente por 1 h con 45 min y se alcanza una lluvia acumulada de 21,53 mm o más, la intensidad alcanzada será de 12,30mm/h y podrá definirse como nivel de alerta.
12,02	Si llueve continuamente por 2 h y se alcanza una lluvia acumulada de 24,05 mm o más, la intensidad alcanzada será de 12,02 mm/h y podrá definirse como nivel de alerta.

Fuente: elaboración propia.

4.2. Integración de intensidades al monitoreo del Sistema de Alerta Temprana (SAT)

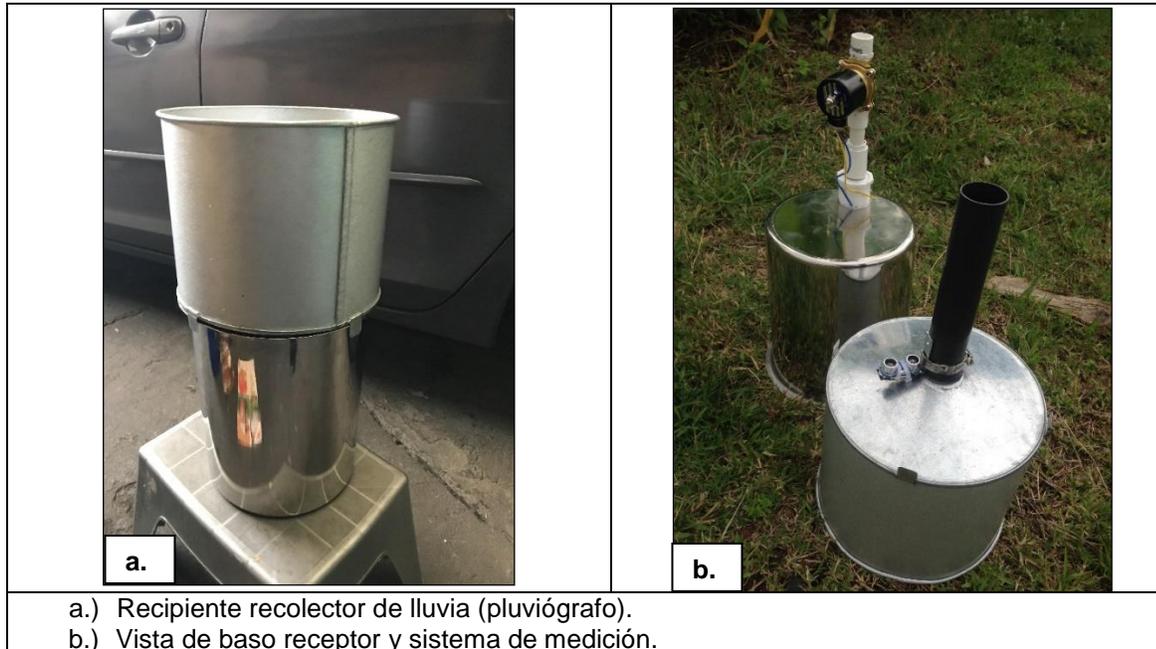
Los resultados obtenidos en la presente investigación (intensidades de lluvia crítica), fueron integrados al sistema de monitoreo de lluvias (pluviógrafo) instalado en la comunidad por PADF, logrando adaptar los resultados a los niveles de alerta previamente establecidos que caracterizan el sistema SAT. Esto se logró, mediante la vinculación del modelo matemático obtenido en el *software* de tal instrumentación. Es importante indicar que no debe confundirse el sistema operativo de la instrumentación (pluviógrafo), con la forma de operar del sistema de alerta temprana (SAT).

4.2.1. Pluviógrafo

Para medir la cantidad de lluvia que cae en la comunidad, se instaló un pluviógrafo de diseño creado por PADF, consistente en un recipiente recolector de abertura superior con área conocida y por donde ingresa el agua, de manera tal que se conduzca a través de un embudo a un recipiente inferior en donde el agua será medida en cantidad (milímetros llovidos) y tiempo de duración de lluvia (figura 24). El pluviógrafo se construyó con las siguientes características:

- Capacidad: 13,25 litros
- Longitud del vaso superior; 20 cm
- Longitud del vaso inferior; 27 cm
- Superficie de recepción; 415 cm²
- Diámetro de la boca de recepción; 23 cm
- Material del vaso inferior: acero inoxidable
- Material del vaso superior: aluzinc
- Medición hídrica: automática mediante sensor ultrasónico de nivel

Figura 24. **Pluviógrafo instalado en la comunidad**



Fuente: elaboración propia.

Dentro del vaso inferior del pluviógrafo se instaló un sensor ultrasónico que desde la parte superior mide el nivel del agua recolectada sin necesidad de tener contacto directo, es decir a través del envío de un pulso de 40 kHz de frecuencia que rebota sobre la superficie del agua y regresa al sensor, permitiendo medir de forma precisa el tiempo de recepción para calcular de esta forma la distancia. Para este proyecto utilizaremos períodos no mayores a 15 minutos entre mediciones. Luego esta información es enviada a un microcontrolador encargado de recibir los datos, procesarlos.

4.2.2. Sistema de medición del pluviógrafo

Consiste en una plataforma informática alojada en un servidor para el monitoreo y análisis en tiempo real de los milímetros llovidos, mediante un módulo denominado microcontrolador. Este módulo tiene las funciones principales de: a) recibir la información que proviene del sensor ultrasónico dentro del pluviógrafo, b) realizar cálculos internos para el procesamiento de la información, c) enviar información periódica hacia un servidor, d) enviar notificaciones en caso de alerta. Dicho microcontrolador consiste en una tarjeta electrónica que posee un procesador con alta capacidad de manejo de entradas y salidas analógicas y digitales, así como interfaces de comunicación hacia otros dispositivos. En el *software* de este módulo, se integró el modelo matemático obtenido.

4.2.3. Envío de notificaciones

Para el envío de datos hacia el servidor y realizar notificaciones, el microcontrolador se conecta a un módulo adicional que tiene la capacidad de conectarse a la red celular de telefonía móvil para hacer uso del servicio denominado GPRS (*General Packet Radio Service*) que es un servicio que permite establecer una conexión de datos en este caso hacia un servidor para el registro de la información hídrica obtenida.

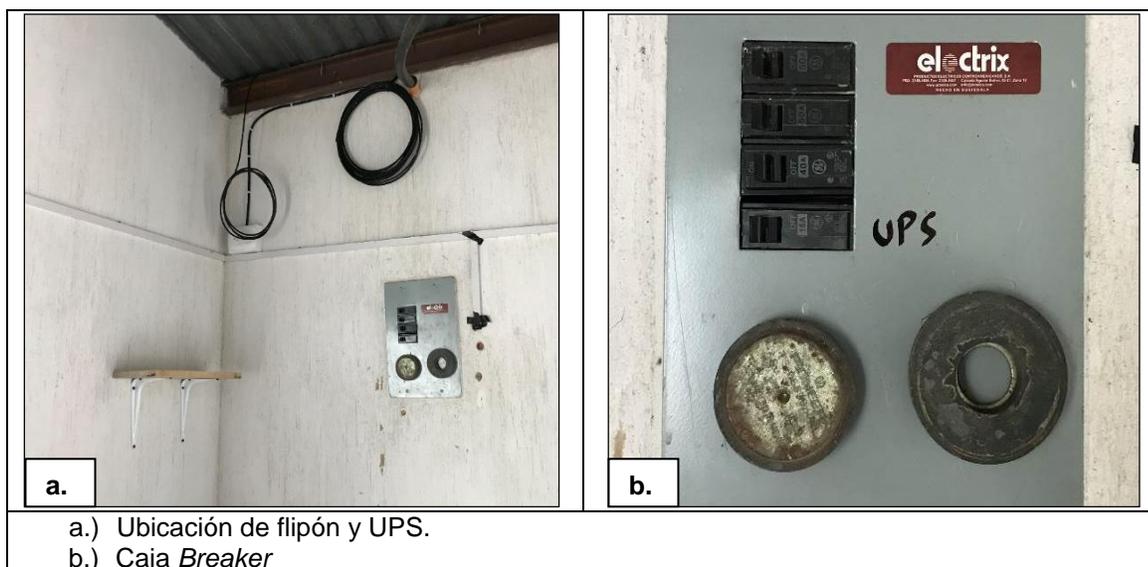
Adicionalmente este módulo de comunicación también es compatible con el servicio GSM (*Global System for Mobile*) que permite el envío de notificaciones a través de mensajes de texto y llamadas hacia teléfonos móviles. Para esto es necesaria la instalación de un *chip* de telefonía celular en dicho módulo con un servicio prepago o postpago con cualquiera de los operadores móviles disponibles en Guatemala.

4.2.4. Instalación de la instrumentación de monitoreo

El diseño de este pluviógrafo se desarrolló de manera tal, que pudieran que tuvieran la capacidad de adquisición de datos de forma automática con una interfaz que permitiera su conexión hacia un dispositivo externo de telemetría para el envío de esta información hacia un servidor.

Para la ubicación del dispositivo, se tomó en cuenta: el relieve, dirección y velocidad del viento, obstáculos cercanos como árboles, arbustos, antenas, cableado o incluso, las viviendas mismas en el área (figura 25 y 26). Las recomendaciones de mantenimiento, se girarán a nivel general, de manera tal que cuente con las consideraciones mínimas por parte de los pobladores y de las autoridades municipales.

Figura 25. **Ubicación fuente de energía para abastecimiento del pluviógrafo**



Fuente: elaboración propia.

Figura 26. **Ubicación de pluviógrafo**



Fuente: elaboración propia.

4.2.5. Forma de operación del Sistema de Alerta Temprana (SAT)

Como se puede apreciar, la instrumentación a colocar como parte del monitoreo del SAT, permite la inclusión del modelo matemático encontrado dentro de su sistema, por lo que alcanza las intensidades previamente establecidas, se obtendrá el nivel de alerta requerido. El envío de la notificación será enviado a la comisión de evacuación establecido en el plan local para la reducción de desastres de la aldea El Campanero; mismo que se ha desarrollado con esfuerzo de PADF y la comunidad.

Con los procedimientos establecidos en dicho plan, la etapa operativa de evacuación se echará andar con los elementos logísticos necesarios para la evacuación. El tipo de alerta a utilizar en este caso, se recomienda sea vinculado al color anaranjado que indica que la amenaza o evento esté presente en el lugar, con afectación total o parcial del sector y zonas aledañas. En este nivel la COLRED, vigila de forma permanente y se activan los recursos locales que, en cualquier momento, puede activar el siguiente nivel (rojo) que implica la evacuación inmediata.

Las intensidades críticas de lluvia obtenidas, podría definirse en el color rojo, si así lo considera el coordinador de la comisión de evacuación. Se ha recomendado asociarlo a nivel de alerta color naranja, tomando en cuenta la falta de datos de lluvia puntuales (estación local) que permitieron generar el modelo matemático.

Una vez se sobrepase cualquiera de estos límites, el microcontrolador a través del módulo de comunicaciones envía notificaciones a través de mensajes cortos y llamadas a los distintos usuarios declarados dentro del programa a través de su número telefónico. El envío de la notificación será enviado a la comisión de evacuación establecido en el plan local para la reducción de desastres de la aldea El Campanero. Con los procedimientos establecidos en dicho plan, la etapa operativa de evacuación se echará andar con los elementos logísticos necesarios para la evacuación.

CONCLUSIONES

1. De las ocho intensidades determinadas en el rango de dos horas y definidas para un mismo nivel de alerta, se considera que las que ocurren entre 15 y 30 minutos correspondientes a las que tienen alta probabilidad de que ocurran en el sector. Estos son parámetros probabilísticos de ocurrencia de escorrentía superficial sobre la ladera, que pueden conllevar a la afectación por erosión; por lo que no son considerados como elementos de predicción de movimientos de laderas o remoción en masa.
2. El grado de confiabilidad del modelo matemático propuesto, radica en el factor de ajuste; ya que consideró las características intrínsecas del sitio. Si la tasa de infiltración del suelo fuese menor, la erosión fuera mayor a menor intensidad de lluvia. Si bien, se considera que las intensidades de 17,16 y 15,24 mm/h en los primeros 15 y 30 min, respectivamente, no están sobrevalorados, contar con datos más precisos de precipitación local conllevaría a parámetros con mayor exactitud.
3. El nivel de alerta atribuido a las intensidades obtenidas, se definió bajo la premisa de que la mayor afectación por erosión en el sitio, se presenta durante lluvias de gran intensidad y corta duración; mientras que en lluvias de larga duración y poca intensidad, generan escorrentía superficial, mas no afectación por erosión potencial. Por lo que no debe esperarse alerta para mediciones significativas de lluvia en largos periodos.

4. La mayor afectación en el área, corresponde a escorrentía superficial (bajadas potenciales de agua) debida a la poca permeabilidad que el suelo contiene. La erosión se torna significativa debido a la particularidad del suelo de gran susceptibilidad a ser erosionado.
5. Durante el desarrollo de la investigación, se identificó que los procesos de remoción de masa en el sector, no se dará de forma repentina o súbita; sino es una problemática que se agrava con el paso del tiempo (deposición de material en la parta baja). Por tanto, las intensidades de lluvia crítica, no evidenciará el momento de detonación de un evento puntual que pueda generarse en el lugar.
6. La afectación por erosión en el sitio, podrá corregirse mediante la conformación de obras de captación de agua superficial tales como drenajes, zanjas de sedimentación, disipadores de energía, etc.

RECOMENDACIONES

1. Al área técnica municipal de Mixco, mejorar el valor de intensidades de lluvia, mediante la consideración de estaciones meteorológica que registre las precipitaciones locales del sector. Lo anterior debido a la limitante de datos con los que se contó para el desarrollo metodológico de la presente. Se espera que con la implementación del pluviógrafo automático desarrollado por PDAF, se generen datos que permitan ajustar las intensidades ya establecidas.
2. El área técnica de la Municipalidad de Mixco, podrá mejorar la confiabilidad de las intensidades críticas de lluvia, realizando mayor muestreo en el área para la realización de ensayos de laboratorio que permitan obtener los índices de permeabilidad del suelo. Esto permitirá entender comportamiento del agua en el suelo, de una forma más homogénea de todo el sector. Debido a que la problemática está asociada a afectación superficial del suelo, podrá considerarse prácticas *in situ* para la obtención de la capacidad de permeabilidad del suelo.
3. El área técnica municipal, podrá utilizar los datos que registre el pluviógrafo instalado por PADF en la comunidad, para diseñar obras de captación y conducción de agua superficial, como parte de la atenuación de la problemática a la que está expuesta la comunidad.

4. Como parte de la continuidad del desarrollo del Sistema de Alerta Temprana (SAT) ante riesgo por remoción de masa implementado en la comunidad El Campanero, las autoridades municipales podrán concientizar a los pobladores respecto a la vulnerabilidad actual a la que está expuesta, mediante el involucramiento de los comunitarios en actividades de monitoreo de datos registrados por el pluviógrafo. Esto permitirá además fortalecer la preparación a emergencias.

5. El lector, podrá utilizar la metodología desarrollada en esta investigación para proyectos de similares características, siempre que considere un enfoque de medición indirecta de prevención y no de predicción de deslizamientos; ya que los datos que se obtienen, no representan el tiempo exacto en el que una eventualidad de remoción de masa, puede suscitarse.

BIBLIOGRAFÍA

1. Agencia de Cooperación Internacional del Japón. *La vulnerabilidad asociada a los desastres, un marco conceptual para Guatemala*. Guatemala: JICA, 2013. 26 p.
2. ALCÁNTARA, Irasema, et al. *Inestabilidad de laderas*. México: CENAPRED, 2001. 35 p.
3. BAKER, Jonathan. *Inventario y caracterización de los sistemas de alerta temprana para Guatemala*. Costa Rica: UNESCO, 2012. 54 p.
4. BARILLAS, Manolo. *Estudio hidrogeológico para la implementación de un sistema de monitoreo y alerta ante deslizamientos en asentamientos urbanos del departamento de Guatemala, Centroamérica*. Guatemala: Geopetrol S.A., 2007. 83 p.
5. BARILLAS, Manolo. *Validación del sistema de monitoreo de lluvias y alertamiento ante deslizamientos de la zona metropolitana de Guatemala*. Guatemala: Geopetrol S.A., 2009. 26 p.
6. CAINE, Nel. *The rainfall intensity-duration control of shallow landslides and debris flows*. Colorado: Institute of Arctic and Alpine Research, 1980. p 62.

7. CAMPBELL, Russell. *Soil slips, debris flows and rainstorms in the Santa Monica Mountains and vicinity, Southern California*. Washington: USGS, 1975. 851 p.
8. CEPEDA, José y MEDINA, Zenón. *Clasificación probabilista de umbrales de lluvia para predecir deslizamientos de tierra*. Estados Unidos: Encuentro Latino de Profesores de Geotecnia, 2011. 77 p.
9. CHUCK, Connor y SHERIDAN, Michael. *Evaluación de deslaves, del 05 de octubre de 2005 en Panabaj, Santiago Atitlán, Sololá*. Guatemala: OXFAM GB, 2006. 45 p.
10. Coordinadora Nacional para la Reducción de Desastres. *Caracterización de los flujos de lodo y escombros que afectaron la cabecera municipal de Santiago Atitlán, Sololá, en octubre de 2005*. Guatemala: CONRED, 2006. 50 p.
11. Coordinadora Nacional para la Reducción de Desastres. *Sistemas de alerta temprana, conceptos básicos*. Guatemala: CONRED 2014. 33 p.
12. CORNEJO, Carmen. *Análisis de la distribución temporal de las precipitaciones en la región del Maule*. Tesis licenciatura inédita, Universidad de Talca, 2011. 74 p.
13. CRUDEN, David Milne y VARNES, David Joseph. *Landslide Types and Processes*. Estados Unidos: Transportation Research Board National Academy of Sciences, 1996. 247 p.

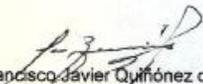
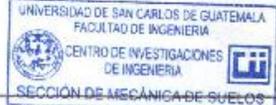
14. DAS, Braja M. *Principios de ingeniería de cimentaciones*. 4a ed. México: Thomson, 2006. 855 p.
15. ECHEVERRI, Leyder y OBANDO, Franco. *Erosividad de las lluvias en la región centro-sur del departamento de Caldas*. Colombia: RFNA, 2010. 12 p.
16. Estrategia Internacional para la Reducción de Desastres. *Tercera conferencia internacional sobre alerta temprana*. Alemania: ISDR, 2006. 10 p.
17. Estrategia Internacional para la Reducción de Desastres. *Terminología sobre reducción del riesgo a desastres*. Suiza: ISDR, 2009. 70 p.
18. GALICIA, Otto y REQUENA, Jiménez. *Determinación de la Amenaza por deslizamientos en las cuencas hidrográficas Coyolate, Madre Vieja, Nahualate y Suchiate, Guatemala*. Guatemala: USAC, Facultad de Ingeniería, 2009. 70 p.
19. Geólogos del Mundo. *Guía metodológica para la elaboración de mapas de susceptibilidad a movimientos de ladera en la cuenca del lago Atitlán, Guatemala*. Guatemala: Garicla, 2011. 62 p.
20. GÓMEZ, Isidro y VÉLEZ, María. *Predicción de las fluctuaciones de niveles freáticos a partir de precipitaciones y su influencia en la estabilidad del talud de la meseta de Bucaramanga*. Medellín: Sociedad Colombiana de Geología, 1990. 80 p.

21. GONZÁLEZ, Alberto, et al. *A methodological approach for the analysis of the temporal occurrence and triggering factors of landslides*. Cantabrian: Elsevier, 2002. p .95-113.
22. GRACIANO, Sandra. *Estimación de umbrales de lluvia detonante de deslizamientos en las microcuencas de los corregimientos de Villa Restrepo y juntas de la cuenca Combeima Ibagué, Tolima*. Tesis magister inédita, Universidad del Tolima, Colombia, 2015. 41 p.
23. GUINAU, Marta. *Metodologías para la evaluación de la susceptibilidad a los deslizamientos basadas en el análisis SIG*. Tesis doctoral inédita, Universidad de Barcelona, España, 2007. 122 p.
24. HERNÁNDEZ, Juan. *Características físicas y propiedades mecánicas de los suelos y sus métodos de medición*. Tesis de licenciatura inédita, Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala, 2008. 466 p.
25. HORTON, Robert. *The role of infiltration in the hydrologic cycle*. New York: Transactions American Geophysical Union, 1933. p. 446-460.
26. HUNGR, Oldrich, et al. *A Review of the Classification of Landslides of the Flow Type*. Canada: The Geological Society of America, 2001. p. 221-238.
27. MUÑOZ, Angélica. *Inestabilidad de laderas, mapas de amenazas, recomendaciones técnicas para su elaboración*. Nicaragua: INETER-COSUDE, 2005. 88 p.

28. OLIVA, Juan. *Umbral de precipitación para la estimación de alerta de deslizamientos en la ruta CA-1 Occidente tramo kilómetro 160 al 180*. Informe inédito, CEDESYD, Universidad de San Carlos de Guatemala, 2014. 11 p.
29. Pan American Development Foundation. *Plan local de respuesta aldea El Campanero, zona 8 de Mixco*. Informe inédito, PDAF Guatemala, 2017. 47 p.
30. PAZ, Cristina y TORRES, Adriana. *Precipitación y su influencia sobre algunos deslizamientos ocurridos en las laderas del Valle de Aburrá*. Tesis licenciatura inédita, Universidad Nacional de Colombia, 1989. 174 p.
31. REGOYOS, Marta. *Metodología para la evaluación de la erosión hídrica con modelos informáticos; aplicación del modelo Geowepp a dos pequeñas cuencas en Madrid*. Tesis licenciatura inédita, Universidad Politécnica de Madrid, España, 2003. 409 p.
32. SUAREZ, Jaime. *Deslizamientos y estabilidad de taludes en zonas tropicales*. Colombia: Instituto de Investigaciones sobre Erosión y Deslizamientos, 1998. 540 p.
33. VELASCO, Inmaculada y CORTÉS, Gely. *Índice de Fournier modificado y de concentración de la precipitación, como estimadores del factor de riesgo de la erosión*. Sinaloa: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, 2007. 434 p.

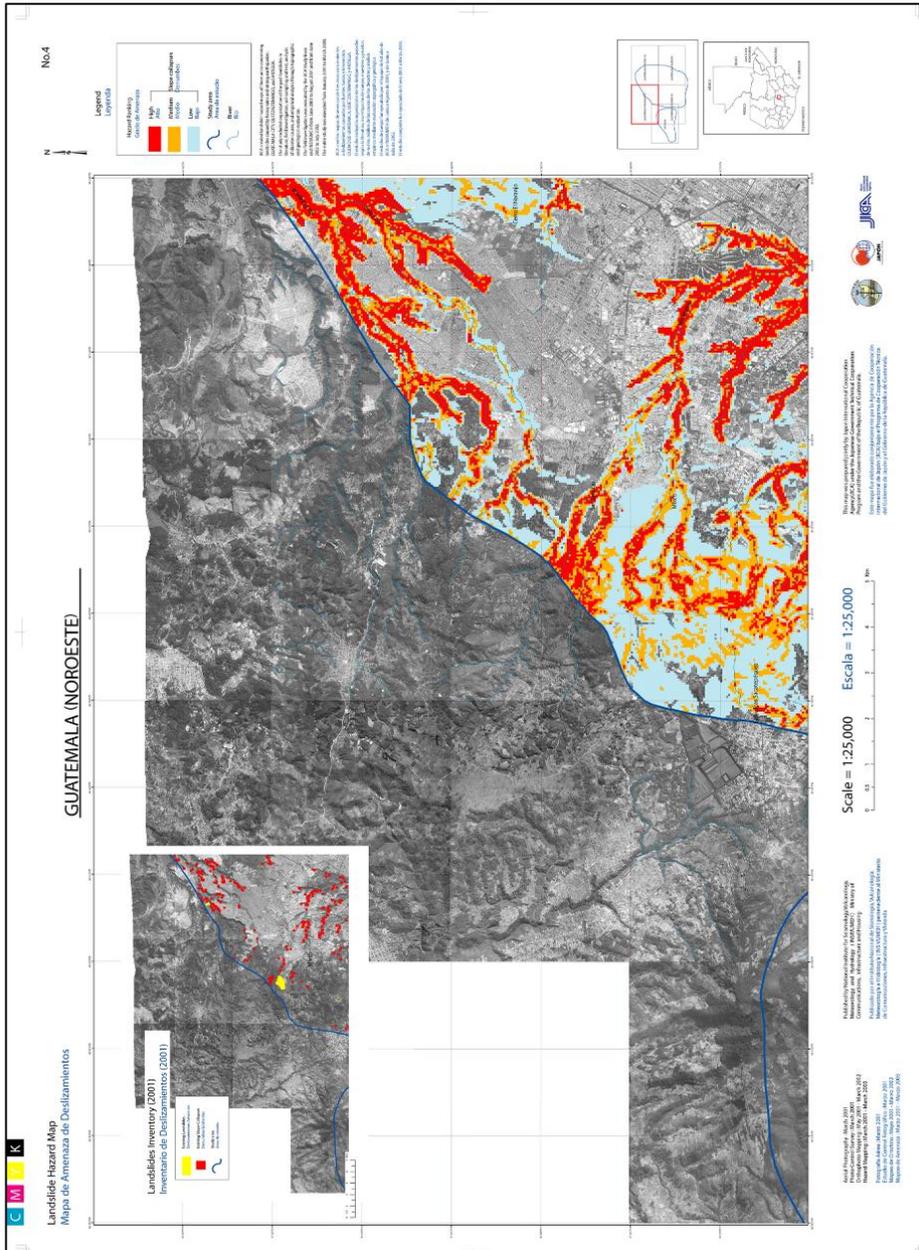
ANEXOS

Anexo 1. Ensayo de permeabilidad del suelo, método cabeza variable.

	CENTRO DE INVESTIGACIONES DE INGENIERIA FACULTAD DE INGENIERIA UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA	
<hr/>		
INFORME No.: 288 S.S.	O.T. No.: 38,781	No. 13459
INTERESADO:	Nelson Abraham Ramírez López	
PROYECTO:	Trabajo de Graduación "Estimación de intensidad de lluvia, para el desarrollo de un sistema de alerta temprana ante riesgo por remoción de masa, en un sector de la comunidad el campanero en la zona 8 de mixco"	
ASUNTO:	Ensayo de Permeabilidad Cabeza Variable por el método de molde de pared rígida	
NORMA:	ASTM D 5856-00	
UBICACIÓN:	Comunidad El Campanero, zona 8 de Mixco	
MUESTRA No.:	1	
DESCRIPCIÓN DEL SUELO:	Limo con Presencia de Arena Color Café Claro	
FECHA:	martes, 24 de julio de 2018	
<u>RESULTADO DEL ENSAYO:</u>		
COEFICIENTE DE PERMEABILIDAD = 5.984×10^{-7} cm/s		
OBSERVACIONES: Muestra proporcionada por el interesado.		
<p>Atentamente,</p>		
 Ing. Omar Enrique Medrano Méndez Jefe Sección Mecánica de Suelos	Vo. Bo.  Ing. Francisco Javier Quiñones de la Cruz DIRECTOR CII/USAC	
	<hr/>	
FACULTAD DE INGENIERÍA —USAC— Edificio T-6. Ciudad Universitaria zona 12 Teléfono directo: 2418-8115, Planta: 2418-6000 Exts. 86208 y 86221 Fax: 2418-9121 Página web: http://cii.usac.edu.gt		

Fuente: Centro de Investigaciones de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala.

Anexo 2. Mapa de amenaza por deslizamientos (hoja 4, Guatemala Noroeste).



Fuente: Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología y Agencia de Cooperación Internacional del Japón. Programa de cooperación técnica, 2001.

