



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

**CARACTERIZACIÓN DE AMENAZA POR DESLIZAMIENTOS EN EL MUNICIPIO DE  
SENAHÚ, ALTA VERAPAZ, MEDIANTE EL USO DE UN SISTEMA DE INFORMACIÓN  
GEOGRÁFICA**

**Javier Oswaldo Dávila Nuñez**

Asesorado por la Inga. Carla Deyanira Gordillo Barranco de Marchena

Guatemala, noviembre de 2024

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**CARACTERIZACIÓN DE AMENAZA POR DESLIZAMIENTOS EN EL MUNICIPIO DE  
SENAHÚ, ALTA VERAPAZ, MEDIANTE EL USO DE UN SISTEMA DE INFORMACIÓN  
GEOGRÁFICA**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
POR

**JAVIER OSWALDO DÁVILA NUÑEZ**

ASESORADO POR LA INGA. CARLA DEYANIRA GORDILLO BARRANCO DE  
MARCHENA

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

**INGENIERO AMBIENTAL**

GUATEMALA, NOVIEMBRE DE 2024



## **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:

**CARACTERIZACIÓN DE AMENAZA POR DESLIZAMIENTOS EN EL MUNICIPIO DE  
SENAHÚ, ALTA VERAPAZ, MEDIANTE EL USO DE UN SISTEMA DE INFORMACIÓN  
GEOGRÁFICA**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Química, con fecha 13 de julio de 2023.



**Javier Oswaldo Dávila Nuñez**

Guatemala 11 de julio de 2024

Ingeniero  
Williams Guillermo Álvarez Mejía  
DIRECTOR  
Escuela Ingeniería Química  
Presente.

Estimado Ingeniero Álvarez:

Le saludo cordialmente, deseándole éxitos en sus actividades. Por medio de la presente hago constar que he revisado y aprobado el Informe Final en la modalidad TESIS, con seminario de investigación, del trabajo de graduación titulado: "CARACTERIZACIÓN DE AMENAZA POR DESLIZAMIENTOS EN EL MUNICIPIO DE SENAHÚ, ALTA VERAPAZ, MEDIANTE EL USO DE UN SISTEMA DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA", elaborado por el estudiante de la carrera de Ingeniería Ambiental, Javier Oswaldo Dávila Nuñez, quien se identifica con el registro académico 2011 14812 y con el CUI 2093 37737 0101.

Agradeciendo la atención a la presente, me suscribo de usted,

Atentamente,



Ing. Carla Gordillo de Marchena  
GEOLOGO-MINERO  
Colegiado 4992

Carla Deyanira Gordillo Barranco de Marchena  
ASESOR  
Ingeniero geólogo minero  
Colegiado activo no. 4992



Guatemala, 02 de octubre de 2024.  
Ref. EIQ.TG-IF.013.2024.

Ingeniero  
Williams Guillermo Álvarez Mejía  
DIRECTOR  
Escuela de Ingeniería Química  
Facultad de Ingeniería

Estimado Ingeniero Álvarez:

Como consta en el registro de evaluación, correlativo **009-2023**, le informo que reunidos los Miembros de la Terna nombrada por la Escuela de Ingeniería Química, se practicó la revisión del:

### INFORME FINAL

Solicitado por el estudiante universitario: **Javier Oswaldo Davila Nuñez**.  
Identificado con número de carné: **2093377370101**.  
Identificado con registro académico: **201114812**.  
Previo a optar al título de la carrera: **Ingeniería Ambiental**.  
En la modalidad de graduación: **TESIS**.  
Con la fase del trabajo: **Informe Final, Seminario de Investigación**.

Siguiendo los procedimientos de revisión interna de la Escuela de Ingeniería Química, los Miembros de la Terna han procedido a **APROBARLO** con el siguiente título:

### **CARACTERIZACIÓN DE AMENAZA POR DESLIZAMIENTOS EN EL MUNICIPIO DE SENAHÚ, ALTA VERAPAZ, MEDIANTE EL USO DE UN SISTEMA DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA**

El Trabajo de Graduación ha sido asesorado por:

**Carla Deyanira Gordillo Barranco de Marchena, profesional de la Ingeniería en Geología**

Habiendo encontrado el referido trabajo de graduación **SATISFACTORIO**, se autoriza al estudiante, proceder con los trámites requeridos de acuerdo a las normas y procedimientos establecidos por la Facultad para su autorización e impresión.

“ID Y ENSEÑAD A TODOS”

Walter Arnoldo Bardales Espinoza  
profesional de la Ingeniería Agronómica  
COORDINADOR DE TERNAS  
Tribunal de Revisión  
Trabajo de Graduación

M.Sc. Ing. Walter Arnoldo Bardales Espinoza  
Maestro en Recursos Hidráulicos Opción Hidrología  
Ingeniero Agrónomo  
Colegiado 4279

C.c.: archivo



SIST.LNG.DIRECTOR.22.EIQ.2024

El Director de la Escuela de Ingeniería Química de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del Asesor, el visto bueno del Coordinador de Área y aprobación del área de lingüística del trabajo de graduación titulado: **CARACTERIZACIÓN DE AMENAZA POR DESLIZAMIENTOS EN EL MUNICIPIO DE SENAHÚ, ALTA VERAPAZ, MEDIANTE EL USO DE UN SISTEMA DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA**, presentado por: **Javier Oswaldo Davila Nuñez**, procedo con el Aval del mismo, ya que cumple con los requisitos normados por la Facultad de Ingeniería.

“Id y Enseñad a Todos”

Ingeniero Williams Guillermo Alvarez Mejia  
DIRECTOR  
Escuela de Ingeniería Química

Guatemala, octubre de 2024



ACAAI

Agencia Centroamericana de Acreditación de  
Programas de Arquitectura e Ingeniería





**USAC**  
TRICENTENARIA  
Universidad de San Carlos de Guatemala

Decanato  
Facultad e Ingeniería

24189101- 24189102

LNG.DECANATO.OIE.771.2024

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 Química, al Trabajo de Graduación titulado: **CARACTERIZACIÓN DE AMENAZA POR DESLIZAMIENTOS EN EL MUNICIPIO DE SENAHÚ, ALTA VERAPAZ, MEDIANTE EL USO DE UN SISTEMA DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA**, presentado por: **Javier Oswaldo Davila Nuñez** después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:

Ing. José Francisco Gómez Rivera  
Decano a.i.



Guatemala, noviembre de 2024

Para verificar validez de documento ingrese a <https://www.ingenieria.usac.edu.gt/firma-electronica/consultar-documento>

Tipo de documento: Correlativo para orden de impresión Año: 2024 Correlativo: 771 CUI: 2093377370101

Escuelas: Ingeniería Civil, Ingeniería Mecánica Industrial, Ingeniería Química, Ingeniería Mecánica Eléctrica, - Escuela de Ciencias, Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos (ERIS). Postgrado Maestría en Sistemas Mención Ingeniería Vial. Carreras: Ingeniería Mecánica, Ingeniería Electrónica, Ingeniería en Ciencias y Sistemas. Licenciatura en Matemática. Licenciatura en Física. Centro de Estudios Superiores de Energía y Minas (CESEM). Guatemala, Ciudad

## **ACTO QUE DEDICO A:**

<b>Mis padres</b>	Norma Nuñez y Cesar Davila, por su apoyo, cuidado y amor incondicional.
<b>Mis abuelas</b>	Clara Luz y María Piedad, por su dedicación, cuidados, consejos y amor (q. e. p. d.).
<b>Mis hermanos</b>	Cesar y Jennifer Dávila, por su compañía, amistad y complicidad
<b>Mi esposa</b>	Lizzy Crisóstomo, por su amor, soporte y ejemplo.
<b>Mi hijo</b>	Adrián Dávila Crisóstomo, por inspirarme a ser mejor cada día.
<b>Mis compañeros</b>	A cada uno por nombre, por su apoyo y cada momento vivido en esta carrera.
<b>Mis formadores</b>	Por sus enseñanzas y aporte a mi crecimiento académico y personal.

## **AGRADECIMIENTOS A:**

<b>Mi madre</b>	Por su incondicional apoyo en mis estudios superiores
<b>Universidad de San Carlos de Guatemala</b>	Por ser mi casa de estudios y fuente de conocimientos.
<b>Facultad de ingeniería</b>	Por brindarme las herramientas y medios necesarios para mi formación profesional.
<b>Mi asesora</b>	Inga. Carla Deyanira Gordillo Barranco de Marchena, por ser una guía y apoyo en esta investigación.

## ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES .....	V
LISTA DE SÍMBOLOS .....	IX
GLOSARIO .....	XI
RESUMEN.....	XIII
OBJETIVOS.....	XV
HIPÓTESIS.....	XVII
INTRODUCCIÓN .....	XIX
1. ANTECEDENTES .....	1
1.1. Justificación .....	3
1.2. Determinación del problema.....	5
1.2.1. Definición .....	5
1.2.2. Delimitación temática.....	6
1.2.3. Delimitación espacial .....	6
1.2.4. Delimitación del universo .....	7
2. MARCO TEÓRICO.....	9
2.1. Senahú, Alta Verapaz.....	9
2.1.1. Historia .....	9
2.1.2. Ubicación .....	10
2.1.3. Territorio .....	11
2.1.4. Clima .....	11
2.1.5. Fisiografía.....	11
2.2. Medio ambiente .....	11
2.2.1. Fenómeno natural.....	12

2.2.2.	Amenaza .....	12
2.2.3.	Vulnerabilidad.....	13
2.2.4.	Riesgo .....	13
2.2.5.	Cambio Climático y desastres naturales .....	14
2.3.	Deslizamientos .....	15
2.3.1.	Clasificación de deslizamientos.....	17
2.3.1.1.	Derribo.....	18
2.3.1.2.	Desprendimientos de roca.....	19
2.3.1.3.	Derrumbe rotacional .....	20
2.3.1.4.	Deslizamiento de traslación.....	21
2.3.1.5.	Corriente de escombros o tierra .....	22
2.4.	Sistemas de información geográfica .....	23
2.4.1.	Historia .....	24
2.4.2.	QGIS .....	25
3.	METODOLOGÍA .....	27
3.1.	Variables .....	27
3.1.1.	Variables independientes .....	27
3.1.2.	Variable dependiente .....	27
3.2.	Delimitación del campo de estudio.....	27
3.3.	Recursos humanos disponibles .....	28
3.4.	Recursos materiales disponibles.....	28
3.4.1.	Recursos físicos .....	28
3.4.2.	Recursos digitales .....	28
3.5.	Técnica cualitativa.....	29
3.6.	Recolección y ordenamiento de la información.....	30
3.6.1.	Amenaza por deslizamiento .....	30
3.7.	Tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información.....	31

3.7.1.	Tabulación de la información .....	32
3.7.2.	Ordenamiento de la información .....	32
3.7.3.	Procesamiento de la información.....	32
3.7.3.1.	Procesamiento de datos de pendiente .....	32
3.7.3.2.	Procesamiento de datos de geología ..	34
3.7.3.3.	Procesamiento de datos de uso de suelo .....	35
3.7.3.4.	Procesamiento de datos de precipitación. pluvial .....	36
3.7.3.5.	Procesamiento de datos para sismicidad .....	38
3.7.3.6.	Procesamiento de datos de distancia población a falla.....	40
3.7.3.7.	Procesamiento final de las capas con su respectiva ponderación AHP.....	42
3.8.	Análisis estadístico .....	44
3.8.1.	Matriz de comparaciones pareadas.....	44
3.8.2.	Análisis de consistencia.....	46
4.	RESULTADOS .....	49
5.	INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS.....	61
	CONCLUSIONES .....	63
	RECOMENDACIONES.....	65
	REFERENCIAS .....	67
	APÉNDICES .....	71



## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

### FIGURAS

<b>Figura 1.</b>	Proyección 3D del municipio Senahú .....	7
<b>Figura 2.</b>	Ubicación de Senahú.....	10
<b>Figura 3.</b>	Calentamiento acelerado.....	15
<b>Figura 4.</b>	Talud natural y artificial .....	16
<b>Figura 5.</b>	Tipos de deslizamiento según el material.....	17
<b>Figura 6.</b>	Ejemplo de un derribo.....	18
<b>Figura 7.</b>	Ejemplo de desprendimiento de rocas.....	19
<b>Figura 8.</b>	Esquema de derrumbe rotacional.....	20
<b>Figura 9.</b>	Ejemplo de deslizamiento de traslación, el Cambray II .....	21
<b>Figura 10.</b>	Derrumbe tipo corriente de tierra en Senahú.....	23
<b>Figura 11.</b>	Pantalla de proceso de pendientes con su script.....	33
<b>Figura 12.</b>	Capa de pendientes con su ponderación asignada .....	33
<b>Figura 13.</b>	Geología de Senahú con su ponderación asignada .....	34
<b>Figura 14.</b>	Uso de suelo de Senahú con su ponderación asignada.....	35
<b>Figura 15.</b>	Estaciones meteorológicas usadas para precipitación pluvial .....	36
<b>Figura 16.</b>	Proceso de interpolación de precipitación pluvial IDW con su <i>script</i> .....	37
<b>Figura 17.</b>	Capa poligonizada de la interpolación IDW de los datos de precipitación pluvial .....	37
<b>Figura 18.</b>	Capa de sismos ocurridos con influencia en el territorio de Senahú .....	38
<b>Figura 19.</b>	Proceso de interpolación de precipitación pluvial IDW con su script .....	39

<b>Figura 20.</b>	Capa poligonizada de la interpolación IDW de los datos de magnitud sísmica.....	39
<b>Figura 21.</b>	Aplicación del proceso centroides para el cálculo de la distancia población-falla. ....	40
<b>Figura 22.</b>	Aplicación del proceso distancia al eje más próximo entre poblados y la falla.....	41
<b>Figura 23.</b>	Proceso de interpolación de distancia población-falla IDW con su script.....	41
<b>Figura 24.</b>	Capa poligonizada de la interpolación de distancia población-falla.....	42
<b>Figura 25.</b>	Asignación de condicionales. ....	43
<b>Figura 26.</b>	Operación de las prioridades generales (R1) e individuales (W1).....	44
<b>Figura 27.</b>	Mapa de la zonificación del nivel de amenaza por deslizamientos. ....	60

## TABLAS

<b>Tabla 1.</b>	Ponderación de la variable .....	30
<b>Tabla 2.</b>	Matriz de comparaciones pareadas de las variables en estudio ..	49
<b>Tabla 3.</b>	Matriz de comparaciones pareadas normalizada y prioridades de las seis variables del estudio .....	50
<b>Tabla 4.</b>	Análisis de consistencia para las seis variables del estudio .....	50
<b>Tabla 5.</b>	Matriz de comparaciones pareadas de la variable pendiente en grados .....	51
<b>Tabla 6.</b>	Matriz de comparaciones pareadas normalizada y prioridades de la variable pendiente .....	51
<b>Tabla 7.</b>	Análisis de consistencia para la variable pendiente .....	52
<b>Tabla 8.</b>	Matriz de comparaciones pareadas de la variable geología.....	52

<b>Tabla 9.</b>	Matriz de comparaciones pareadas normalizada y prioridades la variable geología.....	53
<b>Tabla 10.</b>	Análisis de consistencia para la variable geología.....	53
<b>Tabla 11.</b>	Matriz de comparaciones pareadas de la variable uso de suelo .....	54
<b>Tabla 12.</b>	Matriz de comparaciones pareadas normalizada y prioridades la variable uso de suelo .....	54
<b>Tabla 13.</b>	Análisis de consistencia para la variable uso de suelo .....	55
<b>Tabla 14.</b>	Matriz de comparaciones pareadas de la variable precipitación pluvial.....	55
<b>Tabla 15.</b>	Matriz de comparaciones pareadas normalizada y prioridades ...	56
<b>Tabla 16.</b>	Análisis de consistencia para la variable precipitación pluvial .....	56
<b>Tabla 17.</b>	Matriz de comparaciones pareadas de la variable sismicidad .....	57
<b>Tabla 18.</b>	Matriz de comparaciones pareadas normalizada y prioridades de la variable sismicidad.....	57
<b>Tabla 19.</b>	Análisis de consistencia para la variable sismicidad.....	58
<b>Tabla 20.</b>	Matriz de comparaciones pareadas de la variable distancia población-falla.. .....	58
<b>Tabla 21.</b>	Matriz de comparaciones.....	59
<b>Tabla 22.</b>	Análisis de consistencia para la variable distancia población- falla .....	59



## LISTA DE SÍMBOLOS

<b>Símbolo</b>	<b>Significado</b>
<b>°C</b>	Grado Celsius
<b>Km<sup>2</sup></b>	Kilómetro cuadrado
<b>m.s.n.m</b>	Metros sobre el nivel del mar
<b>mm</b>	Milímetro
<b>3D</b>	Tres dimensiones



## GLOSARIO

<b>AHP</b>	Proceso de análisis jerárquico ( <i>Analytic Hierarchy Process</i> ) proceso desarrollado por Thomas L. Saaty para resolver problemas complejos de criterios múltiples.
<b>CONRED</b>	Coordinadora nacional para la reducción de desastres
<b>Deslizamiento</b>	Corrimiento o movimiento en la masa de la tierra
<b>GPL</b>	General Public License. Licencia de derecho de autor, garantiza a los usuarios finales la libertad de usar, estudiar, compartir y modificar el <i>software</i>
<b>INFORM</b>	Index for Risk Management. Evaluación de riesgo de fuente abierta global para crisis humanitarias y desastres
<b>Ráster</b>	Estructura o fichero de datos que representa una rejilla rectangular de <i>píxeles</i>
<b>Shape</b>	Archivo principal que almacena la información geométrica de los elementos de la capa en formato vectorial.
<b>SIG</b>	Sistema de información geográfica.

**UNICEF**

El Fondo de las Naciones Unidas para la Infancia.

**UNISDR**

La Oficina de las Naciones Unidas para Reducción de  
Riesgo de Desastres.

## **RESUMEN**

El deterioro medioambiental está considerado como uno de los principales problemas actualmente para la seguridad humana, aunado a las amenazas y las condiciones de vida de una sociedad, representan un factor a considerar para prevenir desastres naturales.

El municipio de Senahú, Alta Verapaz ha sido afectado grandemente por deslizamientos debido a su variada fisiografía, cercanía a la falla Chixoy-Polochic y altos índices de pobreza. Por lo anterior se tiene planificado analizar las características fisiográficas, geológicas y meteorológicas en capas de información geográfica existentes para el municipio. A estas se les asignaran ponderaciones y se clasificaran según su prioridad y aporte al nivel de amenaza por medio del sistema de información geográfica QGIS se categorizarán las áreas según su valor de amenaza por deslizamientos.



## **OBJETIVOS**

### **General**

Construir la zonificación ambiental del municipio de Senahú, Alta Verapaz, clasificándolo por susceptibilidad a amenazas de deslizamiento

### **Específicos**

1. Procesar estadísticamente las variables físicas y ambientales del municipio de Senahú.
2. Zonificar la amenaza a deslizamientos.
3. Elaborar el mapa de valor de amenaza por deslizamientos del municipio de Senahú, Alta Verapaz.



## HIPÓTESIS

Las características geomorfológicas, medioambientales y geológicas de Senahú, así como los factores desencadenantes hidrometeorológicos y sísmicos permiten construir una zonificación ambiental de desastres mediante un sistema de información geográfica.

- Hipótesis nula

No es posible construir la zonificación ambiental de las zonas susceptibles a amenazas de deslizamiento e inundación conociendo sus características y los factores detonantes

- Hipótesis alternativa

Es posible construir la zonificación ambiental de las zonas susceptibles a amenazas de deslizamiento e inundación conociendo sus características y los factores detonantes



## INTRODUCCIÓN

Las amenazas se conocen como un proceso, fenómeno o actividad que tiene la capacidad de causar un impacto negativo en una comunidad, pérdidas económicas y humanas y están asociadas a una condición natural o antropogénica (ONU, 2016).

Estas pueden tener distintos impactos según su magnitud, temporalidad, recurrencia y relación con las sociedades. Es muy común por ejemplo que las poblaciones se asienten a orillas de un río, para aprovechar el recurso hídrico o a las faldas de un volcán o montaña, para aprovechar el recurso edáfico; al mismo tiempo esto representa un mayor nivel de exposición a la amenaza y por ende un mayor riesgo. Dichas amenazas se acrecientan por distintos factores como la pobreza, desigualdad social, carencia de planificación y reducción de riesgos y el cambio climático acelerado (Cremen, Galasso & McCloskey, 2022).

Guatemala es un país el cual sus características fisiográficas y geotectónicas le hacen propenso a la ocurrencia de fenómenos naturales y el municipio de Senahú está considerado de alto riesgo debido a las amenazas que se encuentran en sus alrededores (Barillas, 2022).

Ya ha sido afectado en numerosas ocasiones, especialmente por deslizamientos. La falta de prevención, la pobreza y el abandono institucional de las autoridades ha provocado que estos eventos afecten la movilidad, destruyan bienes materiales, medios de producción y cobren múltiples vidas (CONRED, 2010).

El objetivo de este proyecto de investigación consiste en desarrollar mapas de riesgo por amenaza de deslizamiento, con el propósito de generar información técnico-científica de utilidad, proporcionárselos a la comunidad y autoridades municipales para que estén mejor capacitados y educados acerca de las zonas más susceptibles y de las acciones a tomar para evitar futuras tragedias. Se realizará una evaluación de la información geográfica reciente para obtener la mayor precisión en los datos. Se utilizará información de pendiente, geología, uso de suelo, precipitación pluvial, distancia población-fallas y sismicidad para clasificarlas y asignarles una ponderación basada en la importancia relativa de cada factor en los deslizamientos y combinar estas capas para obtener un mapa que indique el nivel de riesgo del municipio, y se enfocará principalmente en las zonas con alto y muy alto riesgo por deslizamientos.

## 1. ANTECEDENTES

Estudios existentes relacionados a la temática de los riesgos y su relación con los desastres en el territorio nacional, como INFORM Guatemala, que es un índice que valora el nivel de riesgo de desastres y crisis humanitarias de sus 340 municipios; catalogan al municipio de Senahú, Alta Verapaz, como “área de riesgo nivel medio y vulnerabilidad muy alta, integrando y considerando información sobre su exposición a diferentes amenazas, la vulnerabilidad y su capacidad de respuesta” (Campos y Barbero–Barrera, 2021, p.3 33).

Por un lado investigaciones relacionadas a deslizamientos que indican que los primeros registros de deslizamientos y su clasificación como tal, datan del 186 A.C. en china y desde entonces han sido documentados y estudiados y desde aproximadamente 140 años atrás, se han estudiado detallada y ampliamente considerando los factores que los provocan y clasificándolos (Huggel *et. al.*, 2015).

Por otra parte, estudios recientes revelan el impacto de los deslizamientos en las comunidades, infraestructura y medios de vida, ya que estos tienen una alta ocurrencia y ocasionan pérdidas humanas y materiales. Sugieren la necesidad de tomar acciones precautorias y correctivas para mitigar su impacto, como la construcción de mapas de zonificación de amenazas por deslizamiento. Estos estudios concluyeron que la contribución de los sensores remotos y sistemas de información geográfica para la zonificación de amenaza por deslizamientos consiste en la derivación de

múltiples parámetros relacionados a la predisposición de deslizamientos y su interacción con los factores detonantes (Scaioni, Longoni & Melillo, 2014).

En 2016, un estudio realizado por la City University of New York (CUNY) se planteó el mejoramiento de mapas de zonificación de deslizamientos en Guatemala. Utilizaron ortofotos del INSIVUMEH, datos de precipitación de TRMM, un modelo de elevación digital y un inventario de deslizamientos de USGS. Procesaron la información mediante ArcGIS y se concluyó que, en promedio, una pendiente de 35 grados se asoció con deslizamientos de tierra en esta área, pero más del 50 % de los deslizamientos de tierra ocurrieron en pendientes mayores a 25 grados. Por lo que superpusieron las capas ráster de pendiente y el aspecto para identificar las áreas que tenían pendientes superiores a 25 grados y rangos de aspecto entre 76 y 260 grados. El resultado fue una matriz binaria donde 0 representaba condiciones no peligrosas y 1 representaba condiciones peligrosas, también describe que su orografía y alta precipitación están estrechamente vinculados a los deslizamientos ocurridos (Gorohkovich *et. al.*, 2016).

En 2019 Aafaf El Jazouli tuvo por objetivo construir un mapa de amenaza por deslizamiento en Marruecos usando un acercamiento espacial multicriterio basado en un GIS. Se utilizaron ocho factores incluyendo cobertura vegetal, litología, distancia a carreteras, distancia a falla, red de drenaje, elevación, aspecto, y pendiente. Les asignó una ponderación mediante el proceso de análisis jerárquico. El mapa de amenaza por deslizamientos fue obtenido aplicando el método de superposición ponderada y clasificado en cinco niveles de amenaza. Los resultados revelaron que el 30.16 % del área de estudio es de muy bajo riesgo, el 12.66 % de bajo riesgo, el 25.75 % de riesgo moderado, 22.59 % de cobertura de zona de alto riesgo y 9.11 % de muy alto riesgo. Las zonas de muy alta vulnerabilidad a

deslizamientos son más comunes dentro de los valles de los ríos en laderas empinadas (El Jazouli, Barakat & Khellouk, 2019).

### **1.1. Justificación**

Guatemala tiene una ubicación geográfica privilegiada entre el océano pacífico y Atlántico, a su vez reposa sobre las placas tectónicas del Caribe, Norte Americana y de Cocos y colinda con el cinturón de fuego del pacífico. Todas estas características la proveen de riquezas naturales, biodiversidad, topografía muy accidentada y gran variedad de climas. Por otro lado, también la convierten en un territorio con gran cantidad de amenazas naturales y una alta vulnerabilidad en su población. Es por eso por lo que el banco mundial en su reporte del índice mundial de riesgo ubica a Guatemala en el puesto No. 10 a nivel global, considerado territorio de muy alto riesgo (Behlert, Diekjobst & Felgentreff, 2020).

“La incorporación de la temática sobre la gestión de riesgos en Guatemala, ha cobrado auge después de la emergencia de eventos naturales que marcaron la escasa capacidad de respuesta en el país” (Ávila, 2018, p. 77). Esto también fue un motivo para la creación de la Coordinadora Nacional para la Reducción de Desastres (CONRED).

La vulnerabilidad ante las amenazas del país tiene su fundamento en múltiples factores según siendo los más comunes la ausencia de planificación, un elevado índice de pobreza, y principalmente su ubicación geográfica por la cual son comunes sismos, inundaciones, tsunamis ciclones y erupciones volcánicas; a esto se le suma su elevada densidad de población y la pobreza de sus habitantes (Campos y Barbero-Barrera, 2021).

El municipio de Senahú ya ha sufrido duros embates por condiciones climáticas las cuales han originado desastres. Un reportaje de Prensa Libre narra que desde el año 2000 se había advertido que el cerro El Calvario, Senahú era un lugar de riesgo, pero nadie desalojó. El 16 de junio de 2005, las fuertes lluvias provocaron que una ladera de dicho cerro cayera sobre un conjunto de casas de la comunidad, dejando un saldo de 22 muertos, 88 casas destruidas, 40 desaparecidos y 25 heridos.

En otro caso CONRED reporta que el 28 de agosto de se registró un deslizamiento en la aldea Secaquib, Senahú, Alta Verapaz, que dejó como saldo una vivienda destruida, dos personas fallecidas, una persona herida y seis personas damnificadas.

De la similar manera, las inundaciones son una amenaza que está presente en el territorio de Guatemala y están definidas como un exceso de agua mayormente causadas por precipitación, ocurren frecuentemente en la época lluviosa y pueden causar daños devastadores a bienes, medios de producción y vidas humanas (Alimi, Andongma & Ogungbade, 2022).

Aunque no se han registrado inundaciones catastróficas como deslizamientos en el municipio de Senahú ambas amenazas comparten factores desencadenante como la precipitación, uso de suelo y cobertura forestal, por lo que su inclusión en el estudio es relevante.

La ocurrencia de estos desastres y el acceso a los sistemas de información geográfica incentivan cada vez más su uso para el estudio de las amenazas y la mitigación de los daños. Opolot (2013) describe un SIG como “un poderoso conjunto de herramientas que permite la recopilación, almacenamiento, recuperación, análisis y presentación de información

geográficamente referenciada” (p. 1887). Según Torres (2015) “La observación de la tierra y uso de un SIG, se han vuelto una manera de evaluar, con una mayor eficiencia para el análisis, desde una visión global hasta llegar a lo específico” (p. 20).

Con esto en mente, es conveniente el uso de un SIG para limitar y estudiar las amenazas presentes en el municipio de Senahú y conocerlas para proponer planes de mitigación para los desastres que estas puedan causar, minimizando las pérdidas humanas y materiales.

## **1.2. Determinación del problema**

El eje central del problema se enfoca en los deslizamientos de tierra y el uso de los sistemas de información geográfica como herramienta para definir las zonas bajo amenaza utilizando información geográfica, ambiental y demográfica para su cálculo.

### **1.2.1. Definición**

Debido a sus características fisiológicas, climatológicas y geológicas, parte del territorio de Senahú está expuesto a deslizamientos que pueden afectar el municipio con pérdidas materiales y humanas. Históricamente se han registrado múltiples deslizamientos con impactos mayúsculos en la comunidad como pérdidas de hogares completos, destrucción de medios de subsistencia y numerosas pérdidas humanas. Por lo que resulta imperativo contar con herramientas que contribuyan a reconocer estas amenazas y así mitigar su impacto mediante la prevención adecuada.

Actualmente se puede estudiar y caracterizar las áreas que están más expuestas a amenaza mediante la evaluación de distintas variables como la topografía, la actividad sísmica, la geología y la precipitación pluvial y el uso de los sistemas de información geográfica para estudiar estas variables resulta conveniente y eficaz para generar mapas que describan el nivel de la amenaza en el área de estudio (Campos y Barbero–Barrera, 2021).

### **1.2.2. Delimitación temática**

Se implementó un análisis espacial multicriterio mediante el uso de sistemas de información geográfica (SIG) mediante el método analítico jerárquico evaluando parámetros fisiológicos, geológicos y meteorológicos para la creación de un mapa de zonificación de la amenaza por deslizamientos en el municipio de Senahú, Alta Verapaz.

### **1.2.3. Delimitación espacial**

El estudio se realizará en el municipio de Senahú al cual le corresponden las coordenadas geográficas 15°24'59"N 89°49'13"O, Alta Verapaz, Guatemala.

Se aplicará el estudio utilizando el sistema de información geográfica QGIS el cual es un *software* de código abierto licenciado bajo General Public License (GPL). El procesamiento de datos se llevará a cabo en la residencia del tesista debido a las condiciones de salubridad y aprovechando la modalidad de trabajo remoto.

Los datos de las variables climáticas a estudiar se obtendrán del Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología de Guatemala (INSIVUMEH) y del Instituto geográfico Nacional (IGN).

**Figura 1.**

*Proyección 3D del municipio Senahú*



*Nota.* Vista general del municipio en 3D. Elaboración propia, realizado con QGIS 3.26.2

**1.2.4. Delimitación del universo**

Las generalidades del estudio son las características fisiográficas, geológicas y climatológicas del municipio de Senahú y cómo estas interactúan entre sí para representar una amenaza para la población e infraestructura del municipio.



## **2. MARCO TEÓRICO**

### **2.1. Senahú, Alta Verapaz**

Senahú es un municipio del departamento de Alta Verapaz, en la República de Guatemala y que pertenece a la región comercial e industrial conocida como Franja Transversal del Norte. Cuenta con un pueblo, cuarenta y un caseríos y ciento veintisiete comunidades. Su extensión territorial es de 336 Km<sup>2</sup>.

#### **2.1.1. Historia**

Según narra la breve reseña histórica publicada por la gobernación de Alta Verapaz que Senahú inicialmente, se trataba de una aldea que se denominaba Sechimail, que en Q'eqch'í significa lugar de los gúisquiles, posteriormente se llamó Nahuc y finalmente los mismos habitantes le denominaron San Antonio Senahú.

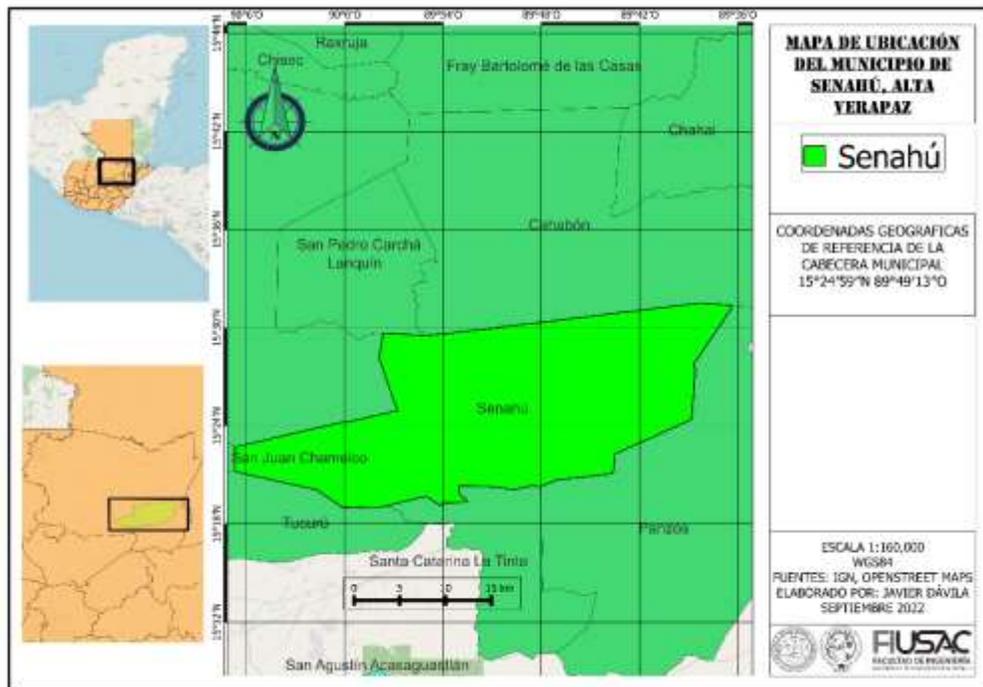
Antes del año 1,869, era una aldea dependiente de Salamá, y por iniciativa de sus habitantes se realizó la gestión que funda el municipio, según acta del 27 de julio de 1,869, la cual fue levantada por el corregidor departamental de Verapaz y en ella quedaron electos los 60 miembros indígenas, las personas que ejercerían los cargos de concejales del nuevo municipio, quedando la primera personalidad en el señor Sebastián Choc, quien fungió como alcalde primero.

## 2.1.2. Ubicación

Según mapas cartográficos del IGN, Senahú es un municipio del departamento de Alta Verapaz, en la República de Guatemala y que pertenece a la región comercial e industrial conocida como Franja Transversal del Norte. Las coordenadas geográficas de la cabecera son  $15^{\circ}24'59''\text{N}$   $89^{\circ}49'13''\text{O}$ . Colinda al norte con los municipios Cahabón y Lanquín, al oeste con San Pedro Carchá y San Juan Chamelco, al sur con Tucurú y Santa Catarina la Tinta y al oeste con Panzós.

**Figura 2.**

*Ubicación de Senahú*



*Nota.* Ubicación del municipio de Senahú con referencia a la república de Guatemala y el departamento de Alta Verapaz. Elaboración propia, realizado con QGIS 3.26.2

### **2.1.3. Territorio**

El municipio cuenta con una extensión territorial de 336 Km<sup>2</sup>. Una distancia desde Guatemala de 278 kilómetros, desde Cobán 137 kilómetros, se ubica a una altitud de 970 metros sobre el nivel del mar.

### **2.1.4. Clima**

Según el Instituto de sismología, vulcanología, meteorología e hidrología -INSIVUMEH-, en Senahú predomina el clima templado frío, con una temperatura media de 24.5 °C, temperatura máxima de 29 °C y temperatura mínima de 20 °C.

Los meses más cálidos son marzo y abril, mientras que los meses más lluviosos son de junio a septiembre. La precipitación pluvial oscila entre 1,250 mm y 2,500 mm al año.

### **2.1.5. Fisiografía**

La fisiografía del municipio es extremadamente variada con altitudes que van desde los 36 m.s.n.m. hasta los 2505 m.s.n.m. según el modelo de elevación digital del IGN del 2020. Predominan los cerros: Sillab, Saquil, Tzul y Seamay.

## **2.2. Medio ambiente**

La influencia del medio ambiente y las variables climatológicas tienen un gran impacto sobre cualquier área de estudio deben de ser tomadas en

cuenta para obtener resultados objetivos. De la misma forma se deben interpretar los impactos que éstas tienen al incluir al factor antrópico.

### **2.2.1. Fenómeno natural**

Un fenómeno natural se entiende como una expresión del funcionamiento de la naturaleza y de la interacción de sus factores internos y externos. Estos tienen características como magnitud, intensidad, ocurrencia y extensión. De la misma explica el autor que su regularidad (precipitación en la época lluviosa) o aparición extraordinaria (sismo o erupción volcánica) son las que pueden dar lugar a un fenómeno adverso o desastre natural.

### **2.2.2. Amenaza**

Se puede describir una amenaza como un “proceso, fenómeno o actividad humana que puede ocasionar muertes, lesiones u otros efectos en la salud, daños a los bienes, interrupciones sociales y económicas o daños ambientales” (ONU, 2016, p.19).

También se consideran como un factor externo que está representado por la posibilidad que ocurra un fenómeno o evento adverso y los vincula con su origen (natural o antropogénico).

Se presenta la siguiente categorización para las amenazas naturales:

- Geofísicas: sismos, deslizamientos, tsunamis y actividad volcánica
- Hidrológicas: avalanchas e inundaciones
- Climatológicas: temperaturas extremas, sequías e incendios
- Meteorológicas: ciclones y tormentas

- Biológicas: enfermedades epidémicas y plagas.

### **2.2.3. Vulnerabilidad**

Este aspecto es descrito como el conjunto de condiciones internas de un sistema, persona o comunidad ante una amenaza. Una definición breve es la propensión o predisposición de algo a verse afectado negativamente y define el impacto o efecto de una amenaza.

### **2.2.4. Riesgo**

Se entiende como la “posibilidad de que se produzcan muertes, lesiones o destrucción y daños en bienes en un sistema, una sociedad o una comunidad en un período de tiempo concreto, determinados de forma probabilística como una función de la amenaza, y la vulnerabilidad” (ONU, 2016, p. 15).

Un desastre natural se crea cuando una amenaza y una población vulnerable que está en riesgo interactúan entre sí y ocurre una interrupción en el funcionamiento de la sociedad, creando daños y pérdidas materiales, de medios de producción y humanas. Un desastre se puede convertir en una catástrofe cuando se cumplen las siguientes condiciones:

- La mayor parte de la comunidad residente es afectada.
- Las bases de las organizaciones de emergencia son afectadas.
- No puede proveerse ayuda externa inmediata, pues varias comunidades cercanas son afectadas.
- Implica una atención mediática más amplia en el tiempo y externa a la comunidad.

### **2.2.5. Cambio climático y desastres naturales**

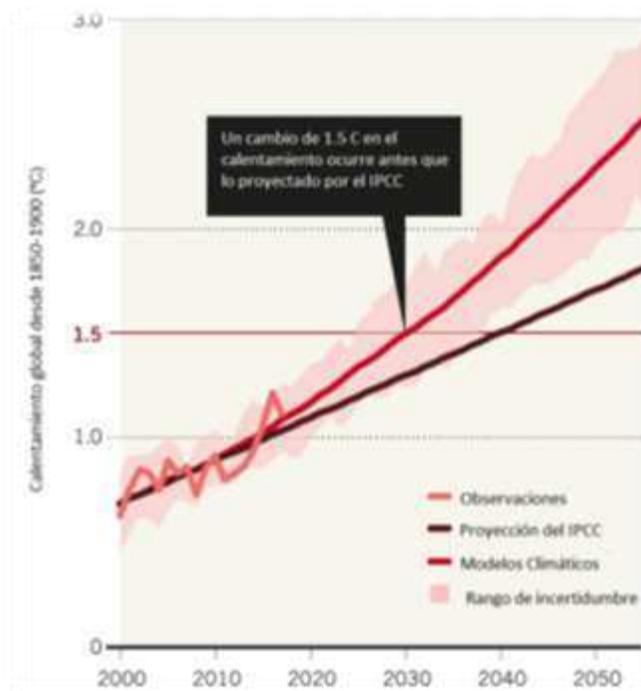
Es evidente que las actividades antropogénicas tienen un impacto significativo en el clima y tal como lo describe los efectos de este cambio climático no ocurren aisladamente, sino están relacionados entre sí. Por ejemplo, las sequías y las olas de calor a menudo ocurren juntas. Las sequías provocan suelos secos, las condiciones secas y cálidas aumentan el riesgo de incendios forestales, que dañan el suelo y preparan el escenario para deslizamientos de tierra e inundaciones posteriores.

Se evidencian tres líneas de evidencia que sugieren que el cambio climático lleva a un calentamiento global más acelerado que el calculado originalmente basado en un reporte del panel intergubernamental de cambio climático (IPCC por sus siglas en inglés).

El primero es que las emisiones de dióxido de carbono siguen incrementándose a una tasa mayor de la proyectada. Segundo; los gobiernos están limpiando la contaminación del aire más rápido que el IPCC y la mayoría de los modeladores climáticos han asumido y tercero; hay señales de que el planeta podría estar entrando en una fase cálida natural que podría durar un par de décadas.

### Figura 3.

#### Calentamiento acelerado



*Nota.* Gráfico del crecimiento del calentamiento global proyectado comparado con el observado. Obtenido de Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (2018). *Global Warming of 1.5 °C* (<https://www.ipcc.ch/sr15/>), consultado el 06 de febrero de 2023. De dominio público.

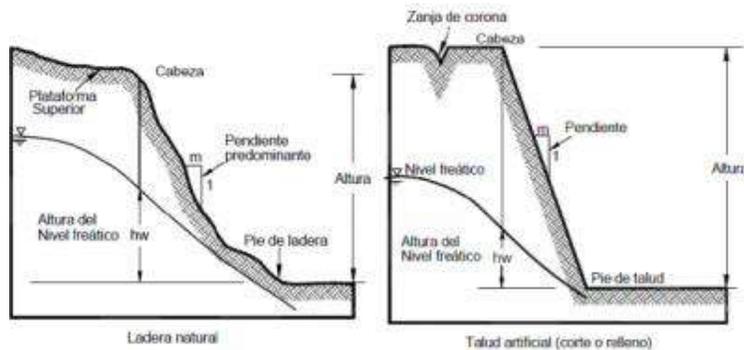
### 2.3. Deslizamientos

Los deslizamientos son movimientos de masas de tierra o rocas con un grado de energía potencial que se desplazan hacia abajo por una pendiente. Si bien la mayoría de los deslizamientos son causados por la gravedad, también influyen factores detonantes como lluvias (saturación del suelo), sismos, erupciones volcánicas, desestabilización de laderas como resultado de la deforestación, el cultivo y la construcción. Los balances de pérdidas

humanas y la economía en general son muy graves debido a su poder destructivo y amplio alcance (Shahabi & Hashim, 2015).

De manera similar se describen los derrumbes que son similares a los deslizamientos, pero estos consisten en caídas de rocas o material más compacto que no representa un deslizamiento como tal. Ambos tienen su origen en un talud que es una masa de tierra que no es plana, sino que presenta una pendiente o cambios significativos de altura. Estos pueden ser naturales, como montañas, laderas, volcanes, barrancos, entre otros o artificiales como brechas de carretera y proyectos de construcción.

**Figura 4.**  
*Talud natural y artificial*

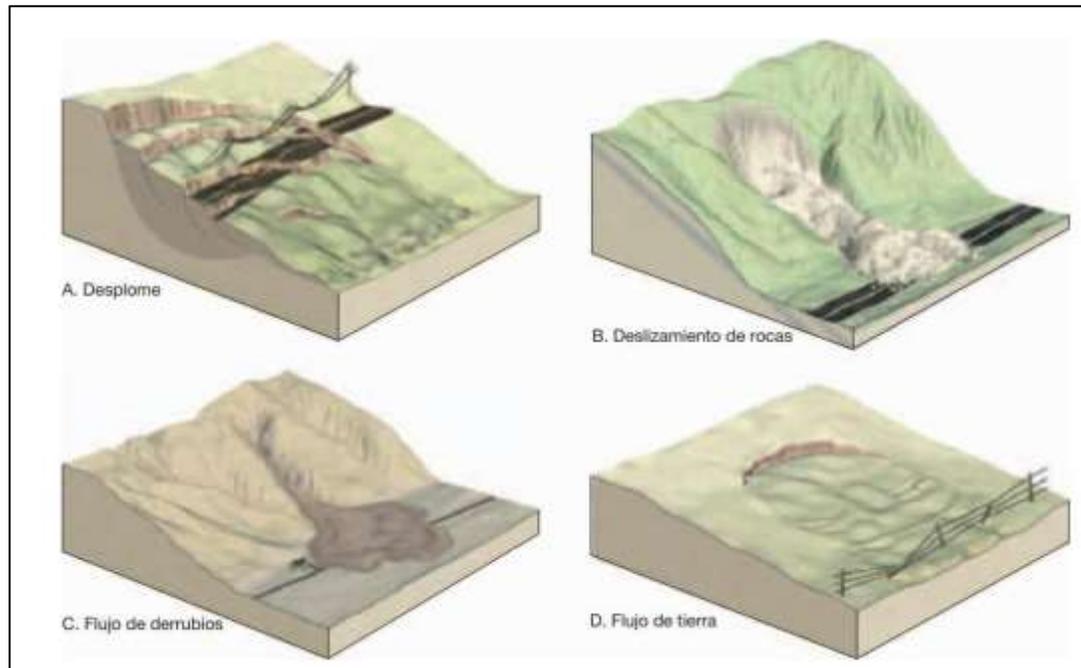


*Nota.* Talud natural (izquierda) comparado con talud artificial (derecha). Obtenido de J. Suarez (1998). *Deslizamientos y estabilidad de taludes en zonas tropicales.* (<https://desastres.medicina.usac.edu.gt/documentos/docqt/pdf/spa/doc0101/doc0101-parte01.pdf>), consultado el 06 de febrero de 2023. De dominio público.

Los deslizamientos también se clasifican según su material ya que los taludes pueden estar compuestos de roca, tierra o una mezcla de estos y al deslizarse por la pendiente se comportan y se nombran de manera distinta.

## Figura 5.

*Tipos de deslizamiento según el material*



*Nota.* Comparación de deslizamientos según el material. Obtenido de E. Tarbuck (2005). *Procesos gravitacionales: la fuerza de la gravedad.* (p. 431). Pearson Educación S. A

### 2.3.1. Clasificación de deslizamientos

Existen diferentes tipos de deslizamientos que se clasifican según el material que se desplome, el tipo de movimiento y la forma en que se interrelacionan los factores que los desencadenan. Los tipos de movimientos más comunes.

### 2.3.1.1. Derribo

Es la rotación de una masa de suelo de roca que se desprende de la ladera. A veces es inducido por el peso ejercido por el material que se encuentra pendiente arriba o por filtración de agua. Puede conformarse de roca, material grueso o material fino. Son frecuentes en tierras volcánicas y a lo largo de cauces de ríos con riberas empinadas.

#### Figura 6.

*Ejemplo de un derribo*



*Nota.* Ilustración de un deslizamiento del tipo derribo de rocas. Obtenido de E. Méndez (2022). *Deslizamiento de rocas cayó sobre un automóvil en la calzada La Paz.* (<https://www.soy502.com/articulo/lluvias-provocan-derrumbe-calzada-paz-afecto-carro-32419>), consultado el 06 de febrero de 2023. De dominio público.

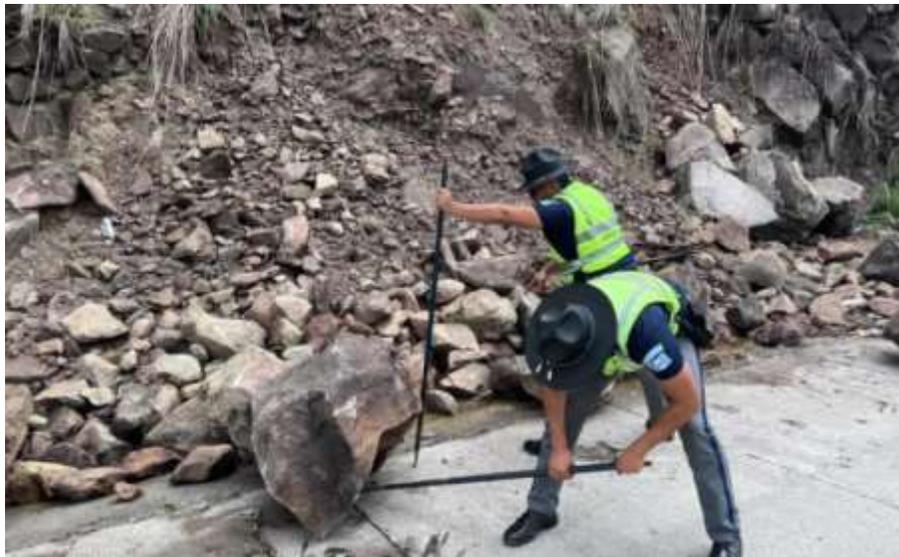
### 2.3.1.2. Desprendimientos de roca

Es un deslizamiento descendente de masas de rocas o material no consolidado a lo largo de una ladera empinada o acantilado. Es una caída libre rápida. Son de los eventos más rápidos y destructivos.

Se producen cuando las rocas se sueltan y se deslizan pendiente abajo. Una de las condiciones para que sucedan es un ambiente geológico con estratos rocosos inclinados, otra son las diaclasas y fracturas paralelas a la pendiente.

#### **Figura 7.**

Ejemplo de desprendimiento de rocas



*Nota.* Ilustración de un desprendimiento de rocas. Obtenido de C. Pérez (2022). *Deslizamiento de tierra y caída de rocas: Provia identifica las carreteras con más riesgos para automovilistas.* (<https://www.guatevision.com/nacionales/deslizamiento-de-tierra-y-caida-de-rocas-provia-identifica-las-carreteras-con-mas-riesgos-para-automovilistas>), consultado el 06 de febrero de 2023. De dominio público.

### 2.3.1.3. Derrumbe rotacional

En este tipo de deslizamiento la superficie de rotura se curva hacia arriba y el movimiento es de rotación alrededor de un eje. Están asociados con pendientes que varían entre 20 y 40 grados. Son desencadenados por lluvias intensas o terremotos. También por el aumento del nivel de los cuerpos de agua que causan erosión en la base de la ladera. El movimiento puede ser lento y ser perjudicial para estructuras y carreteras.

#### Figura 8.

*Esquema de derrumbe rotacional*



*Nota.* Ilustración de derrumbe rotacional ocurrido en cerro Xicut, Los chorros, Quiché. Donde en 2009 más de 38 personas perdieron la vida. Obtenido de [xplorandoguatemala.com](https://xplorandoguatemala.com) (2022). *El temible paso del cerro Xicut, Los Chorros.* (<https://xplorandoguatemala.com/curiosidades/el-temible-paso-del-cerro-xicut-los-chorros>), consultado el 06 de febrero de 2023. De dominio público.

#### 2.3.1.4. Deslizamiento de traslación

El movimiento se da hacia afuera a lo largo de superficies planas. El material del deslizamiento puede ser una mezcla de suelos sueltos y placas de rocas. Puede avanzar distancias considerables dependiendo de la inclinación del terreno. La velocidad inicialmente es lenta pero después aumenta. Sus principales desencadenantes son las lluvias intensas, inundaciones, fugas en la tubería, terremotos o perturbaciones antropogénicas.

#### **Figura 9.**

*Ejemplo de deslizamiento de traslación, el Cambray II*



*Nota.* Ilustración de un deslizamiento de traslación ocurrido en el Cambray II en 2015. Obtenido de W. López (2015). *Ciudad de contrastes: la tragedia de El Cambray vista desde el aire.* (<https://www.soy502.com/articulo/ciudad-contrastes-tragedia-cambray-vista-desde-aire>), consultado el 06 de febrero de 2023. De dominio público.

### **2.3.1.5. Corriente de escombros o tierra**

Se definen como corrientes de escombros cuando un movimiento espacialmente continuo y rápido en el que una mezcla de agua, tierra, roca y materia orgánica fluye ladera abajo. Estas corrientes son también conocidas como deslaves. Se producen en barrancos muy empinados, principalmente cuando se ha quitado la vegetación del lugar. Son comunes en regiones volcánicas.

Por otro lado, en las corrientes de tierra, el suelo se mueve como una corriente viscosa con deformaciones internas. Estas corrientes pueden variar desde muy lentas a rápidas y catastróficas. Están formadas principalmente de arcillas o limos ubicados sobre un manto rocoso.

Los desencadenantes son la saturación del suelo por precipitación intensa o prolongada, la erosión de los cauces en la parte inferior de las pendientes, la excavación y actividades de construcción, terremotos o vibraciones antrópicas. Pueden dañar propiedades e infraestructura, también generar sedimentación y presas en ríos que pueden desencadenar inundaciones aguas arriba.

## Figura 10.

*Derrumbe tipo corriente de tierra en Senahú*



*Nota.* De tipo corriente de tierra ocurrido en la ladera del cerro El Calvario, Senahú, Alta Verapaz. Obtenido de Hemeroteca PL (2018). *Tragedia, 22 muertos por deslave en Senahú. Alta Verapaz.* (<https://www.prensalibre.com/hemeroteca/deslave-en-senahu-alta-verapaz-en-2005/>), consultado el 6 de febrero de 2023. De dominio público.

### 2.4. Sistemas de información geográfica

Se puede definir un sistema de información geográfica (SIG) como una herramienta digital para procesar, analizar y presentar datos espaciales georreferenciados. Estos procesan la información de forma automática a través de un ordenador con énfasis en la gestión y modelización de información geográfica que puede ser temática o espacial y perteneciente a

un territorio natural o controlado. Se trata de herramientas multipropósito dirigidas a la solución de problemas en campos como la planificación territorial, análisis de mercados, prevención de riesgos naturales, gestión catastral, meteorología y muchas otras aplicaciones que han ido surgiendo con su mejoramiento e innovación (Santos, 2020).

Un SIG presenta su base en la tecnología informática y se desarrolla por medio de los datos o información georreferenciada de los cuales se alimenta el ordenador para para producir un estudio sobre un área específica. Otro de sus componentes es el humano que maneja los datos mediante el ordenador mediante una metodología enfocada en resolver un problema.

#### **2.4.1. Historia**

La cartografía ha acompañado a la humanidad desde el comienzo de la historia y se han encontrado mapas fechados desde el siglo VI A.C. siendo este una tablilla babilónica que describía a babilonia en el centro del mapa rodeado por agua y siete islas míticas en medio del océano (Prieto, 2016).

Con la evolución de la humanidad, el descubrimiento de nuevos lugares y técnicas para plasmar la forma y escala de la tierra en papel, la cartografía ha evolucionado notablemente. Impulsada principalmente por el comercio y la milicia, el hombre ha necesitado plasmar con más exactitud cada vez la forma, ubicación y escala de la tierra lo que ha llevado a avances mayúsculos en la cartografía.

El primer sistema de información geográfica desarrollado como tal se creó 1963 en Canadá por Roger Tomlinson con el fin de gestionar el territorio

rural de ese país, llamado Canadian Geographical Information System (Olaya, 2020).

Desde mediados de 1970 a principios de 1980, la tecnología SIG comenzó a ser adoptada por agencias y organismos nacionales, esto fue lo que permitió su desarrollo exponencial. Entre 1982 y finales de la década de los 80, consistió en el surgimiento y explotación del mercado comercial que rodea SIG. desde finales de los 80 hasta hoy en día, donde se busca implementar mejoras en los SIG que permitan una mayor usabilidad y practicidad por parte del usuario. Hasta 1985 aparece el primer *software* SIG libre, GRASS, y hasta el 2002 la primera versión de QGIS.

#### **2.4.2. QGIS**

QGIS es un sistema de información geográfica creado por la Open Source Geospatial Foundation, la cual es una organización no gubernamental constituida en febrero de 2006. QGIS fue uno de sus primeros proyectos disponible completamente desde el 2008 y actualmente es uno de los SIG de *software* libre más utilizados a nivel mundial. QGIS tiene una infraestructura de complemento.

El usuario puede adicionar muchas funcionalidades nuevas escribiendo sus propios complementos. Estos complementos pueden ser escritos en C++ o en Python. Se ha escogido este *software* para desarrollar el estudio debido a que es un *software* de libre acceso, por su estabilidad al trabajar grandes cantidades de datos y por resultar de uso amigable para el usuario. Sus características principales incluyen:

- Visualización y vector de superposición y de datos de trama en diferentes formatos y proyecciones, sin conversión a un formato interno. Los formatos soportados son:
  - Tablas PostgreSQL con PostGIS y Spatialite.
  - Formatos vectoriales con el apoyo de la biblioteca OGR, incluyendo ESRI shapefiles, MapInfo, SDTS y GML.
  - Formatos de mapa de bits con el apoyo de la biblioteca de GDAL, tales como modelos de elevación digital, la fotografía aérea o imágenes Landsat.
  - Lugares de GRASS y mapsets.
  - Datos espaciales OGC-WMS.
  
- Creación de mapas y explorar interactivamente los datos espaciales con una interfaz gráfica de usuario.
  
- Creación, edición y exportación de datos espaciales usando herramientas para la digitalización de GRASS y formatos shapefile; georreferenciador; Herramientas de GPS para la importación y exportación en formato GPX
  
- Realizar el análisis espacial utilizando el plugin para fTools Shapefiles o el plugin de GRASS integrado, incluyendo:

### **3. METODOLOGÍA**

#### **3.1. Variables**

Para el presente estudio se consideran variables geomorfológicas, hidrometeorológicas, medioambientales y geológicas siendo estas:

##### **3.1.1. Variables independientes**

- Pendiente (en gradianes)
- Geología (según su génesis)
- Suelo (según su uso)
- Precipitación pluvial (según su acumulación)
- Sismicidad (según su magnitud)
- Distancia de las poblaciones a la falla (según su magnitud).

##### **3.1.2. Variable dependiente**

- Valor de amenaza por deslizamientos.

#### **3.2. Delimitación del campo de estudio**

En este estudio se abarca la identificación de variables que influyen en los deslizamientos de tierra, su operación mediante un *software* de información geográfica y la zonificación de amenaza por deslizamiento del municipio de Senahú, Alta Verapaz.

El campo de estudio está dentro de la Ingeniería Ambiental, abarcando las áreas de climatología, geología, topografía y sistemas de información geográfica

### **3.3. Recursos humanos disponibles**

- Tesista: Javier Oswaldo Dávila Nuñez
- Asesora: Ing. Carla Deyanira Gordillo Barranco de Marchena

### **3.4. Recursos materiales disponibles**

A continuación, se desarrollan los recursos materiales disponibles para el desarrollo de la investigación.

#### **3.4.1. Recursos físicos**

- Computadora Lenovo M83 con procesador Core i7 3.1 GHZ, 16 GB de RAM y sistema operativo Windows 10 pro
- Cámara
- GPS.

#### **3.4.2. Recursos digitales**

- *Software* SIG (Quantum GIS 3.26.2)
- Bases de datos pública del INSIVUMEH, área de meteorología, registro de precipitación diario.
- Geoservicios de mapas de la secretaria general de Planificación – SEGEPLAN- mapas base de Guatemala
- Mapas de acceso libre OpenStreetMap y GoogleEarth

- Capas ráster y shapefile de acceso libre del IGN: suelos, geología, uso de suelo, cobertura vegetal, caminos y ríos.
- Capas ráster y shapefile de acceso privado del MAGA: Modelo de elevación digital, uso de la tierra, cambio de uso del suelo.

### 3.5. Técnica cualitativa

Se aplicó un enfoque estadístico basado en la metodología de proceso de análisis jerárquico (AHP) el cual se explica a continuación paso a paso:

Paso 1. Se ordenaron las variables en una matriz pareada, colocándolas tanto en el eje X como en el Y y se les asignó una ponderación (ver tabla 1) a cada elemento de las columnas con cada elemento de las filas, obteniendo (Aij).

Paso 2. Se sintetizó la matriz pareada para obtener una matriz de normalizada, para lo cual se sumaron los valores en cada columna de la matriz pareada (S). Se dividió cada elemento de la matriz entre esta sumatoria y se obtiene una matriz normalizada (Rij). Se promediaron los valores de cada fila de la nueva matriz normalizada obteniendo la matriz de prioridades (W1).

Paso 3. Se calculó el Valor de Amenaza por Deslizamiento (VAD) según la ecuación

$$VAD = \sum_{i=1}^n (Rij \times W1) \quad (\text{Ec. 1})$$

Paso 4. Estos resultados numéricos se clasificaron en 4 grupos y describen el nivel de amenaza baja ( $\leq 0.20$ ), moderada (0.20-0.30), alta (0.30-0.41) y muy alta ( $> 0.41$ ).

**Tabla 1.**

*Ponderación de la variable*

<b>Planteamiento verbal del peso de la variable</b>	<b>Ponderación</b>
Extremadamente influyente	9
Entre muy fuerte y extremadamente influyente	8
Muy fuertemente influyente	7
Entre fuerte y muy fuertemente influyente	6
Fuertemente influyente	5
Entre moderada y fuertemente influyente	4
Moderadamente influyente	3
Entre ligeramente influyente y moderadamente influyente	2
Ligeramente influyente	1

*Nota.* Valores de ponderación que se asignan a las variables según el método AHP. Elaboración propia, realizado con Word.

### **3.6. Recolección y ordenamiento de la información**

A continuación, se presenta la información recolectada.

#### **3.6.1. Amenaza por deslizamiento**

Los datos de pendiente se obtuvieron a través de un modelo de elevación digital (MDE) del IGN con una resolución de 19.7m x19.7 m. Estos datos se procesaron mediante la herramienta pendiente por el *software* QGIS.

Los datos de geología se obtuvieron de la capa *shape* geología del IGN y se ordenarán según su origen o roca madre.

Los datos de suelo se obtuvieron de la capa cobertura vegetal del MAGA y se ordenaron según el uso que se tiene registrado del suelo en la región.

Los datos de precipitación pluvial se recolectaron de los registros históricos (1990-2023) de las estaciones meteorológicas del INSIVUMEH y se clasificaron y ordenaron por intervalo anual para obtener un promedio de la lluvia anual del lugar de estudio. Se realizó una interpolación IDW para generar un mapa ráster de precipitación en todo el territorio de Senahú que luego se vectorizó para asignarle su ponderación según la matriz obtenida.

Los datos de Sismicidad se obtuvieron de los registros históricos del servicio geológico de los estados unidos (USGS) tomando en consideración aquellos sismos mayores a 3 en magnitud en la escala de Richter desde 1985 a 2023.

Los datos de distancia de población a falla se obtuvieron ubicando los centroides de los centros poblados de Senahú y la falla más cercana que es la falla Chixoy-Polochic. Se usó el proceso distancia al eje más próximo del *software* QGIS.

### **3.7. Tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información**

Se utilizaron diversos métodos para sintetizar la información y su procesamiento dependiendo del origen de los datos descritos a continuación.

### **3.7.1. Tabulación de la información**

La información utilizada en este estudio fue obtenida en su totalidad de medios digitales existentes en bases de datos de diversas entidades estatales e internacionales. Todas fueron cortadas y adaptadas de acuerdo con la extensión territorial del municipio de Senahú. La información fue tabulada en tablas de atributos dentro del *software* QGIS.

### **3.7.2. Ordenamiento de la información**

La información utilizada para el estudio se ordenó de una forma digital, georreferenciada sobre la extensión territorial del municipio de Senahú para todas las capas. Adicionalmente las capas de precipitación pluvial y sismicidad tienen un ordenamiento temporal; los registros de precipitación pluvial abarcan el periodo de 1990 a 2023; los registros de sismos abarcan el periodo de 1985 a 2023.

### **3.7.3. Procesamiento de la información**

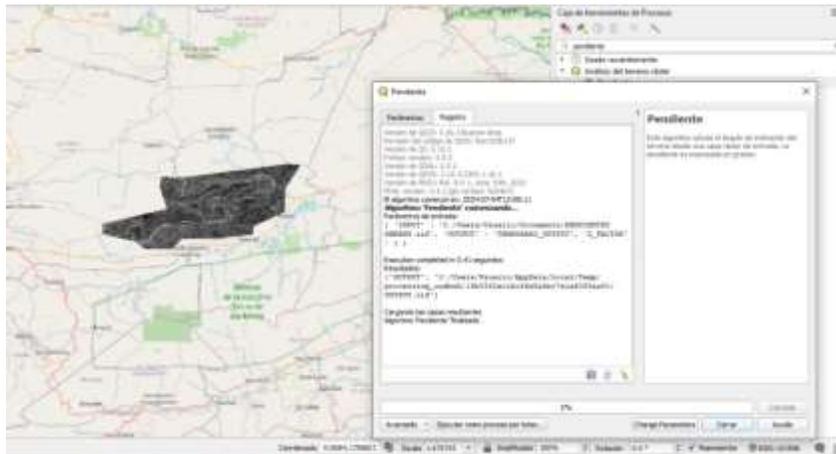
Las capas geográficas contienen información cruda, la cual debe ser procesada mediante herramientas del *software* para extraer los datos de interés. Dicho *software* cuenta con procesos digitales que permiten completar las operaciones descritas y se detallan a continuación.

#### **3.7.3.1. Procesamiento de datos de pendiente**

Los datos de pendiente se obtuvieron mediante el proceso pendiente a partir de la capa MED Senahú.

**Figura 11.**

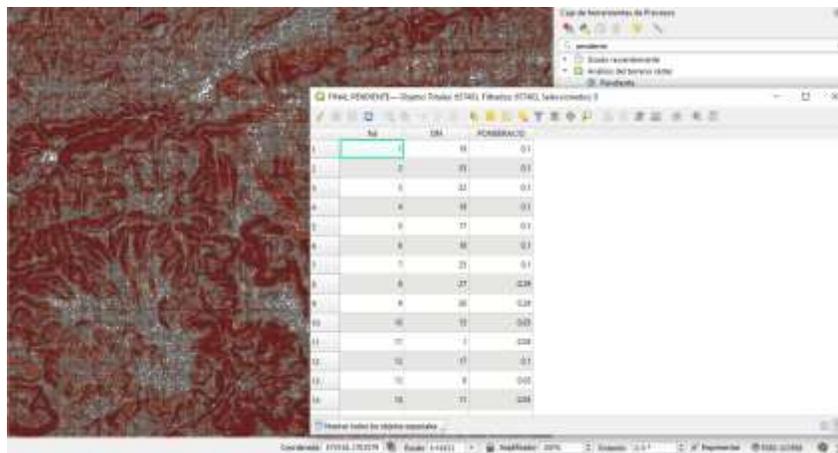
*Pantalla de proceso de pendientes con su script*



*Nota.* Procesamiento de MED a pendientes. Elaboración propia, realizado con QGIS 3.26.2.

**Figura 12.**

*Capa de pendientes con su ponderación asignada*



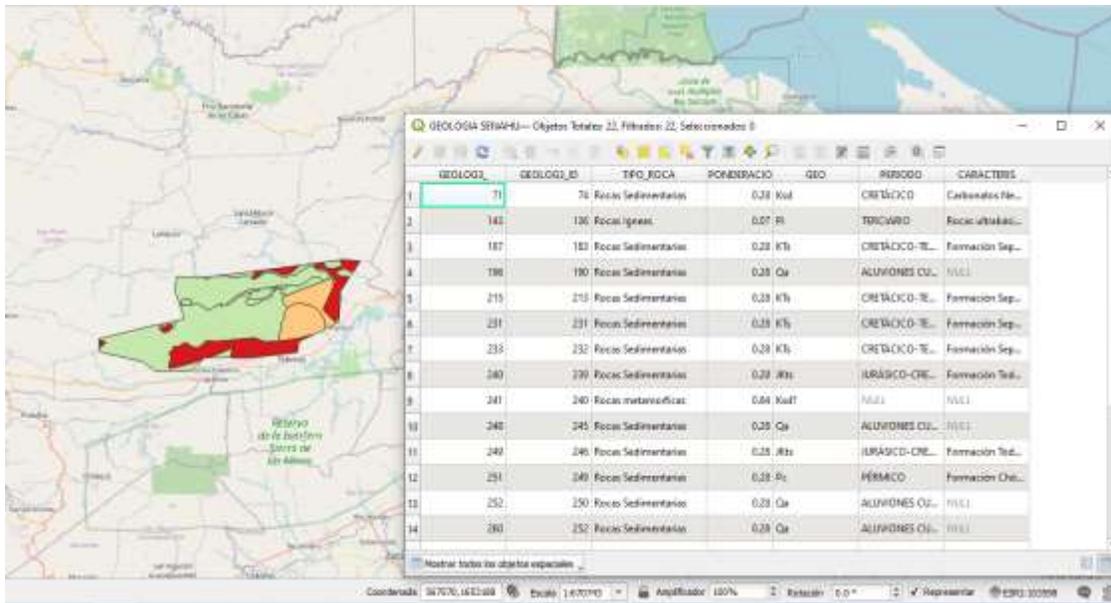
*Nota.* La capa tiene aumento de tamaño para exhibir claramente los detalles de la simbología. Elaboración propia, realizado con QGIS 3.26.2.

### 3.7.3.2. Procesamiento de datos de geología

La capa geológica del IGN contiene los datos de la roca madre bajo el suelo de todo el territorio nacional, clasificándolas en rocas sedimentarias, rocas ígneas y rocas metamórficas. Al encontrarse ya como capa vectorial, se creó un campo nuevo asignándole la ponderación obtenida para la variable geología según el tipo de roca.

**Figura 13.**

*Geología de Senahú con su ponderación asignada*



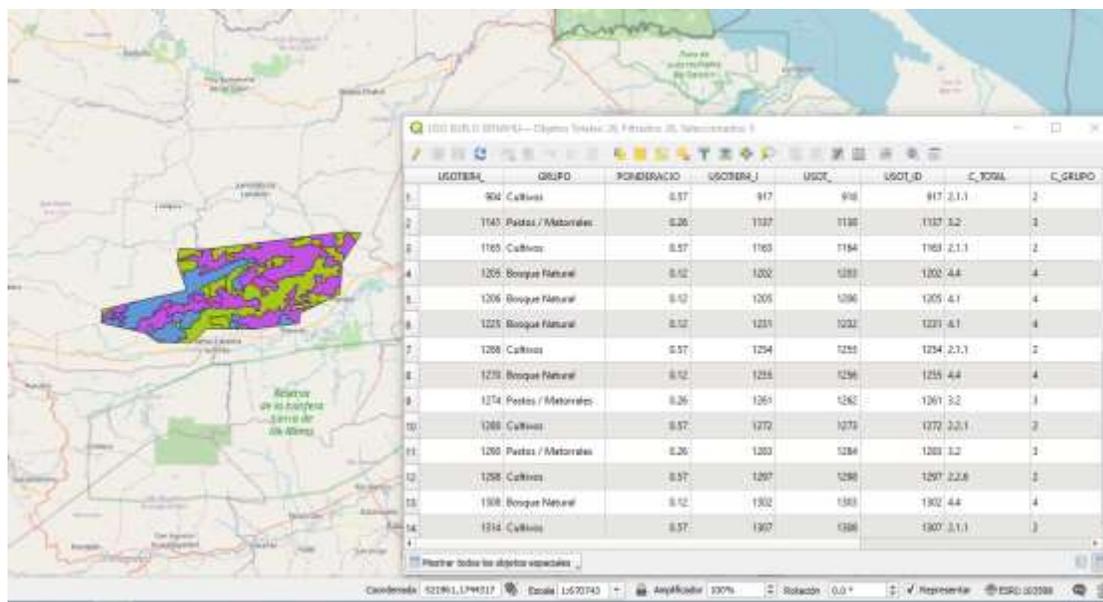
*Nota.* La capa describe la capa litológica y la roca madre del municipio de Senahú. Elaboración propia, realizado con QGIS 3.26.2.

### 3.7.3.3. Procesamiento de datos de uso de suelo

La capa usada tierra del IGN contiene datos de registros de uso de suelos clasificándolos en grupos y subgrupos, para este estudio se usó la clasificación según grupos siendo estos: bosque natural, pastizal, cultivos e infraestructura. Al encontrarse ya como capa vectorial, se creó un campo nuevo asignándole la ponderación obtenida para la variable uso de suelo

**Figura 14.**

*Uso de suelo de Senahú con su ponderación asignada*



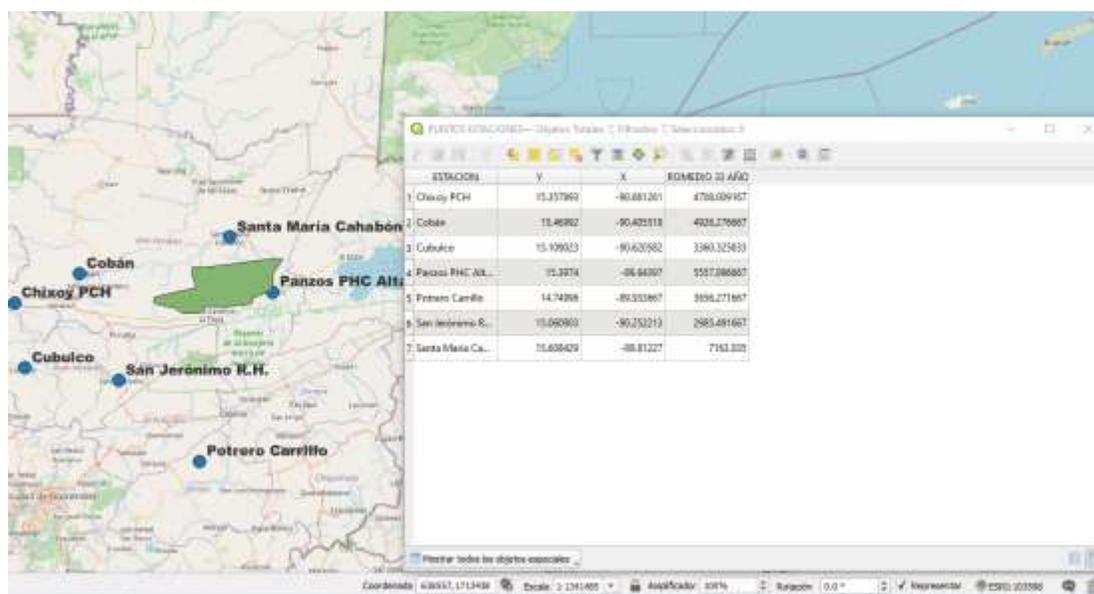
*Nota.* La capa describe el uso del suelo según registros del IGN. Elaboración propia, realizado con QGIS 3.26.2.

### 3.7.3.4. Procesamiento de datos de precipitación pluvial

Los datos de precipitación pluvial se obtuvieron de estaciones meteorológicas del INSIVUMEH cercanas a Senahú y su promedio anual desde el año 1990 a 2023.

**Figura 15.**

*Estaciones meteorológicas usadas para precipitación pluvial*

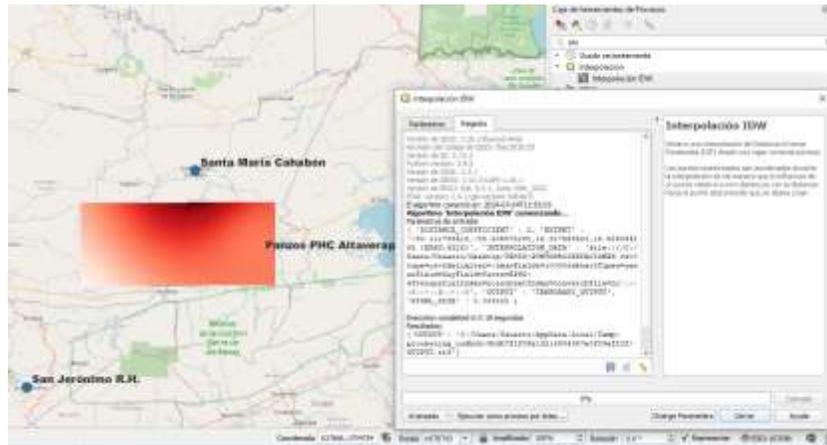


*Nota.* La capa describe las coordenadas de las estaciones meteorológicas, su nombre y su precipitación media anual. Elaboración propia, realizado con QGIS 3.26.2.

Utilizando los datos de precipitación media anual se construyó una capa mediante el método de interpolación de ponderación inversa de la distancia y se recortó para el territorio de Senahú.

**Figura 16.**

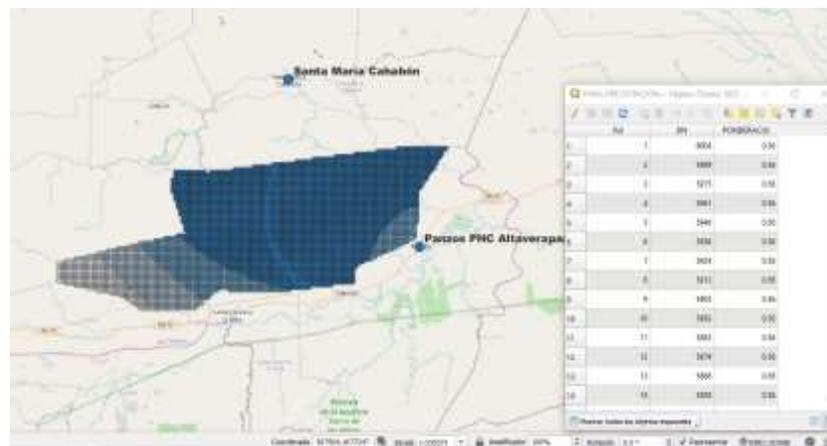
*Proceso de interpolación de precipitación pluvial IDW con su script*



*Nota.* Los parámetros utilizados fueron: Promedio de 33 años, coeficiente P(2) y un tamaño de pixel de 0.003255. Elaboración propia, realizado con QGIS 3.26.2.

**Figura 17.**

*Capa poligonizada de la interpolación IDW de los datos de precipitación pluvial*



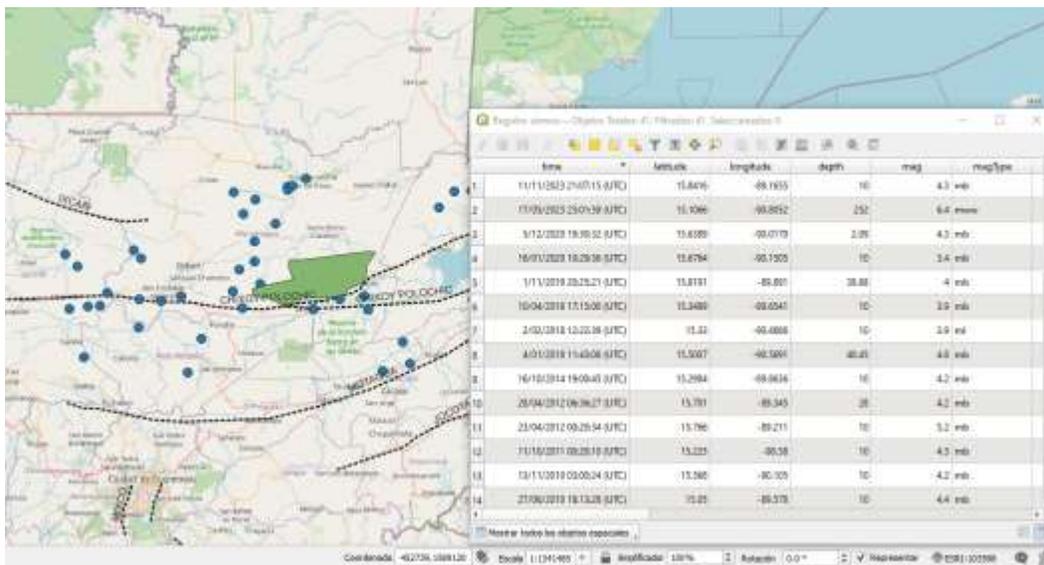
*Nota.* La capa muestra las coordenadas de las estaciones meteorológicas, su nombre y su precipitación media anual. Elaboración propia, realizado con QGIS 3.26.2.

### 3.7.3.5. Procesamiento de datos para sismicidad

Los datos históricos del Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS) desde 1985 a 2023 se tabularon en una capa *shape* que contenía las coordenadas, magnitud, fecha y hora en la que ocurrió el sismo. Se tomaron en cuenta sismos ocurridos a una distancia menor a 11 km de Senahú.

**Figura 18.**

*Capa de sismos ocurridos con influencia en el territorio de Senahú*

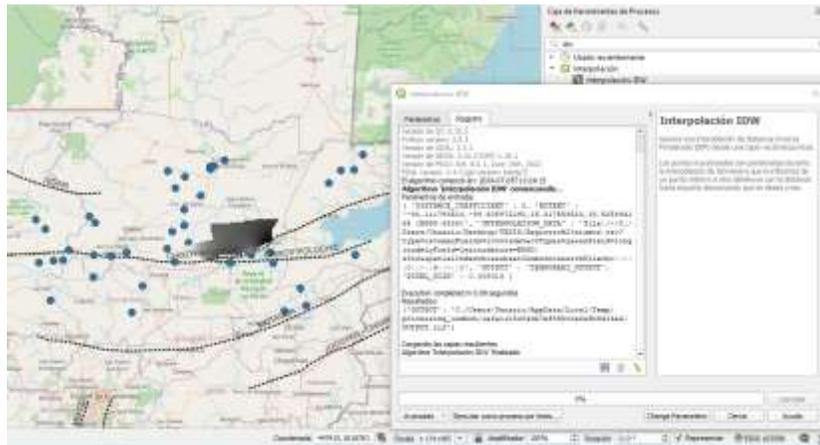


*Nota.* La capa describe las coordenadas de la ocurrencia de sismos, su nombre y su precipitación media anual. Elaboración propia, realizado con QGIS 3.26.2.

Se aplicó el proceso de interpolación IDW para el parámetro de magnitud y así obtener una capa ráster para todo el municipio de Senahú, la cual posteriormente se cortó y vectorizó para asignarle su ponderación específica.

**Figura 19.**

*Proceso de interpolación de precipitación pluvial IDW con su script*



*Nota.* Los parámetros utilizados fueron: magnitud en escala de Richter de 33 años, coeficiente P(2) y un tamaño de pixel de 0.030638. Elaboración propia, realizado con QGIS 3.26.2.

**Figura 20.**

*Capa poligonizada de la interpolación IDW de los datos de magnitud sísmica.*



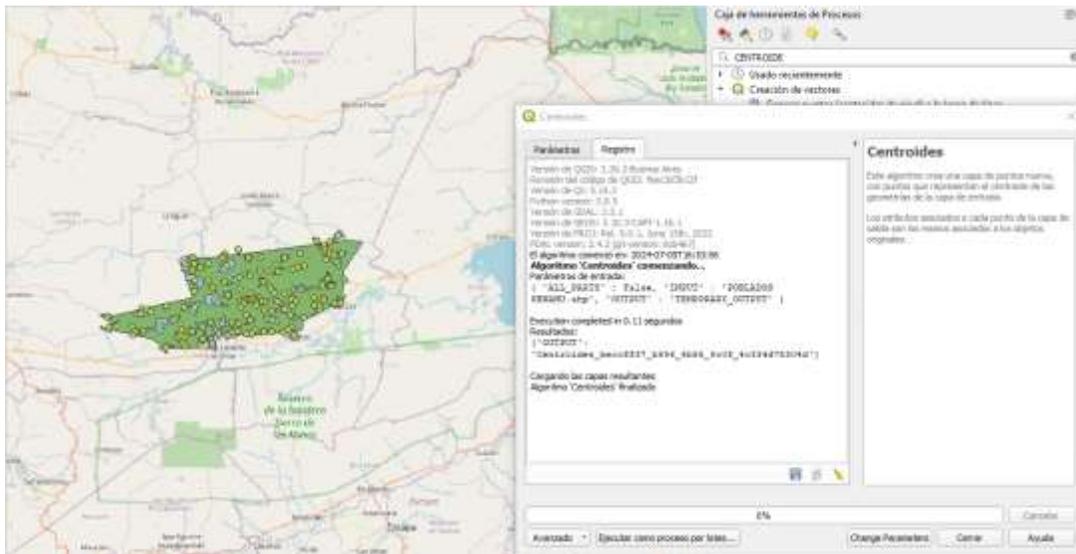
*Nota.* La capa describe una estimación de: ocurrencia de sismos y su magnitud en el territorio de Senahú. Elaboración propia, realizado con QGIS 3.26.2.

### 3.7.3.6. Procesamiento de datos de distancia población a falla

La falla de referencia utilizada para este estudio es la falla Chixoy-Polochic por su cercanía al municipio de Senahú. La distancia se calculó utilizando los centros poblados de Senahú y calculando la distancia en línea recta del centroide del poblado a la falla y luego interpolando estas distancias para cubrir toda la extensión territorial del municipio.

**Figura 21.**

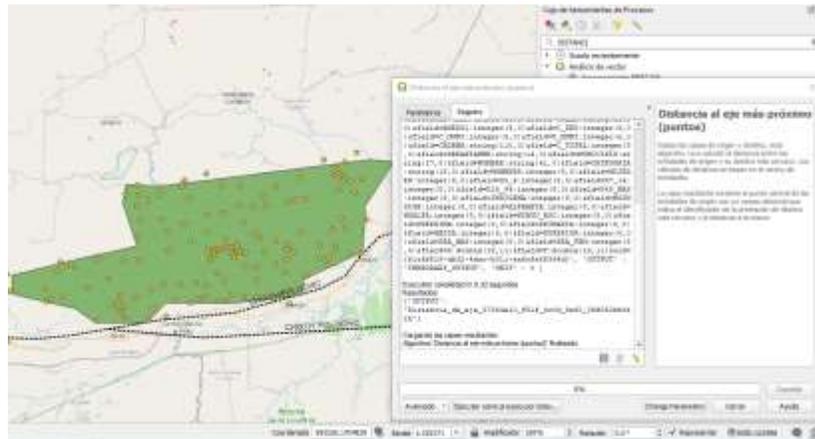
*Aplicación del proceso centroides para el cálculo de la distancia población-falla*



*Nota.* La capa describe el centro geométrico de los polígonos de las poblaciones de Senahú. Elaboración propia, realizado con QGIS 3.26.2.

**Figura 22.**

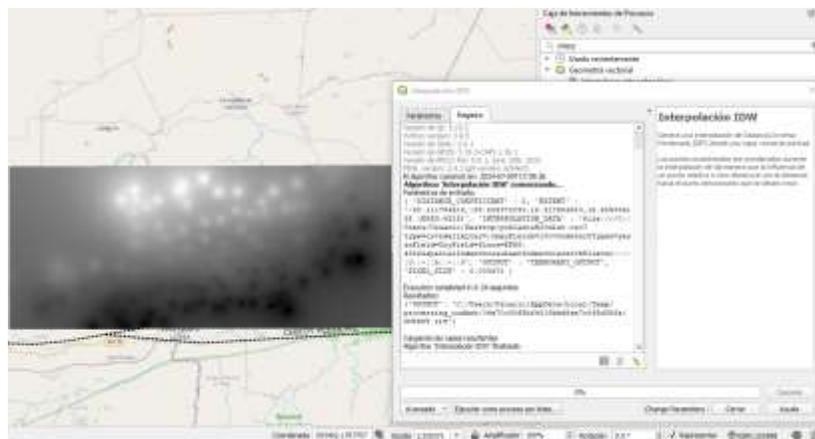
*Aplicación del proceso distancia al eje más próximo entre poblados y la falla*



*Nota.* La capa proporciona la distancia en metros del centro poblado a la falla Chixoy-Polochic. Elaboración propia, realizado con QGIS 3.26.2.

**Figura 23.**

*Proceso de interpolación de distancia población-falla IDW con su script*

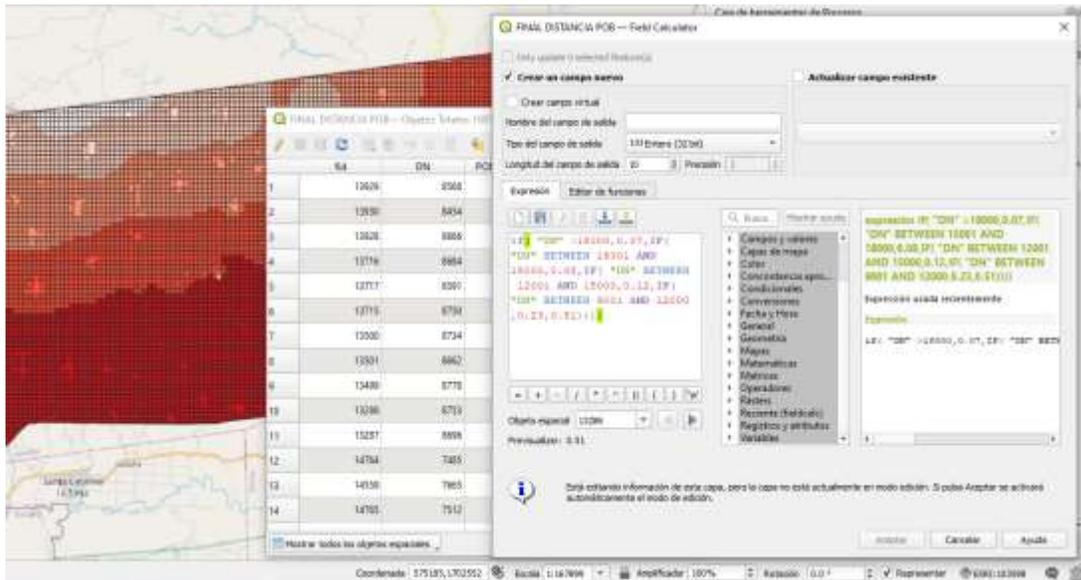


*Nota.* Los parámetros utilizados fueron: distancia a falla en metros, coeficiente P(2) y un tamaño de pixel de 0.003472. Elaboración propia, realizado con QGIS 3.26.2.



**Figura 25.**

*Asignación de condicionales*

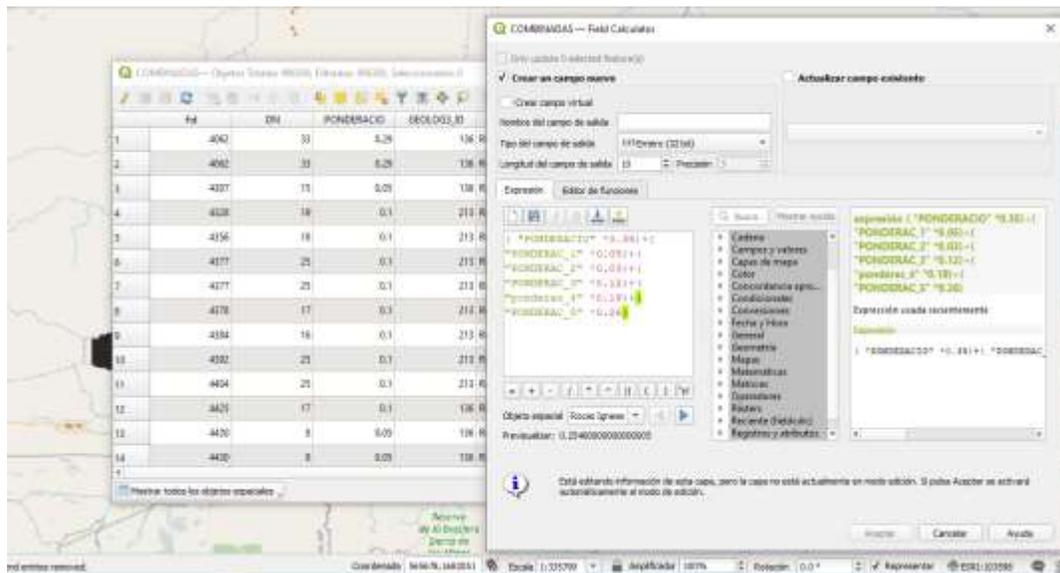


*Nota.* Asignación de condicionales mediante una expresión en la calculadora de campos dentro de la tabla de atributos. La expresión condicional “if” se aplicó para los valores de cada variable según el rango obtenido en su matriz normalizada y su prioridad (W1). Elaboración propia, realizado con QGIS 3.26.2.

Después de que cada capa *shape* correspondiente a cada una de las 6 variables fuera procesada según el paso anterior, se procedió a realizar una unión de las 6 capas para unir sus tablas de atributos y luego se multiplicó la ponderación de la matriz normalizada general (R1) por la ponderación de la matriz normalizada individual (W1) según la ecuación 1 para así obtener el valor de Valor de Amenaza por Deslizamiento (VAD).

**Figura 26.**

*Operación de las prioridades generales (R1) e individuales (W1)*



*Nota.* Se muestra el proceso para obtener el producto de las prioridades denominado valor de amenaza por deslizamiento. Elaboración propia, realizado con QGIS 3.26.2.

### **3.8. Análisis estadístico**

Para operar los valores de cada capa en una dimensional en común, es necesario construir un análisis estadístico que nos permita asignar valores porcentuales en lugar de un valor cuantitativo o cualitativo. Esto se llevó a cabo a través de la metodología AHP y se describe a continuación.

#### **3.8.1. Matriz de comparaciones pareadas**

La metodología AHP dicta que se debe construir una matriz de comparaciones pareadas  $n \times n$  ( $A_{ij}$ ) y asignar un valor a cada variable de

acuerdo con la Tabla 1. El primer paso para la obtención de las prioridades es realizar una sumatoria de los elementos de cada columna (j) tal que:

$$S_j = \sum_{i=1}^n A_{j1} + A_{j2} \dots A_{jn} \quad (\text{Ec. 2})$$

Donde:

$A_j$  = valor de j en columnas de la matriz de comparaciones pareadas

$S_j$  = sumatoria de la columna

En el siguiente paso se divide cada elemento de la matriz ( $A_{ij}$ ) dentro de S para obtener una matriz de comparaciones pareadas normalizada ( $R_{ij}$ )

$$\begin{Bmatrix} A_{i1j1} & A_{i1j2} \\ A_{i2j1} & A_{i2j2} \end{Bmatrix} \div \{S_j\} = \begin{Bmatrix} R_{i1j1} & R_{i1j2} \\ R_{i2j1} & R_{i2j2} \end{Bmatrix} \quad (\text{Ec. 3})$$

Donde:

$A_{ij}$  = elementos de la matriz de comparaciones pareadas

$S_j$  = sumatoria de columnas de la matriz de comparaciones pareadas

$R_{ij}$  = elementos de la matriz de comparaciones pareadas normalizada

En el siguiente paso se promediaron los valores de cada fila ( $R_i$ ) para construir una matriz de prioridades ( $W_1$ )

$$\overline{W1} = \frac{\sum_j^R R_j}{n} = \begin{bmatrix} W_{j1} \\ W_{j2} \\ W_{jn} \end{bmatrix} \quad (\text{Ec. 4})$$

Donde:

$\overline{W1}$  = media aritmética (ponderación AHP)

$\sum_j^R R_j$  = sumatoria de los datos

$n$  = número de datos

### 3.8.2. Análisis de consistencia

La metodología AHP ofrece un método para medir el grado de consistencia entre las opiniones pareadas que se asignan a las variables del estudio. Si el grado de consistencia es aceptable ( $RC \leq 0.1$ ), puede continuarse con el proceso, de lo contrario se deben reconsiderar y modificar los juicios realizados sobre las comparaciones pareadas. Esta relación se calcula de la siguiente forma:

$$RC = \frac{IC}{IA} \quad (\text{Ec. 5})$$

Donde

RC = razón de consistencia

IC = índice de consistencia

IA = índice de consistencia aleatorio

El índice de consistencia se obtiene del coeficiente de la sumatoria del vector columna de A menos el orden de la matriz, entre el orden de la matriz menos uno, de la siguiente forma:

$$IC = \frac{\{\sum A x \overline{W1}\} - n}{n-1} \quad (\text{Ec. 6})$$

Donde:

IC = índice de consistencia

A = matriz de comparaciones pareadas

$\overline{W1}$  = media aritmética (prioridad AHP)

n = orden de la matriz

El índice de consistencia aleatorio (IA) se calcula de la siguiente forma:

$$IA = \frac{1.98*(n-2)}{n} \quad (\text{Ec. 7})$$

Donde:

IA = índice de consistencia aleatorio

n = orden de la matriz



## 4. RESULTADOS

A continuación, se presentarán los resultados obtenidos.

**Tabla 2.**

*Matriz de comparaciones pareadas de todas las variables en estudio*

VARIABLE	PENDIENTE	GEOLOGIA	USO DE SUELO	PRECIPITACION PLUVIAL	SISMICIDAD	DIST POBOLACION-FALLA
PENDIENTE	1	7	9	3	2	2
GEOLOGIA	1/7	1	3	1/3	1/7	1/5
USO DE SUELO	1/9	1/3	1	1/7	1/7	1/5
PRECIPITACION PLUVIAL	1/3	3	7	1	1/2	1/3
SISMICIDAD	1/2	7	7	2	1	1/3
DIST. POBOLACION-FALLA	1/2	5	5	3	3	1
SUMATORIA	2.59	23.33	32.00	9.48	6.79	4.07

*Nota.* Matriz de orden 6 donde se comparan todas las variables del estudio para determinar su influencia en los deslizamientos de acuerdo con la tabla 1. Elaboración propia, realizado con Microsoft Excel.

**Tabla 3.**

*Matriz de comparaciones pareadas normalizada y prioridades de todas las variables*

VARIABLE	PENDIENTE	GEOLOGIA	USO DE SUELO	PRECIPITACION PLUVIAL	SISMICIDAD	DISTANCIA POBLACION-FALLA	PRIORIDADES (R1)
PENDIENTE	0.39	0.30	0.28	0.32	0.29	0.49	<b>0.35</b>
GEOLOGIA	0.06	0.04	0.09	0.04	0.02	0.05	<b>0.05</b>
USO DE SUELO	0.04	0.01	0.03	0.02	0.02	0.05	<b>0.03</b>
PRECIPITACION PLUVIAL	0.13	0.13	0.22	0.11	0.07	0.08	<b>0.12</b>
SISMICIDAD	0.19	0.30	0.22	0.21	0.15	0.08	<b>0.19</b>
DIST. POBLACION-FALLA	0.19	0.21	0.16	0.32	0.44	0.25	<b>0.26</b>

*Nota.* Se muestra el cálculo de la matriz R y W1 para las variables del estudio. Elaboración propia, realizado con Microsoft Excel.

**Tabla 4.**

*Análisis de consistencia para todas las variables del estudio*

A x (W1)	Índice	Resultado
2.23	Índice de consistencia	0.10
0.31	Consistencia aleatoria	1.32
0.18	Razón de consistencia	<b>0.08</b>
0.77		
1.25		
1.77		
$\Sigma$	<b>6.51</b>	

*Nota.* Cálculo de la razón de consistencia. Resultado menor que 0.1 por lo que las ponderaciones asignadas son aceptables. Elaboración propia, realizado con Microsoft Excel.

**Tabla 5.***Matriz de comparaciones pareadas de la variable pendiente en grados*

<b>Grados (°)</b>	<b>0-15</b>	<b>16-25</b>	<b>26-35</b>	<b>&gt;35</b>
<b>0-15</b>	1	1/3	1/7	1/8
<b>16-25</b>	3	1	1/4	1/6
<b>26-35</b>	7	4	1	1/3
<b>&gt;35</b>	8	6	3	1
<b>Σ</b>	<b>19.00</b>	<b>11.33</b>	<b>4.39</b>	<b>1.63</b>

*Nota.* Matriz de orden 4 donde se comparan las pendientes del terreno para determinar su influencia en los deslizamientos de acuerdo con la tabla 1. Elaboración propia, realizado con Microsoft Excel.

**Tabla 6.***Matriz de comparaciones pareadas normalizada y prioridades de la variable pendiente*

<b>Grados (°)</b>	<b>0-15</b>	<b>16-25</b>	<b>26-35</b>	<b>&gt;35</b>	<b>Prioridades (W1)</b>
<b>0 - 15</b>	0.05	0.03	0.03	0.08	<b>0.05</b>
<b>16-25</b>	0.16	0.09	0.06	0.10	<b>0.10</b>
<b>26-35</b>	0.37	0.35	0.23	0.21	<b>0.29</b>
<b>&gt;35</b>	0.42	0.53	0.68	0.62	<b>0.56</b>

*Nota.* Se muestra el cálculo de la matriz R y W1 para las pendientes en grados del terreno de Senahú. Elaboración propia, realizado con Microsoft Excel.

**Tabla 7.***Análisis de consistencia para la variable pendiente*

<b>A x (W1)</b>	<b>Índice</b>	<b>Resultado</b>
0.19	Índice de consistencia	0.08
0.41	Consistencia aleatoria	0.99
1.22	Razón de consistencia	<b>0.08</b>
2.42		
<b>Σ</b>	<b>4.24</b>	

*Nota.* Cálculo de la razón de consistencia. Resultado menor que 0.1 por lo que las ponderaciones asignadas son aceptables. Elaboración propia, realizado con Microsoft Excel.

**Tabla 8.***Matriz de comparaciones pareadas de la variable geología*

<b>Tipo de roca</b>	<b>Ígnea</b>	<b>Sedimentaria</b>	<b>Metamórfica</b>
<b>Ígnea</b>	1	1/5	1/7
<b>Sedimentaria</b>	5	1	1/3
<b>Metamórfica</b>	7	3	1
<b>Σ</b>	<b>13.00</b>	<b>4.20</b>	<b>1.48</b>

*Nota.* Matriz de orden 3 donde se comparan los tipos de roca madre del municipio de Senahú para determinar su influencia en los deslizamientos de acuerdo con la tabla 1. Elaboración propia, realizado con Microsoft Excel.

**Tabla 9.***Matriz de comparaciones pareadas normalizada y prioridades la variable geología*

Tipo de roca	Ígnea	Sedimentaria	Metamórfica	Prioridades (W1)
Ígnea	0.08	0.05	0.10	<b>0.07</b>
Sedimentaria	0.38	0.24	0.23	<b>0.28</b>
Metamórfica	0.54	0.71	0.68	<b>0.64</b>

Nota. Se muestra el cálculo de la matriz R y W1 para el tipo de roca del terreno de Senahú. Elaboración propia, realizado con Microsoft Excel.

**Tabla 10.***Análisis de consistencia para la variable geología*

	A x (W1)	Índice	Resultado
	0.22	Índice de consistencia	0.05
	0.87	Consistencia aleatoria	0.66
	2.01	Razón de consistencia	<b>0.07</b>
$\Sigma$	3.10		

Nota. Cálculo de la razón de consistencia. Resultado menor que 0.1 por lo que las ponderaciones asignadas son aceptables. Elaboración propia, realizado con Microsoft Excel.

**Tabla 11.***Matriz de comparaciones pareadas de la variable uso de suelo*

Uso de suelo	Infraestructura	Cultivos	Pastizal	Bosque
<b>Infraestructura</b>	1	3	5	8
<b>Cultivos</b>	1/3	1	3	5
<b>Pastizal</b>	1/5	1/3	1	3
<b>Bosque</b>	1/8	1/5	1/3	1
<b>Σ</b>	<b>1.66</b>	<b>4.53</b>	<b>9.33</b>	<b>17.00</b>

*Nota.* Matriz de orden 4 donde se comparan los tipos de uso del suelo en el municipio de Senahú para determinar su influencia en los deslizamientos de acuerdo con la tabla 1. Elaboración propia, realizado con Microsoft Excel.

**Tabla 12.***Matriz de comparaciones pareadas normalizada y prioridades la variable uso de suelo*

Uso de suelo	Infraestructura	Cultivos	Pastizal	Bosque	Prioridades (W1)
<b>Infraestructura</b>	0.60	0.66	0.54	0.47	<b>0.57</b>
<b>Cultivos</b>	0.20	0.22	0.32	0.29	<b>0.26</b>
<b>Pastizal</b>	0.12	0.07	0.11	0.18	<b>0.12</b>
<b>Bosque</b>	0.08	0.04	0.04	0.06	<b>0.05</b>

*Nota.* Se muestra la matriz R y W1 para el uso de suelo de Senahú. Elaboración propia, realizado con Microsoft Excel.

**Tabla 13.***Análisis de consistencia para la variable uso de suelo*

<b>A x (W1)</b>	<b>Índice</b>	<b>Resultado</b>
2.37	Índice de consistencia	0.05
1.07	Consistencia aleatoria	0.99
0.48	Razón de consistencia	<b>0.05</b>
0.22		
<b>Σ</b>	<b>4.14</b>	

*Nota.* Cálculo de la razón de consistencia. Resultado menor que 0.1 por lo que las ponderaciones asignadas son aceptables. Elaboración propia, realizado con Microsoft Excel.

**Tabla 14.***Matriz de comparaciones pareadas de la variable precipitación pluvial*

<b>Precipitación (mm)</b>	<b>&lt;5000</b>	<b>5001-5300</b>	<b>5301-5600</b>	<b>&gt;5600</b>
<b>&lt;5000</b>	1	1/3	1/7	1/8
<b>5001-5300</b>	3	1	1/4	1/6
<b>5301-5600</b>	7	4	1	1/3
<b>&gt;5600</b>	8	6	3	1
<b>Σ</b>	<b>19.00</b>	<b>11.33</b>	<b>4.39</b>	<b>1.63</b>

*Nota.* Matriz de orden 4 donde se compara la precipitación pluvial anual en el municipio de Senahú para determinar su influencia en los deslizamientos de acuerdo con la tabla 1. Elaboración propia, realizado con Microsoft Excel.

**Tabla 15.***Matriz de comparaciones pareadas normalizada y prioridades*

Precipitación (mm)	<5000	5001-5300	5301-5600	>5600	Prioridades (W1)
<5000	0.05	0.03	0.03	0.08	<b>0.05</b>
5001-5300	0.16	0.09	0.06	0.10	<b>0.10</b>
5301-5600	0.37	0.35	0.23	0.21	<b>0.29</b>
>5600	0.42	0.53	0.68	0.62	<b>0.56</b>

*Nota.* Matriz de comparaciones pareadas normalizada y prioridades de la variable precipitación pluvial. Se muestra la matriz R y W1 para el uso de suelo de Senahú. Elaboración propia, realizado con Microsoft Excel.

**Tabla 16.***Análisis de consistencia para la variable precipitación pluvial*

A x (W1)	Índice	Resultado
0.19	Índice de consistencia	0.08
0.41	Consistencia aleatoria	0.99
1.22	Razón de consistencia	<b>0.08</b>
2.42		
$\Sigma$ <b>4.24</b>		

*Nota.* Cálculo de la razón de consistencia. Resultado menor que 0.1 por lo que las ponderaciones asignadas son aceptables. Elaboración propia, realizado con Microsoft Excel.

**Tabla 17.***Matriz de comparaciones pareadas de la variable sismicidad*

<b>grados Richter</b>	<b>&gt;5</b>	<b>4.6 - 5</b>	<b>4.1 - 4.5</b>	<b>&lt;4</b>
<b>&gt;5</b>	1	1/3	1/7	1/8
<b>4.6 - 5</b>	3	1	1/4	1/6
<b>4.1-4.5</b>	7	4	1	1/3
<b>&lt;4</b>	8	6	3	1
<b>Σ</b>	19.00	11.33	4.39	1.63

*Nota.* Matriz de orden 4 donde se compara la magnitud de sismos ocurridos en el municipio de Senahú para determinar su influencia en los deslizamientos de acuerdo con la tabla 1. Elaboración propia, realizado con Microsoft Excel.

**Tabla 18.***Matriz de comparaciones pareadas normalizada y prioridades de la variable sismicidad*

<b>Grados Richter</b>	<b>&lt;4</b>	<b>4.1 - 4.5</b>	<b>4.6 - 5</b>	<b>&gt;5</b>	<b>Prioridades (W1)</b>
<b>&lt;4</b>	0.05	0.03	0.03	0.08	<b>0.05</b>
<b>4.1 - 4.5</b>	0.16	0.09	0.06	0.10	<b>0.10</b>
<b>4.6 - 5</b>	0.37	0.35	0.23	0.21	<b>0.29</b>
<b>&gt;5</b>	0.42	0.53	0.68	0.62	<b>0.56</b>

*Nota.* Se muestra la matriz R y W1 para la sismicidad de Senahú. Elaboración propia, realizado con Microsoft Excel.

**Tabla 19.***Análisis de consistencia para la variable sismicidad*

<b>A x (W1)</b>	<b>Índice</b>	<b>Resultado</b>
0.19	Índice de consistencia	0.08
0.41	Consistencia aleatoria	0.99
1.22	Razón de consistencia	<b>0.08</b>
2.42		
<b>Σ</b>	<b>4.24</b>	

*Nota.* Cálculo de la razón de consistencia. Resultado menor que 0.1 por lo que las ponderaciones asignadas son aceptables. Elaboración propia, realizado con Microsoft Excel.

**Tabla 20.***Matriz de comparaciones pareadas de la variable distancia población-falla*

<b>Distancia (m)</b>	<b>&gt;18,000</b>	<b>18,000 - 13,001</b>	<b>13,000- 9,001</b>	<b>9,000 - 3,001</b>	<b>&lt;3000</b>
<b>&gt;18,000</b>	1	7	6	5	4
<b>18,000 - 13,001</b>	1/7	1	5	4	3
<b>13,000-9,001</b>	1/6	1/5	1	3	2
<b>9,000 - 3,001</b>	1/5	1/4	1/3	1	2
<b>&lt;3000</b>	1/4	1/3	1/2	1/2	1
<b>Σ</b>	<b>1.76</b>	<b>8.78</b>	<b>12.83</b>	<b>13.50</b>	<b>12.00</b>

*Nota.* Matriz de orden 5 donde se compara la distancia de los poblados del municipio de Senahú a la falla Chixoy-Polochic para determinar su influencia en los deslizamientos de acuerdo con la tabla 1. Elaboración propia, realizado con Microsoft Excel.

**Tabla 21.***Matriz de comparaciones pareadas*

Distancia (m)	<9000	12,000 - 9,001	15,000- 12,001	18,000 - 15,001	>18,000	Prioridades (W1)
<9000	0.57	0.80	0.47	0.37	0.33	<b>0.51</b>
12,000 - 9,001	0.08	0.11	0.39	0.30	0.25	<b>0.23</b>
15,000-12,001	0.09	0.02	0.08	0.22	0.17	<b>0.12</b>
18,000 - 15,001	0.11	0.03	0.03	0.07	0.17	<b>0.08</b>
>18,000	0.14	0.04	0.04	0.04	0.08	<b>0.07</b>

*Nota.* Matriz de comparaciones pareadas normalizada y prioridades de la variable distancia población-falla. Se muestra la matriz R y W1 para la distancia de poblados de Senahú a la falla Chixoy-Polochic. Elaboración propia, realizado con Microsoft Excel.

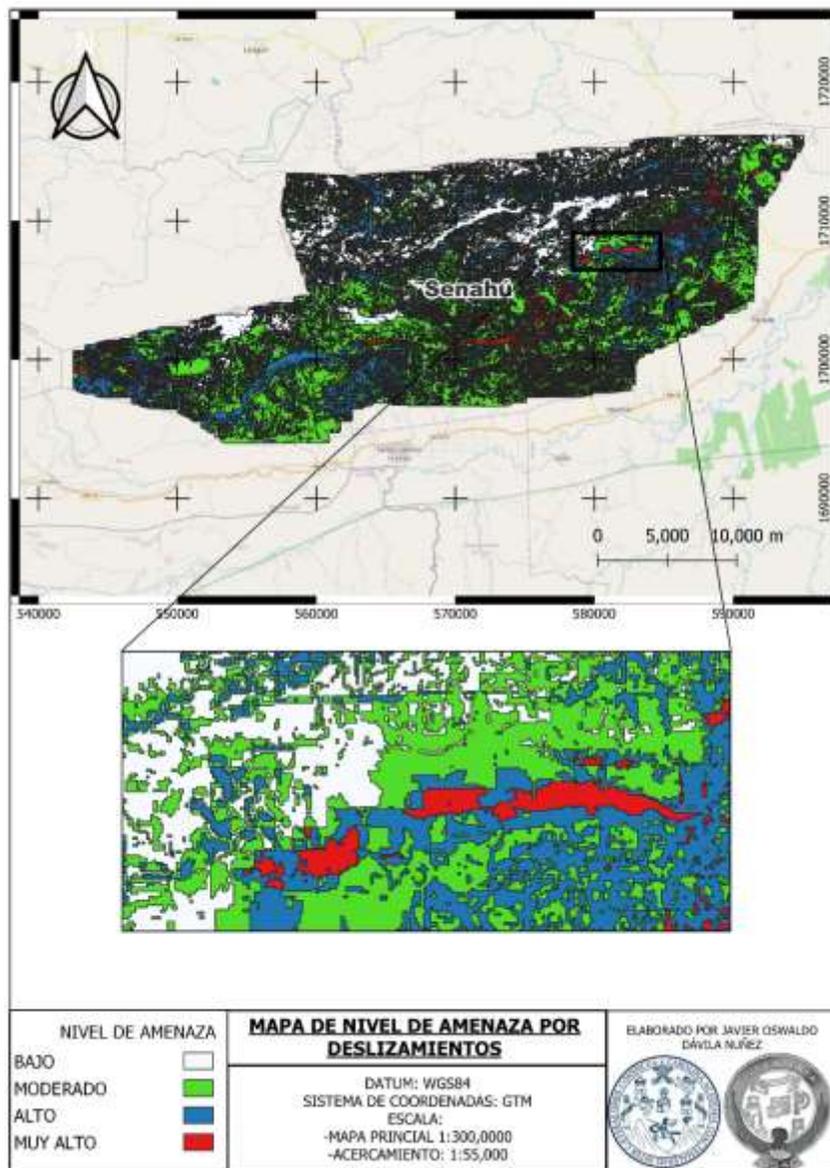
**Tabla 22.***Análisis de consistencia para la variable distancia población-falla*

A x (W1)	Índice	Resultado
3.47	Índice De Consistencia	0.06
1.41	Consistencia Aleatoria	1.32
0.63	Razón De Consistencia	<b>0.05</b>
0.41		
0.37		
<b>Σ 6.30</b>		

*Nota.* Cálculo de la razón de consistencia. Resultado menor que 0.1 por lo que las ponderaciones asignadas son aceptables. Elaboración propia, realizado con Microsoft Excel.

**Figura 27.**

*Mapa de la zonificación del nivel de amenaza por deslizamientos*



*Nota.* Se muestra la zonificación del nivel de amenaza por deslizamiento en todo el municipio de Senahú y un área con acercamiento para mejor apreciación de la distribución. Elaboración propia, realizado con QGIS 3.26.2.

## 5. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

En este estudio se investigó la amenaza por deslizamiento en el municipio de Senahú, Alta Verapaz utilizando un sistema de información geográfica. El objetivo del estudio fue construir la zonificación ambiental del municipio. A partir del análisis de las variables en estudio y la aplicación del método AHP se encontró que la prioridad de las variables, de mayor a menor son: pendiente del terreno (35 %), distancia de la población a la falla más cercana (26 %), sismicidad (19 %), precipitación pluvia (12 %), geología (5 %) y uso del suelo (3 %) según la tabla 3. Estos resultados son consistentes con los descritos por Gorohkovich *et. al.* (2016) en los antecedentes considerados en este estudio.

A partir del análisis de cada una de las variables en conjunto e individualmente se encontró que las ponderaciones asignadas en las matrices de comparaciones pareadas fueron aceptables por haber obtenido una razón de consistencia menor o igual a 1 según se observa en las tablas 4, 7, 10, 13, 16, 19 y 22. A partir de estas ponderaciones se encontró que aquellas pendientes mayores a 26 grados, suelos provenientes de roca metamórfica, uso de suelo destinado a infraestructura, precipitaciones anuales mayores a 5300 mm, sismicidad histórica mayor a 4.6 grados Richter y distancia menor que 9km de un punto poblado a la falla, representan la mayor influencia en el valor de amenaza por deslizamiento.

Los hallazgos sugieren que el método AHP es altamente eficiente cuando se aplica interpretando correctamente la influencia que cada variable tiene en un proceso (deslizamiento) y de la misma manera demuestran la

versatilidad y conveniencia de aplicar la metodología utilizando un sistema de información geográfica que procesa datos cuantitativos y cualitativos y los homogeniza por medio de las prioridades obtenidas para una fácil representación como en un mapa con colores asignados para cada valor de amenaza. Por otro lado, también se demostró que el método AHP puede representar un mayor grado de complejidad al ser necesaria un juicio profesional basado en la experiencia lo cual puede limitar su alcance y aplicación si no se cuenta con el aporte de un experto en el tema.

La zonificación construida en este estudio describe que el territorio del municipio de Senahú se encuentra en un nivel de amenaza bajo en un 19.7 %; moderado, 44.6 %; alto, 29.6 % y muy alto 6.1 % según la figura 27. Se observa también en esta figura la tendencia al nivel de amenaza muy alto en la parte sur del municipio debido a que es la más cercana a la falla y también por poseer un mayor grado de pendientes, siendo ambos factores de mayor prioridad según la tabla 3. De la misma manera se observa en las figuras 11 y 12 un “hilo” de pendientes elevadas que se extiende en forma lineal de oeste a este en la zona sur del municipio, aportando así a elevar el valor de amenaza por deslizamientos.

A partir del análisis gráfico se encontró que el 35.7 % del territorio del municipio de Senahú se encuentra en alto riesgo de ocurrencia de un deslizamiento por lo que se confirman las afirmaciones descritas por Behlert Diekjobst & Felgentreff (2020) en la justificación de este trabajo al calificar de territorio de muy alto riesgo a Guatemala y de la misma manera explica los antecedentes de deslizamientos que han ocurrido en este municipio.

## CONCLUSIONES

1. Se aplicó un análisis estadístico multicriterio para evaluar variables físicas (pendiente, geología, uso del suelo, distancia población-falla y sismicidad) y ambientales (precipitación pluvial) mediante el método de análisis jerárquico (AHP). Este análisis fue verificado y validado con una medida de consistencia matemática que respaldó los juicios del experto al revisar y confirmar la consistencia de las matrices construidas. El método permitió establecer la prioridad de las variables evaluadas, concluyendo que la pendiente del terreno y la proximidad de la población a la falla Chixoy-Polochic son los factores más críticos para el riesgo de deslizamientos.
2. La evaluación de la amenaza por deslizamientos se realizó multiplicando las prioridades de las variables estudiadas por la ponderación asignada a cada una, según sus características o magnitud (ver tabla 3). Este análisis se llevó a cabo con el *software* de sistemas de información geográfica QGIS, mediante operaciones entre capas geográficas, lo que permitió generar una zonificación clasificada en categorías de riesgo: baja, moderada, alta y muy alta.
3. Se creó un mapa de amenazas por deslizamientos para el municipio de Senahú, Alta Verapaz, utilizando una codificación de colores. En el mapa, las áreas de riesgo bajo se representan en blanco, las de riesgo moderado en amarillo, las de alto riesgo en azul y las de muy alto riesgo en rojo.



## RECOMENDACIONES

1. Fortalecer y ampliar el conocimiento y la utilización de los sistemas de información geográfica como herramienta para analizar amenazas ambientales, mejorando así el acceso y la disponibilidad de información crucial. Esto puede prevenir e identificar amenazas naturales, mitigar impactos en el medio ambiente, la infraestructura y la sociedad, y reducir la vulnerabilidad de las poblaciones afectadas.
2. Considerar, utilizar y aplicar el conocimiento técnico-científico existente para actuar de manera preventiva en beneficio de las comunidades. Es crucial educar a la población sobre la importancia de reconocer que el uso de este conocimiento puede salvar vidas.
3. Utilizar capas de información actualizadas y de alta resolución para aumentar el nivel de detalle, con una precisión mínima de 10 metros. Asimismo, al recopilar registros, se aconseja considerar datos históricos completos para obtener una mayor perspectiva temporal de los eventos ocurridos.
4. Promover la comprensión del comportamiento de los deslizamientos en las comunidades cercanas a las zonas clasificadas como de alto y muy alto riesgo. Es crucial educar sobre la influencia humana en el medio ambiente y cómo identificar factores desencadenantes como lluvias prolongadas, saturación del suelo, sismos, entre otros.



## REFERENCIAS

- Alimi, S., Andongma, T., & Ogungbade, O. (2022). Flood vulnerable zones mapping using geospatial techniques: Case study of Osogbo Metropolis , Nigeria [Mapeo de zonas vulnerables a inundaciones utilizando técnicas geoespaciales: estudio de caso de la metrópolis de Osogbo, Nigeria]. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Sciences*, 25(3), 841–850. <https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2022.08.003>
- Ávila, M. (2018). La institucionalidad de la gestión de riesgo a desastres en Guatemala. *Revista Naturaleza, Sociedad y Ambiente*, 5(1), 77–90. <https://doi.org/10.37533/cunsurori.v5i1.33>
- Barillas, E. (2022). *El antes, durante y después de la gestión de desastres en Guatemala*. Office for the Coordination of Humanitarian Affairs (OCHA). <https://reliefweb.int/report/guatemala/el-antes-durante-y-despues-de-la-gestion-de-desastres-en-guatemala>
- Behlert, B., Diekjobst, R., & Felgentreff, C., (2020). *World Risk Report 2020-Focus: Forced Displacement and Migration* [Informe Mundial de Riesgos 2020-Enfoque: Desplazamiento forzado y migración]. <http://www.worldriskreport.org>.
- Campos, A., & Barbero–Barrera, M. (2021). Evaluación de la digitalización frente a desastres naturales: los casos de Guatemala, Costa Rica y Nicaragua. *Revista de Fomento Social*, 3(2020), 327–354. <https://doi.org/10.32418/rfs.2020.298.4343>

Coordinadora Nacional para la Reducción de Desastres. (2010). *Boletín Informativo No. 1082 – Deslizamiento se registró en Senahú*. <https://conred.gob.gt/boletin-informativo-no-1082-deslizamiento-se-registro-en-senahu-alta-verapaz/>

Crement, G., Galasso, C., & McCloskey, J. (2022). Modelling and quantifying tomorrow's risks from natural hazards. *Science of the Total Environment*, 817, 152552. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.152552>

El Jazouli, A., Barakat, A., & Khellouk, R. (2019). GIS-multicriteria evaluation using AHP for landslide susceptibility mapping in Oum Er Rbia high basin (Morocco) [Evaluación multicriterio SIG utilizando AHP para el mapeo de susceptibilidad a deslizamientos de tierra en la cuenca alta de Oum Er Rbia (Marruecos)]. *Geoenvironmental Disasters*, 6(1), 1-12. <https://doi.org/10.1186/s40677-019-0119-7>

Gorohkovich, Y., Machado, E. A., Ivan, L., & Melgar, G. (2016). *Improving landslide hazard and risk mapping in Guatemala using terrain aspect* [Mejorar el mapeo de amenazas y riesgos de deslizamientos de tierra en Guatemala utilizando el aspecto del terreno]. *Natural Hazards*, 81, 869-886. <https://link.springer.com/article/10.1007/s11069-015-2109-8>

Huggel, C., Khabarov, N., Korup, O., & Obersteiner, M. (2015). Physical impacts of climate change on landslide occurrence and related adaptation [Impactos físicos del cambio climático en la ocurrencia de deslizamientos de tierra y la adaptación relacionada]. *University of Zurich*, 229(1–2), 45–59. <https://doi.org/https://doi.org/10.5167/uzh-68356>

- Olaya, V. (2020). *Sistemas de Información Geográfica*. [https://www.icog.es/TyT/files/Libro\\_SIG.pdf](https://www.icog.es/TyT/files/Libro_SIG.pdf)
- Organización de las Naciones Unidas. (2016). Informe del grupo de trabajo indicadores desastres. *Organización de Las Naciones Unidas, 21184*, 1–39.
- Opolot, E. (2013). Application of Remote Sensing and Geographical Information Systems in Flood Management: A Review [Aplicación de sistemas de información geográfica y teledetección en la gestión de inundaciones: una revisión]. *Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology*, 6(10), 1884–1894. <http://maxwellsci.com/print/rjaset/v6-1884-1894.pdf>
- Prieto, G. (2016). *La historia de la cartografía mundial a través de los mapas*. Geografía Infinita .
- Santos, J. (2020). *Sistemas de Información Geográfica*. Universidad Nacional de Educación a Distancia.
- Scaioni, M., Longoni, L., & Melillo, V. (2014). Remote Sensing for Landslide Investigations: An Overview of Recent Achievements and Perspectives [Teledetección para investigaciones de deslizamientos de tierra: una visión general de los logros y perspectivas recientes]. *Remote Sensing*, 6(7), 5909–5937. <https://doi.org/10.3390/rs6075909>
- Shahabi, H. & Hashim, M. (2015). Landslide susceptibility mapping using GIS-based statistical models and Remote sensing data in tropical environment [Mapeo de susceptibilidad a deslizamientos de tierra

utilizando modelos estadísticos basados en SIG y datos de teledetección en ambientes tropicales]. *Scientific Reports*, 5, 1–15.  
<https://doi.org/10.1038/srep09899>

Tarback, E. (2005). *Procesos gravitacionales: la fuerza de la gravedad*. Pearson Educación S. A

Torres, L. (2015). *SIG aplicado a la zonificación por amenaza de inundación en la cuenca del río Polochic, Alta Verapaz, Guatemala*. Universidad San Francisco de Quito.

## APÉNDICES

### Apéndice 1.

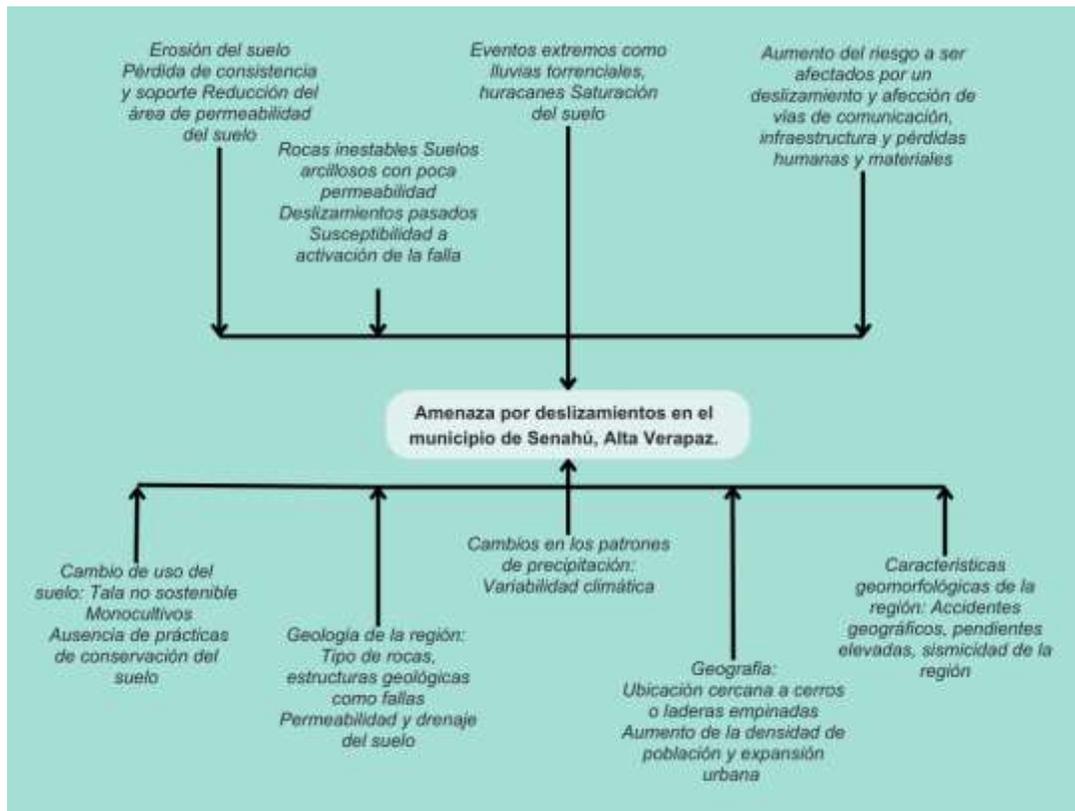
*Tabla de requisitos académicos*

Área	Curso	Contenido
Complementaria	Climatología	Fenómenos meteorológicos, precipitación
Sanitaria	Geología	Procesos geológicos, sismicidad, génesis de suelos, características de la roca madre
	Gestión de desastres	Amenazas ambientales naturales, amenazas exógenas e hidrológicas
Aguas	Manejo de cuencas	Manejo integral de la cuenca, caracterización morfométrica y biofísica de una cuenca
	Hidrología	Ciclo hidrológico, datos de precipitación
Dibujo y topografía	Topografía 3	Cartografía y sistemas de información geográfica
	Taller de sistema de información geográfica	Manejo, almacenamiento y operación de información geográfica en capas y representación de la información geográfica

*Nota.* Tabla de requisitos académicos de la carrera de Ingeniería Ambiental de la Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería. Elaboración propia, realizado con Microsoft Excel.

## Apéndice 2.

### Árbol de problemas



Nota. Árbol de problemas para la amenaza por deslizamiento en el municipio de Senahú, Alta Verapaz. Elaboración propia.

### **Apéndice 3.**

*Vínculo a la carpeta de Google Drive*

En esta sección se añade un vínculo hacia una carpeta de libre acceso en Google Drive debido a que los registros históricos que se utilizaron crean tablas tan extensas de hasta 200,000 filas lo cual no es conveniente incluir en este trabajo. Dicha carpeta contiene registros de precipitación pluvia, sismos en datos crudos, así como las capas shape y ráster con los datos ya procesados para su libre consulta.

<https://drive.google.com/drive/folders/1b-TN9JcWF9wXFdWcy0Rlqlgp-QBLtoG3?usp=sharing>

*Nota.* Acceso a datos. Elaboración propia.