

**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE CUENCA**

CARRERA DE INGENIERÍA AMBIENTAL

*Trabajo de titulación previo a la
obtención del título de Ingeniera
Ambiental e Ingeniero Ambiental*

TRABAJO EXPERIMENTAL:

**“EVALUACIÓN DE LA SUSCEPTIBILIDAD A MOVIMIENTOS DE MASAS POR
DESLIZAMIENTOS MEDIANTE LOS ÍNDICES DE VEGETACIÓN NDVI Y SBI DEL
CANTÓN ALAUSÍ, PROVINCIA DE CHIMBORAZO”**

AUTORES:

LISSETTE JACQUELINE MEJÍA PESÁNTEZ

JUAN CARLOS TROYA IRIARTE

TUTORA:

ING. ESTEFANÍA CARIDAD AVILÉS SACOTO, PhD

CUENCA - ECUADOR

2021

CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR

Nosotros, Lissette Jacqueline Mejía Pesántez con documento de identificación N° 0105339642 y Juan Carlos Troya Iriarte con documento de identificación N° 1106087149, manifestamos nuestra voluntad y cedemos a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que somos autores del trabajo de titulación: **“EVALUACIÓN DE LA SUSCEPTIBILIDAD A MOVIMIENTOS DE MASAS POR DESLIZAMIENTOS MEDIANTE LOS ÍNDICES DE VEGETACIÓN NDVI Y SBI DEL CANTÓN ALAUSÍ, PROVINCIA DE CHIMBORAZO”**, mismo que ha sido desarrollado para optar por el título de: *Ingeniera Ambiental e Ingeniero Ambiental*, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En la aplicación a lo determinado por la Ley de Propiedad Intelectual, en nuestra condición de autores nos reservamos los derechos morales de la obra antes citada. En concordancia, suscribimos este documento en el momento que hacemos entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, octubre de 2021.



Lissette Jacqueline Mejía Pesántez

C.I. 0105339642



Juan Carlos Troya Iriarte

C.I. 1106087149

CERTIFICACIÓN

Yo, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: **“EVALUACIÓN DE LA SUSCEPTIBILIDAD A MOVIMIENTOS DE MASAS POR DESLIZAMIENTOS MEDIANTE LOS ÍNDICES DE VEGETACIÓN NDVI Y SBI DEL CANTÓN ALAUSÍ, PROVINCIA DE CHIMBORAZO”**, realizado por Lissette Jacqueline Mejía Pesántez y Juan Carlos Troya Iriarte, obteniendo el *Trabajo Experimental*, que cumple con todos los requisitos estipulados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, octubre de 2021.



Ing. Estefanía Caridad Avilés Sacoto, PhD

C.I. 0104551395

DECLARATORIA DE RESPONSABILIDAD

Nosotros, Lissette Jacqueline Mejía Pesántez con documento de identificación N° 0105339642 y Juan Carlos Troya Iriarte con documento de identificación N° 1106087149, autores del trabajo de titulación: **“EVALUACIÓN DE LA SUSCEPTIBILIDAD A MOVIMIENTOS DE MASAS POR DESLIZAMIENTOS MEDIANTE LOS ÍNDICES DE VEGETACIÓN NDVI Y SBI DEL CANTÓN ALAUSÍ, PROVINCIA DE CHIMBORAZO”**, certificamos que el total contenido del *Trabajo Experimental*, es de nuestra exclusiva responsabilidad y autoría.

Cuenca, octubre de 2021.



Lissette Jacqueline Mejía Pesántez

C.I. 0105339642



Juan Carlos Troya Iriarte

C.I. 1106087149

DEDICATORIA

Lisette,

A Dios, por haberme dado la vida y permitirme llegar hasta este momento tan importante de mi formación académica, enseñándome que los errores no son más que aprendizajes de vida.

A Angélica Pesantez y María Pesantez, que siempre han estado para mí en las buenas y en las malas, enseñándome que se puede alcanzar cualquier objetivo, sin importar que tan difícil sea conseguirlo.

A mi tía, hermano y padre, que con sus oraciones, consejos y palabras de aliento me han brindado su apoyo incondicional, logrando hacer de mí una mejor persona.

A mis amigos, con los que compartí dentro y fuera del aula, los cuales me apoyaron en los momentos más complicados y difíciles de mi vida, enseñándome que el camino al éxito es largo, pero no inalcanzable.

DEDICATORIA

Juan,

En primer lugar, agradecido con Dios, por haberme levantado cuando tropecé y enseñarme que caer no significa perder ni fracasar, porque nuestro propósito personal va mucho más allá que cualquier anhelo temporal.

Marco Troya, mi padre, el que ha estado conmigo en las buenas y en las malas, el que me ha inculcado el respeto, la responsabilidad, la templanza, la confianza y el amor propio, convirtiéndome en una persona fuerte, confiada y decidida.

María Troya y Andrés Troya, mis entrañables y amados hermanos, que me enseñaron que con responsabilidad, disciplina y perseverancia se puede lograr cualquier cosa.

AGRADECIMIENTOS

A nuestra tutora Estefanía Caridad Avilés Sacoto, que gracias a su continuo apoyo se ha podido culminar este trabajo de titulación, entregándonos lo que nadie nos puede quitar, lo aprendido, la educación y el conocimiento que nos servirá en nuestro desarrollo humano y profesional.

RESUMEN

En este trabajo de titulación se hizo un estudio de susceptibilidad a movimientos de masas por deslizamientos del cantón Alausí, provincia de Chimborazo. La zona de estudio tiene una extensión de 1657,97 km². En primera instancia se identificaron las zonas susceptibles a deslizamientos mediante técnicas geomáticas y el análisis de imágenes satelitales del sensor Sentinel 2 de los años 2016, 2018, 2020 y 2021. Luego, se realizaron combinaciones multitemporales de los mapas temáticos del NDVI, SBI y de la pendiente, con el propósito de identificar los estados de actividad de los deslizamientos. Para disminuir el error se realizó el cálculo de las diferencias de temporalidades, con lo cual se las relacionó mediante un traslape espacial, obteniendo de esta manera el mapa de susceptibilidad a deslizamientos. Las parroquias que presentaron susceptibilidad alta fueron Guasuntos, Sibambe y Huigra con un área total de 9183,38 Ha, las de susceptibilidad media fueron las parroquias de Achupallas, Sibambe Sur y Chillanes con un área total de 1185,16 Ha y las parroquias que presentaron susceptibilidad baja fueron Tixán, Sevilla, Pistishi y Pumallacta con un área total de 152776,11 Ha. Finalmente, para la validación de resultados se aplicaron tres métodos de verificación, el primero a través de un muestreo estratificado, el segundo mediante la comprobación de los deslizamientos históricos registrados y el último a través de un análisis estadístico del índice de Kappa.

Palabras claves: *Teledetección, geomática, deslizamientos, índices espectrales, imágenes satelitales, Sentinel 2, model builder.*

ABSTRACT

In this titling work, a study was made of susceptibility to mass movements due to landslides in the Alausí canton, province of Chimborazo. The study area has an extension of 1657.97 km². First, landslide susceptible zones were identified using geomatics techniques and analysis of Sentinel 2 sensor satellite images from 2016, 2018, 2020 and 2021. Then, multitemporal combinations of NDVI, SBI and slope thematic maps were performed in order to identify landslide activity states. To reduce the error, the differences in temporalities were calculated and related by means of a spatial overlap, thus obtaining the landslide susceptibility map. The parishes with high susceptibility were Guasuntos, Sibambe and Huigra with a total area of 9183.38 ha, those with medium susceptibility were the parishes of Achupallas, Sibambe Sur and Chillanes with a total

area of 1185.16 ha and the parishes with low susceptibility were Tixán, Sevilla, Pistishi and Pumallacta with a total area of 152776.11 ha. Finally, for the validation of results, three verification methods were applied, the first through stratified sampling, the second by checking the historical landslides recorded and the last through a statistical analysis of the Kappa index.

Key Words: Remote sensing, geomatics, landslides, spectral indexes, satellite images, sentinel 2, model builder.

ÍNDICE GENERAL

1	INTRODUCCIÓN.....	14
2	MARCO LEGAL.....	15
2.1	Herramientas legales	15
3	MARCO TEÓRICO	17
3.1	Movimientos de masas	17
3.2	Estados de actividad de los deslizamientos.....	17
3.3	Estructura de los deslizamientos	19
3.4	Susceptibilidad a deslizamientos	20
3.5	Factores que afectan a la estabilidad del terreno	21
3.6	Causas de los deslizamientos.....	22
3.7	Consecuencias de los deslizamientos	23
3.8	Lineamientos preventivos contra los deslizamientos.....	24
3.9	Sensores remotos	24
3.9.1	Imágenes satelitales.....	25
3.9.2	Sensores remotos	26
3.9.3	Ventajas de las imágenes satelitales Sentinel 2.....	27
3.9.4	Procesamiento de imágenes satelitales.....	27
3.10	Sistemas de información geográfica (SIG)	29
3.10.1	Algebra de mapas.....	29
3.10.2	Pendientes y Orientaciones	29
3.10.3	Model Builder.....	30
3.11	Índices de vegetación.....	30
3.11.1	Índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI).....	30
3.11.2	Índice de brillantez del suelo (SBI).....	31
3.12	Importancia de la validación de resultados	33
4	MATERIALES Y MÉTODOS	34
5	METODOLOGÍA	35
5.1	Delimitación del área de estudio	35
5.2	Adquisición y procesamiento de datos.....	36
5.3	Determinación de las pendientes e índices espectrales.....	40
5.3.1	Índices de Vegetación de Diferencia Normalizada e Índices de Brillantez del Suelo	41
5.3.2	Mapa temático de Pendientes y Orientaciones.....	46

5.4	Extracción de los procesos a movimientos de masas por deslizamientos	47
5.4.1	Combinaciones multitemporales	47
5.4.2	Diferencia de temporalidades.....	48
5.5	Métodos de validación.....	49
5.5.1	Muestreo estratificado	49
5.5.2	Verificación mediante los deslizamientos históricos registrados	51
5.5.3	Análisis estadístico del índice de Kappa de Cohen	52
6	RESULTADOS	54
6.1	Análisis de la pendiente	54
6.2	Análisis de los índices espectrales NDVI y SBI.....	55
6.3	Análisis de las combinaciones.....	62
6.4	Análisis de la diferencia de temporalidades	65
6.5	Análisis de las zonas susceptibles a deslizamientos	71
6.6	Análisis de la validación de resultados.....	76
6.7	Análisis estadístico del índice de Kappa.....	78
7	DISCUSIÓN	79
8	CONCLUSIONES.....	80
9	RECOMENDACIONES.....	81
10	REFERENCIAS.....	82

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1	.....	18
Tabla 2	.....	28
Tabla 3	.....	38
Tabla 4	.....	41
Tabla 5	.....	47
Tabla 6	.....	52
Tabla 7	.....	53
Tabla 8	.....	54
Tabla 9	.....	55
Tabla 10	.....	56
Tabla 11	.....	57
Tabla 12	.....	58
Tabla 13	.....	59
Tabla 14	.....	60
Tabla 15	.....	61

Tabla 16	62
Tabla 17	69
Tabla 18	70
Tabla 19	71
Tabla 20	72
Tabla 21	74
Tabla 22	78

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1	17
Ilustración 2	18
Ilustración 3	20
Ilustración 4	21
Ilustración 5	22
Ilustración 6	23
Ilustración 7	24
Ilustración 8	25
Ilustración 9	26
Ilustración 10	27
Ilustración 11	32
Ilustración 12	32
Ilustración 13	34
Ilustración 14	35
Ilustración 15	36
Ilustración 16	37
Ilustración 17	42
Ilustración 18	43
Ilustración 19	44
Ilustración 20	45
Ilustración 21	46
Ilustración 22	48
Ilustración 23	49
Ilustración 24	50
Ilustración 25	51
Ilustración 26	54
Ilustración 27	55
Ilustración 28	56
Ilustración 29	57
Ilustración 30	58
Ilustración 31	59
Ilustración 32	60
Ilustración 33	61
Ilustración 34	62
Ilustración 35	63

Ilustración 36	64
Ilustración 37	66
Ilustración 38	67
Ilustración 39	68
Ilustración 40	69
Ilustración 41	70
Ilustración 42	71
Ilustración 43	72
Ilustración 44	73
Ilustración 45	77

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1	31
Ecuación 2	31
Ecuación 3	53

1 INTRODUCCIÓN

Ecuador es uno de los países de Sudamérica que por su ubicación geográfica se ve influenciado por movimientos de masas, especialmente deslizamientos, los mismos que son ocasionados por fuertes precipitaciones, actividades agrícolas, extensión de las vertientes, formaciones geológicas, presencia de fallas, actividades naturales y antrópicas (Bustamante, 2018); (Demoraes et al., 2016).

El cantón Alausí, provincia de Chimborazo, se caracteriza por tener grandes deslizamientos, los cuales han afectado a los ecosistemas terrestres y acuáticos. Además, los valores de la vegetación y de las pendientes, son determinantes a la hora de realizar inventarios sobre deslizamientos (GAD Municipal Alausi, 2015); (Cadena Alvarado & Pérez Carrillo, 2009).

En este sentido, es de vital importancia que se realicen estudios de los movimientos de masas por deslizamientos, y de esta manera contribuir a la generación de planes de contingencia y emergencia, que vayan en beneficio de los sectores agrícolas, forestales, ambientales y económicos.

Este trabajo tuvo como objetivo evaluar la susceptibilidad a movimientos de masas por deslizamientos a través de índices de vegetación NDVI y SBI dentro del cantón Alausí, mediante el procesamiento multitemporal de imágenes satelitales Sentinel 2, se empleó como base la identificación de las pendientes y los índices espectrales (NDVI y SBI) haciendo uso del software QGIS y ARCGIS conjuntamente.

Finalmente, se realizó el mapa de susceptibilidad a movimientos de masas por deslizamientos con la respectiva validación de resultados, identificando aquellas zonas con alta, media y baja vulnerabilidad.

2 MARCO LEGAL

2.1 Herramientas legales

Constitución de la República del Ecuador

Art. 389.- “El Estado protegerá a las personas, las colectividades y la naturaleza frente a los efectos negativos de los desastres de origen natural o antrópico mediante la prevención ante el riesgo, la mitigación de desastres, la recuperación y mejoramiento de las condiciones sociales, económicas y ambientales, con el objetivo de minimizar la condición de vulnerabilidad. El sistema nacional descentralizado de gestión de riesgo está compuesto por las unidades de gestión de riesgo de todas las instituciones públicas y privadas en los ámbitos local, regional y nacional. El Estado ejercerá la rectoría a través del organismo técnico establecido en la ley” (Constitución del Ecuador, 2008).

Código Orgánico de Organización Territorial, Autonomía y Descentralización

Art. 140.- “Ejercicio de la competencia de gestión de riesgos. - La gestión de riesgos que incluye las acciones de prevención, reacción, mitigación, reconstrucción y transferencia, para enfrentar todas las amenazas de origen natural o antrópico que afecten al territorio se gestionarán de manera concurrente y de forma articulada por todos los niveles de gobierno de acuerdo con las políticas y los planes emitidos por el organismo nacional responsable, de acuerdo con la Constitución y la ley. Los gobiernos autónomos descentralizados municipales adoptarán obligatoriamente normas técnicas para la prevención y gestión de riesgos en sus territorios con el propósito de proteger las personas, colectividades y la naturaleza, en sus procesos de ordenamiento territorial. Para el caso de riesgos sísmicos los Municipios expedirán ordenanzas que reglamenten la aplicación de normas de construcción y prevención. La gestión de los servicios de prevención, protección, socorro y extinción de incendios, que de acuerdo con la Constitución corresponde a los gobiernos autónomos descentralizados municipales, se ejercerá con sujeción a la ley que regule la materia. Para tal efecto, los cuerpos de bomberos del país serán considerados como entidades adscritas a los gobiernos autónomos descentralizados municipales, quienes funcionarán con autonomía administrativa y financiera, presupuestaria y operativa, observando la ley especial y normativas vigentes a las que estarán sujetos” (COOTAD, 2010).

Código Orgánico de Planificación y Finanzas Públicas

Art. 64.- “Preeminencia de la producción nacional e incorporación de enfoques ambientales y de gestión de riesgo. - En el diseño e implementación de los programas y proyectos de inversión pública, se promoverá la incorporación de acciones favorables al ecosistema, mitigación, adaptación al cambio climático y a la gestión de vulnerabilidades y riesgos antrópicos y naturales. En la adquisición de bienes y servicios, necesarios para la ejecución de los programas y proyectos, se privilegiará a la producción nacional” (Oficio No. T.5458-SNJ-10-1558, 2010).

Ley Orgánica de Ordenamiento Territorial, Uso y Gestión de Suelo

Art. 11.- “Alcance del componente de ordenamiento territorial. Además de lo previsto en el Código Orgánico de Planificación y Finanzas Públicas y otras disposiciones legales, la planificación del ordenamiento territorial de los Gobiernos Autónomos Descentralizados observarán, en el marco de sus competencias” (Oficio No. SAN-2016-1196, 2016).

3 MARCO TEÓRICO

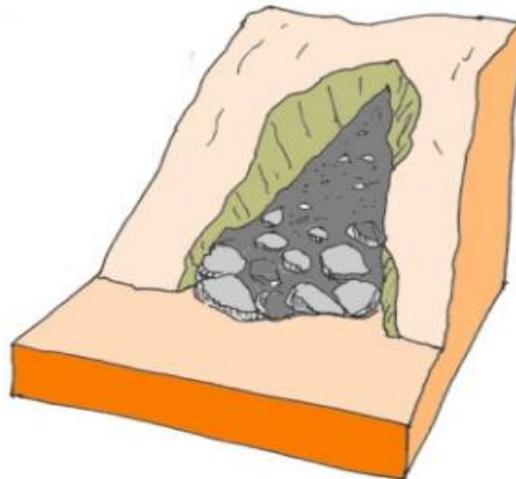
3.1 Movimientos de masas

Se refiere a los movimientos de rocas, detritos o escombros desplazados laderas abajo por acción de la gravedad. Estos movimientos son causados por las intensas lluvias, actividades agrícolas y cambios de uso de suelo, los cuales a su vez se pueden clasificar en hundimientos, deslizamientos, caídas y movimientos complejos (Ortíz Agudelo, 2019); (Montero Olarte, 2017).

Los deslizamientos se forman a partir de grietas transversales, localizándose en los escarpes principales y en las superficies de rotura (López Cordonez, 2011); (Alcántara Ayala, 2000).

Ilustración 1

Esquema de un deslizamiento



Fuente: (Aizpiri et al., 2014)

3.2 Estados de actividad de los deslizamientos

Los terrenos son más propensos a deslizarse cuando se debilitan las zonas de altura, debido a que ocasionan movimientos discontinuos y tangenciales. Por lo que, los estados funcionales constituyen una parte fundamental para la predicción de los deslizamientos (Beltrán Rincón, 2019). A continuación, se presentan los estados de actividad que tienen los deslizamientos.

Tabla 1

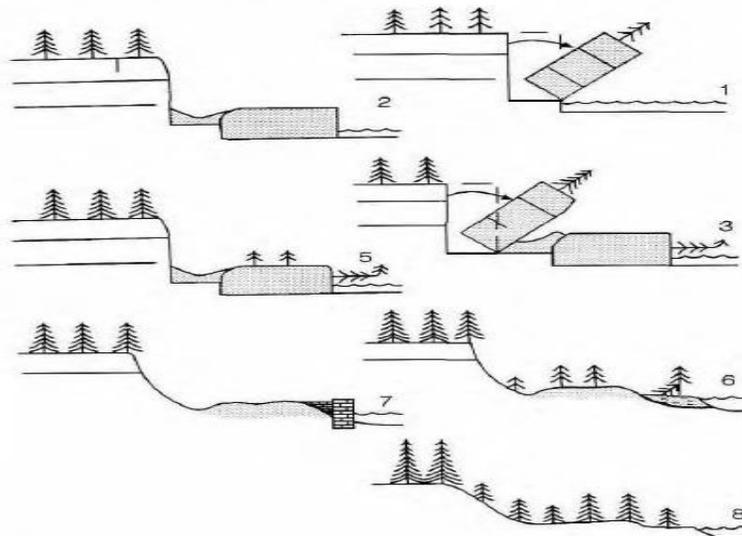
Estado de actividad de los deslizamientos

Actividad	Descripción
Activo	Son aquellos deslizamientos que se dan en el momento de la observación.
Reactivado	Son aquellos deslizamientos que superan la fase de inactivación.
Inactivo	Son aquellos deslizamientos que están constituidos por varios ciclos estacionales.

Fuente: (Suárez Díaz, 1998)

Ilustración 2

Estado funcional de los deslizamientos



Fuente: (Alcántara Ayala, 2000)

3.3 Estructura de los deslizamientos

Los movimientos de masas están constituidos de la siguiente manera.

Cabeza: Se ubica en la parte superior del material alterado (Suarez Díaz, 1998).

Cima: Es considerado el nivel más alto de la cabeza uniendo la masa desplazada con la superficie (Burgos Alemán, 2015).

Corona: Es aquella que se localiza en el área contigua de la superficie terrestre (Samaniego, 2018).

Escarpe principal: Zona que se desplaza a lo largo de la superficie del escarpe (Alberti et al., 2006).

Escarpe secundario: Es aquella superficie que está en la parte central de la corona (Prado González et al., 2020).

Superficie de falla: Suelo que está por debajo de la superficie terrestre (Carrión Aguilar, 2019).

Pie de la superficie de falla: Línea de intersección entre el área de rotura y la zona única (Mostajo Carbonel, 2013).

Base: Zona que se localiza en el pie de la superficie terrestre (Vivanco Quizhpe, 2011).

Punta o uña: Es la zona de la base que está muy cerca de la superficie longitudinal (Paccini Sánchez, 2018).

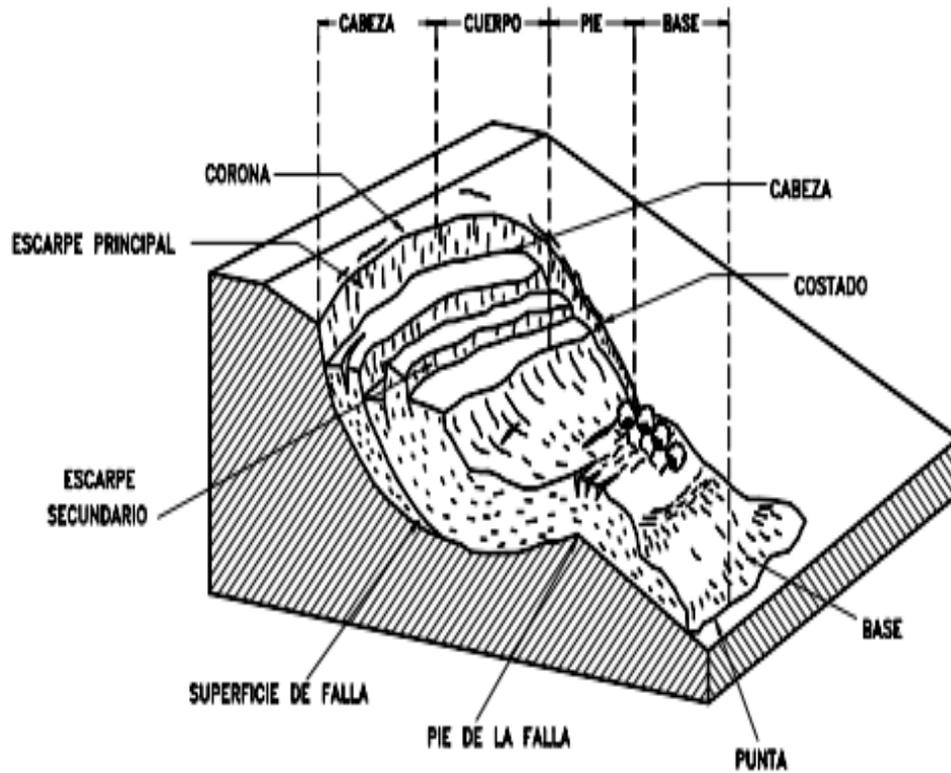
Cuerpo principal: Está ubicada en la zona superior de la superficie de falla (Torres García, 2017).

Superficie del terreno: Zona que se encuentra en la activación de un deslizamiento (Mesa Ramos, 2012).

Costado o Flanco: Zona que está a un lado del movimiento (Anyelo, 2011).

Ilustración 3

Nomenclatura de los deslizamientos



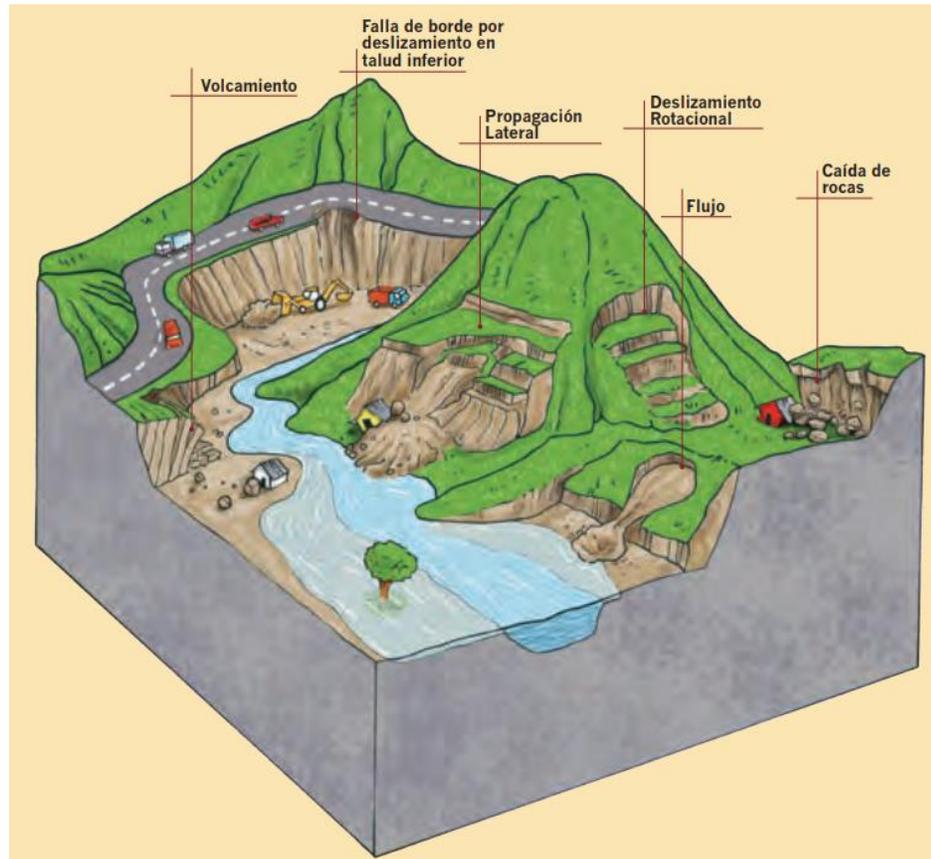
Fuente: (Suarez Díaz, 1998)

3.4 Susceptibilidad a deslizamientos

Los niveles de susceptibilidad son distribuciones geospaciales que funcionan a partir de conceptos estructurales, topográficos, geométricos, estadísticos, matemáticos y físicos, los cuales están representados por objetos espaciales y mapas cartográficos. Por lo tanto, los estudios de susceptibilidad permiten determinar dónde y cuándo podrían ocurrir los deslizamientos, convirtiéndose en elementos importantes para la toma de decisiones (Osorio Marín, 2019).

Ilustración 4

Tipos de deslizamientos



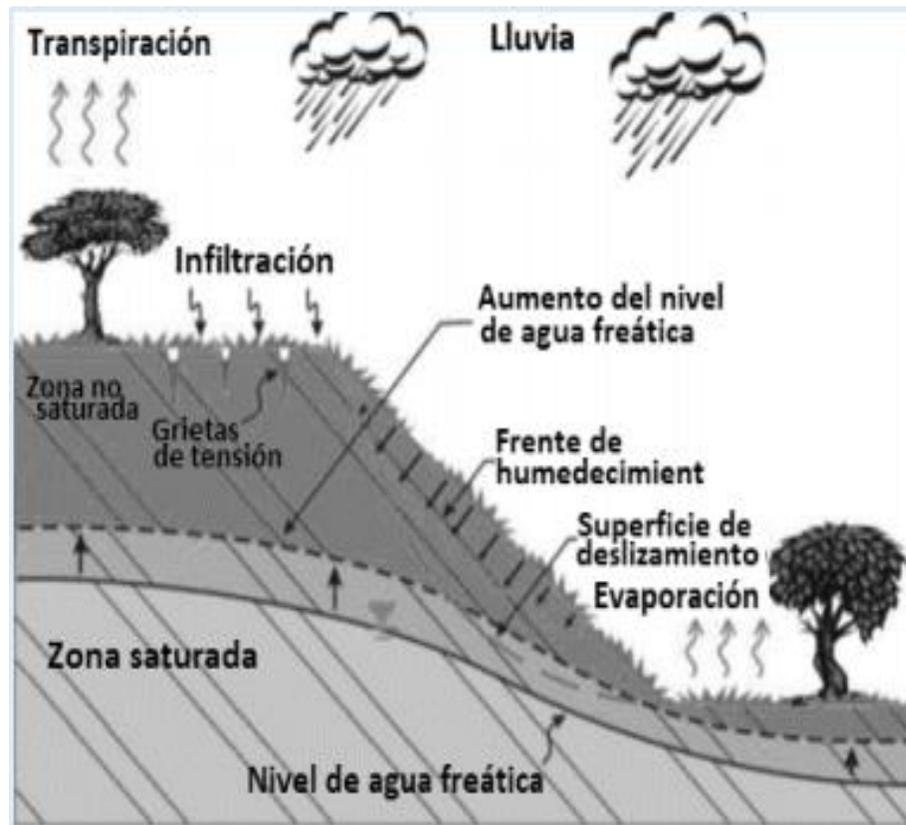
Fuente: (Salcedo Rodríguez, 2014)

3.5 Factores que afectan a la estabilidad del terreno

Los deslizamientos profundos y superficiales se generan a lo largo de las zonas de erosión, movimientos de masas o flujos superficiales, que están dirigidos hacia arriba o hacia abajo de las laderas. Además, los deslizamientos dependen de factores geológicos, geomorfológicos, climáticos, topográficos y antrópicos, los mismos que se originan por las intensas precipitaciones, procesos de deforestación, actividades agrícolas y altos niveles de radiación. Por ende, estos factores generan múltiples consecuencias, como la inestabilidad de los terrenos, pérdida de los cuerpos de agua, infertilidad de los suelos y aumento de los niveles de erosión (Alcaldía de Medellín, 2016); (Suarez Díaz, 1998).

Ilustración 5

Factores que afectan la estabilidad del terreno



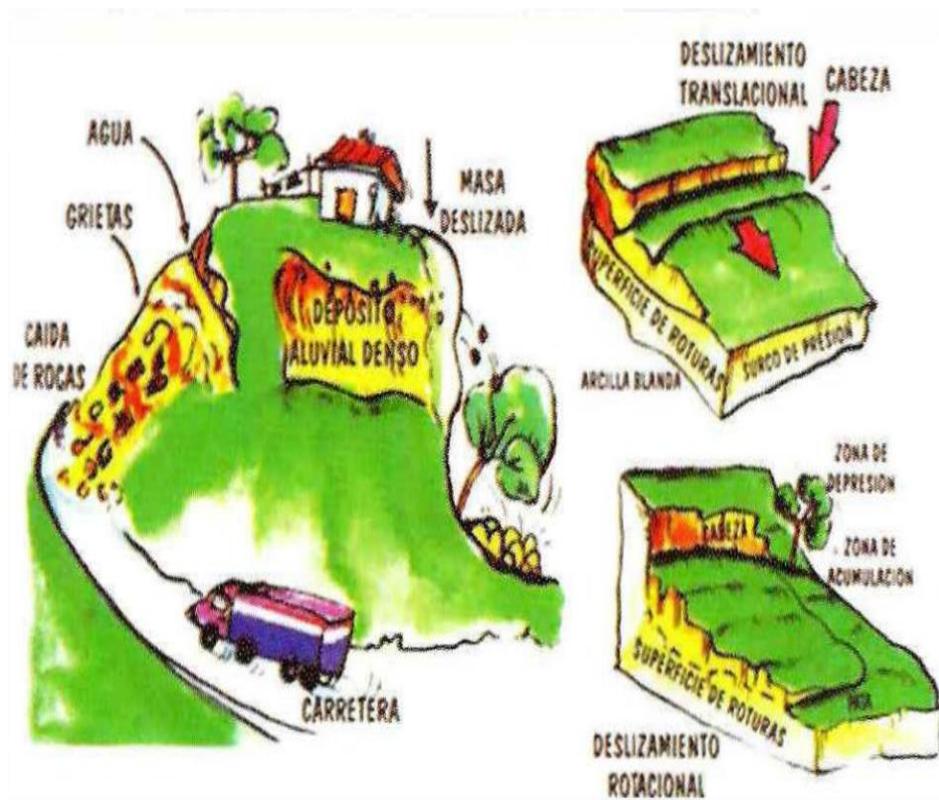
Fuente: (Pérez Fajardo, 2018)

3.6 Causas de los deslizamientos

Se producen por las diferentes actividades sísmicas, construcción de edificaciones sin apoyo técnico en montañas con pendientes inclinadas, sobresaturación del suelo, ausencia de canalización de aguas negras, deforestación, erosión del suelo, grietas en los terrenos y condiciones geométricas de ladera, las mismas que se dan por las altas precipitaciones, procesos erosivos, actividades naturales y antrópicas (Bonachea Pico, 2006); (Chacón Montero, 2003).

Ilustración 6

Causas de los deslizamientos



Fuente: (CREPAD - BOYACÁ, 2012)

3.7 Consecuencias de los deslizamientos

Los deslizamientos han ocasionado múltiples impactos a los ecosistemas, como son la reducción de los recursos de la tierra, inundaciones y movimientos de ladera, que están principalmente relacionados con la aparición de derrumbes o escarpes (García Lopez, 2005).

Asimismo, se producen impactos directos sobre las actividades productivas, niveles económicos y paisajísticos, los cuales han impulsado cada vez más a buscar nuevas medidas de prevención y mitigación. De igual manera, muchas investigaciones hablan sobre la importancia de realizar inventarios de deslizamientos, que tengan un alto grado de confiabilidad, seguridad y precisión, contribuyendo así a la mejora de planes de emergencia y contingencia (Abril, 2011).

Ilustración 7

Deslizamiento de tierra



Fuente: (BBC NEWS, 2011)

3.8 Lineamientos preventivos contra los deslizamientos

A través de los años, los deslizamientos han ocasionado grandes problemas en los territorios, que presentan mayor susceptibilidad. Es por ello, que en la última década se han establecido medidas de prevención y minimización, con el fin de evitar pérdidas humanas, ambientales, agrícolas y económicas (Alcátara et al., 2020).

Es así que, diversos autores coinciden en la importancia de identificar zonas con mayor grado de susceptibilidad a deslizamientos, mediante la realización de inventarios geoespaciales. Estos estudios deben estar actualizados en los diferentes planes de salud y seguridad ocupacional (Alcátara et al., 2020).

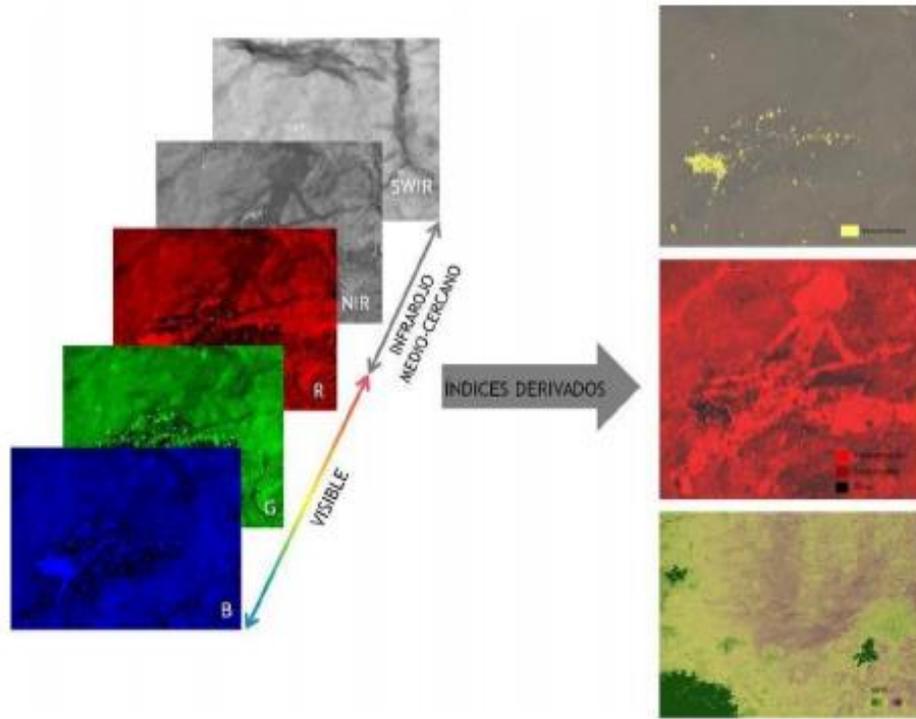
3.9 Sensores remotos

Los sensores remotos han permitido adquirir diferente tipo de información espacial, llegando a analizar de manera adecuada las variaciones de la vegetación, cuerpos de agua e incremento de las actividades antropogénicas (Ortíz Agudelo, 2019). Además, han ayudado a generar medidas preventivas frente a los deslizamientos, tsunamis, temblores, terremotos,

erupciones volcánicas, derretimiento de los glaciares y aumento de las sequías, mediante la aplicación de los sistemas de información geográfica (Moncada Rojas et al., 2014).

Ilustración 8

Imágenes multispectrales usando la teledetección



Fuente: (Alvarado Brito & Mainato Mayancela, 2021)

3.9.1 Imágenes satelitales

Son recursos que identifican las radiaciones emitidas o reflejadas por diferentes satélites artificiales, que contienen características específicas de varios colores, resoluciones y elevaciones, mejorando la calidad de las imágenes satelitales. Las mismas, que dependen de las condiciones de latitud, altitud y de los instrumentos utilizados (Sánchez Jara, 2012).

Asimismo, identifican cuerpos de agua, parques recreativos, actividades agrícolas, inundaciones, nubes de desarrollo vertical y procesos de movimientos de masas, mediante el procesamiento de las bandas espectrales y de los espectros electromagnéticos (Cede et al., 2011); (Cervantes Gómez, 2014).

Ilustración 9

Imagen satelital



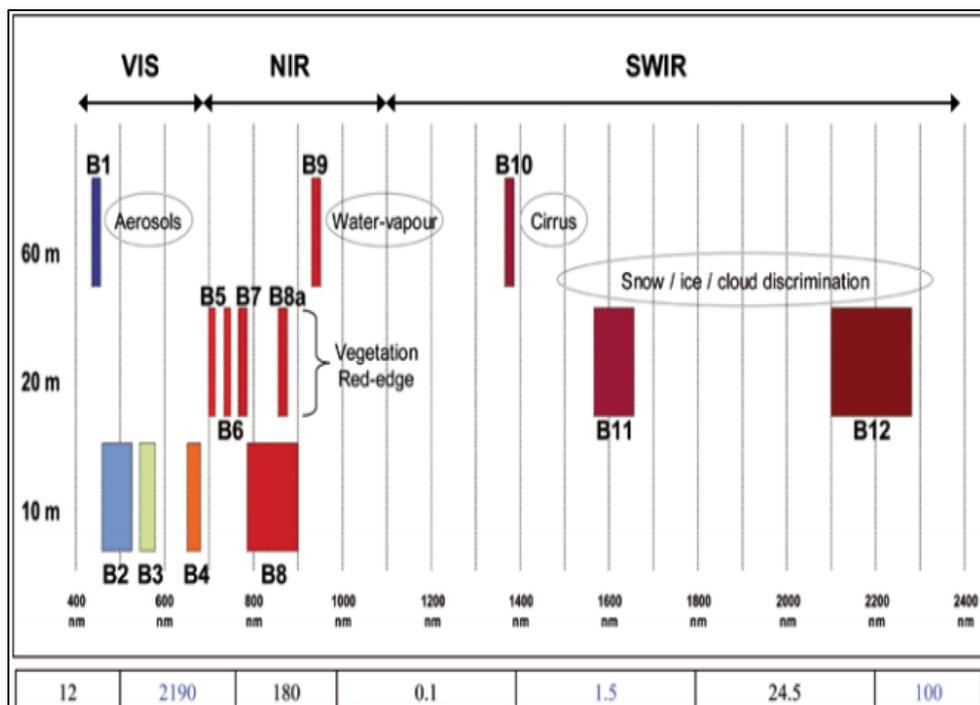
Fuente: (BBC NEWS, 2021)

3.9.2 Sensores remotos

Las imágenes satelitales Sentinel 2 son de gran utilidad para la caracterización de la superficie terrestre debido a que cuentan con información actualizada, las mismas que presentaron información espacial el 23 de junio del 2015, reportando datos de todas las superficies de la Tierra, con un tiempo efectivo en el Ecuador de cinco días. De igual manera, están compuestas por 13 bandas espectrales, que se encuentran ubicadas en la región espectral del infrarrojo de onda corta. Las mismas que, están constituidas por cuatro bandas a 10 m, seis bandas a 20 m y tres bandas a 60 m de distancia (Delegido et al., 2016). Además, están formadas por dos satélites que se mueven a 180° entre sí y se encuentran rectificadas con niveles de reflectancia por debajo de la atmósfera. Además, tienen resoluciones radiométricas Multispectral Instrument (MSI) con un ancho de banda de 12 bits, las cuales permiten adquirir imágenes con alta resolución espectral (COPERNICUS, 2018).

Ilustración 10

Bandas del satélite Sentinel 2



Fuente: (ESA, 2015)

3.9.3 Ventajas de las imágenes satelitales Sentinel 2

En los últimos años, las imágenes satelitales Sentinel 2 han permitido obtener datos de todas las superficies de la Tierra, teniendo un alcance de registro a 10 m, 20 m y 60 m de distancia (Delegido et al., 2016).

De igual forma, estas permiten monitorear los ecosistemas, las actividades humanas, las cuencas hidrográficas, las inundaciones, erupciones volcánicas y deslizamientos, mediante el mapeo de la superficie terrestre (SM GEODIM, 2016).

3.9.4 Procesamiento de imágenes satelitales

Las imágenes satelitales Sentinel 2 contienen fallas atmosféricas, debido a los errores espectrales que traen los sensores, siendo necesario corregirlas para restaurar y recuperar los diferentes rangos de radiancia, logrando equilibrar los valores de las intensidades homogéneas y corrigiendo imperfecciones presentes en los píxeles, mediante el método DOS1 o también conocido como el método de Chávez (Delúquez Moreno, 2018).

Es así que, el método DOS1 tiene la función de eliminar el cambio de la radiación que está presente en la atmósfera, permitiendo identificar el nivel más bajo de radiancia que tiene la imagen satelital. Por lo tanto, el valor registrado se transforma en radiancia mediante la información del metadato (Delúquez Moreno, 2018).

Tabla 2

Resolución espectral de las bandas del satélite Sentinel 2

Banda Sentinel 2	Longitud de onda central (μm)	Resolución espacial (m)
Banda 1 – coastal aerosol	0.443	60
Banda 2 – azul	0.490	10
Banda 3 – verde	0.560	10
Banda 4 – rojo	0.665	10
Banda 5 – Vegetation Red Edge	0.705	20
Banda 6 – Vegetation Red Edge	0.740	20
Banda 7 – Vegetation Red Edge	0.783	20
Banda 8 – NIR	0.842	10
Banda 8A – Vegetation Red Edge	0.865	20
Banda 9 – Vapor de agua	0.945	60
Banda 10 – SWIR – cirros	1.375	60
Banda 11 – SWIR	1.610	20
Banda 12 – SWIR	2.190	20

Fuente: (COPERNICUS, 2018)

3.10 Sistemas de información geográfica (SIG)

Los sistemas de información geográfica ayudan a manipular, organizar y procesar grandes espacios de terreno. Por otro lado, los métodos geoespaciales permiten conocer los valores especializados de los usuarios, basándose en el procesamiento de información cartográfica (Palacio, 2017).

Los SIG son importantes porque brindan valiosas herramientas para el aprendizaje espacial, logrando tener una mejor comprensión de los conceptos, mediante la elaboración de mapas cartográficos (Lázaro y Torres & González González, 2005).

De igual manera, se están convirtiendo en herramientas usuales, porque permiten analizar alternativas y herramientas de apoyo (Rodríguez & Olivella, 2010). En efecto, los SIG pueden almacenar, manipular y relacionar patrones de información, contribuyendo así a la toma de decisiones (IAVH, 2006).

De igual forma, pueden solucionar diferentes problemas como la localización, la condición, la tendencia y la comparación entre situaciones de diferentes tiempos, rutas y modelos. Las mismas que pueden ser transferidas, transformadas, superpuestas, procesadas y mostradas mediante diversas aplicaciones del software (Alarcón-Ruiz & Ordoñez-Pacheco, 2019).

3.10.1 Algebra de mapas

Son operadores que funcionan a partir de conceptos matemáticos de diferentes álgebras matriciales. Las mismas que, incluyen diferentes capas de entrada y salida de tipo raster. Por otro lado, las herramientas son codificadas a partir de varios algoritmos que operan en todas las celdillas espaciales (Carvallo, 2005).

3.10.2 Pendientes y Orientaciones

Están constituidas por diferentes datos numéricos y distribuciones espaciales, incluyendo varias capas de elevación (Contreras & Odriozola, 2016). De igual manera, los Modelos Digitales de Elevación (MDE) permiten estudiar, manejar y administrar diferente tipo de información (Frau et al., 2011). De hecho, las pendientes tienen algunas especificaciones en la caracterización de los terrenos, como la no ambigüedad, modelización, tecnificación, verificación y repetición de los resultados (Contreras & Odriozola, 2016).

Es así que, las pendientes permiten extraer los diferentes procesos de remoción, tanto por deslizamientos como por inundaciones, debido a que están directamente relacionados con las tensiones de cortes tangenciales y normales en la formación de los suelos. Algunos autores especifican que, los valores que caracterizan los movimientos de masas por deslizamientos oscilan en pendientes mayores a 15° (Ochoa-Tejeda & Parrot, 2007). En cambio, los mapas de orientaciones permiten conocer las áreas llanas e inclinadas, las cuales se miden en sentido de las agujas del reloj, formando círculos completos (Benayas, 2015); (Benayas, 2015).

3.10.3 Model Builder

Es una herramienta capaz de crear, modificar y administrar modelos, generando rutas de salida y entrada, conformando flujos de trabajo a través de los lenguajes de programación (Fernández García, 2012).

También, es aplicable para crear instrumentos propios, los cuales son usados en diferentes series de Python del software ARCGIS (ESRI, 2016).

3.11 Índices de vegetación

Los valores de la vegetación tienen varios estados fenológicos, que están constituidos por espectros electromagnéticos (Beltrán Rincón, 2019). Además, es importante destacar que son útiles para estudiar los cambios de la cobertura vegetal y poderla separar de los elementos que impiden su observación. Por ende, los índices de vegetación que tienen mayor resolución espectral son el NDVI, SBI, TVI, TTVI, NRVI, NDWI, SAVI, los cuales permiten adquirir la información del suelo, agua y aire (Beltrán Rincón, 2019); (Peguero, 2016).

3.11.1 Índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI)

Es la relación de la energía reflejada por un objeto a partir de la energía absorbida de la vegetación y esta oscila de 1 a -1 siendo el valor cercano a 1 la zona con mayor vegetación y cercano a -1 la zona con escasa vegetación (Beltrán Rincón, 2019); (Ortíz Agudelo, 2019).

Por consiguiente, la respuesta espectral que tiene la vegetación sana muestra un claro contraste entre el espectro visible y el Infrarrojo Cercano (NIR), siendo este el más utilizado para indicar la cantidad de vegetación verde presente en un píxel. De ahí, que el valor más alto del NDVI indica más vegetación contenida en una sola imagen espectral y el valor más bajo indica

menor vegetación (Beltrán Rincón, 2019); (Ortíz Agudelo, 2019). A continuación, se muestra la ecuación para calcular el índice de vegetación de diferencia normalizada.

Ecuación 1

Fórmula para el cálculo del índice de vegetación de diferencia normalizada

$$\text{NDVI} = \frac{(\text{NIR} - \text{RED})}{(\text{NIR} + \text{RED})}$$

Fuente: (Beltrán Rincón, 2019)

Donde NIR representa la reflectancia espectral del infrarrojo y RED representa el canal rojo visible, logrando la separación de la cubierta vegetal (Ortíz Agudelo, 2019).

3.11.2 Índice de brillantez del suelo (SBI)

También llamado patrón de “tapa de espiga”, incluye la reflectividad del fondo del suelo y la línea de brillo, logrando separar la vegetación del límite del suelo. En definitiva, el SBI ignora el efecto de la atmósfera con el suelo, siendo útil para evaluar el comportamiento de la vegetación y el suelo desnudo (Beltrán Rincón, 2019).

Ecuación 2

Fórmula para el cálculo del índice de brillantez del suelo

$$\text{SBI} = \sqrt{\frac{(\text{RED})^2 + (\text{GREEN})^2}{2}}$$

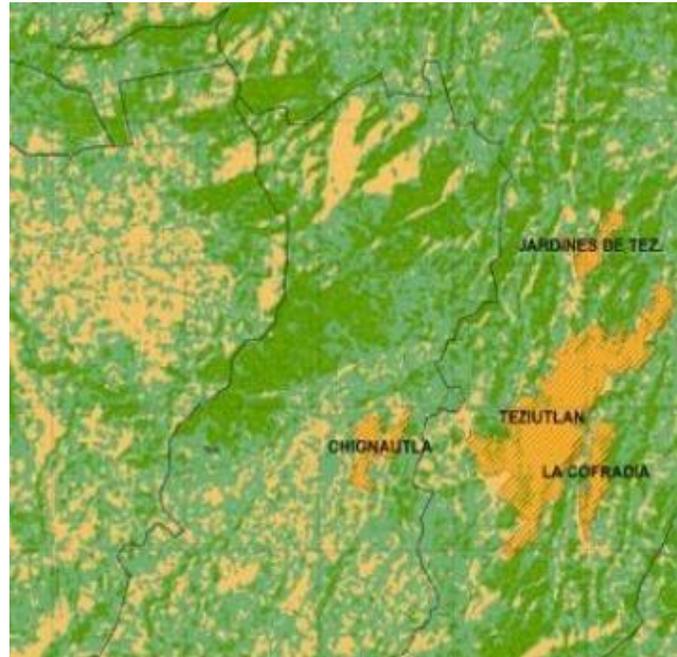
Fuente: (Palas & Zawadzki, 2020)

Este índice mejora la reflectancia del suelo, consiguiendo un mejor contraste visual entre el límite del suelo y la vegetación, que está determinado por la sensibilidad y la reflectancia total (Palas & Zawadzki, 2020).

Consecuentemente, el SBI tiene un rango de 0 a 1, cuyo valor de 0.12 representa el recurso hídrico, el valor de 0.17 representa la zona construida, el valor de 0.25 representa la zona desnuda y el valor más alto está entre 0.6 y 1 que corresponde a la parte nubosa. Por ende, este índice se utiliza para mostrar la variación cromática del suelo (Beltrán Rincón, 2019).

Ilustración 11

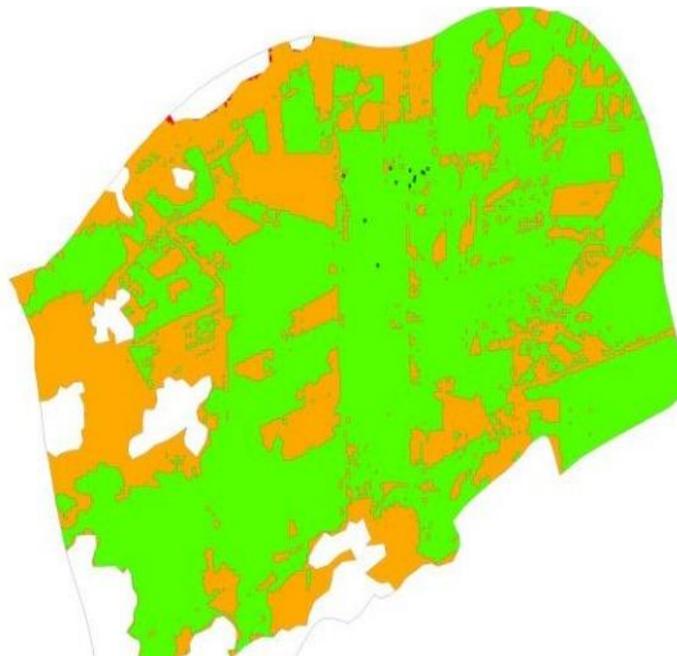
Índice de vegetación de diferencia normalizada



Fuente: (Torres et al., 2014)

Ilustración 12

Índice de la brillantez del suelo



Fuente: (González Cubides & Otálora Cardenas, 2017)

3.12 Importancia de la validación de resultados

Según la bibliografía consultada, en los últimos años, se han publicado alrededor de 40 estudios sobre la identificación de los deslizamientos. En donde, la mayoría de estos son a partir de modelos estadísticos y análisis en campo, pero muy pocos estudios evalúan la calidad de las metodologías empleadas. Es por ello, que los estudios sobre deslizamientos necesitan ser validados, porque tienen mayor fiabilidad, robustez, grado de adaptación y una buena capacidad de predicción (Abril, 2011).

Los métodos más aceptados por la comunidad científica son el muestreo estratificado y la comprobación de los deslizamientos históricos que se han dado a través de los años. Por lo tanto, las muestras que se obtienen por el muestreo estratificado, representan a todos los estratos de una población, logrando que los mapas de amenazas a cualquier desastre natural, tengan un uso importante por su calidad de predicción (Bonachea Pico, 2006).

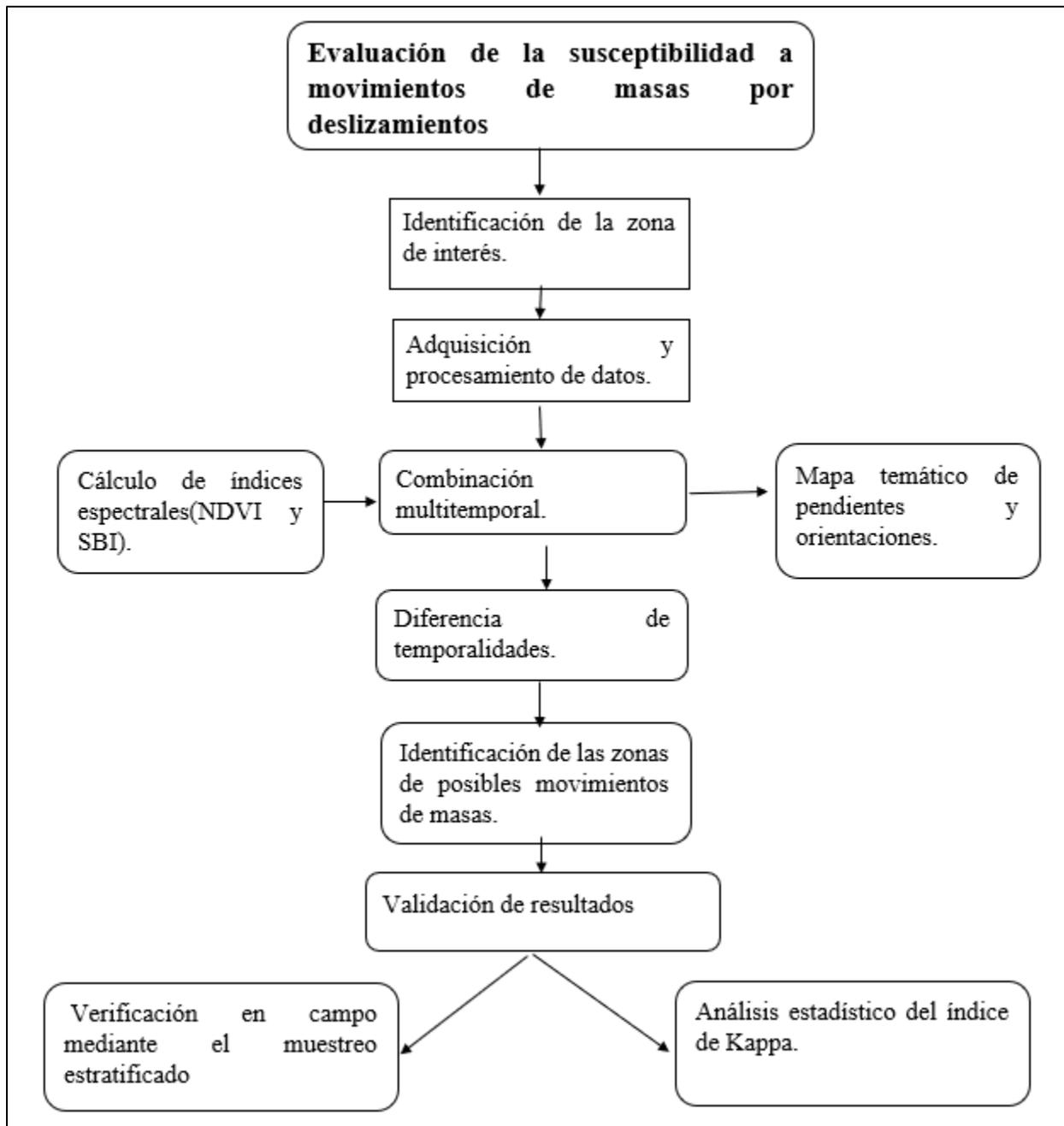
Independientemente del tipo de investigación que se esté llevando, la validez de este puede verse severamente afectada si se usan mediciones poco confiables, es por ello que para estimar la confiabilidad de los datos es posible estimar mediante los estudios de concordancia, los cuales tienen como objetivo predecir hasta qué punto dos observadores coinciden en su medición, estadísticamente la manera de abordar este problema depende de la naturaleza de los datos cuando éstos son de tipo categórico, la prueba más frecuentemente empleado es el test de kappa o índice de Kappa, cuyo coeficiente homónimo refleja la fuerza de la concordancia entre dos observadores (Cerdeña & Villarroel, 2008).

4 MATERIALES Y MÉTODOS

En la ilustración 13 se presenta el diagrama de flujo para identificar los movimientos de masas por deslizamientos del cantón Alausí, mediante el cálculo de las pendientes y de los índices espectrales (NDVI y SBI).

Ilustración 13

Diagrama de procesos para la evaluación de la susceptibilidad a movimientos de masas por deslizamientos



5 METODOLOGÍA

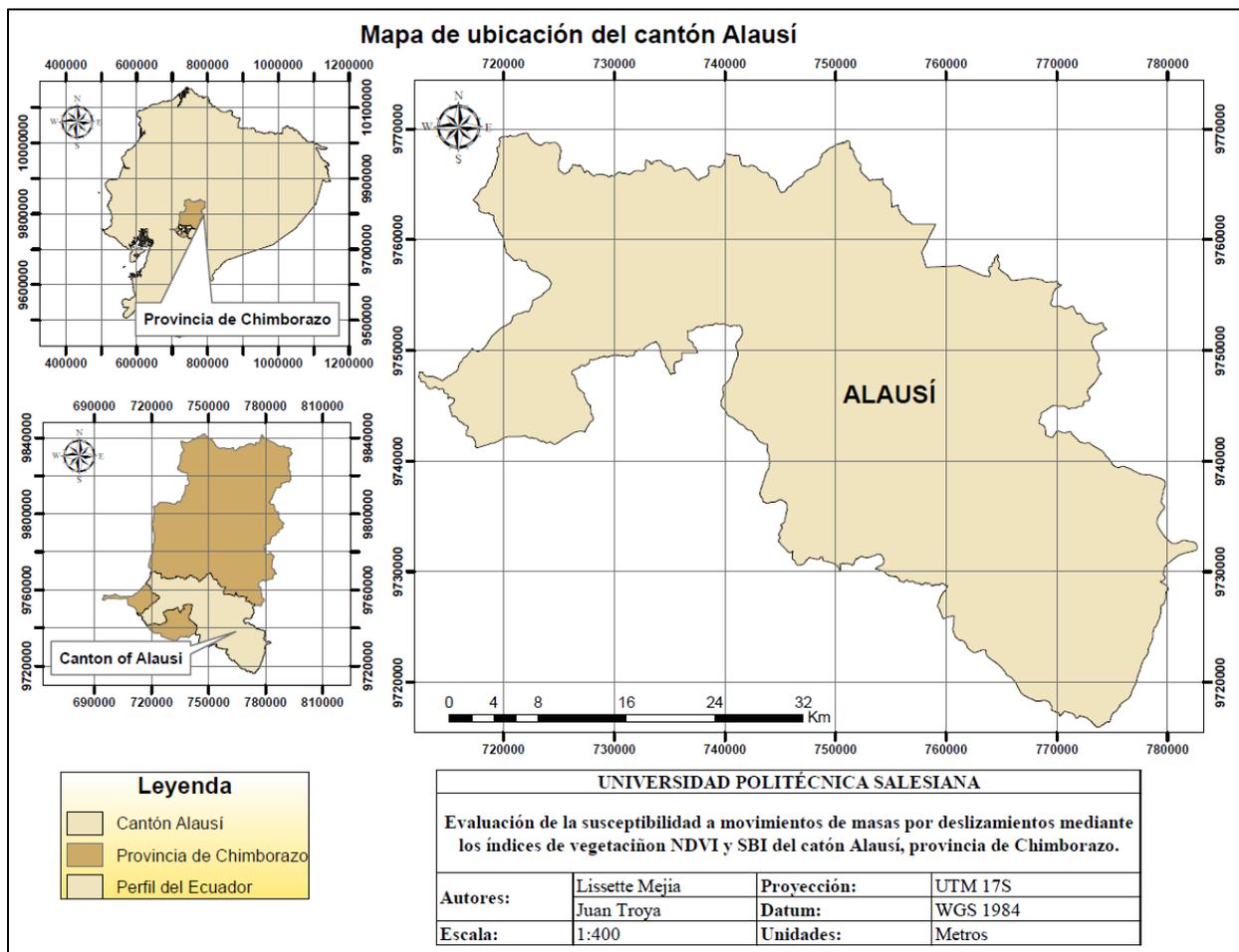
5.1 Delimitación del área de estudio

La zona de estudio está localizada en el cantón Alausí, provincia de Chimborazo, se encuentra a 2387 msnm, se dispone de una extensión territorial de 1657,97 km², se limita al norte con el cantón Guamote, al sur con el cantón Chunchi, al este con Macas y al occidente con el Guayas.

El cantón está constituido por las parroquias de Alausí Central, Tixán, Sibambe, Huigra, Pistishi, Guasuntos, Achupallas, Sevilla, Pumallacta y Multitud, las mismas que están atravesadas por los ríos Chanchan y Alausí. El área de interés se ha podido identificar mediante la información cartográfica disponible en el Instituto Geográfico Militar.

Ilustración 14

Mapa de ubicación del cantón Alausí

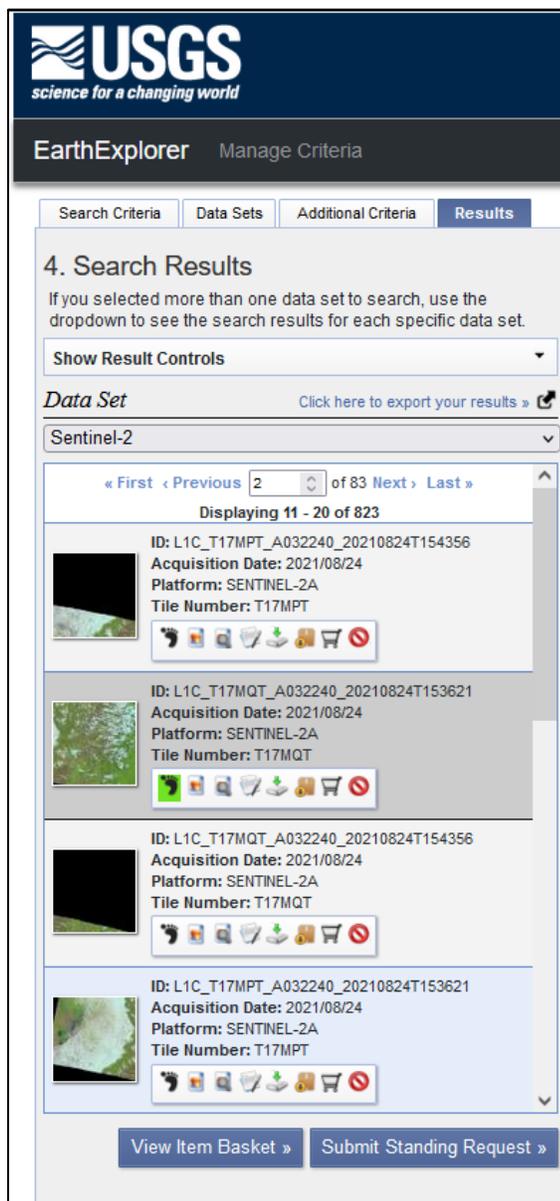


5.2 Adquisición y procesamiento de datos

Las imágenes satelitales Sentinel 2 se obtuvieron a través del portal USGS EarthExplorer, en donde se tuvo en cuenta la nubosidad y temporalidad de cada una de ellas, las mismas que no presentaron errores topográficos, pero sí errores atmosféricos. Por lo que, fue necesario realizar las respectivas correcciones atmosféricas, mediante la herramienta “Semi-Automatic Classification Plugin (SCP)” del software QGIS 3.16.5 (*Ver ilustración 15 y 16*).

Ilustración 15

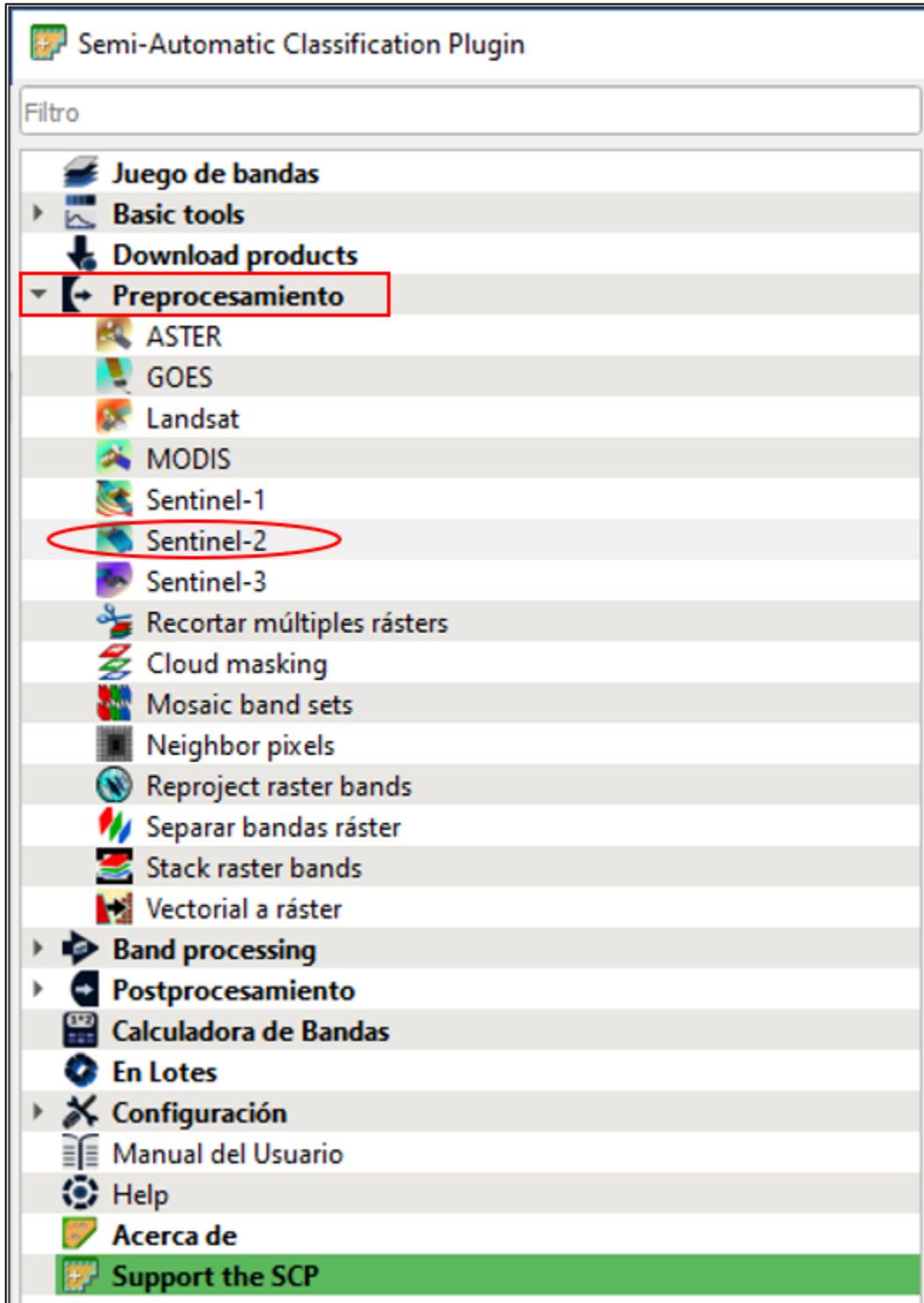
Adquisición de las imágenes



The screenshot shows the USGS EarthExplorer interface. At the top, the USGS logo and tagline "science for a changing world" are visible. Below the logo, the text "EarthExplorer" and "Manage Criteria" are displayed. The main navigation bar includes tabs for "Search Criteria", "Data Sets", "Additional Criteria", and "Results". The "Results" tab is active, showing "4. Search Results". A message states: "If you selected more than one data set to search, use the dropdown to see the search results for each specific data set." Below this, there is a "Show Result Controls" dropdown menu. The "Data Set" section shows "Sentinel-2" selected in a dropdown menu, with a link to "Click here to export your results". A pagination bar indicates "« First < Previous 2 of 83 Next > Last »" and "Displaying 11 - 20 of 823". Four data set entries are listed, each with a thumbnail image, ID, Acquisition Date (2021/08/24), Platform (SENTINEL-2A), and Tile Number (T17MPT or T17MQT). Each entry has a set of icons for actions like zoom, pan, and download. At the bottom, there are two buttons: "View Item Basket" and "Submit Standing Request".

Ilustración 16

Corrección de las imágenes satelitales Sentinel 2

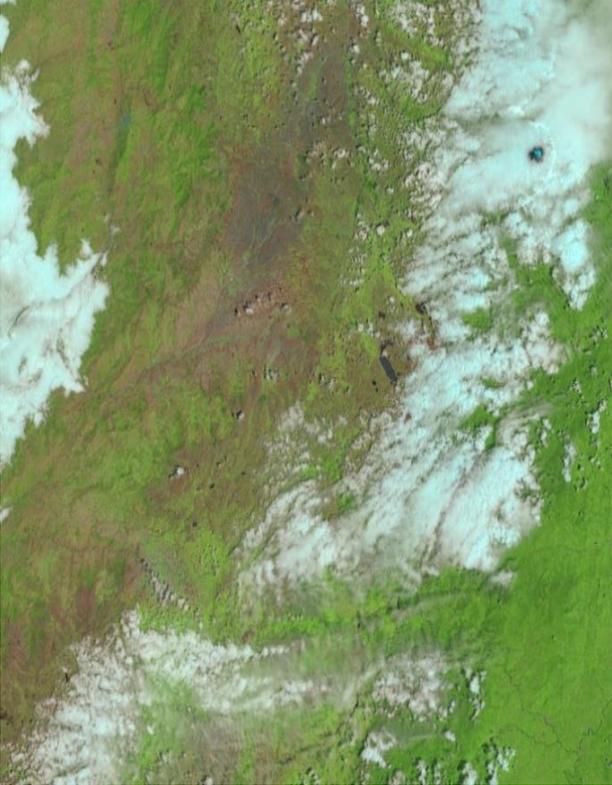
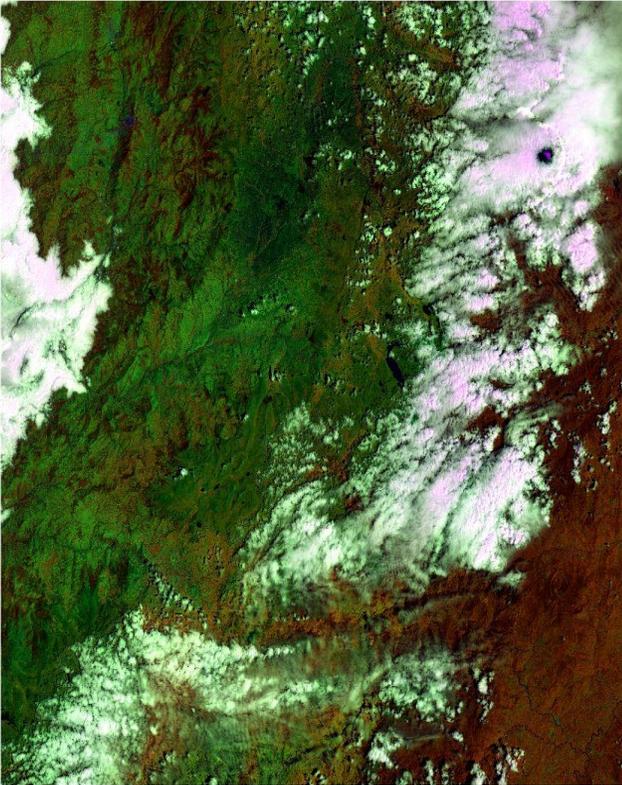


Por consiguiente, para mejorar la resolución de las imágenes satelitales, se identificaron las diferentes zonas de vegetación, cuerpos de agua, áreas potencialmente erosionadas y zonas construidas, combinando las bandas espectrales 8A, 11 y 2, logrando con ello identificar las zonas de mayor interés con respecto a los movimientos de masas, las cuales posee mayor intensidad, contraste y luminosidad espectral.

Consecuentemente, para identificar de manera adecuada las zonas de vegetación y las áreas potencialmente erosionadas fue importante corregir los errores espectrales, consiguiendo recuperar la información espacial de las imágenes satelitales, eliminando los efectos de dispersión y absorción de la atmosfera, obteniendo de esta manera la reflectancia de la superficie terrestre. A continuación, se muestran las correcciones espectrales de las imágenes satelitales.

Tabla 3

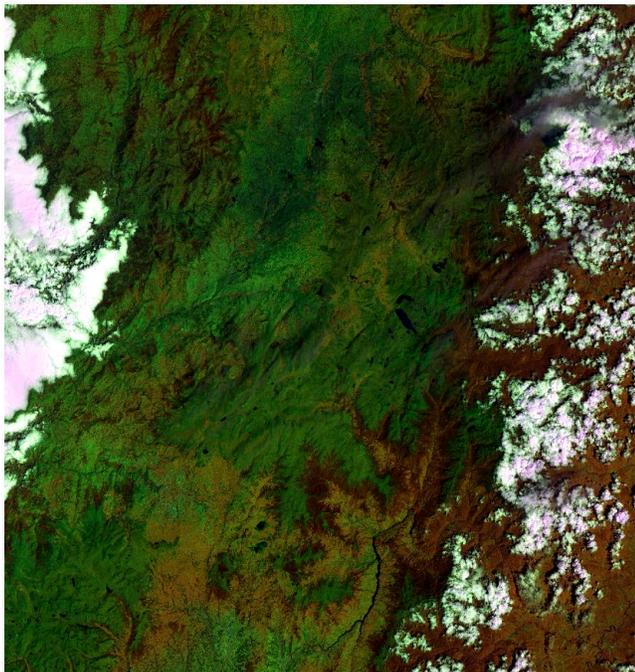
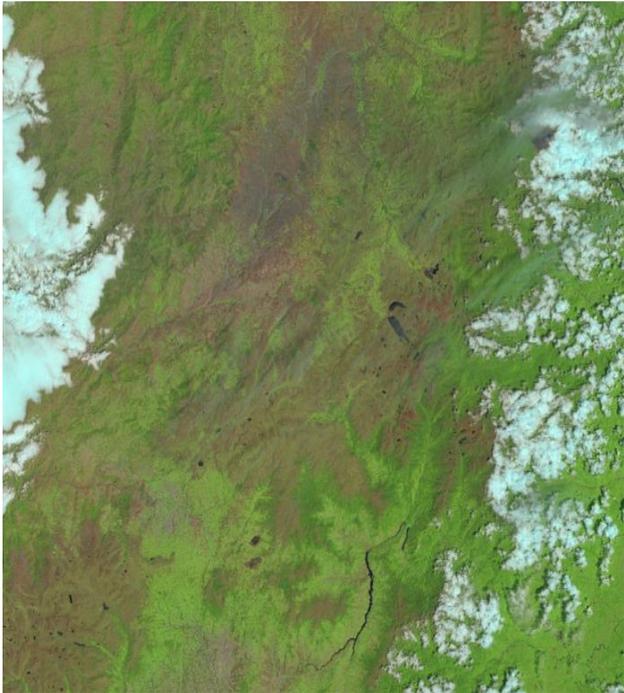
Imágenes satelitales

Año	Imagen no corregida	Imagen corregida
2016		

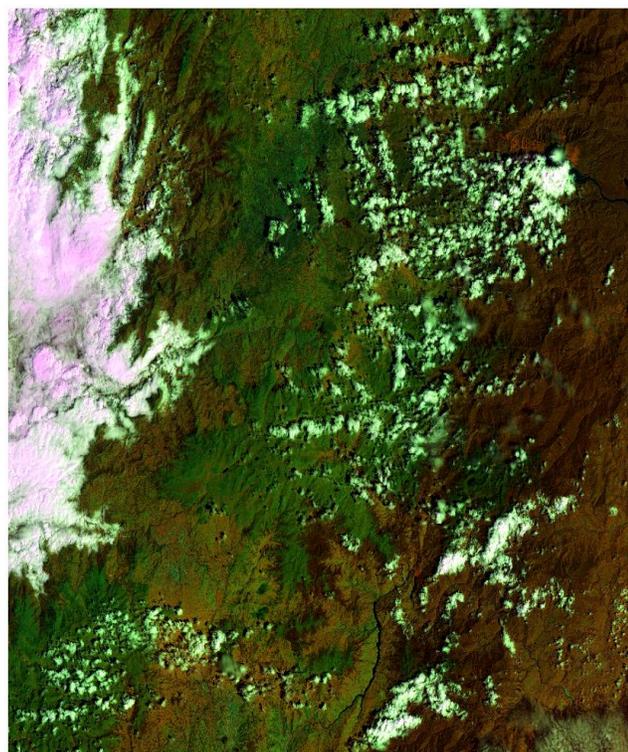
2018



2020



2021



5.3 Determinación de las pendientes e índices espectrales

Los índices de vegetación (NDVI y SBI) se calcularon mediante la aplicación de las fórmulas descritas en la ecuación 1 y 2, mientras que las pendientes fueron procesadas a través de la información cartográfica. Los resultados obtenidos se reclasificaron según la “*Tabla 4*”, permitiendo identificar los cambios de la superficie terrestre.

Tabla 4*Reclasificación de índices de vegetación y pendiente*

NDVI	SBI	PENDIENTE
-1 a 0,15 = Cuerpos de agua, zonas construidas y nubes.	0 a 0,2 = Cuerpos de agua y zonas de vegetación.	0° = Zonas horizontales y planas.
0,15 a 0,45 = Procesos de movimientos de masas.	0,2 a 0,3 = Suelos desnudos.	1 a 14° = Zonas de pendiente ligera.
0,45 a 0,75 = Vegetación poco densa.	0,3 a 1 = Nubes.	>15° = Zonas inclinadas (Procesos de movimientos en masa).
0,75 a 1 = Vegetación activa.		

Fuente: (Beltrán Rincón, 2019)

5.3.1 Índices de Vegetación de Diferencia Normalizada e Índices de Brillantez del Suelo

Los valores del NDVI se calcularon mediante la herramienta “*Raster Calculator*” del software ARCGIS 10.6. Obteniendo así, las diferentes capas de tipo raster con valores de -1 a 1. Por consiguiente, los valores cercanos a 1 son indicadores de vegetación y cercanos a -1 escasa cantidad de vegetación. Una vez generados estos valores, se reclasificaron de acuerdo con la “**Tabla 4**”, haciendo uso de la herramienta “*Reclassify*”. Finalmente, se obtuvieron los mapas del NDVI correspondientes al área de estudio (*Ver ilustración 17, 18, 19 y 20*).

Por otro lado, los valores del SBI generaron diferentes tipos de información sobre las áreas potencialmente erosionadas, confirmando así los verdaderos cambios que se dieron en las variaciones cromáticas del suelo. Asimismo, para calcular los valores del SBI se siguieron los mismos pasos que para el NDVI, dando como resultado capas de tipo raster con valores de 0 a 1. Por lo que, los valores cercanos a 0 fueron aquellas zonas de suelos desnudos y cercanos a 1 las zonas con vegetación vigorosa (*Ver ilustración 17, 18, 19 y 20*).

Ilustración 17

Mapa de los índices NDVI Y SBI de año 2016

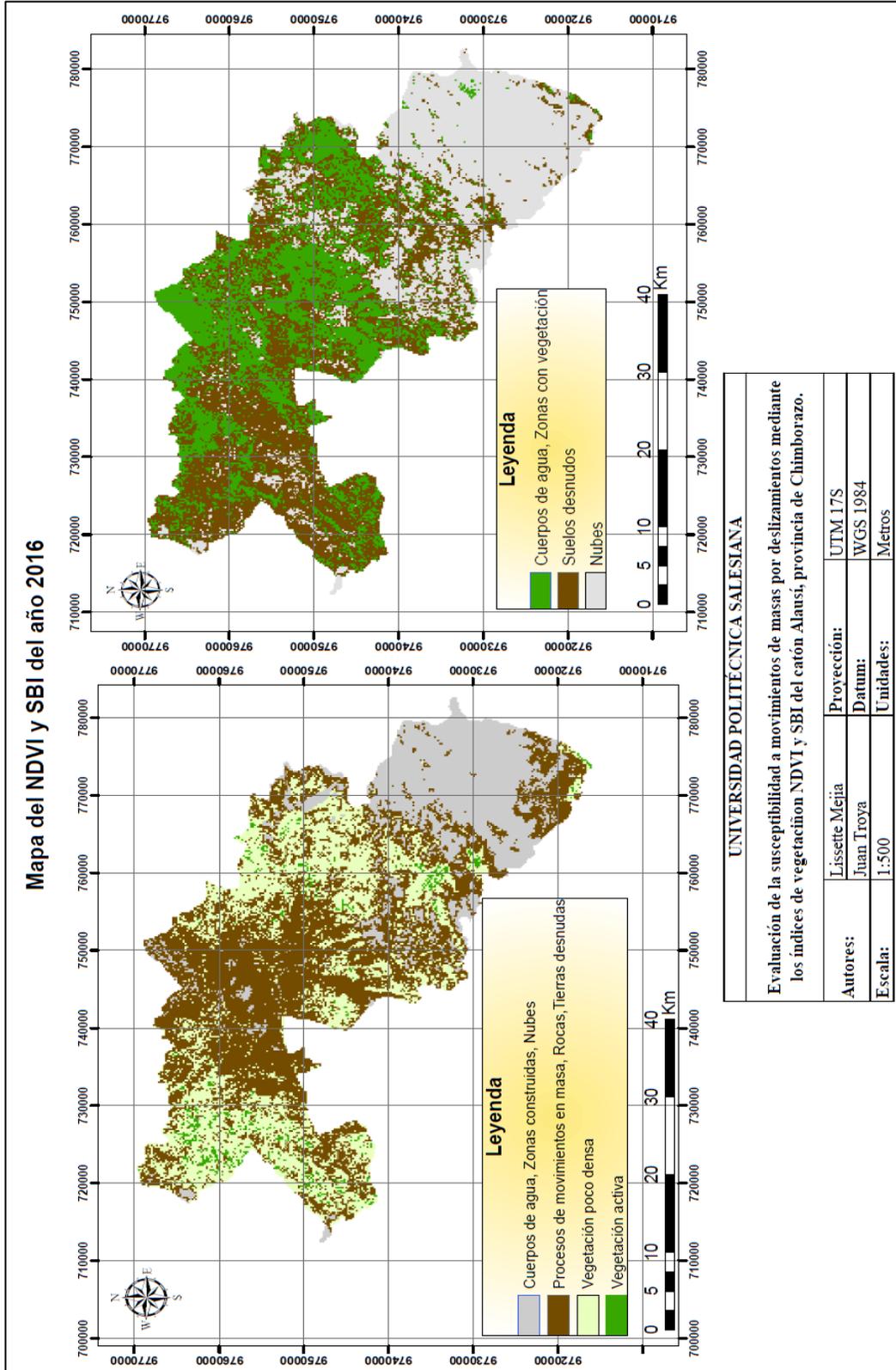


Ilustración 18

Mapa de los índices NDVI Y SBI de año 2018

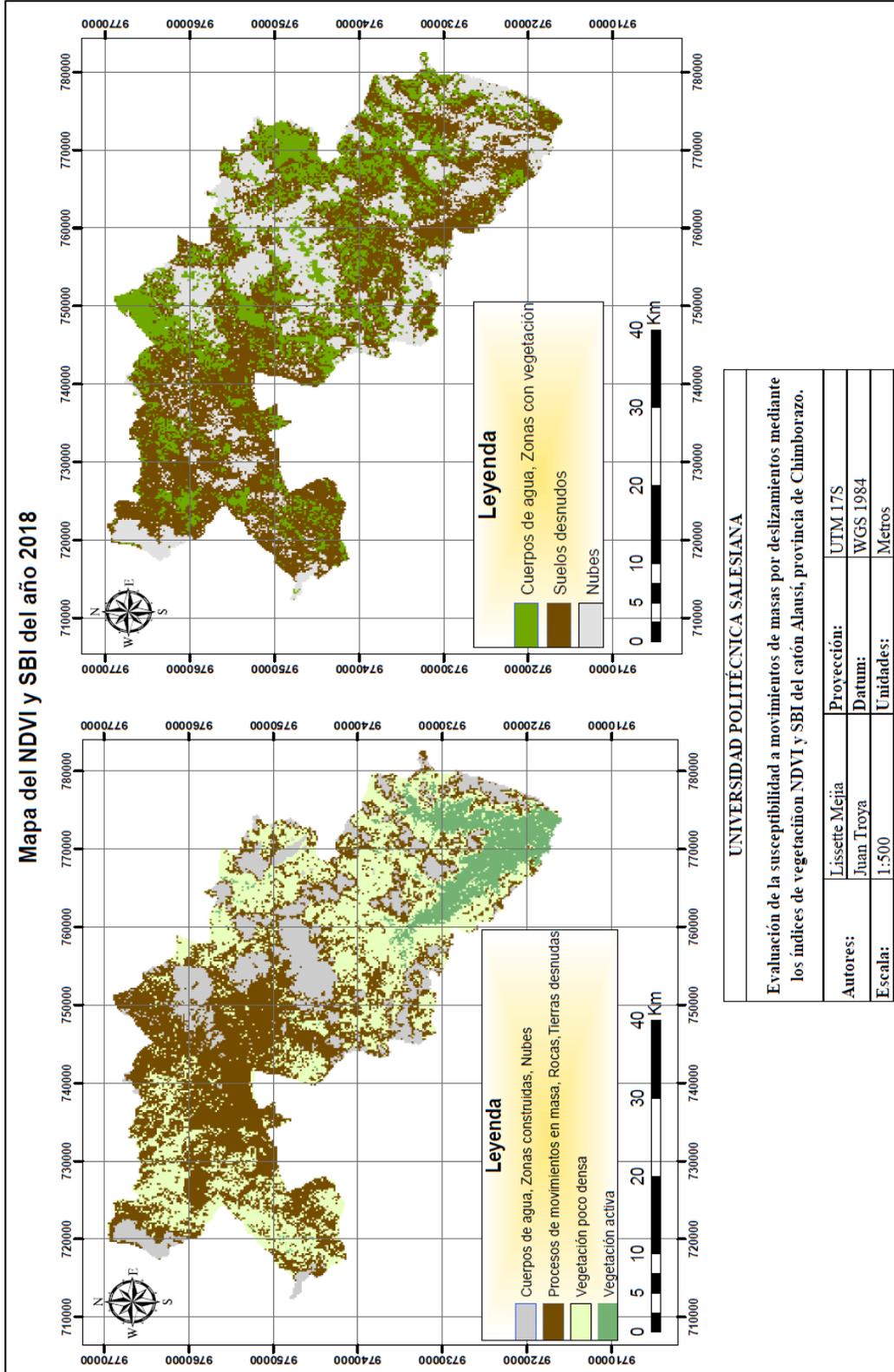


Ilustración 19

Mapa de los índices NDVI Y SBI de año 2020

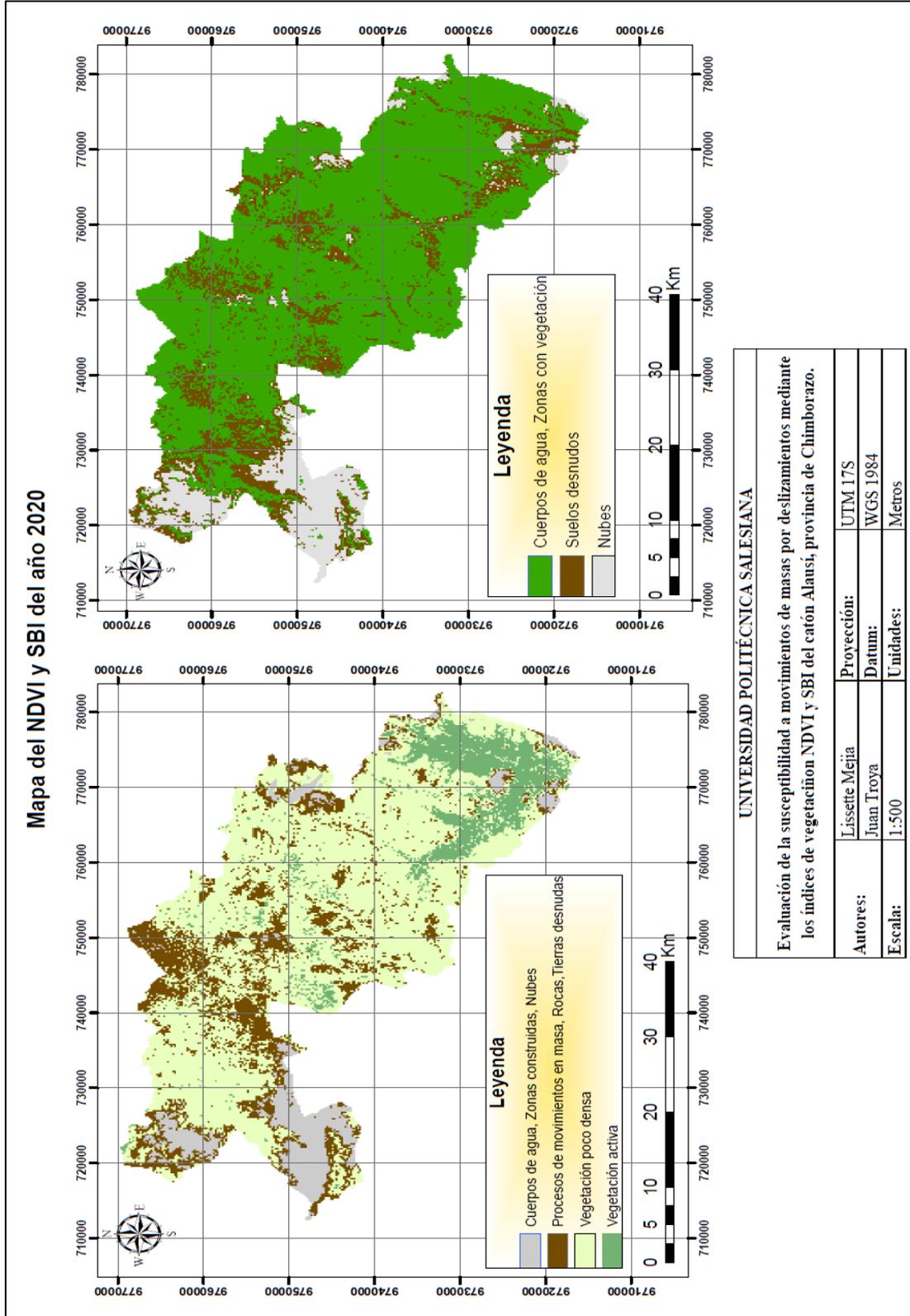
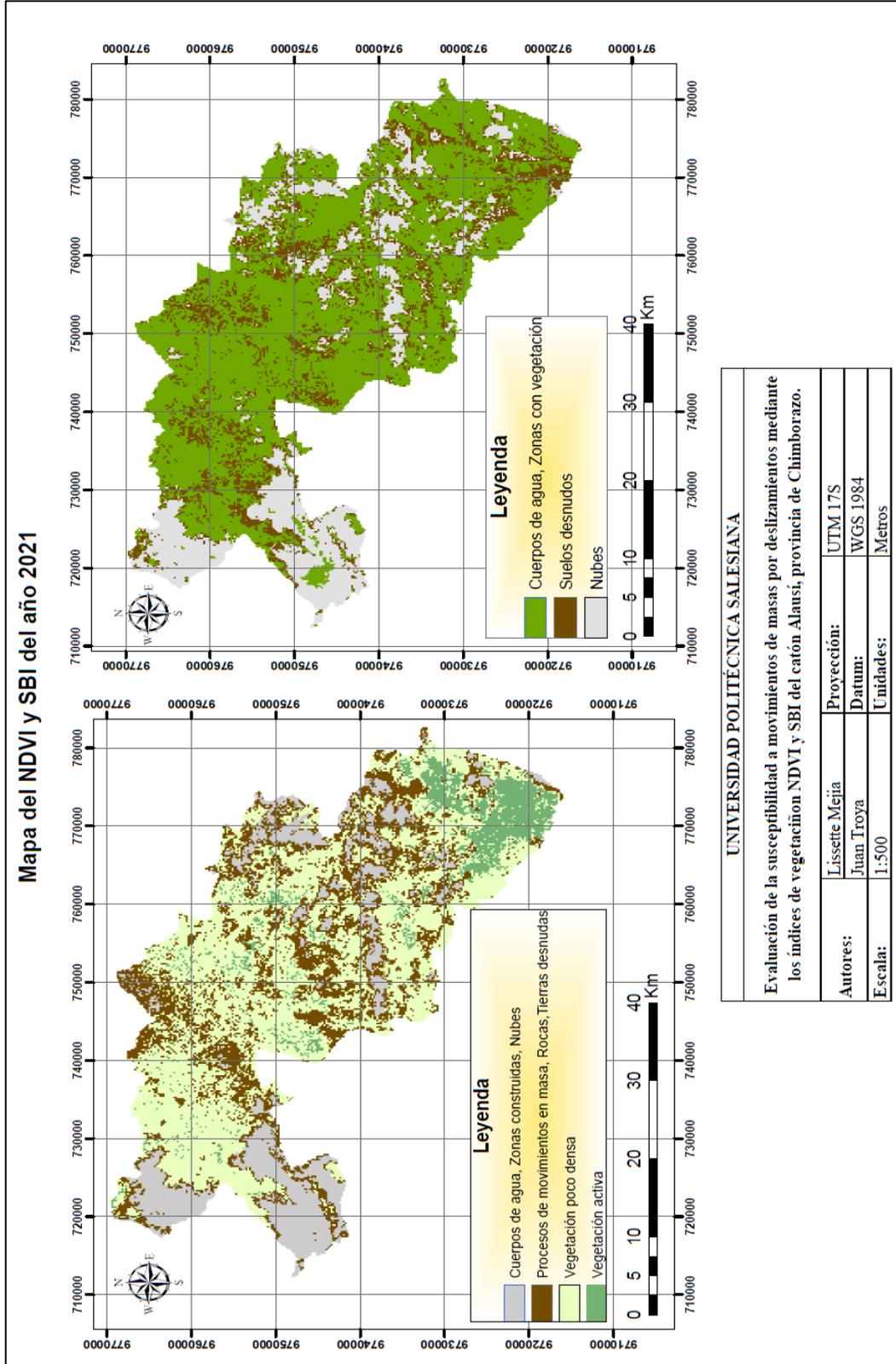


Ilustración 20

Mapa de los índices NDVI Y SBI de año 2021



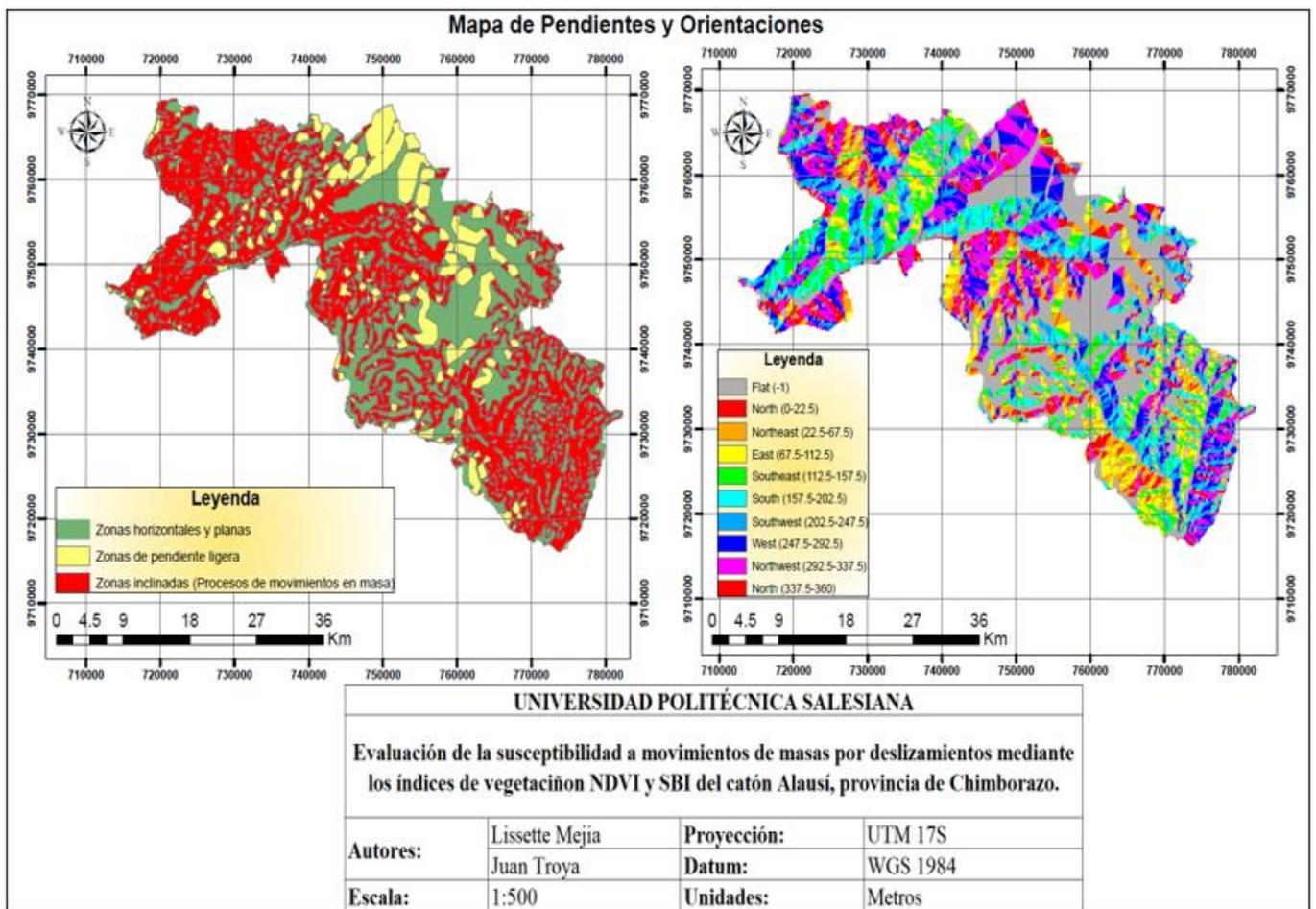
5.3.2 Mapa temático de Pendientes y Orientaciones

Los valores de las pendientes se identificaron haciendo uso de las curvas de nivel y de los modelos digitales de elevación, correspondientes al área de estudio. Seguidamente, se reclasificaron según el criterio descrito en la “*Tabla 4*”.

Por otro lado, el mapa orientaciones permitió identificar las diferentes direcciones que tienen las pendientes. Por ejemplo, las zonas que están dirigidas hacia el sur son áreas montañosas, con pendientes inclinadas, las cuales fueron más propensas a deslizarse.

Ilustración 21

Mapa de Pendientes y Orientaciones



5.4 Extracción de los procesos a movimientos de masas por deslizamientos

Se calcularon para las diferentes combinaciones multitemporales de las pendientes y de los índices de vegetación (NDVI Y SBI).

5.4.1 Combinaciones multitemporales

Permitieron extraer las trazas de los posibles movimientos de masas, relacionando los valores de las pendientes, índices de vegetación de diferencia normaliza e índices de brillantez del suelo, mediante la herramienta “*Combine*” del software ARCGIS 10.6. Además, esta herramienta atribuyó un código a cada combinación de los segmentos generados, seleccionando el código del segmento 2 del NDVI (0.15 – 0.45), el segmento 2 del SBI (0.2 – 0.3) y el segmento 3 de la pendiente ($> 15^\circ$), siendo esta la combinación adecuada para la extracción de los deslizamientos activos (*Ver tabla 5*).

Tabla 5

Combinación de segmentos del año 2016

Código	Pixeles	Pendiente	NDVI	SBI
0	3566	3	3	2
1	382	3	4	2
2	3584	3	2	1
3	1021	1	3	1
4	3607	3	2	2
5	1399	3	3	1
6	1973	1	2	2
7	2197	1	3	2
8	1680	2	2	1
9	141	3	1	1
10	2531	1	2	1
11	1104	2	2	2
12	1178	2	3	2
13	139	2	1	1
14	1507	3	2	3
15	4355	3	1	3
16	888	1	2	3
17	2374	1	1	3

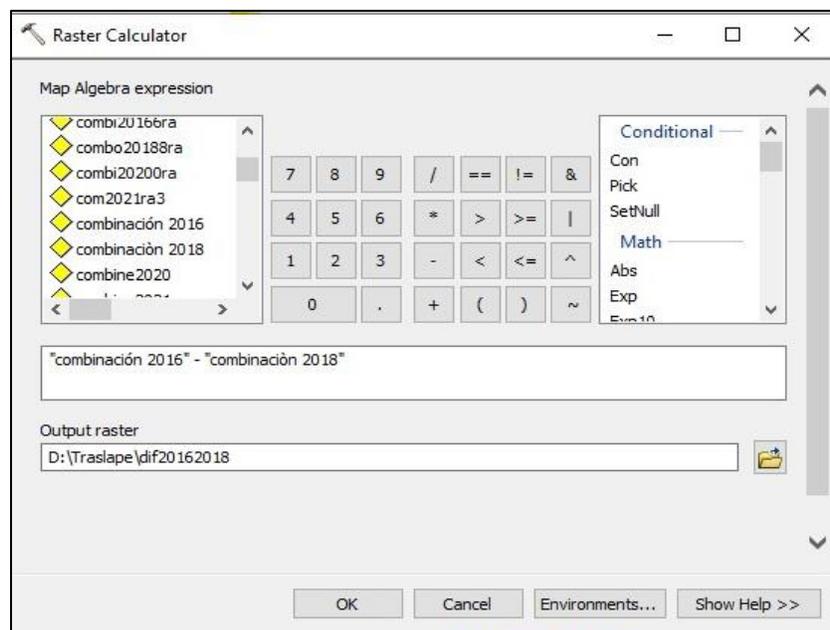
18	76	2	4	3
19	384	2	2	3
20	391	2	3	3
21	427	2	3	1
22	489	1	3	3
23	299	1	1	1
24	620	3	3	3
25	75	1	4	2
26	13	1	4	1
27	29	3	4	1
28	23	2	1	2
29	62	3	1	2
30	504	2	1	3
31	105	1	4	3

5.4.2 Diferencia de temporalidades

Se identificaron mediante la herramienta “*Calculator raster*” de ArcGIS 10.6, siguiendo las respectivas líneas de temporalidad, correspondientes a las combinaciones multitemporales de los años 2016 – 01 – 20; 2018 – 10 – 12, 2020– 10 – 03 y 2021-01-13 (***Ver ilustración 22***).

Ilustración 22

Cálculo de las diferencias de temporalidades



Seguidamente, se realizó un traslape espacial de las diferencias de temporalidades, logrando eliminar los píxeles mal identificados. En efecto, se denominan posibles deslizamientos, porque deben ser validados.

5.5 Métodos de validación

El muestreo estratificado, la verificación de los deslizamientos históricos registrados y el análisis estadístico del índice de Kappa fueron los métodos que se aplicaron para validar los resultados obtenidos.

5.5.1 Muestreo estratificado

El muestreo estratificado fue de carácter probabilístico y aleatorio, el cual toma en cuenta los estratos poblacionales. Seguidamente, se realizó el muestreo estratificado espacial, mediante el lenguaje de programación “*Model Builder*” el cual se programó con la herramienta “*create fishnet*” del ArcToolbox, en el software ARCGIS 10.6 (*Ver ilustración 23*), generando 62 puntos a muestrear, los mismos que se distribuyeron en toda la zona de estudio (*Ver ilustración 24*).

Ilustración 23

Diagrama de flujo de la herramienta Model Builder

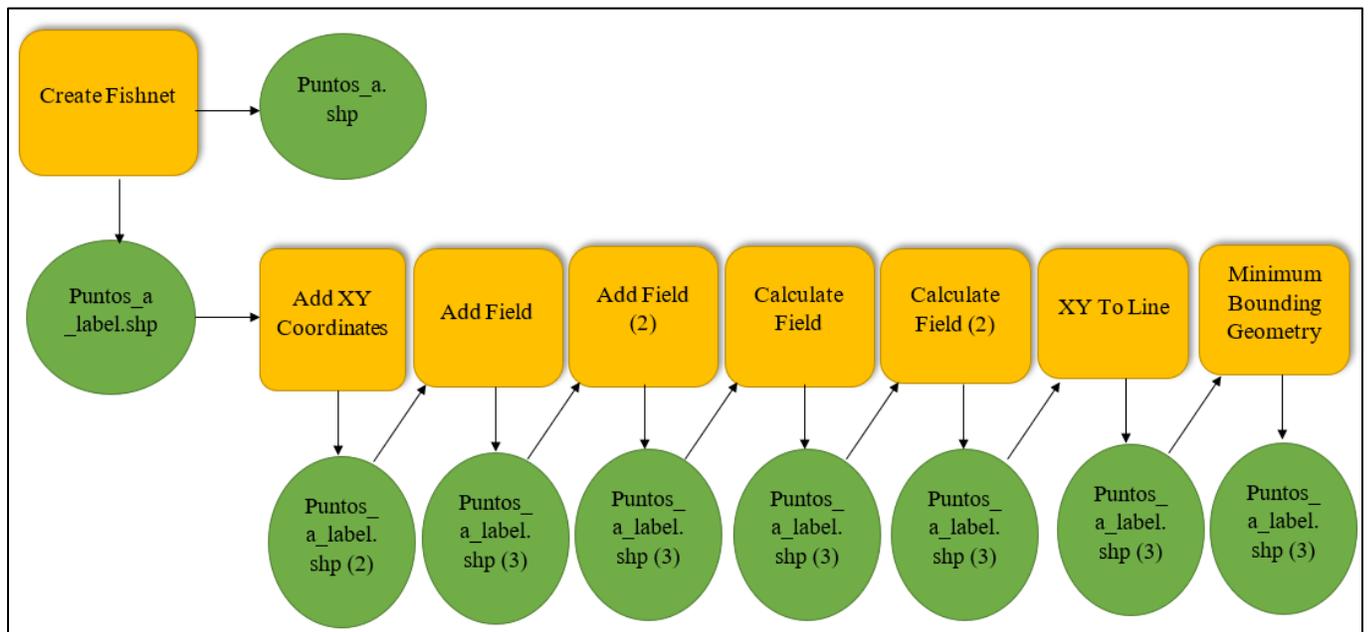
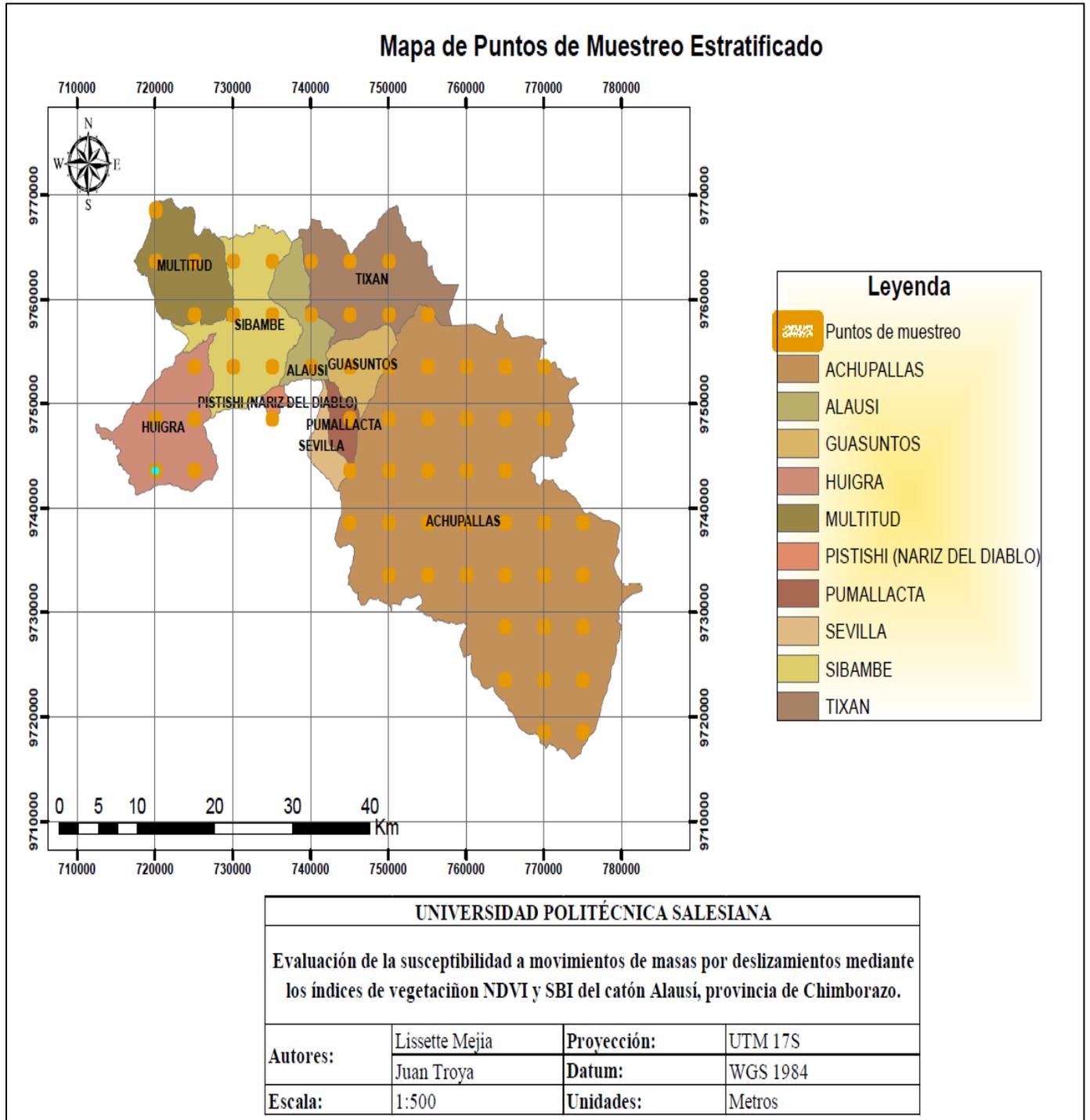


Ilustración 24

Mapa de muestreo de puntos estratificados



Es así que, los 62 puntos que se generaron en el muestreo estratificado fueron validados en campo, según las características topográficas que presentaron los deslizamientos. Entendiéndose aquellos deslizamientos activos como zonas de susceptibilidad alta, los deslizamientos temporales como zonas de susceptibilidad media y los deslizamientos inactivos como zonas de susceptibilidad baja (*Ver ilustración 25*).

Ilustración 25

Validación en campo



5.5.2 Verificación mediante los deslizamientos históricos registrados

En esta parte se consideró las coordenadas de los deslizamientos históricos que se han dado a lo largo del tiempo en el cantón, los mismos que en su momento se reportaron por los respectivos órganos de control. A continuación, en la “**Tabla 6**”, se muestran los deslizamientos históricos.

Tabla 6*Deslizamientos históricos del cantón Alausí*

Código	Coordenada X	Coordenada Y	Característica	Susceptibilidad
1	742167	9760035	Deslizamiento activo	Alta
2	724411	9746359	Deslizamiento activo	Alta
3	724300	9745500	Deslizamiento activo	Alta
4	749560	9750728	Deslizamiento activo	Alta
5	742000	9760000	Deslizamiento activo	Alta
6	741600	9759700	Deslizamiento activo	Alta
7	737500	9756200	Deslizamiento activo	Alta
8	737800	9756000	Deslizamiento activo	Alta
9	724400	9746400	Deslizamiento activo	Alta
10	748445	9749281	Deslizamiento activo	Alta
11	748591	9749617	Deslizamiento activo	Alta
12	748777	9749849	Deslizamiento activo	Alta
13	724411	9746359	Deslizamiento activo	Alta
14	724300	9745500	Deslizamiento activo	Alta
15	746771	9753205	Deslizamiento activo	Alta
16	749560	9750728	Deslizamiento activo	Alta
17	742000	9760000	Deslizamiento activo	Alta
18	741600	9759700	Deslizamiento activo	Alta
19	737500	9756200	Deslizamiento activo	Alta
20	737800	9756000	Deslizamiento activo	Alta
21	724400	9746400	Deslizamiento activo	Alta

Fuente: (GAD Municipal Alausi, 2015)

En la “**Tabla 6**” se observan los deslizamientos históricos que se han dado en el cantón. Por ende, para verificar la confiabilidad que tuvieron los métodos aplicados, se cruzaron las respectivas coordenadas con el mapa de susceptibilidad a deslizamientos.

5.5.3 Análisis estadístico del índice de Kappa de Cohen

Para evaluar la precisión de los resultados obtenidos se realizó la matriz de confusión para lo cual fue necesario determinar el coeficiente de Kappa, a partir de la verificación de los puntos

tomados en campo, los mismos que permitieron seleccionar una muestra representativa del área cartográfica. Por ende, para calcular el índice de Kappa se aplicó la siguiente ecuación.

Ecuación 3

Fórmula para el cálculo del índice de kappa

$$K = \frac{[(\Sigma \text{concordancias observadas}) - (\Sigma \text{concordancias atribuibles al azar})]}{[(\text{total de observaciones}) - (\Sigma \text{concordancias atribuibles al azar})]}$$

Fuente: (Cerde & Villarroel, 2008)

Los valores de precisión se miden de acuerdo a (Cerde & Villarroel, 2008), donde expresan que aquellos valores de 0,8 a 1 son de concordancia casi perfectos, mientras que los valores de 0 a 0,6 son de baja concordancia (*Ver “Tabla 7”*).

Tabla 7

Valores del índice de Kappa

Estadística Kappa	Fuerza de Acuerdo
< 0,00	Pobre
0,00 - 0,20	Leve
0,21 - 0,40	Aceptable
0,41 - 0,60	Moderado
0,61 - 0,80	Sustancial
0,81 - 1,00	Casi perfecta

Fuente: (Cerde & Villarroel, 2008)

En la “*Tabla 7*” se puede observar los valores referenciales del índice Kappa, cuyo objetivo es realizar un análisis estadístico en base a la distribución marginal, donde aquellos valores inferiores o iguales a 0,61 significan que el nivel de confiabilidad es inaceptable, mientras que aquellos rangos de 0,80 a 1 significan que los resultados obtenidos son aceptables, precisos y confiables.

6 RESULTADOS

Los valores de los índices espectrales y de las pendientes fueron determinantes para la extracción de los procesos a movimientos de masas, debido a que permitieron caracterizar de manera efectiva la susceptibilidad de los deslizamientos.

6.1 Análisis de la pendiente

En la identificación de los movimientos de masas, se estableció que las pendientes son elementos determinantes para evaluar la estabilidad del terreno, para lo cual se identificaron pendientes de 0° , de 1 a 14° y $> 15^\circ$.

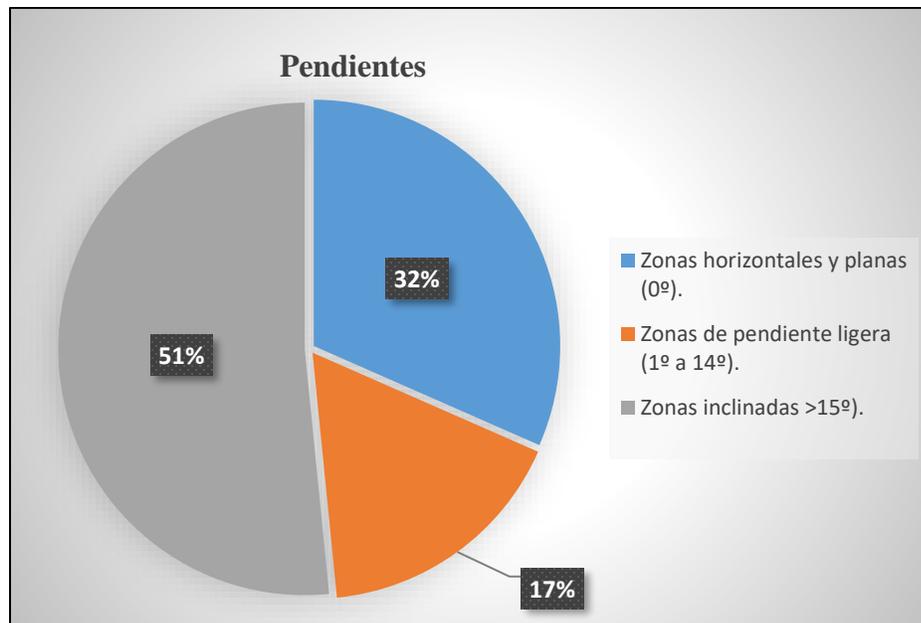
Tabla 8

Clasificación de las pendientes

Pendientes	
Clasificación	Área (Ha)
Zonas horizontales y planas (0°).	52241,539
Zonas de pendiente ligera (1° a 14°).	27821,268
Zonas inclinadas ($>15^\circ$).	85288,771

Ilustración 26

Clasificación de las pendientes



En la “*ilustración 26*” se observa que las áreas con pendientes de 0° correspondieron a superficies planas de (52241,53 ha) el cual representó el 32% del área estudiada. En cambio, las pendientes mayores a 15° resultaron ser de superficies inclinadas (85288,77 ha) con el 51%. Además, hay que reconocer que también existieron áreas con pendientes ligeras (27821,268 ha) llegando al 17%.

6.2 Análisis de los índices espectrales NDVI y SBI

Los índices espectrales NDVI y SBI jugaron un papel importante en la identificación de los deslizamientos, evaluando los diferentes comportamientos de las áreas potencialmente erosionadas. A continuación, se muestran los resultados.

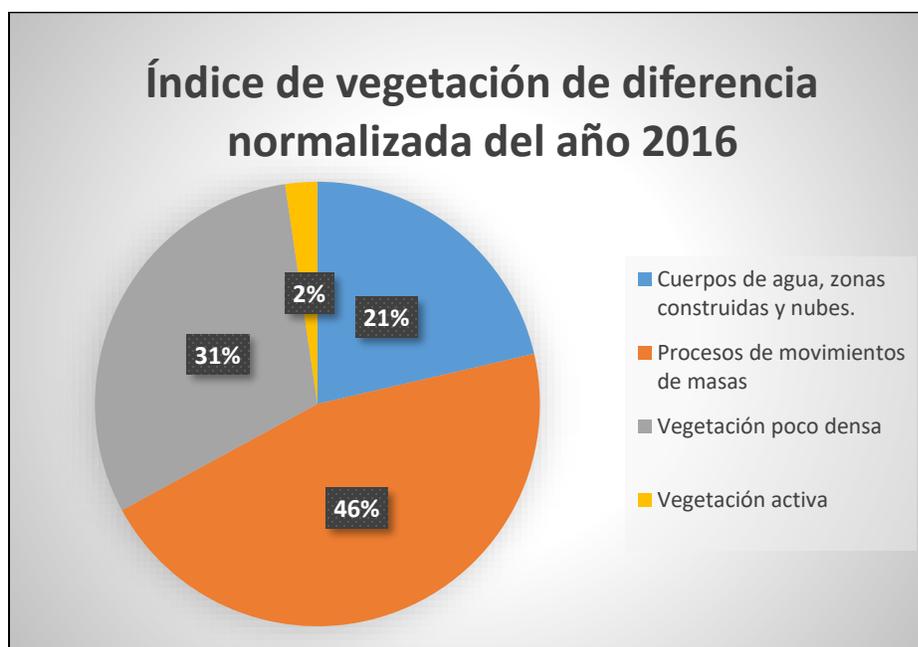
Tabla 9

Índice de vegetación de diferencia normalizada del año 2016

Índice de vegetación de diferencia normalizada del año 2016	
Clasificación	Área (Ha)
Cuerpos de agua, zonas construidas y nubes.	35481,433
Procesos de movimientos de masas	75855,398
Vegetación poco densa	50815,799
Vegetación activa	3859,552

Ilustración 27

Clasificación del NDVI del año 2016



En la “*ilustración 27*” se observa que los procesos a movimientos de masas presentaron un área de (75855,39 ha) las cuales representaron el 46% del área estudiada, las zonas construidas y cuerpos de agua (35461,433 ha) tienen el 21%, las zonas de vegetación poco densa (50615,79 ha) presentan el 31% y las zonas de vegetación activa (3659,552 ha) tienen el 46%.

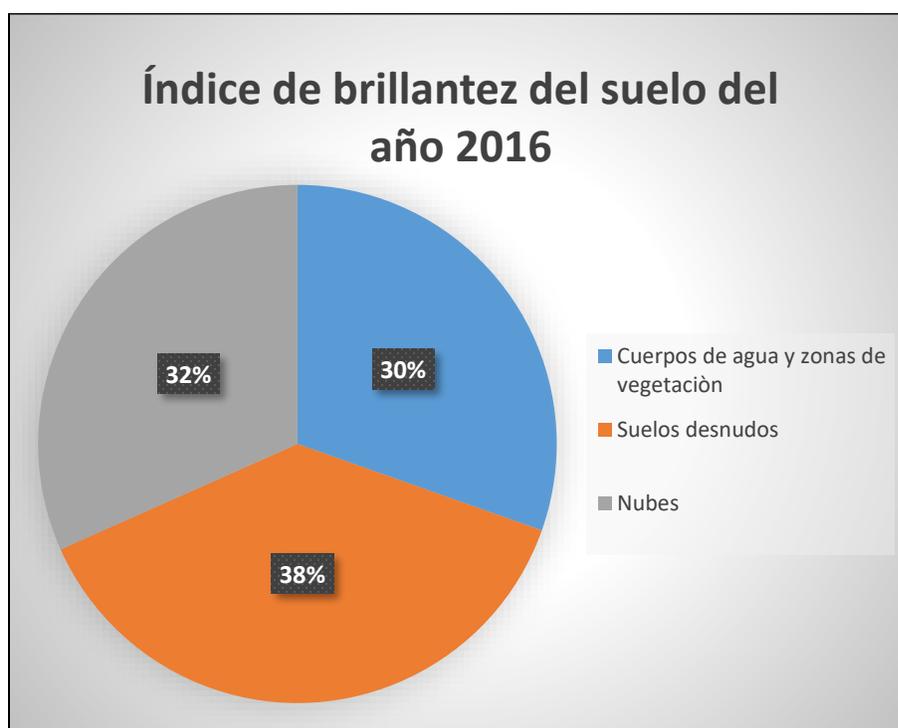
Tabla 10

Índice de brillantez del suelo del año 2016

Índice de brillantez del suelo del año 2016	
Clasificación	Área (Ha)
Cuerpos de agua y zonas de vegetación	50433,498
Suelos desnudos	62840,089
Nubes	52518,845

Ilustración 28

Clasificación del SBI del año 2016



En la “*ilustración 28*” se visualiza que los suelos desnudos presentaron un área de 62840,08 ha, las mismas que representaron el 38% del área estudiada, las zonas de vegetación y

cuerpos de agua (50433,498 ha) tienen el 30%. Por lo tanto, los procesos de desertificación ocasionaron que los suelos desnudos prevalecieran sobre las otras zonas de identificación.

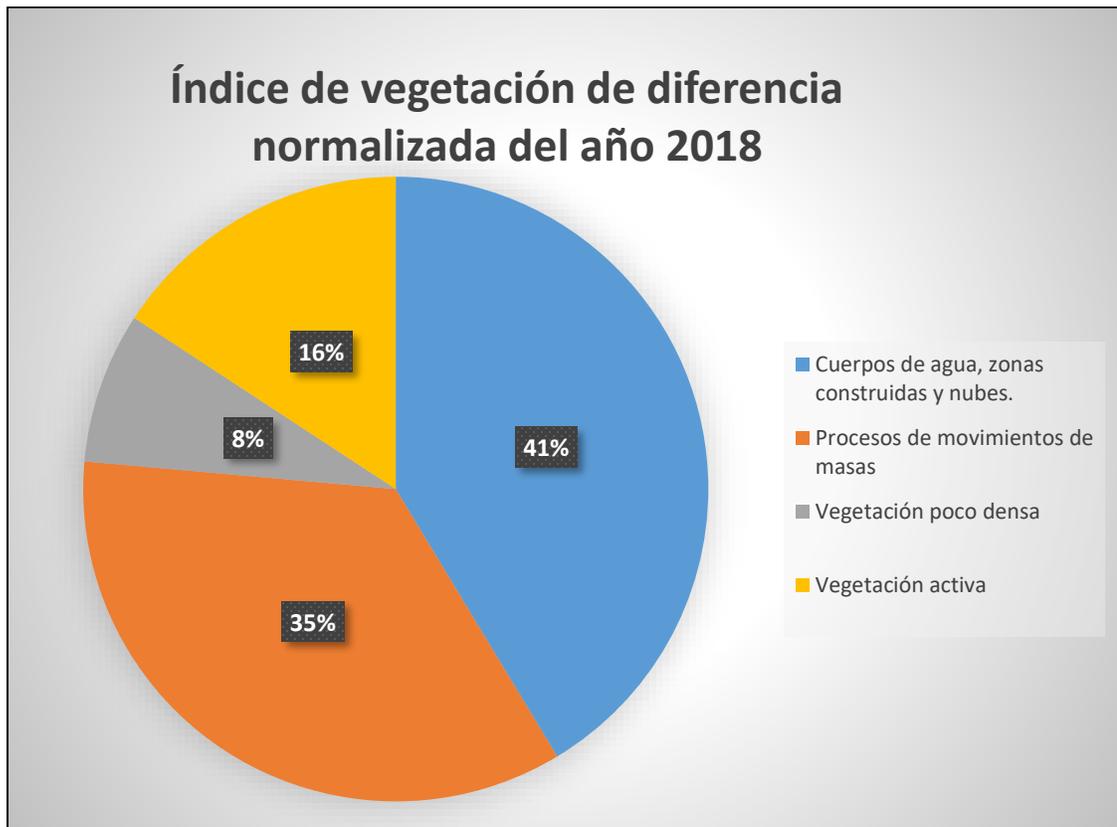
Tabla 11

Índice de vegetación de diferencia normalizada del año 2018

Índice de vegetación de diferencia normalizada del año 2018	
Clasificación	Área (Ha)
Cuerpos de agua, zonas construidas y nubes.	68575,381
Procesos de movimientos de masas	58107,478
Vegetación poco densa	12958,281
Vegetación activa	26151,785

Ilustración 29

Clasificación del NDVI del año 2018



En la “*ilustración 29*” se observa que los procesos a movimientos de masas tuvieron un área de 58107,478 ha, las cuales presentan el 35% del área estudiada, las zonas construidas y cuerpos de agua (68575,381 ha) tienen el 41%, las zonas de vegetación poco densa (12958,261 ha) presentan el 8% y las zonas de vegetación activa (26151,786 ha) tienen el 16%.

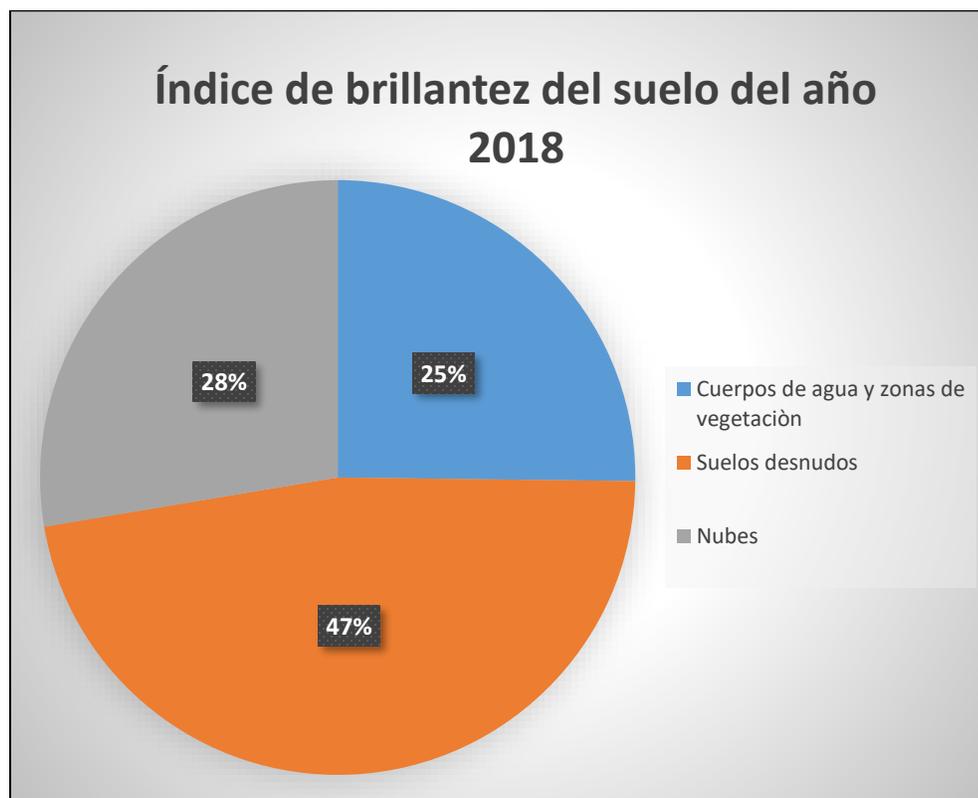
Tabla 12

Índice de brillantez del suelo del año 2018

Índice de brillantez del suelo del año 2018	
Clasificación	Área (Ha)
Cuerpos de agua y zonas de vegetación	41770,569
Suelos desnudos	78183,815
Nubes	45838,425

Ilustración 30

Clasificación del SBI del año 2018



En la “*ilustración 30*” se observa que los suelos desnudos presentaron un área de 78183,815 ha, las mismas que tienen el 47% del área estudiada, las zonas de vegetación y cuerpos de agua (41770,569 ha) presentan el 25%. En efecto, se puede observar que las actividades antrópicas ocasionaron que los suelos desnudos del año 2018 aumenten con respecto al 2016.

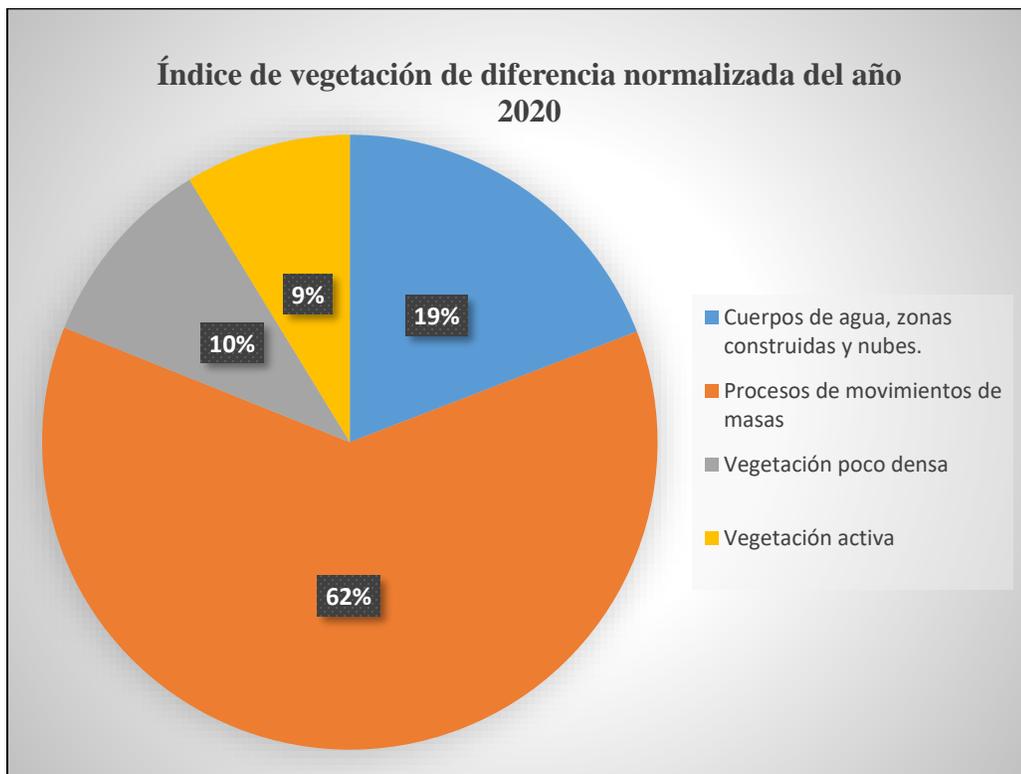
Tabla 13

Índice de vegetación de diferencia normalizada del año 2020

Índice de vegetación de diferencia normalizada del año 2020	
Clasificación	Área (Ha)
Cuerpos de agua, zonas construidas y nubes.	31738,017
Procesos de movimientos de masas	102678,949
Vegetación poco densa	16905,126
Vegetación activa	14470,959

Ilustración 31

Clasificación del NDVI del año 2020



En la “*ilustración 31*” se observa que los procesos a movimientos de masas tuvieron un área de 102678,949 ha, las cuales representan el 62% del área estudiada, las zonas construidas y cuerpos de agua (31738,017 ha) tienen el 19%, las zonas de vegetación poco densa (16902,126 ha) presentan el 10% y las zonas de vegetación activa (14470,959 ha) tienen el 9%.

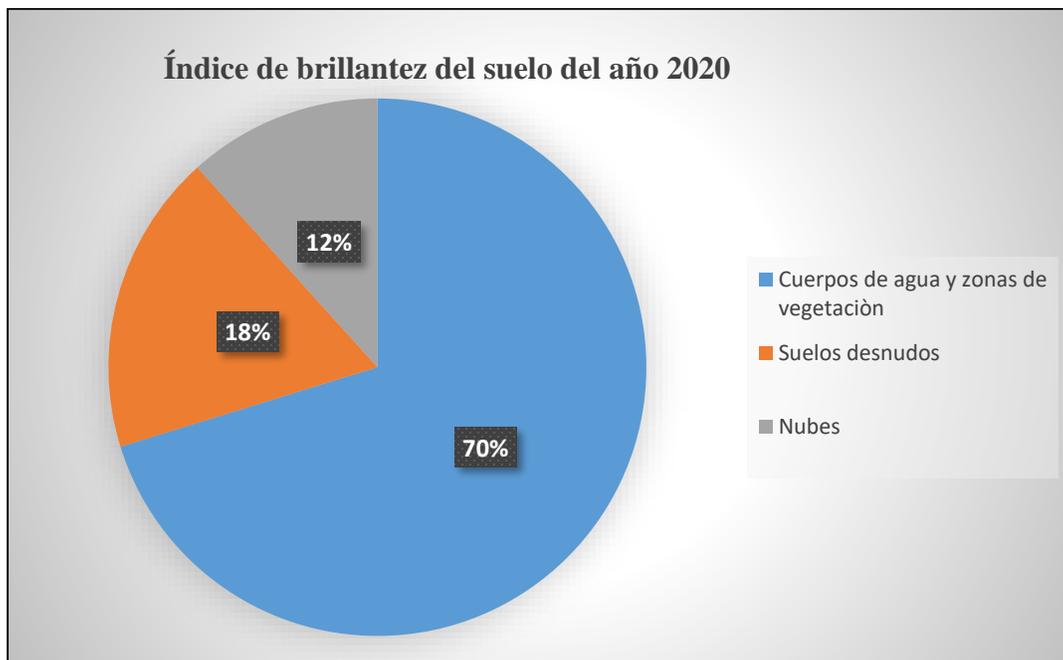
Tabla 14

Índice de brillantez del suelo del año 2020

Índice de brillantez del suelo del año 2020	
Clasificación	Área (Ha)
Cuerpos de agua y zonas de vegetación	116414,063
Suelos desnudos	30026,153
Nubes	19354,339

Ilustración 32

Clasificación del SBI del año 2020



En la “*ilustración 32*” se visualiza que los suelos desnudos presentaron un área de 30026,153 ha, las cuales presentan el 18% del área estudiada, las zonas de vegetación y cuerpos

de agua (116414,083 ha) tienen el 70%. Del mismo modo, se pudo observar que el contenido de nubes fue relativamente bajo (19354,339 ha) con el 12%.

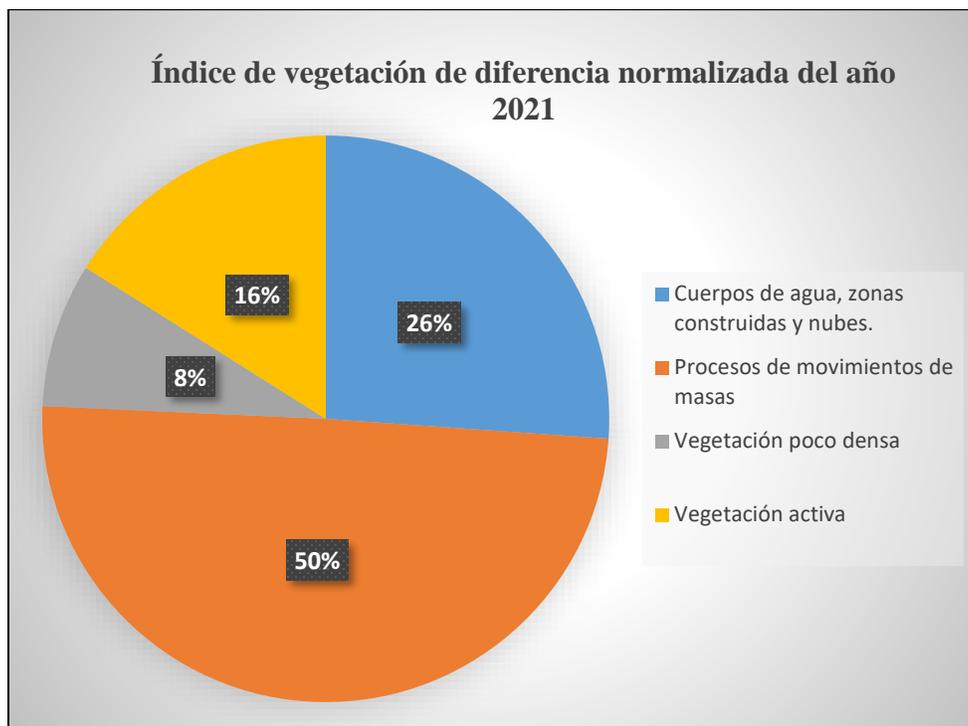
Tabla 15

Índice de vegetación de diferencia normalizada del año 2021

Índice de vegetación de diferencia normalizada del año 2021	
Clasificación	Área (Ha)
Cuerpos de agua, zonas construidas y nubes.	43303,817
Procesos de movimientos de masas	82227,11
Vegetación poco densa	13649,011
Vegetación activa	26612,777

Ilustración 33

Clasificación del NDVI del año 2021



En la “*ilustración 33*” se observa que los procesos a movimientos de masas tuvieron un área de 82227,11 ha, las mismas que representan el 50% del área estudiada, las zonas construidas y cuerpos de agua (43303,817 ha) tienen el 26%, las zonas de vegetación poco densa (13649,011 ha) presentan el 8% y las zonas de vegetación activa (26612,777 ha) tienen el 16%.

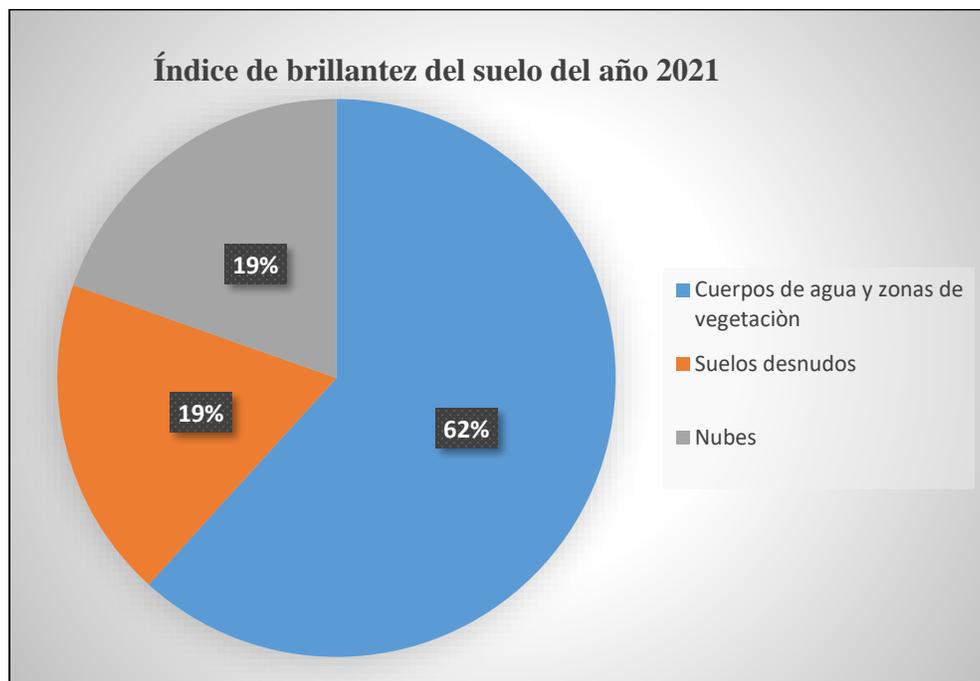
Tabla 16

Índice de brillantez del suelo del año 2021

Índice de brillantez del suelo del año 2021	
Clasificación	Área (Ha)
Cuerpos de agua y zonas de vegetación	102353,987
Suelos desnudos	30948,425
Nubes	32492,452

Ilustración 34

Clasificación del SBI del año 2021



En la “*ilustración 34*” se identifica que los suelos desnudos presentaron un área de 30948,425 ha, las cuales tienen el 19% del área estudiada, las zonas de vegetación y cuerpos de (102353,987 ha) presentan el 62%. Además, se puede ver que los suelos desnudos del año 2021 aumentaron con respecto al 2020, debido a la pérdida de la vegetación.

6.3 Análisis de las combinaciones

Las combinaciones multitemporales permitieron relacionar los índices espectrales y las pendientes, con las cuales se identificaron las trazas a movimientos de masas. A continuación, se muestran los mapas temáticos.

Ilustración 35

Mapa de combinaciones del año 2016 y 2018

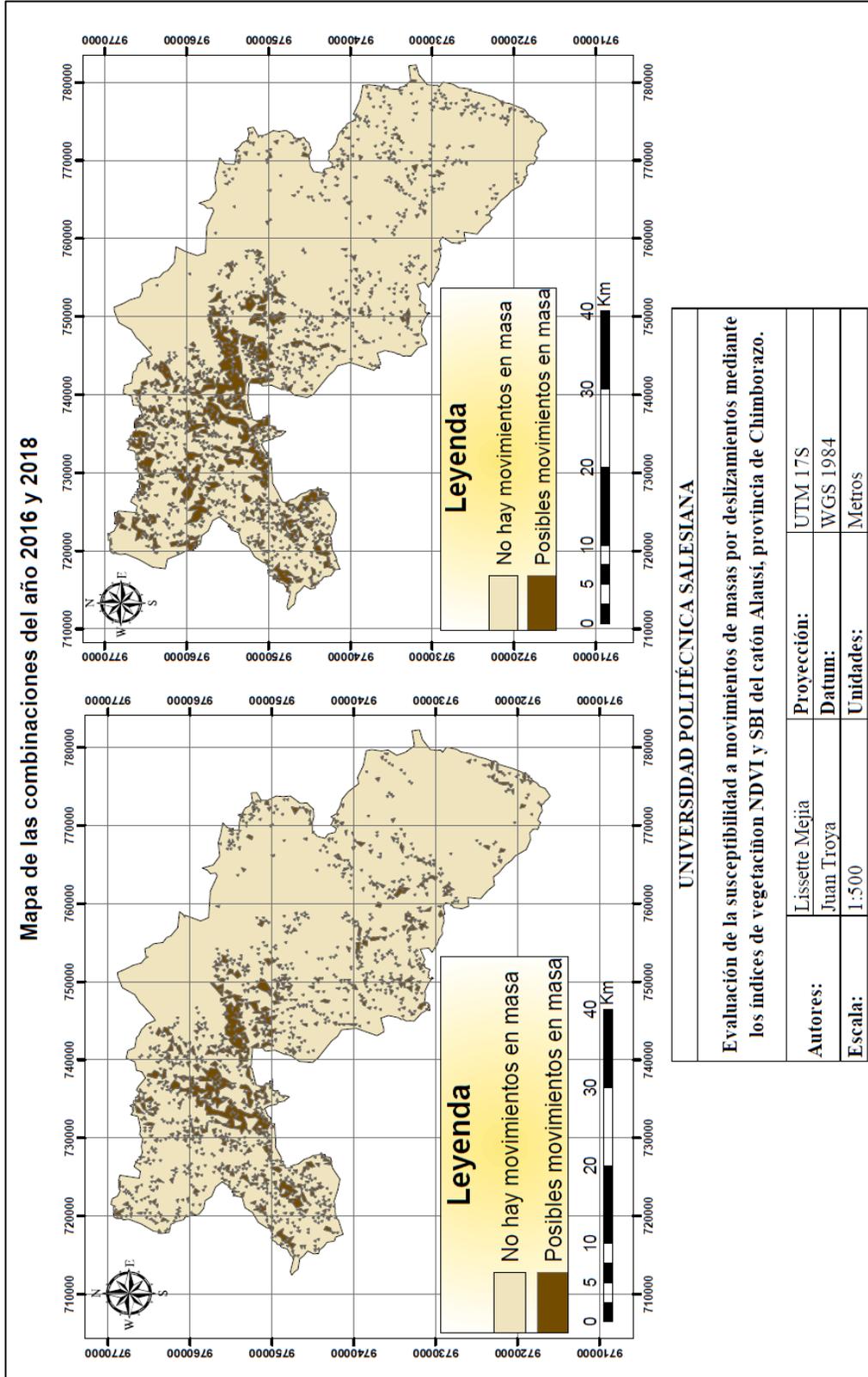
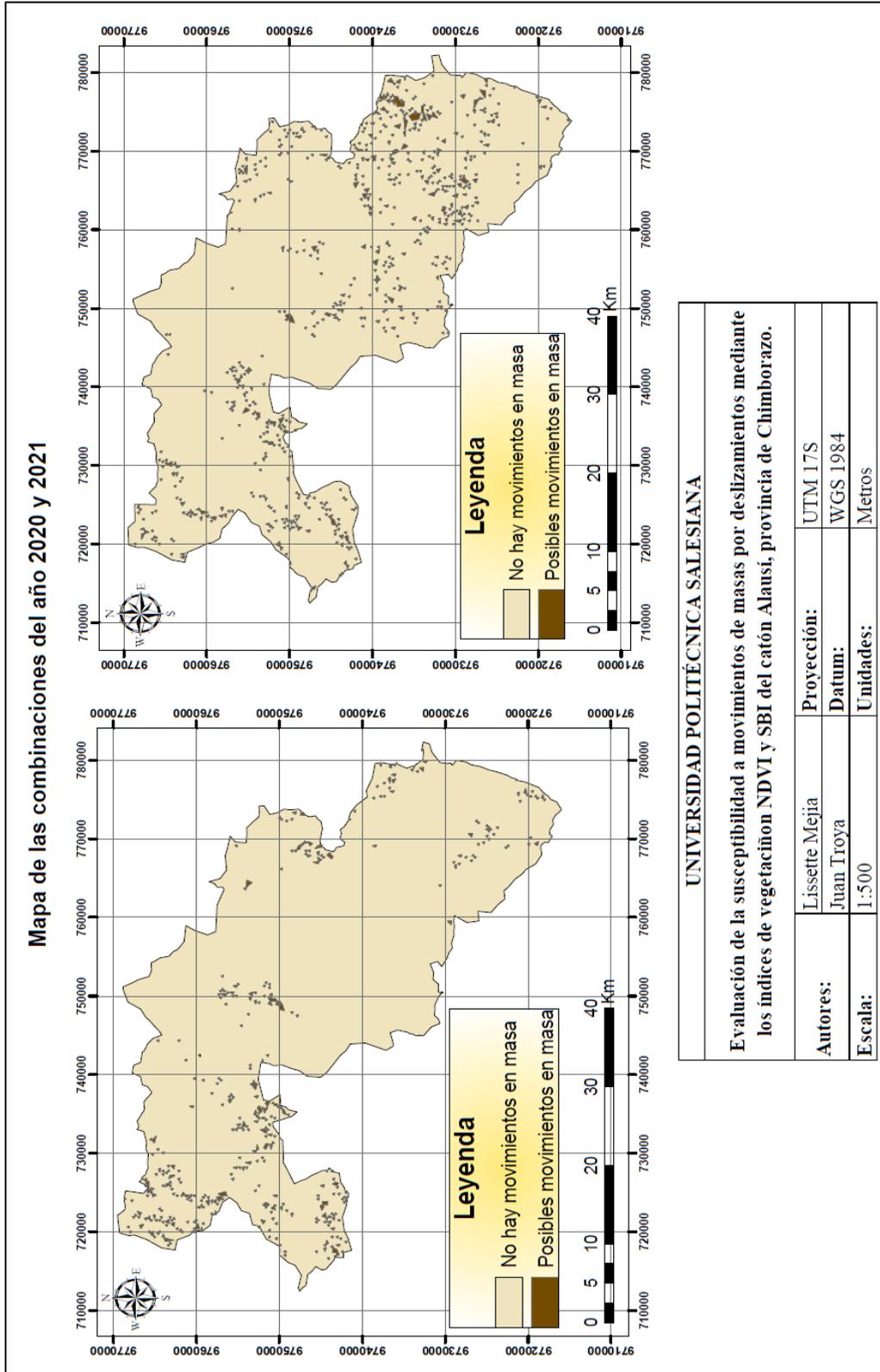


Ilustración 36

Mapa de combinaciones del año 2020 y 2021



En la “*ilustración 35 y 36*” se muestra los deslizamientos de los años 2016, 2018, 2020 y 2021. Los mismos, que resultaron de las combinaciones de los índices espectrales y de las pendientes.

Por lo tanto, se observa que en los años del 2016 y 2018 se identificaron mayor cantidad de trazas de movimientos de masas, debido a que se incluyeron los deslizamientos activos e inactivos. Por otra parte, en el año 2020 se eliminaron los pixeles erróneos, identificando así menor cantidad de movimientos de masas. En definitiva, el análisis multitemporal evitó los errores de identificación.

6.4 Análisis de la diferencia de temporalidades

Con el fin de eliminar los pixeles mal identificados, se calcularon las diferencias de temporalidades, siguiendo la línea de continuidad de cada una de las combinaciones multispectrales.

Los datos obtenidos fueron variables, debido a las influencias estacionales y espectrales que tuvieron las imágenes satelitales. Por ese motivo, las diferencias de temporalidades generaron cambios en los ángulos de iluminación.

Además, el relieve, la vegetación y el estado del suelo desnudo, fueron determinantes para extraer las trazas de los deslizamientos. Es así que, mediante el análisis multitemporal, se pudo evitar una falsa identificación.

En definitiva, para una correcta extracción de los procesos a movimientos de masas fue necesario que las imágenes satelitales sean cercanas entre sí, logrando tener una mayor exactitud y precisión de los resultados. A continuación, se muestran las diferencias de temporalidades obtenidas.

Ilustración 37

Mapa de temporalidades del año 2016 – 2018

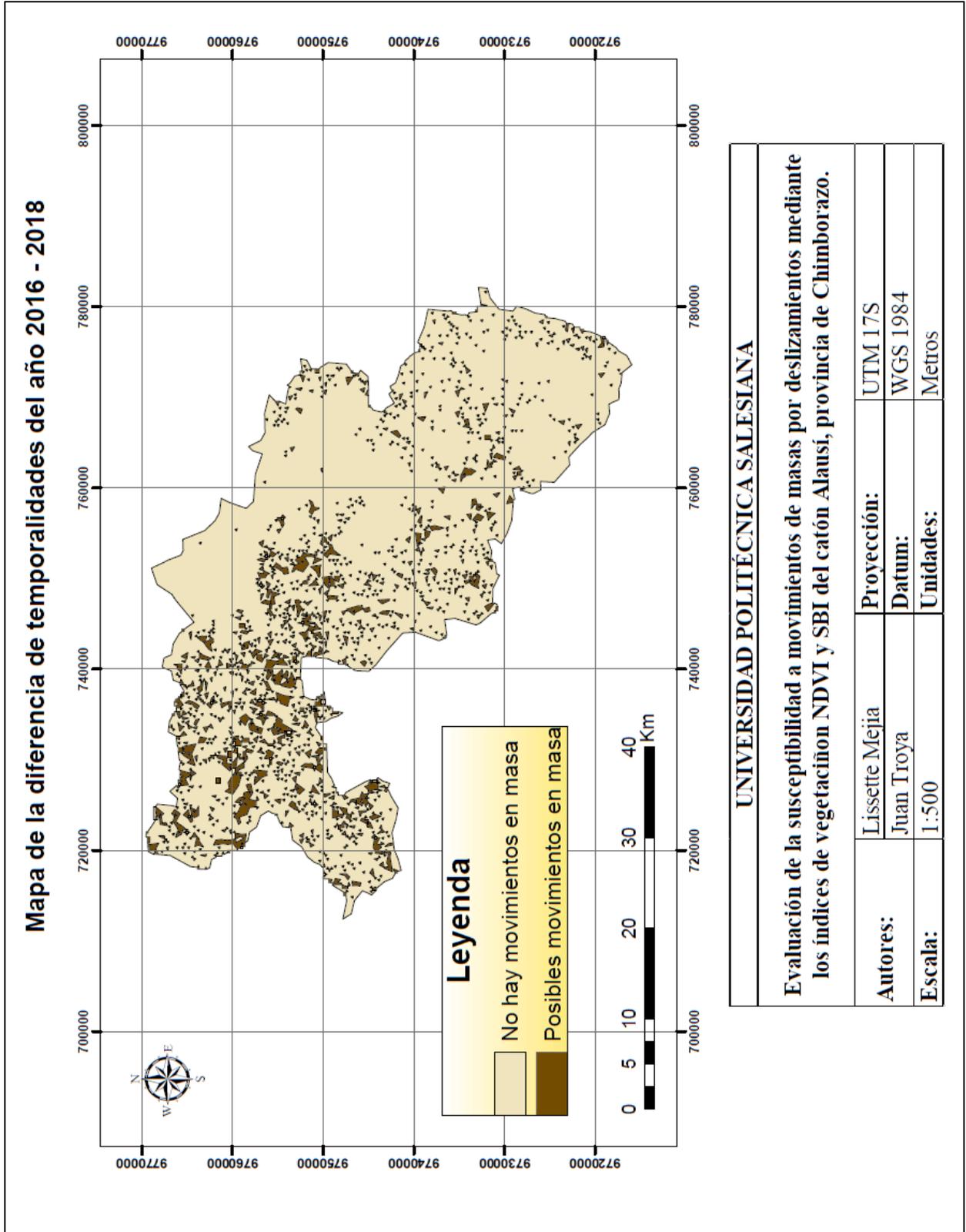


Ilustración 38

Mapa de temporalidades del año 2018 - 2020

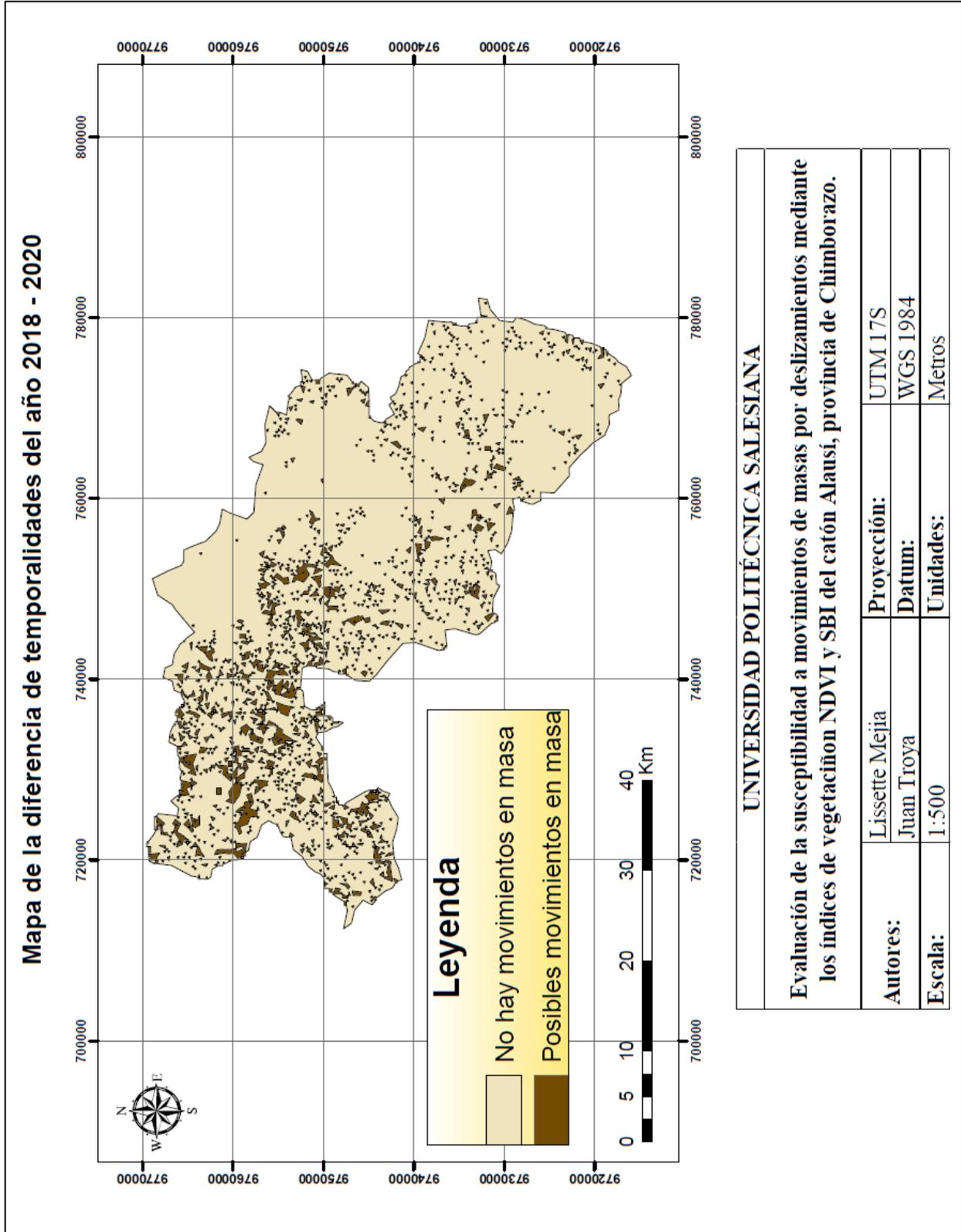
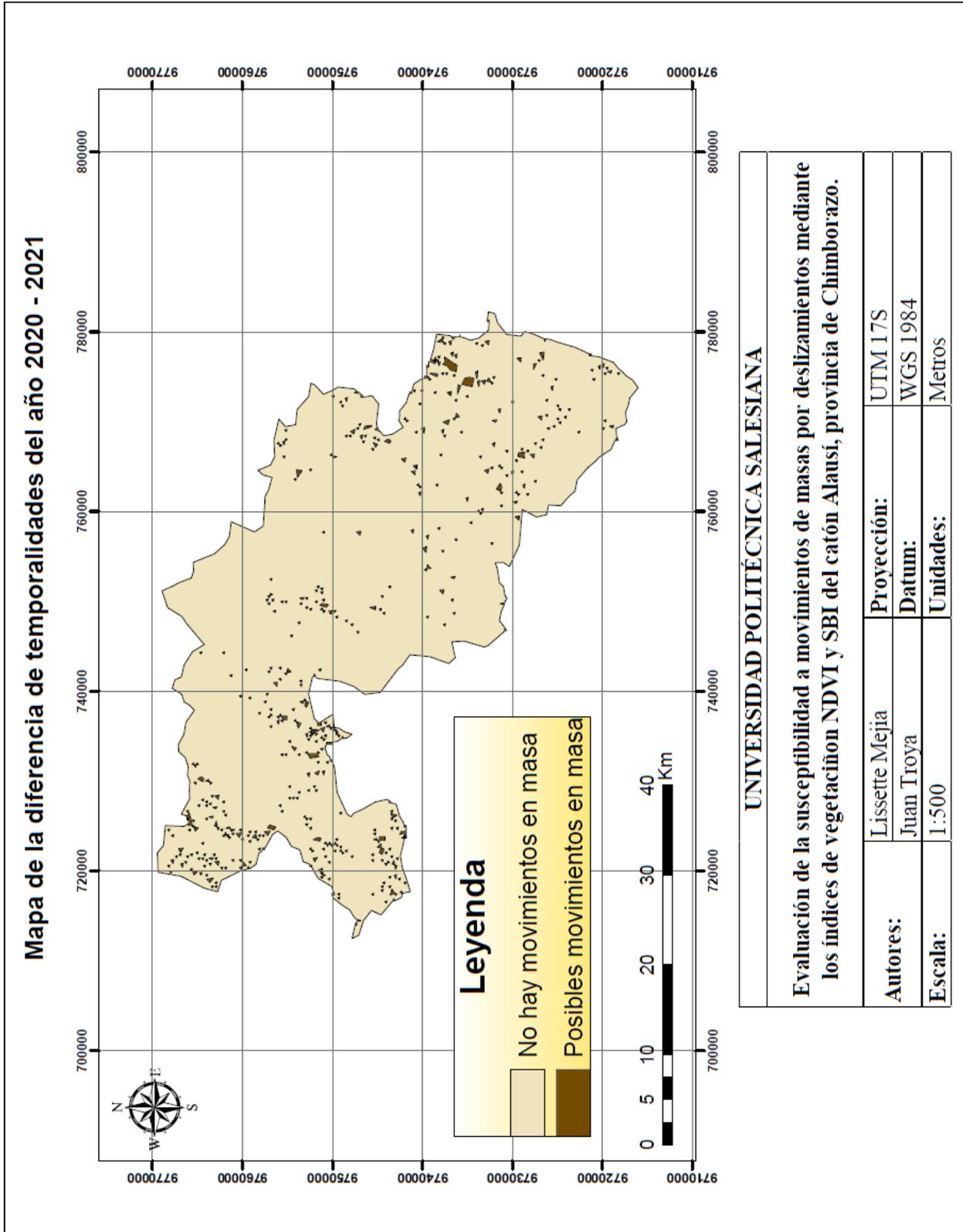


Ilustración 39

Mapa de temporalidades del año 2020 - 2021



En la “*ilustración 37, 38 y 39*” se observa que los píxeles de coloración café representaron las trazas de movimientos de masas por deslizamientos. De igual forma, se encontró que están presentes en más de dos fechas de temporalidad.

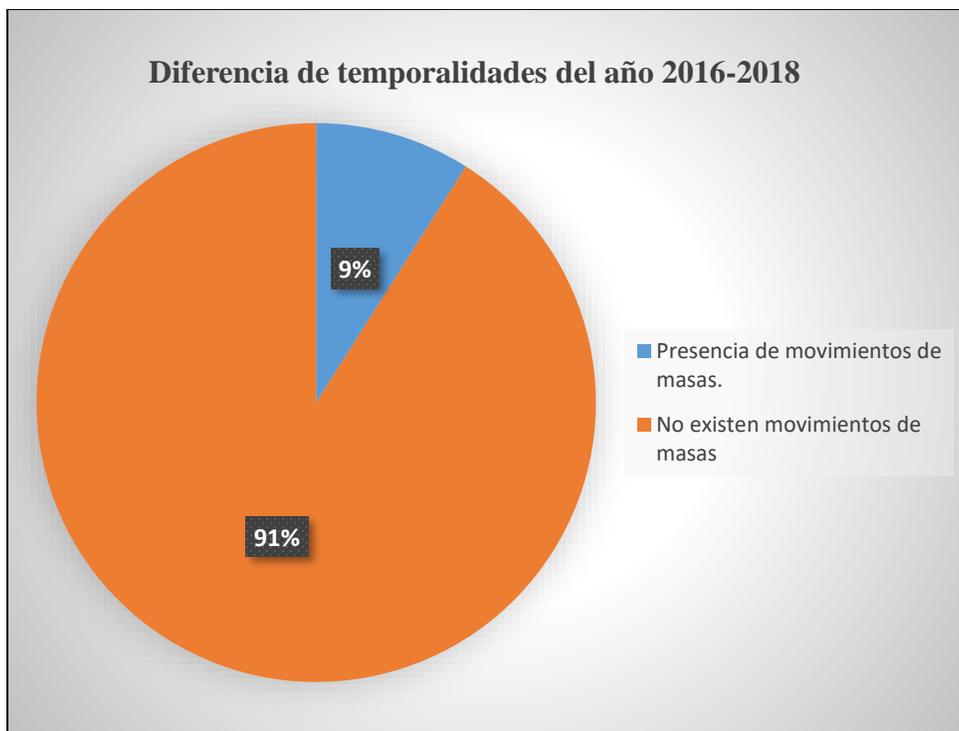
Tabla 17

Diferencia de temporalidades del año 2016-2018

Diferencia de temporalidades del año 2016-2018	
Característica	Área (Ha)
Presencia de movimientos de masas.	14763,044
No existen movimientos de masas	149404,93

Ilustración 40

Diferencia de temporalidades 2016 - 2018



En la “*ilustración 40*” se visualiza que las trazas de los deslizamientos correspondientes a los años 2016 y 2018, tuvieron una extensión de terreno de 14763,044 ha, las cuales tienen el 9% del área estudiada, las zonas que no presentaron deslizamientos (149404,934 ha) tienen el 91%.

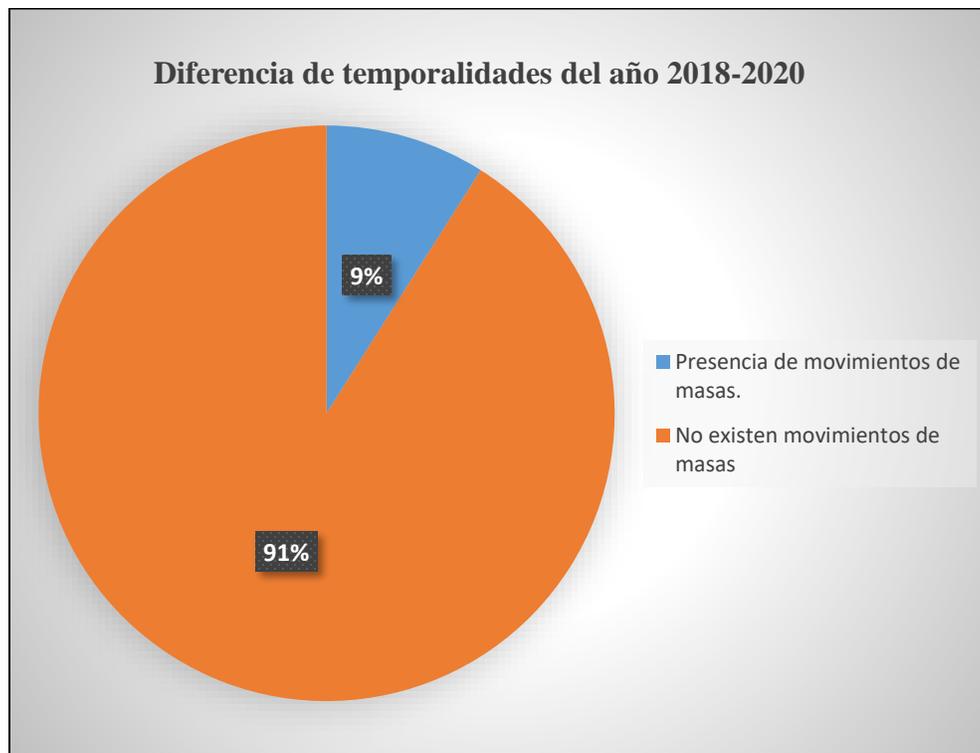
Tabla 18

Diferencia de temporalidades del año 2018-2020

Diferencia de temporalidades del año 2018-2020	
Característica	Área (Ha)
Presencia de movimientos de masas.	14763,044
No existen movimientos de masas	149404,934

Ilustración 41

Diferencia de temporalidades 2018 - 2020



En la “*ilustración 41*” se visualiza que las trazas de los deslizamientos correspondientes a los años 2018 y 2020, tuvieron una extensión de terreno de 14763,044 ha, las mismas que representan el 9% del área de estudio, las zonas que no presentaron deslizamientos (149404,934 ha) presentan el 91%.

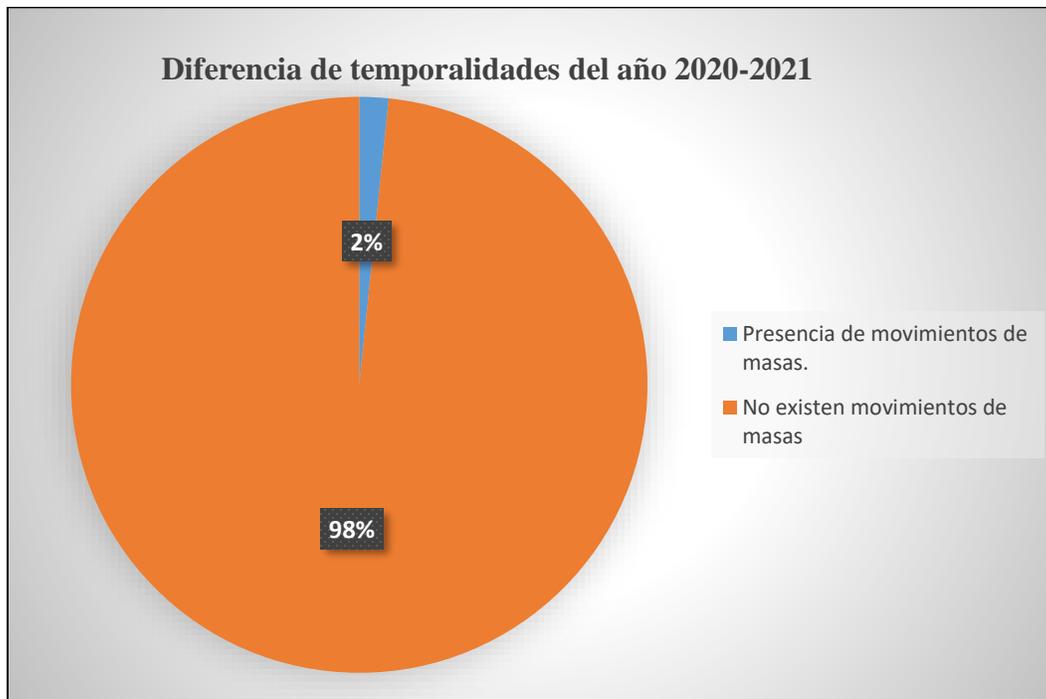
Tabla 19

Diferencia de temporalidades del año 2020-2021

Diferencia de temporalidades del año 2020-2021	
Característica	Área (Ha)
Presencia de movimientos de masas.	2681,593
No existen movimientos de masas	161505,781

Ilustración 42

Diferencia de temporalidades



En la “*ilustración 42*” se visualiza que las trazas de los deslizamientos correspondientes a los años 2020 y 2021 presentaron una extensión de terreno de 2681,593 ha, las mismas que tienen el 2% del área de estudio, las zonas que no presentaron deslizamientos (161505,781 ha) presentan el 98%.

6.5 Análisis de las zonas susceptibles a deslizamientos

Los factores que incidieron en la reactivación de los deslizamientos fueron las altas precipitaciones, procesos de erosión, intensos niveles de radiación, actividades antrópicas, etc. Por lo tanto, los procesos de extracción de movimientos de masas permitieron identificar los

deslizamientos activos, interrumpidos e inactivos. A continuación, se muestran los resultados obtenidos.

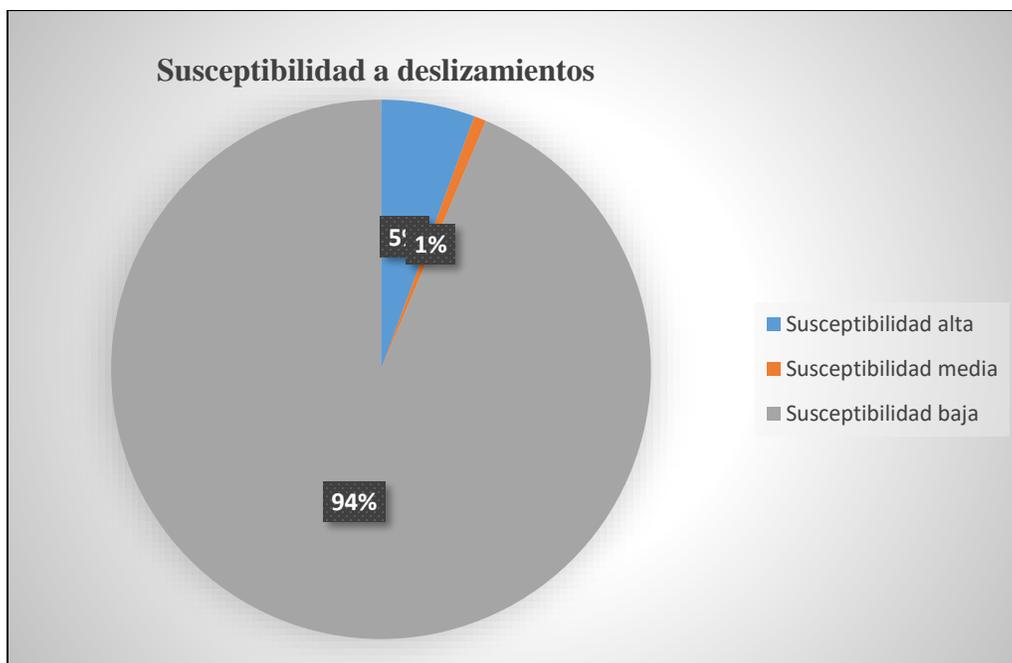
Tabla 20

Susceptibilidad a deslizamientos

Diferencia de temporalidades del año 2020-2021	
Característica	Área (Ha)
Susceptibilidad alta	9183,381
Susceptibilidad media	1185,162
Susceptibilidad baja	152776,114

Ilustración 43

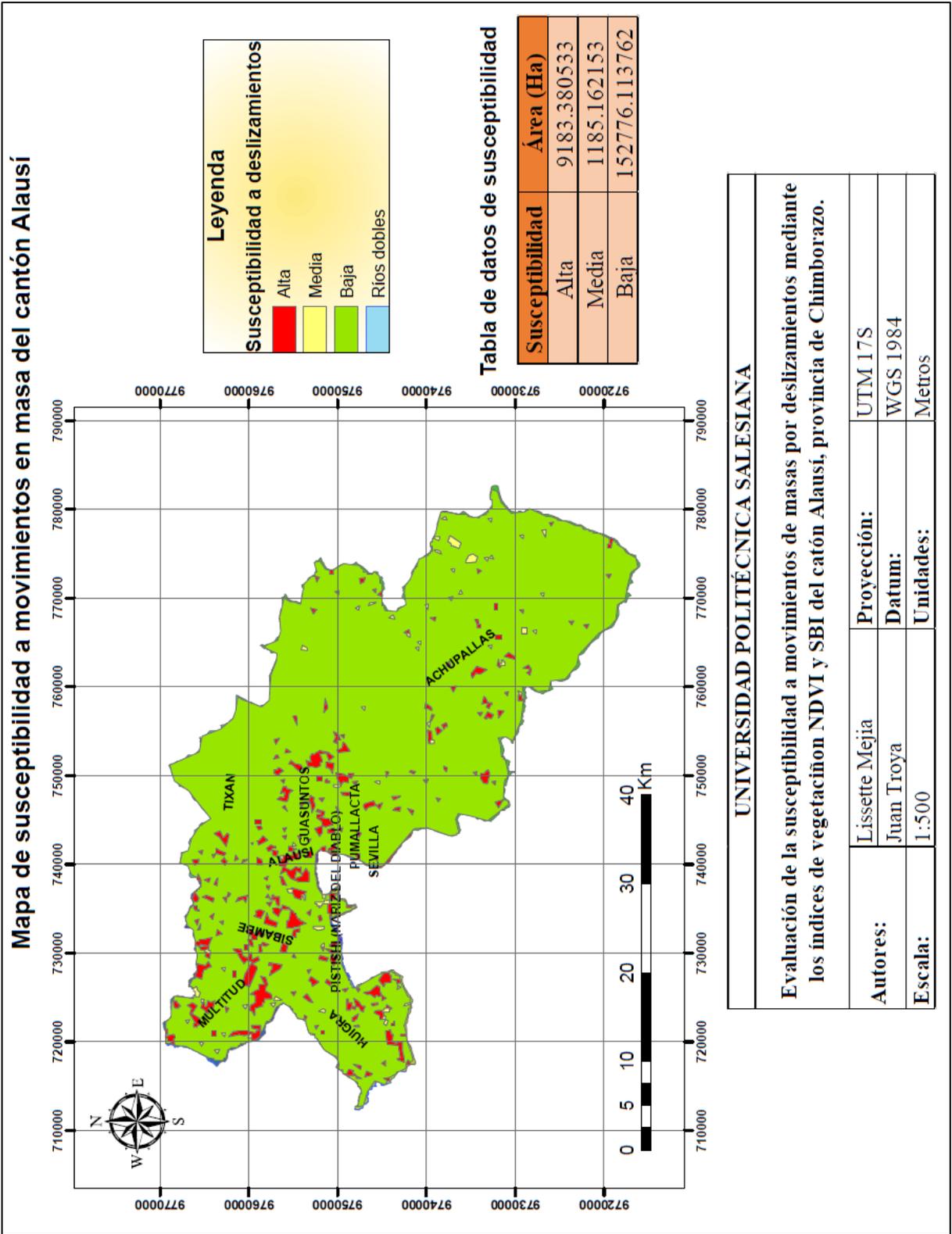
Frecuencia de la susceptibilidad a movimientos en masa



En la “*ilustración 43*” se visualiza que las áreas de susceptibilidad alta tienen el 5% del área estudiada, las de susceptibilidad media el 1% y las zonas de susceptibilidad baja el 94%.

Ilustración 44

Mapa de susceptibilidad a movimientos en masa



En la “*ilustración 43 y 44*” se observa que las zonas con susceptibilidad alta tuvieron un área de 9183.380533 Ha, las zonas de susceptibilidad media tuvieron un área de 1185.162153 Ha y las de susceptibilidad baja tuvieron un área de 152776.113762 Ha. Además, las parroquias que fueron afectadas por los deslizamientos activos, inactivos e interrumpidos se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 21

Descripción de las zonas susceptibles a deslizamientos

FID	Coordenada x	Coordenada y	Característica	Susceptibilidad	Parroquia
1	720330.131	9743694.83	Deslizamiento activo	Alta	Huigra
2	720330.131	9748694.83	No hay deslizamientos	Baja	Huigra
3	720330.131	9763694.83	No hay deslizamientos	Baja	Huigra
4	720330.131	9768694.83	Deslizamiento activo	Alta	Huigra
5	725330.131	9743694.83	No hay deslizamientos	Baja	Huigra
6	725330.131	9748694.83	No hay deslizamientos	Baja	Huigra
7	725330.131	9753694.83	Deslizamiento activo	Alta	Huigra
8	725330.131	9758694.83	No hay deslizamientos	Baja	Multitud
9	725330.131	9763694.83	No hay deslizamientos	Baja	Multitud
10	730330.131	9753694.83	No hay deslizamientos	Baja	Sibambe
11	730330.131	9758694.83	No hay deslizamientos	Baja	Sibambe
12	730330.131	9763694.83	Deslizamiento interrumpido	Media	Sibambe
13	735330.131	9748694.83	No hay deslizamientos	Baja	Pistishi
14	735330.131	9753694.83	No hay deslizamientos	Baja	Sibambe
15	735330.131	9758694.83	Deslizamiento activo	Alta	Sibambe
16	735330.131	9763694.83	No hay deslizamientos	Baja	Sibambe
17	740330.131	9753694.83	Deslizamiento activo	Alta	Alausí central
18	740330.131	9758694.83	No hay deslizamientos	Baja	Tixán
19	740330.131	9763694.83	No hay deslizamientos	Baja	Tixán
20	745330.131	9738694.83	No hay deslizamientos	Baja	Achupallas
21	745330.131	9743694.83	No hay deslizamientos	Baja	Achupallas
22	745330.131	9748694.83	No hay deslizamientos	Baja	Pumallacta
23	745330.131	9753694.83	Deslizamiento activo	Alta	Guasuntos
24	745330.131	97586994.8	No hay deslizamientos	Baja	Tixán
25	745330.131	9763694.83	No hay deslizamientos	Baja	Tixán
26	750330.131	9733694.83	Deslizamiento activo	Alta	Achupallas
27	750330.131	9738694.83	Deslizamiento activo	Alta	Achupallas
28	750330.131	9743694.83	Deslizamiento interrumpido	Media	Achupallas
29	750330.131	9748694.83	Deslizamiento activo	Alta	Achupallas

30	750330.131	9753694.83	No hay deslizamientos	Baja	Achupallas
31	750330.131	9758694.83	No hay deslizamientos	Baja	Tixán
32	750330.131	9763694.83	No hay deslizamientos	Baja	Tixán
33	755330.131	9733694.83	Deslizamiento activo	Alta	Achupallas
34	755330.131	9738694.83	Deslizamiento activo	Alta	Achupallas
35	755330.131	9743694.83	No hay deslizamientos	Baja	Achupallas
36	755330.131	9748694.83	No hay deslizamientos	Baja	Achupallas
37	755330.131	9753694.83	No hay deslizamientos	Baja	Achupallas
38	755330.131	9758694.83	No hay deslizamientos	Baja	Achupallas
39	760330.131	9733694.83	Deslizamiento interrumpido	Media	Achupallas
40	760330.131	9738694.83	No hay deslizamientos	Baja	Achupallas
41	760330.131	9743694.83	No hay deslizamientos	Baja	Achupallas
42	760330.131	9748694.83	No hay deslizamientos	Baja	Achupallas
43	760330.131	9753694.83	No hay deslizamientos	Baja	Achupallas
44	760330.131	9723694.83	No hay deslizamientos	Baja	Achupallas
45	760330.131	9728694.83	No hay deslizamientos	Baja	Achupallas
46	760330.131	9733694.83	Deslizamiento interrumpido	Media	Achupallas
47	760330.131	9738694.83	No hay deslizamientos	Baja	Achupallas
48	760330.131	9743594.83	No hay deslizamientos	Baja	Achupallas
49	760330.131	9748694.83	No hay deslizamientos	Baja	Achupallas
50	765330.131	9753694.83	No hay deslizamientos	Baja	Achupallas
51	770330.131	9718694.83	No hay deslizamientos	Baja	Achupallas
52	770330.131	9723694.83	No hay deslizamientos	Baja	Achupallas
53	770330.131	9728694.83	No hay deslizamientos	Baja	Achupallas
54	770330.131	9733694.83	No hay deslizamientos	Baja	Achupallas
55	770330.131	9738694.83	No hay deslizamientos	Baja	Achupallas
56	770330.131	9748694.83	No hay deslizamientos	Baja	Achupallas
57	770330.131	9753694.83	No hay deslizamientos	Baja	Achupallas
58	775330.131	9718694.83	No hay deslizamientos	Baja	Achupallas
59	775330.131	9723694.83	No hay deslizamientos	Baja	Achupallas
60	775330.131	9728694.83	No hay deslizamientos	Baja	Achupallas
61	775330.131	9733694.83	Deslizamiento interrumpido	Media	Achupallas
62	775330.131	9738694.83	Deslizamiento interrumpido	Media	Achupallas

En la “**Tabla 7**” se observa que las parroquias de Guasuntos, Sibambe y Huigra fueron zonas de susceptibilidad alta. Además, las parroquias de Achupallas y Sibambe Sur fueron zonas de susceptibilidad media y las parroquias de Tixán, Sevilla, Pistishi, y Pumallacta fueron zonas de susceptibilidad baja a deslizamientos.

6.6 Análisis de la validación de resultados

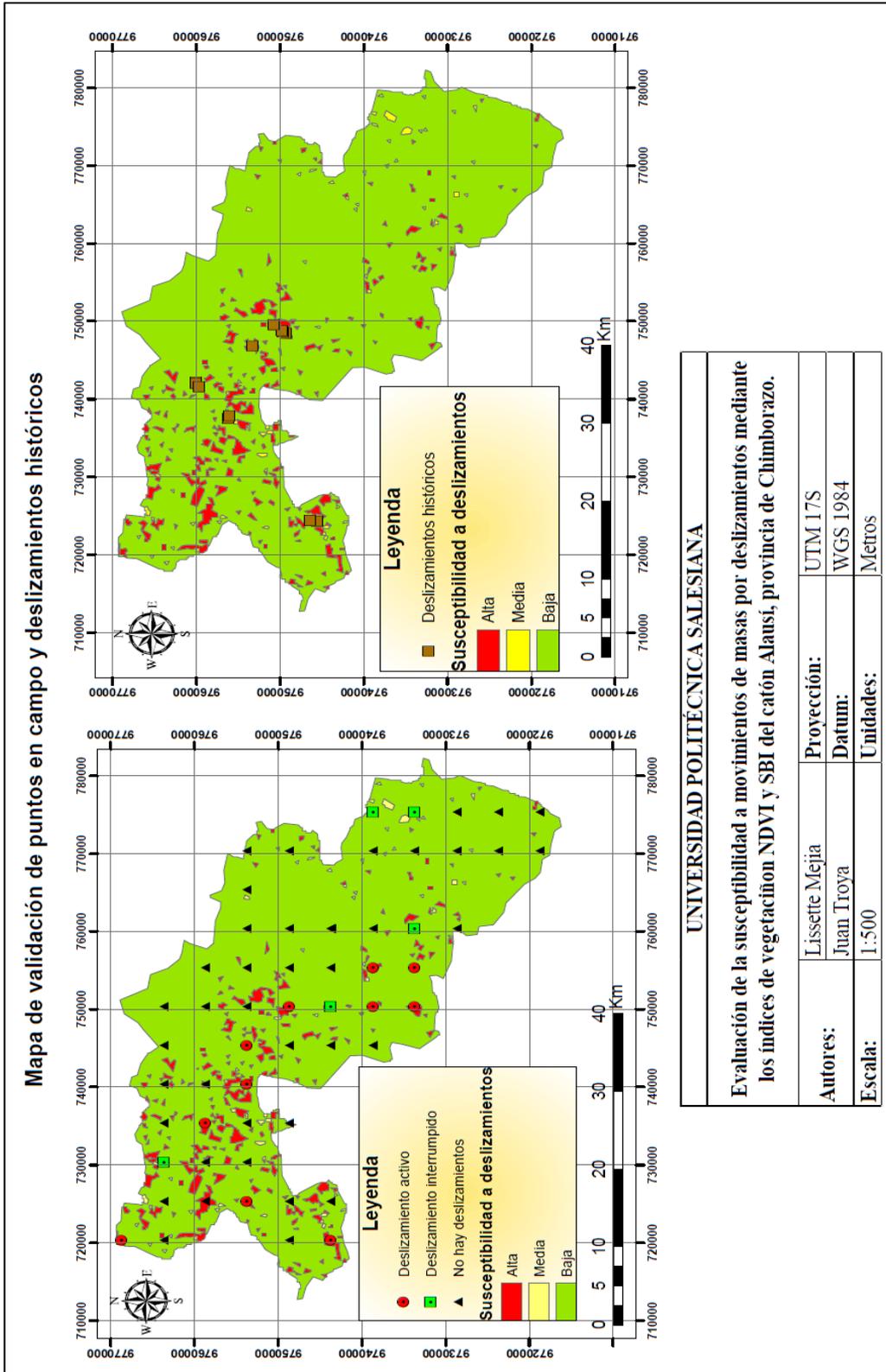
La validación de resultados permitió darle utilidad, confianza y fiabilidad a la metodología empleada a través de la aplicación del muestreo estratificado, verificación de los deslizamientos históricos del cantón y a través del análisis estadístico de Kappa. Del mismo modo, el muestreo estratificado generó 62 puntos a muestrear mediante el lenguaje de programación “*Model Builder*”, combinando los datos de acuerdo con sus estratos poblacionales.

El muestreo estratificado resultó ser un método confiable, debido a que las muestras estuvieron presentes en diferentes estratos poblacionales y estructurales. En donde, las mismas aseguraron que los componentes de cada estrato se relacionen en diferentes subgrupos, coincidiendo con las áreas geográficas del territorio.

Por ende, la verificación en campo resultó ser la vía más adecuada, porque permitió conocer la realidad del territorio con respecto a los deslizamientos. Además, los deslizamientos activos fueron de susceptibilidad alta, los deslizamientos interrumpidos de susceptibilidad media y las zonas donde no hay deslizamientos de susceptibilidad baja. A continuación, se muestra el mapa temático de validación en campo.

Ilustración 45

Mapa de validación en campo y deslizamientos históricos



Según la “*ilustración 45*” se observa que los puntos tomados en campo y los deslizamientos históricos coincidieron con las áreas de mayor y menor riesgo a deslizarse. Seguidamente, se comprobó la fiabilidad del método empleado, aceptándose el mismo como el mapa de susceptibilidad a movimientos de masas por deslizamientos, siendo este un resultado seguro y confiable.

Finalmente, se logró evidenciar que los resultados obtenidos, pueden ser usados como recursos para la elaboración de planes de emergencia y contingencia, que ayuden a generar medidas preventivas y correctivas frente a estos eventos. Asimismo, este estudio puede ser usado como un medio de apoyo para futuras investigaciones.

6.7 Análisis estadístico del índice de Kappa

La matriz de confusión es un medio que permite identificar el error de los procesos geoespaciales a partir del índice de kappa, el mismo que permite evaluar el rendimiento de un algoritmo de clasificación, relacionando la concordancia que tienen los resultados (*Ver tabla 8*).

Tabla 22

Matriz de confusión y coeficiente de Kappa

Matriz de confusión y coeficiente de Kappa					
Clases	SA	SM	SB	Suma de líneas	%
Susceptibilidad alta	9	1	0	10	90
Susceptibilidad media	0	10	0	10	100
Susceptibilidad baja	0	0	28	28	100
Suma de columnas	9	11	28	48	97
Suma de diagonales				95	
Numero de muestras				62	
Suma de productos entre columnas y líneas			2304		
Coeficiente de Kappa			0,96		

En la “*Tabla 22*” se puede observar que la matriz de confusión identificó una precisión de resultados del 97%, con un coeficiente de kappa de 0,96 lo que representa que los valores están dentro de los rangos aceptables, ya que los valores son mayores al 90%, considerándose admisibles dentro del estudio.

7 DISCUSIÓN

(Salcedo et al., 2017) especifica que el 17% de todas las fatalidades que ocurren en el mundo son debido a los movimientos de masas por deslizamientos. Es así que, los impactos ambientales a causa de los deslizamientos se podrían evitar mediante la identificación de los movimientos de masas. De igual forma, estos representan medios importantes para la elaboración de medidas preventivas y correctivas.

(GAD Municipal Alausi, 2015) reporta un estudio publicado por el ministerio de recursos naturales no renovables sobre deslizamientos del cantón Alausí. En donde, determinaron que las litologías más susceptibles corresponden a las rocas metamórficas que están ubicadas en las parroquias Guasuntos y Punin, las mismas que se han deformado, fracturado y meteorizado debido a los grandes deslizamientos que se han producido.

(Beltrán Rincón, 2019) realizó un estudio sobre la aplicación de técnicas geomáticas, el cual tuvo la finalidad de identificar los movimientos de masas. En donde, expresa que la geomática es la mejor opción para trabajar grandes territorios con difícil acceso. De igual forma, comenta que relacionar los índices espectrales con las pendientes ayudan a una buena identificación de estos fenómenos, siempre y cuando se realice un procedimiento eficaz en el manejo y obtención de resultados.

Según (Ortiz Agudelo, 2019), comenta que el NDVI es adecuado para identificar aquellos deslizamientos activos. Así como, el procesamiento de imágenes satelitales consecutivas porque permiten monitorear la vegetación, recursos hídricos, suelos desnudos, bosques nativos, expansión agrícola, zonas urbanas, penetración atmosférica, etc.

Nosotros en este trabajo encontramos similitud con el estudio expuesto por (GAD Municipal Alausi, 2015) en donde identificó que las parroquias de Guasuntos y Punin fueron de susceptibilidad alta, las parroquias de Sibambe y Achupallas fueron de susceptibilidad media, y las parroquias de Huigra, Multitud y Tixán fueron de susceptibilidad baja. Asimismo, existió una semejanza con el estudio expuesto por (Ortiz Agudelo, 2019), en donde reportó que los procesos de movimientos de masas por deslizamientos se dan en mayor cantidad cuando existen pendientes inclinadas ($>15^\circ$).

8 CONCLUSIONES

- ❖ Las técnicas geomáticas son importantes porque permiten identificar los deslizamientos que tienen los territorios, empleando modelos digitales de elevación, pendientes, orientaciones e índices espectrales de vegetación (NDVI y SBI). Por otro lado, los parámetros descritos anteriormente permiten identificar las zonas donde se producen los mayores deslizamientos.
- ❖ Las imágenes satelitales Sentinel 2 se miden a 10, 20 y 60 m de distancia superficial, permitiendo determinar el NDVI y SBI. Además, es importante que las imágenes satelitales tengan bajo contenido de nubosidad, para evitar errores futuros en el procesamiento de datos.
- ❖ Los cálculos de las combinaciones y las diferencias de temporalidades se dan a partir de imágenes satelitales consecutivas, permitiendo evidenciar los diferentes cambios que ocurren en el territorio.
- ❖ En el cantón Alausí las parroquias de Guasuntos, Sibambe y Huigra presentan susceptibilidad alta a deslizamientos con un área total de 9183.380533 Ha, los mismos que están caracterizados por tener pendientes mayores a 15°, afectando directamente a los cuerpos de agua, edificaciones y a las principales actividades de producción. Mientras que, las zonas de susceptibilidad media están constituidas por las parroquias de Achupallas, Sibambe Sur y Chillanes con un área total de 1185.162153 Ha, debido a que sus pendientes son de 1 a 14°. Finalmente, las parroquias de Tixán, Sevilla, Pistishi, Pumallacta, tienen susceptibilidad baja debido a que están caracterizadas por tener pendientes de 0° con un área total de 152776.113762 Ha.

9 RECOMENDACIONES

- ✚ Se recomienda utilizar información espacial con un porcentaje de nubes menor para que al momento de realizar los cálculos de los índices espectrales no presenten ningún tipo de error en el resultado final.
- ✚ Realizar más estudios e inventarios de movimientos de masas, debido a que no hay muchos estudios sobre este tema, sirviendo como base para diferentes proyectos de concientización y mejora en el cantón.
- ✚ En definitiva, se recomienda procesar de manera eficiente la información obtenida con el fin de garantizar que los resultados obtenidos sean los correctos.
- ✚ Brindar información cartográfica acerca de los lugares más susceptibles a deslizamientos a través del portal web del GAD municipal.
- ✚ Promover socializaciones a todas las comunidades del cantón sobre cómo identificar las áreas con amenazas a deslizamientos.
- ✚ Identificar si hay grietas en las rocas, suelos o viviendas o ha ocurrido algún desplazamiento del lugar original.
- ✚ Verificar si las viviendas están ubicadas en zonas seguras o propensas a movimientos de masas.
- ✚ Establecer sistemas de alertas y alarmas ante deslizamientos, comunicando a las autoridades pertinentes.
- ✚ Efectuar simulacros de evacuación y fijar puntos de encuentros seguros para toda la población.
- ✚ Reforestar aquellas zonas que presentan laderas inestables con especies nativas, lo cual ayudarían a estabilizar el terreno y reducir la probabilidad a deslizarse en zonas específicas.

10 REFERENCIAS

- Abril, A. L. (2011). *Estudio e implementación de un modelo para la zonificación de áreas susceptibles a deslizamiento mediante el uso de sistemas de información geográfica: caso de estudio sector Quimsacocha*. <http://dspace.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/739>
- Aizpiri, F. J., Guerrero, D., & Ormaetxea, V. (2014). *Riesgo de deslizamiento del terreno*. 1–42. <http://www.icog.es/TyT/index.php/2015/02/guia-riesgo-deslizamiento-del-terreno/>
- Alarcón-Ruiz, E., & Ordoñez-Pacheco, L. D. (2019). Tendencias de los Sistemas de Información Geográfica. Alcances y limitaciones. *Revista de Tecnologías Computacionales*, 3(12), 8–13. <https://doi.org/10.35429/joct.2019.12.3.8.13>
- Alberti, J., Canales, R., & Elizabeth, B. (2006). *Técnicas de mitigación para el control de deslizamientos en taludes y su aplicación a un caso específico*. 489. [http://ri.ues.edu.sv/id/eprint/4514/1/Técnicas de mitigación para el control de deslizamientos en taludes y su aplicación a un caso específico.pdf](http://ri.ues.edu.sv/id/eprint/4514/1/Técnicas%20de%20mitigaci3n%20para%20el%20control%20de%20deslizamientos%20en%20taludes%20y%20su%20aplicaci3n%20a%20un%20caso%20espec3fico.pdf)
- Alcaldía de Medellín. (2016). *Movimientos En Masa*. *Alcaldía de Medellín*, 1, 25.
- Alcántara Ayala, I. (2000). Landslides: ¿deslizamientos o movimientos del terreno? Definición, clasificaciones y terminología. *Investigaciones Geográficas*, 1(41). <https://doi.org/10.14350/rig.59101>
- Alcátara, I., Echavarría, A., Guitiérrez, C., Morales, D., & Noriega, I. (2020). Inestabilidad de laderas. In *Journal of Chemical Information and Modeling* (Vol. 2, Issue 9).
- Alvarado Brito, N. C., & Mainato Mayancela, F. X. (2021). *Herramientas SIG para el estudio de la cobertura vegetal y cambio de uso de suelo en el cantón Chunchi, provincia del Chimborazo*. 96. <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/20104/1/UPS-CT009032.pdf>
- Anyelo, R. (2011). *Protección y estabilización de taludes para evitar deslizamientos*. 122.
- BBC NEWS. (2011). *La Paz sufre sus peores deslizamientos de tierra*. https://www.bbc.com/mundo/noticias/2011/02/110227_galeria_deslizamientos_tierra_bolivia_lr

- BBC NEWS. (2021). *Canal de Suez: las impresionantes imágenes satelitales del impacto del bloqueo causado por el Ever Given*. <https://www.bbc.com/mundo/noticias-56545960>
- Beltrán Rincón, L. C. (2019). *Elaboración de un inventario de movimientos en masa mediante técnicas geomáticas en el municipio de Villeta Cundinamarca*.
- Benayas, R. (2015). *Mapa de orientaciones con ArcGIS*. Madrid, España.
<http://www.geasig.com/mapa-de-orientaciones-con-arcgis>
- Bonachea Pico, J. (2006). Desarrollo, aplicación y validación de procedimientos y modelos para la evaluación de amenazas, vulnerabilidad y riesgo debidos a procesos geomorfológicos. In *Tesis Doctorales en Red (TDR)*.
- Burgos Alemán, C. S. (2015). *Aplicaciones Geotécnicas para la Determinación del Peligro por Deslizamiento*.
- Bustamante, D. (2018). Perspectiva para zonificación del riesgo por deslizamientos para el cantón Riobamba Perspective for zoning the risk by slides for the Riobamba canton. *Revista FIGEMPA: Investigación y Desarrollo*.
- Cadena Alvarado, M. V., & Pérez Carrillo, A. C. (2009). Diseño y desarrollo de cartillas informativas culturales y turísticas enfocadas en la cultura Puruhá. *Aspectos Generales De La Planificación Tributaria En Venezuela, 2009(75)*, 31–47.
- Carrión Aguilar, C. H. (2019). Análisis y diseño de la estabilidad de talud en el sector Sausacocha – Pallar km. 8+000 al 9+000 provincia de Sánchez Carrión, departamento de La Libertad, 2017. *Universidad Católica Santo Toribio De Mogrovejo Facultad De Ingeniería Escuela De Ingeniería Civil Ambiental*.
- Carvalho, A. (2005). Formato raster: Algebra de mapas. *Universidad de Murcia, 2005(4)*, 101–118. <http://www.um.es/geograf/sigmur/teledet/tema09.pdf>
- Cede, R., Cabrera, E., Vargas, D. M., Galindo, G., García, M. C., Ordoñez, M. F., & Alonso, F. (2011). Capítulo 10: Fundamentos de la teledetección. *Introducción a La Percepción Remota y Sus Aplicaciones Geológicas, 4*, 181–218.
http://www.um.es/geograf/sigmur/%0Ahttp://www.ideam.gov.co/documents/13257/13817/Protocolo_para_la_cuantificación_Deforestación_Nivel_Nacional.pdf

- Cerda, J., & Villarroel, L. (2008). Evaluación de la concordancia inter-observador en investigación pediátrica: Coeficiente de Kappa. *Revista Chilena de Pediatría*, 79(1), 54–58. <https://doi.org/10.4067/s0370-41062008000100008>
- Cervantes Gómez, E. R. (2014). *Clasificación de imágenes satelitales mediante el uso de memorias asociativas*. 99.
- Chacón Montero, J. (2003). Riesgos de origen geológico y geomorfológico: deslizamientos de tierras, identificación, análisis y prevención de sus consecuencias. *Areas. Revista Internacional de Ciencias Sociales*, 0(23), 33–64.
- Constitución del Ecuador. (2008). Constitución de la república del Ecuador 2008. *Registro Oficial 449*, 1–136. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Contreras, F. I., & Odriozola, M. P. (2016). *Aplicación de modelos de elevación digital para la delimitación de áreas de riesgo por inundaciones*. San Luis del Palmar, Corrientes, Rca. Argentina.
- COOTAD. (2010). Código Orgánico Organización Territorial Autonomía Descentralización COOTAD. *Registro Oficial Suplemento 303 de 19-Oct-2010*, 2, 174. http://www.oas.org/juridico/pdfs/mesicic4_ecu_org.pdf
- COPERNICUS. (2018). El programa Copernicus aplicado a la producción y gestión de la información geoespacial. *Copernicus*, 2, 2003.
- CREPAD - BOYACÁ. (2012). *Guía para la prevención y atención de deslizamientos*. 6.
- Delegido, J., Tenjo, C., Ruiz-Verdú, A., Pereira-Sandoval, M., Pasqualott, N., Gibaja, G., Verrelst, J., Peña, R., Urrego, E. P., Borrás, J., Sanchis-Muñoz, J., Pezzola, A., Mosquera, Z., Quinto, Z., Gómez, J. ., & Moreno, J. (2016). Aplicaciones de Sentinel-2 a Estudios de vegetación y calidad de aguas continentales. *XVII Simposio Internacional En Percepción Remota y Sistemas de Información Geográfica (SELPER)*, November, 16. https://www.researchgate.net/publication/311572244_Aplicaciones_de_Sentinel-2_a_estudios_de_vegetacion_y_calidad_de_aguas_continentales
- Delúquez Moreno, C. (2018). *Valoración Económica del servicio ambiental de provisión de agua del páramo andino ubicado en la zona contigua al Bosque Protector Cubilan*,

Provincia del Cañar. 66.

- Demoraes, F., Ercole, R. D., Demoraes, F., Ercole, R. D., & De, C. (2016). *Cartografía de las amenazas de origen natural por cantón en Ecuador* To cite this version : HAL Id : hal-01292338 Informe preliminar.
- ESA. (2015). *ESA's Optical High-Resolution Mission for GMES Operational Services.*
- ESRI. (2016). *¿Qué es ModelBuilder?* Plataforma ArcGIS.
<https://desktop.arcgis.com/es/arcmap/10.3/analyze/modelbuilder/what-is-modelbuilder.htm>
- Fernández García, E. (2012). *Ejemplos De Aplicación De Model Builder De Arc Gis 10 En La Gestión Forestal.*
- Frau, C. M., Pino, L. M., Rojas, Y. O., & Hernández, Y. M. (2011). Digital elevation model generalization constrained by critical points of the terrain. *Boletim de Ciencias Geodesicas*, 17(3), 439–457. <https://doi.org/10.1590/s1982-21702011000300007>
- GAD Municipal Alausi. (2015). “*Actualización Del Plan De Desarrollo Y Ordenamiento Territorial Del Canton Alausi.*” 2014(June), 1–2.
https://repositories.lib.utexas.edu/handle/2152/39127%0Ahttps://cris.brighton.ac.uk/ws/portalfiles/portal/4755978/Julius+Ojebode%27s+Thesis.pdf%0Ausir.salford.ac.uk/29369/1/Angela_Darvill_thesis_esubmission.pdf%0Ahttps://dspace.lboro.ac.uk/dspace-jspui/ha
- García Lopez, J. C. (2005). *Análisis de la vulnerabilidad por movimientos de ladera: Desarrollo de las metodologías para evaluación y cartografía de la vulnerabilidad.* 1–220.
- González Cubides, A. R., & Otálora Cardenas, P. C. (2017). *Uso de sensores remotos y tecnología de vehículos aéreos no tripulados (UAV) para apoyar la identificación de la salinización del suelo en San Miguel de Sema, Boyacá, Colombia.* 14–102.
- IAVH. (2006). Los Sistemas de Información Geográfica. *Geoenseñanza*, 11(1), 107–116.
- Lázaro y Torres, M. L., & González González, M. J. (2005). La utilidad de los sistemas de información geográfica para la enseñanza de la geografía. *Didáctica Geográfica*, 105–122.
- López Cordonez, M. C. (2011). *Estudio técnico de deslizamientos en el sector “El Salado” que permita controlar la afectación al balneario Y viviendas cercanas al río Vazcún del cantón*

Baños de la provincia de Tungurahua.

Mesa Ramos, M. G. (2012). *Estudio de factores de susceptibilidad (topográfico, geológico, hidrológico, geomorfológico, desarrollo social y económico) de la quebrada situada al flanco este del cerro Susanga, ante la posible reactivación del microdeslizamiento, durante el periodo de .* 1–116.

Moncada Rojas, O., Botero Fernández, V., & Ochoa Jaramillo, A. (2014). *Detección de movimientos en masa a escala regional empleando imágenes del sensor MODIS.*

Montero Olarte, J. (2017). Clasificación de movimiento en masa y su distribución en terrenos geológicos de Colombia. In *Clasificación de movimiento en masa y su distribución en terrenos geológicos de Colombia*. <https://doi.org/10.32685/9789585978218>

Mostajo Carbonel, J. (2013). Estudio de probabilidad de falla e implementación de alternativas de solución al deslizamiento de taludes andinos. *Universidad Ricardo Palma*, 1–188.

Ochoa-Tejeda, V., & Parrot, J. F. (2007). Extracción automática de trazas de deslizamientos utilizando un modelo digital de terreno e imágenes de satélite de alta resolución IKONOS. Ejemplo en la Sierra Norte de Puebla, México. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 24(3), 354–367.

Oficio No. SAN-2016-1196. (2016). Ley Orgánica de Ordenamiento Territorial, Uso y Gestión de Suelo. *Suplemento Del Registro Oficial 790, 5-VII-2016, LOOTUGS*, 31.
<https://www.habitatyvivienda.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2016/08/Ley-Organica-de-Ordenamiento-Territorial-Uso-y-Gestion-de-Suelo1.pdf>
<http://www.habitatyvivienda.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2016/08/Ley-Organica-de-Ordenamiento-Territorial>

Oficio No. T.5458-SNJ-10-1558. (2010). CODIGO ORGANICO DE PLANIFICACION Y FINANZAS PUBLICAS. *Abstracts of Papers of the American Chemical Society*, 1–64.
https://www.oas.org/juridico/pdfs/mesicic4_ecu_plani.pdf

Ortíz Agudelo, J. L. (2019). Aplicabilidad del NDVI para la elaboración de un inventario de deslizamientos en el municipio de Albán, Cundinamarca. *XVII Congr. Colomb. Geol.*

Osorio Marín, L. F. (2019). *Zonificación de la Susceptibilidad del Terreno a los Deslizamientos.*

Caso de Estudio: Nariño - Colombia.

<https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/69829/1030564924.2019.pdf?isAllowed=y&sequence=1>

Paccini Sánchez, J. C. (2018). *Análisis de alternativas técnico - económicas para estabilizar el talud ubicado en el km 3+310 al km 3+490 de la vía Chontayoc – Tinyash, distrito de independencia –Huaraz –Ancash.*

Palacio, A. (2017). *Análisis de percepción en la gestión de espacios naturales y el uso de sistemas de información geográfica de participación pública.* www.tesisred.net

Pałas, K. W., & Zawadzki, J. (2020). Sentinel-2 imagery processing for tree logging observations on the bialowieza forest world heritage site. *Forests, 11*(8).

<https://doi.org/10.3390/F11080857>

Peguero, C. (2016). Sensores remotos y aplicaciones en teledetección. Geodesia y gestión de recursos naturales y patrimonio natural. *Sensores Remotos y Aplicaciones En Teledetección, 21*(ONU-GE@), 306.

Pérez Fajardo, J. S. (2018). *Confiabilidad de taludes de suelo no saturado expuestos a precipitaciones pluviales (Tesis doctoral).* 177.

http://ri.uaemex.mx/bitstream/handle/20.500.11799/95134/TES_DOC_20

[JULIO.pdf?sequence=1&isAllowed=y](http://ri.uaemex.mx/bitstream/handle/20.500.11799/95134/TES_DOC_20)

Prado González, A. A., Aguilar Guevara, J. R., & Cruz Talavera, R. J. (2020). Análisis de estabilidad de talud de la carretera nic. 7 en el km 176, municipio de Santo Tomas, del departamento de Chontales. *Journal of Chemical Information and Modeling, 102.*

Rodríguez, J. L., & Olivella, R. (2010). Introducción a los sistemas de información geográfica : conceptos y operaciones fundamentales. *Univerisidad Oberta De Catalunya, 5–82.*

http://openaccess.uoc.edu/webapps/o2/bitstream/10609/53645/1/Introducci3n+a+los+sistemas+de+informaci3n+geogr3fica.pdf%0Ahttp://ccuc.cbuc.cat/record=b5170112~S23*spi

Salcedo, D., Padilla, O., Morales, B., & Toulkeridis, T. (2017). Evaluaci3n De Susceptibilidad a Deslizamientos Mediante L3gica Fuzzy Y T3cnicas De Evaluaci3n Multicriterio En La Avenida Sim3n Bol3var , Quito Landslide Susceptibility Mapping Using Fuzzy Logic and

- Multi-. *Revista Geoespacial*, 1–20.
- Salcedo Rodríguez, D. (2014). Caracterización y acondicionamiento del terreno. *Angewandte Chemie International Edition*, 6(11), 951–952., 67.
- Samaniego, R. (2018). *Caracterización de la tipología y cinemática del deslizamiento de la urbanización Triguales Altos , Cuenca , a partir de fotografías aéreas , estación total , escáner láser terrestre y ensayos geotécnicos del suelo*. 195.
- Sánchez Jara, P. (2012). *La teledetección enfocada a la obtención de mapas digitales*. 60.
- SM GEODIM. (2016). Satélite Sentinel-2. *Sm Geodim.*, 2–3. [http://www.geodim.es/pdf/Geodim SENTINEL-2A.pdf](http://www.geodim.es/pdf/Geodim_SENTINEL-2A.pdf).
- Suárez Díaz, J. (1998). Deslizamientos y estabilidad de taludes en zonas tropicales. *Deslizamientos y Estabilidad de Taludes En Zonas Tropicales*, 429–472.
- Torres, E., Linares, G., Tenorio, M. G., Peña, R., Castelán, R., & Rodríguez, A. (2014). Índices de vegetación y Uso de Suelo en la Región Terrestre Prioritaria 105: Cuetzalan, México. *Revista Iberoamericana de Ciencias*, 12.
<https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=2&cad=rja&uact=8&ved=0ahUKEwib6s7FnuTYAhUOyGMKHTdHDAUQFgguMAE&url=http%3A%2F%2Fwww.reibci.org%2Fpublicados%2F2014%2Fagosto%2F3300108.pdf&usg=AOvVaw1qHbLTgmsrMGQZ9PJC24tB>
- Torres García, J. A. (2017). Estabilización de taludes para el mantenimiento de la carretera “Huancayo-El Tambo-San Agustín de Cajas–Hualhuas–Saño–Quilcas-San Jerónimo de Tunan-Ingenio, provincia de Huancayo–Junín-2016. *Universidad Peruana Los Andes*, 148.
- Vivanco Quizhpe, C. M. (2011). *Análisis comparativo de técnicas estadísticas y de aprendizaje para evaluar la susceptibilidad del terreno a los deslizamientos superficiales*. 214.

ANEXOS

FICHA DE INFORMACIÓN SOBRE LOS PUNTOS VALIDADOS EN CAMPO

PROYECTO: “EVALUACIÓN DE LA SUSCEPTIBILIDAD A MOVIMIENTOS DE MASAS POR DESLIZAMIENTOS MEDIANTE LOS ÍNDICES DE VEGETACIÓN NDVI Y SBI DEL CANTÓN ALAUSI, PROVINCIA DE CHIMBORAZO”

INSTITUCIÓN: UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA

TESISTAS: LISSETTE MEJIA, JUAN TROYA

DATOS GENERALES

MOVIMIENTO Nro.			
COORDENADAS			
FOTO Nro.			
FECHA:			
DIRECCIÓN:			
USO DEL TERRENO:	Arbustos y árboles ()	No vegetada ()	Pastos ()
	Cultivos ()	Residencial ()	Vía presente ()

EVIDENCIA FOTOGRÁFICA DE LOS PUNTOS VALIDADOS EN CAMPO

