



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE GUERRERO

FACULTAD DE INGENIERÍA



TRABAJO DE TESIS

**“APLICACIÓN DE HERRAMIENTAS GEOTECNOLÓGICAS
PARA LA EVALUACIÓN DE SUSCEPTIBILIDAD A PROCESOS
DE REMOCIÓN EN MASA EN LA ZONA CENTRO DEL ESTADO
DE GUERRERO”**

QUE PRESENTA

GEOL. WENDY ROMERO ROJAS

PARA OBTENER EL TÍTULO DE

**MAESTRÍA EN INGENIERÍA PARA LA INNOVACIÓN Y
DESARROLLO TECNOLÓGICO, OPCIÓN TERMINAL:
GEOMÁTICA**

DIRECTOR DE TRABAJO DE INVESTIGACIÓN

DR. RENÉ VÁZQUEZ JIMÉNEZ

CHILPANCINGO, GUERRERO, DICIEMBRE DE 2017

INTRODUCCIÓN

Los procesos de remoción en masa forman parte de los procesos naturales de evolución del relieve terrestre y constituyen uno de los procesos geológicos más recurrentes y, por lo tanto, una amenaza latente. La incidencia de estos procesos se ha vuelto más frecuente dentro del territorio nacional como consecuencia de eventos extraordinarios de los fenómenos meteorológicos (Hernández-Mena, 2008). Existen factores que actúan como condicionantes o detonantes en los fenómenos de remoción en masa, tal es el caso de la precipitación intensa, actividad sísmica, características del suelo, pendiente de la ladera, vegetación escasa, estructuras geológicas y deslizamientos previos (Ramos-Bernal et al., 2015).

Los procesos de remoción en masa están determinados por factores externos, lo cual hace que no se encuentren limitados a áreas específicas a diferencia de otros procesos geodinámicos. Según Hernández-Mena (2008), existen dos grupos de factores importantes que involucran a los procesos de remoción en masa, unos están determinados por la composición, estructura y forma del geosistema (condicionantes) y los otros que actúan de manera externa, y que provocan la inestabilidad al modificar los factores preexistentes (detonantes).

Las características antrópicas juegan un rol importante en los procesos de remoción en masa, tales como la construcción de carreteras, sobreexplotación de los mantos acuíferos, la deforestación incontrolada, el crecimiento demográfico, la actividad industrial y el uso del suelo descontrolado; estos son sólo algunos de los factores que contribuyen al desencadenamiento de dichos procesos (Ramos-Bernal *et al.*, 2015). Cabe señalar que en este trabajo no se abordan estos factores, debido a la insuficiencia de tiempo para la conclusión oportuna del mismo; por lo tanto, se propone como una línea de trabajo futuro.

Las herramientas integradoras para el análisis de los procesos de remoción en masa incluyen metodologías innovadoras como la Percepción Remota, cuya función contribuye en el uso y manipulación de datos geográficos para la generación de modelos que, en conjunto con análisis estadísticos, permitan evaluar y gestionar el efecto negativo de los fenómenos naturales en beneficio de la sociedad. Los sensores espaciales de Percepción Remota y la mejora de las técnicas de tratamiento digital de las imágenes hacen factible el estudio, detección y control de los procesos de remoción en masa. Cabe mencionar que no todos los tipos de sensores y método de tratamiento de las imágenes tienen las mismas funciones; se debe tomar en cuenta el objetivo del estudio para el análisis de los procesos de remoción en masa (Pacheco-Gil, 2013). Dentro de los estudios a realizarse se deben incluir herramientas de análisis geográfico, geológico, ecológico y de infraestructura, entre otros, que en conjunto con los Sistemas de Información Geográfica (SIG), como herramienta integradora de condicionantes de evaluación bajo distintos criterios, permitan proveer de información que sirva en la toma de decisiones para establecer planes de prevención o de atención ante riesgos naturales en una escala regional.

Las herramientas geotecnológicas en México comienzan a tener auge para el uso y manipulación de los datos espaciales.

La Geomática se encarga de conjuntar ciencias para integrar, difundir y almacenar información espacial. De manera simple, la geomática aporta los conocimientos necesarios para dominar los métodos de referencia espacial como base para proyectos de integración y sistemas (Kemp, 2007).

Las técnicas que se encargan de apoyar la perspectiva de los datos analizados están determinadas por el análisis espacial, el cual mide patrones de eventos hasta complejas pruebas estadísticas aplicadas a estudios de eventos ocurridos en el espacio, cuyos resultados dependen de la ubicación de los objetos o fenómenos, analizados a través de su integración en Sistemas de Información Geográfica (Ripley 1981, Goodchild et al., 1992).

La relación entre la Percepción Remota, los Sistemas de Información Geográfica y las herramientas de análisis y modelado espacial es muy estrecha entre sí, ya que interactúan y se complementan mutuamente a través de marcos teóricos de disciplinas específicas; desde la adquisición de la información por sensores remotos, su integración en Sistemas de Información Geográfica, su análisis y modelado, concluyendo con productos finales a través de mapas, informes, gráficos o datos estadísticos; todo ello bajo el marco global de la ciencia Geomática (Vázquez-Jiménez, 2017).

JUSTIFICACIÓN

El estado de Guerrero presenta condiciones geográficas y topográficas, y sobre todo geológicas que lo hacen vulnerable a estos fenómenos. En septiembre de 2013, un número importante de procesos de remoción en masa ocurrieron a lo largo de las costas de México debido a la presencia de la depresión tropical N. 13 en las costas de Guerrero, en el Océano Pacífico, posteriormente se desarrolló la tormenta tropical “Manuel” y de manera simultánea se desarrolló el huracán “Ingrid” (Bravo-Lujano, 2013). Estos fenómenos dieron como resultado grandes deslizamientos, como el registrado en la comunidad de La Pintada en el municipio de Atoyac de Álvarez, cuyos registros fueron de 70 personas desaparecidas, 379 damnificados y 20 construcciones dañadas (Ramos-Bernal et al., 2015) y diversos deslizamientos en varios municipios de la región Montaña del estado; algunos de los más importantes se registraron en los límites de los municipios de Leonardo Bravo y Chilpancingo de los Bravo, cerca de la comunidad de Jaleaca de Catalán; es por eso que los procesos de remoción en masa se han convertido en un factor importante a estudiar, por lo tanto, demanda caracterizar la amenaza y su entorno a fin de prevenirla o mitigar los efectos ocasionados. Ante estos factores, el presente estudio tiene como finalidad generar información oportuna para considerarse en la toma de decisiones en caso de existir población vulnerable a estos procesos, asimismo hacer referencia en las zonas de riesgo para la planificación y ordenamiento territorial de estudios posteriores.

ALCANCES

Generar un estudio espacio-temporal a partir de la aplicación de marcos teóricos, métodos, procesos y herramientas propios de la Geomática, que permitan caracterizar y determinar zonas de vulnerabilidad a procesos de remoción en masa en la región Centro del estado de Guerrero. En este trabajo se pretende estudiar los cambios externos debido a las condiciones pluviales extraordinarias, su acumulación y su relación con el relieve, litología, rasgos estructurales y edafología en la zona de estudio.

OBJETIVOS

Objetivo General

Construir un modelo espacial relativo al grado de susceptibilidad a procesos de remoción de masa, que eventualmente permita comprender el fenómeno en torno a los riesgos generados por estos procesos y a la vez permita eventualmente apoyar el desarrollo de planes de prevención y/o gestión territorial en la zona centro del estado de Guerrero

Objetivos Específicos.

- Evaluar la implementación de imágenes de satélite (Aster) en la generación de cartografía de deslizamientos previos y posteriores al evento Ingrid-Manuel.
- Determinar las características geológicas, estructurales, geomorfológicas y geotectónicas y su relación con las zonas propensas a procesos de remoción en masa.
- Explorar y definir las variables físico-naturales como lo son la geología, el relieve, la vegetación, la edafología, etc., que influyan en la generación de procesos de remoción en masa.
- Construir un modelo de susceptibilidad a partir de herramientas de evaluación multicriterio para determinar zonas susceptibles a procesos de remoción de masa, específicamente los deslizamientos de laderas.
- Construir un mapa que represente el grado de riesgo a procesos de remoción en masa con base al modelado de la aportación individual de las variables analizadas.

CAPITULO I. MARCO TEÓRICO E HIPÓTESIS

1.1 Antecedentes

A lo largo del tiempo los eventos catastróficos de tipo hidrometeorológico ocurridos en México se han presentado con mayor frecuencia, evidenciado la amenaza y vulnerabilidad de la población involucrada. El cambio climático, la deforestación y factores antropogénicos ligados al crecimiento poblacional y al uso del suelo en condiciones poco favorables para el desarrollo de una población han sido parteaguas en el incremento en la incidencia de estos fenómenos (González de Vallejo, 2002). Dentro de los eventos catastróficos más recurrentes en México se encuentran los procesos de remoción en masa, los cuales se convierten en riesgo latente cuando ponen en peligro a los asentamientos humanos.

En los últimos años, el estudio de los procesos de remoción en masa han permitido identificar y caracterizar los factores detonantes y condicionantes que ponen en manifiesto las amenazas y la vulnerabilidad de la población asentada en ciertas áreas con características similares, tales como las geológicas, geomorfológicas, climatológicas y antropogénicas. La identificación y caracterización oportuna de estos factores influyen sustancialmente en la mitigación a la exposición de estos fenómenos (Ramos-Bernal, et al., 2015).

El estado de Guerrero presenta condiciones geográficas y topográficas que lo hacen vulnerable a estos fenómenos; los factores antropogénicos como la tala descontrolada, la apertura de áreas para el cultivo y la construcción de viviendas sin un estudio previo de factibilidad que consideren las características del suelo, han hecho que la vulnerabilidad vaya en incremento. Zúñiga-Gutiérrez, et al., (2016), describen procesos de tipo deslizamiento en la comunidad El Balsamar, municipio de Leonardo Bravo, en el 2002; en Taxco de Alarcón en las colonias de Martelas, La Molina y La Cadena, en el 2010, estos fenómenos están íntimamente ligados al incremento de la precipitación relacionados a la vez con eventos hidrometeorológicos extraordinarios.

En el 2013 la ocurrencia de los procesos de remoción de masa afectaron con mayor intensidad a países como la India, China, Japón, Estados Unidos, Brasil, Chile, Perú y México (Sistema Estatal de Protección Civil, Veracruz, 2013). En este año un número importante de procesos de remoción de masa, específicamente de deslizamientos, ocurrieron a lo largo de las costas de México debido al paso de la depresión tropical N. 13 del Océano Pacífico en las costas de Guerrero, la cual dio inicio a 170 km al suroeste de Tecpan de Galeana, Guerrero, y posteriormente se desarrolló la tormenta tropical “Manuel”, la cual propició la entrada de humedad hacia el sur y occidente del país y posteriormente incrementó su intensidad a huracán. Simultáneamente a “Manuel” se desarrolló el huracán “Ingrid”, afectando a 29 estados

del país (Bravo-Lujano, 2013). Estos fenómenos dieron como resultado grandes deslizamientos como el que se presentó en la comunidad de La Pintada en el municipio de Atoyac de Álvarez, cuyos registros son de 70 personas desaparecidas, 379 damnificados y 20 construcciones dañadas (Ramos-Bernal, et al., 2015), y diversos deslizamientos en la regiones de montaña y otros municipios del Estado, particularmente en el municipio de Leonardo Bravo, colindando con la comunidad de Jaleaca de Catalán en el municipio de Chilpancingo de los Bravo.

1.2 Procesos de remoción en masa

La superficie terrestre presenta procesos geodinámicos que involucran movimientos de terreno con diversas características, magnitud y velocidad. Dentro de los más recurrentes y de mayor extensión están los procesos de remoción en masa, que están sujetos a procesos gravitacionales y forman parte del relieve topográfico de las zonas donde se producen.

Los procesos de remoción en masa se definen como el movimiento de una masa de roca, suelo o derrubios de una ladera en sentido descendente y son producidos por condiciones geomorfológicas, hidrológicas y geológicas, las cuales pueden ser modificadas por procesos geodinámicos, vegetación, usos de suelo y factores antropogénicos (Navarro-Vidal, 2012).

Según Terzaghi (1960) existen dos tipos de causas principales que involucran a estos procesos:

- 1) Los causados por agentes externos que modifican el campo de esfuerzos
- 2) Causas que modifican e inhiben la resistencia de los materiales.

1.2.1 Clasificación de los procesos de remoción en masa

La clasificación de procesos de remoción de masa está determinada por sus características geomorfológicas, el tipo de material y movimiento. Este último describe la mecánica interna del desplazamiento, lo cual permite la identificación y descripción de los cuerpos.

A continuación se presenta la clasificación de los tipos de procesos de remoción en masa según Varnes (1978):

Deslizamientos: Son movimientos de masas de suelo o roca que se mueven respecto al sustrato. Este tipo de deslizamiento se produce sobre una o varias superficies de rotura definidas en conjunto; generalmente la velocidad a la que se mueven es variable, suelen ser procesos rápidos y de grandes volúmenes (fig. 1).

Los deslizamientos se dividen en (Navarro-Vidal, 2012):

- *Deslizamientos rotacionales*: La superficie donde comienza la rotura presenta forma cóncava y los materiales son de las mismas dimensiones o en macizos rocosos fracturados (fig. 1a).
- *Deslizamiento traslacional*: Presenta inclinaciones constantes y presenta materiales de distintos tamaños con superficies de discontinuidades bien definidas (fig. 1b).
- *Deslizamientos compuestos*: Presenta ambos tipos de geometría (traslacional y rotacional).

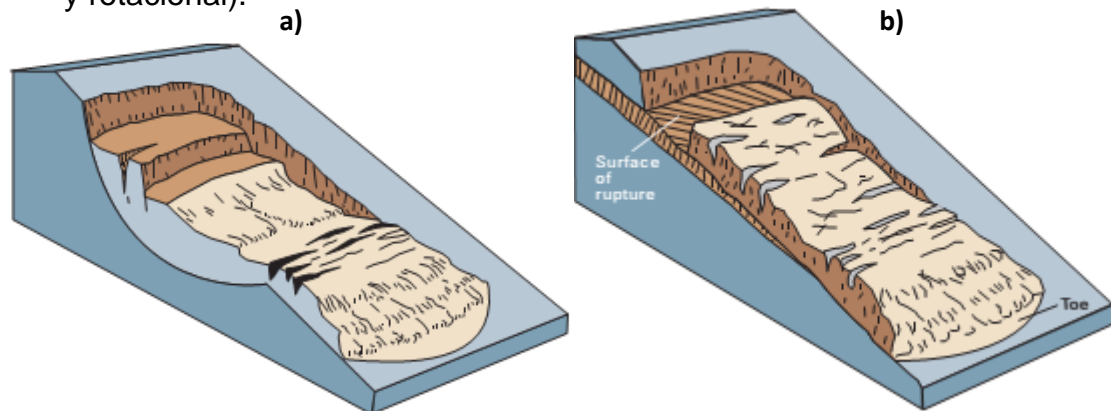


Figura 1. Esquema de un deslizamiento rotacional (a) y un deslizamiento traslacional (b). Tomado de USGS. (2008).

Desprendimientos: Se caracterizan por movimientos súbitos de masas de rocas de tamaños distintos y suelo en forma de bloques aislados o material masivo. Se producen por caída libre y están ligados a discontinuidades. La presencia de topografía con escarpes o pendientes pronunciadas son típicas de este proceso, además poseen acumulaciones de bloques de distintos tamaño al pie de la ladera (fig. 2a). Existe otro tipo de desprendimiento denominado *vuelcos*, estos involucran fragmentos rocosos o estratos, los cuales buzan en sentido contrario a la ladera por estar fracturados en bloques o por rotura de la zona del pie de la ladera (González de Vallejo, 2002) (fig. 2b).

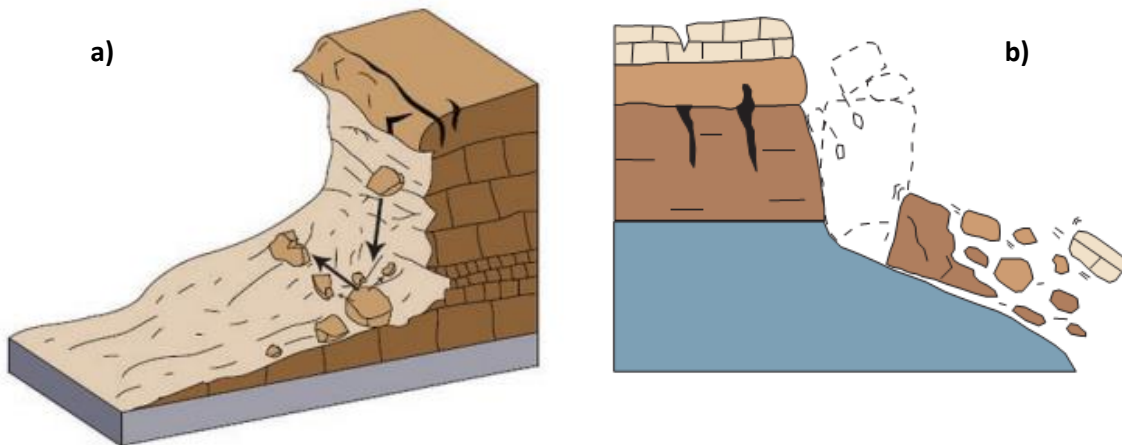


Figura 2. Esquema de un desprendimiento rocoso (a). Esquema de un vuelco (b). Tomado de USGS, (2008).

Flujos: Son movimientos que involucran el suelo, derrubios o bloques rocosos y están en función de la presencia de agua en cantidad abundante, la cual actúa como un agente disgregador convirtiendo el material en un flujo. El agua contribuye a la pérdida de resistencia del material, lo que los vuelve poco cohesivos (González de Vallejo, 2002).

Según el USGS (2008), los flujos se clasifican en

- *Flujos de escombros (Debris flows):* Es un movimiento rápido que involucra masa suelta, rocas y materia orgánica en interacción con agua en cantidades anómalas. Son muy peligrosos debido a que son muy rápidos y ocurren sin ninguna advertencia (fig. 3a).
- *Lahares:* Son flujos de lodos volcánicos, son originados en las pendientes de los volcanes: comienzan a moverse cuando existe una acumulación de *tefra* en el edificio volcánico.
- *Avalancha:* Movimientos extremadamente rápidos formados cuando la pendiente se vuelve inestable y colapsa transportando el material lejos de la pendiente; generalmente están asociados a nieve y hielo (fig. 3b).
- *Flujos de tierra:* Ocurren en pendientes suaves a moderadas en materiales de grano fino, comúnmente de arcilla o limos. Se mueven como un flujo plástico (fig. 3c).
- *Flujos de tierra lentos:* Son movimientos de tierra casi imperceptibles en la base del suelo o rocas que forman la pendiente. Estos flujos son causados por la tensión del cizallamiento interno (fig. 3d)

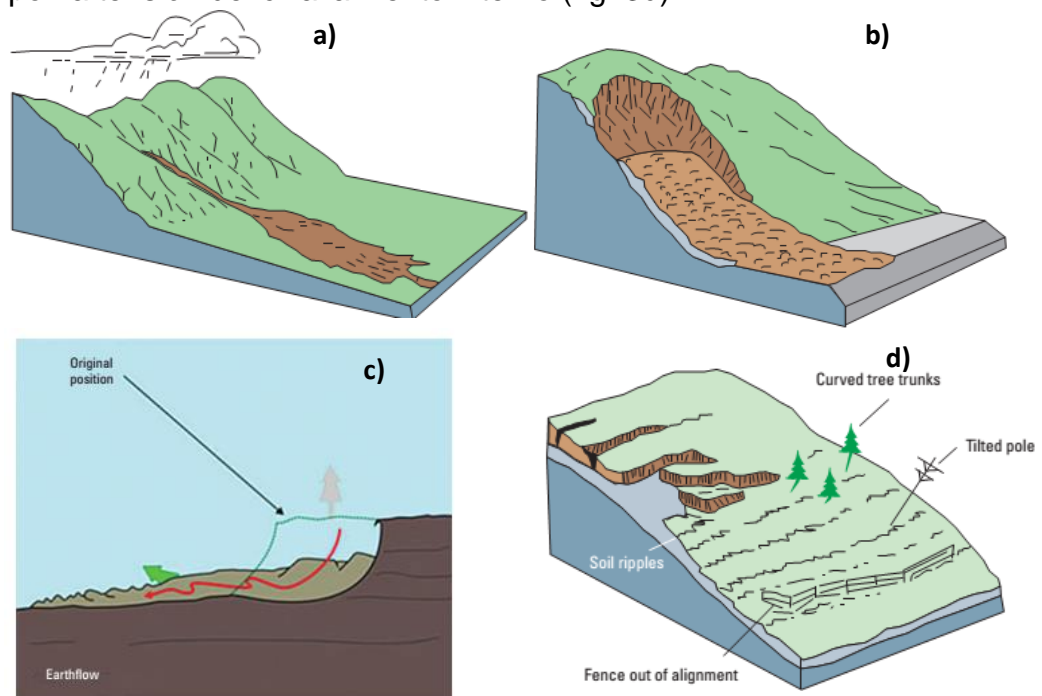


Figura 3. Esquema de un flujo de escombros (a), Avalancha (b), Flujos de tierra (c), Flujos de tierra lentos (d). Tomado de USGS, (2008).

Desplazamientos laterales: Movimiento de macizos rocosos o masas de suelo consolidado y cementado sobre material fácilmente deformable donde se desplazan en pendientes suaves. Esto ocurre debido a la pérdida de cohesión del material subyacente, lo que provoca la fluidez bajo el peso de los bloques más rígidos (fig. 4).

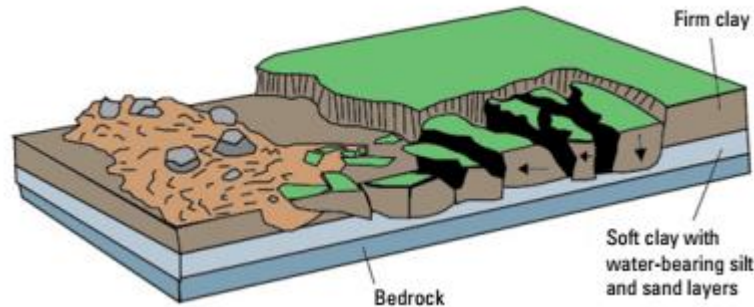


Figura 4. Esquema de un ejemplo de desplazamiento lateral. Tomado de USGS, (2008).

1.2.2 Factores condicionantes y desencadenantes de los procesos de remoción en masa.

Según Pacheco-Gil, (2013) el estudio de los procesos de remoción en masa enfoca principalmente las unidades litológicas, su posición en el sustrato rocoso y la posición en cada afloramiento en la zona de estudio, ya que esto define la calidad de la estabilidad de la ladera. Las características lito-estructurales deben caracterizarse debido a que estos influyen como planos de despegue de muchos de los movimientos en masa en conjunto con la configuración topográfica de la zona.

Los factores que controlan a los procesos de remoción de masa están ligados a los factores condicionantes (o pasivos) que dependen de la naturaleza, estructura y forma del terreno. Por otra parte los factores desencadenantes (o activos) que actúan como fuerzas externas al macizo rocoso que desencadenan la inestabilidad y son responsables de la magnitud y velocidad de los movimientos (tabla 1).

1.2.2.1 Factores condicionantes

Dentro de estos factores se incluyen aquellos que involucran las propiedades físicas de los materiales, tales como la litología, planos de estratificación, foliación, fracturas, fallas, geomorfología, relieve, meteorización o alteración de los materiales. Los condicionantes antrópicos están determinados por los cambios morfológicos en la geometría de las laderas por procesos de urbanización, deforestación, explotación de materiales, condiciones hidrológicas, y aplicación de cargas estáticas o dinámicas al talud (Sistema Estatal de Protección Civil, Veracruz, 2013).

1.2.2.2 Factores desencadenantes

Existen varios factores desencadenantes (tabla 1) de los cuales dos son de importancia fundamental que involucran los procesos de remoción de masa: las

precipitaciones y los sismos. Las precipitaciones con durabilidad de horas o días provocan la saturación de agua en el material constituyente del terreno, según el Sistema de Protección Civil de Veracruz (2013) “esto provoca presiones intersticiales que alteran el estado natural del terreno, así como el aumento de peso”, esto como consecuencia de las lluvias extraordinarias, cambios en el nivel freático y aguas superficiales. Por su parte, los sismos juegan un papel importante en estos procesos, generalmente los deslizamientos se dan en las partes cercanas al epicentro; este factor además propicia que el material del terreno se inestabilice durante el sismo y produzca nuevos deslizamientos.

Tabla 1. Factores condicionantes y desencadenantes de los procesos de remoción de masa. Tomado de González de Vallejo, (2002).

	Factores	Influencias y efectos
Condicionantes	Relieve (pendiente, geometría)	Distribución del peso del terreno
	Litología (composición, textura)	Densidad, resistencia. Comportamiento hidrogeológico
	Estructura geológica y estado tensional	Resistencia, deformabilidad. Comportamiento discontinuo y anisotrópico. Zona de debilidad.
	Propiedades geomecánicas de los materiales	Comportamiento hidrogeológico. Generación de presiones intersticiales.
	Deforestación	Modificaciones en el balance hídrico. Erosión
	Meteorización	Cambios físicos y químicos, erosión externa e interna, generación de zonas de debilidad.
Desencadenantes	Precipitaciones y aportes de agua. Cambio en las condiciones hidrológicas	Variación en las presiones intersticiales y del peso del terreno Cambio en la distribución del peso de los materiales y el estado tensional de la ladera. Incremento de presiones intersticiales.
	Aplicación de cargas estáticas o dinámicas	Variación de las fuerzas debido al peso. Cambio del estado tensional
	Cambios morfológicos y de geometría en las laderas	Cambios geométricos de la ladera. Cambios en la distribución del peso de los materiales y en el estado tensional de la ladera.
	Erosión o socavación del pie de la ladera	Cambio en el contenido de agua del terreno. Generación de grietas y planos de debilidad. Disminución de las propiedades resistentes.
	acciones dinámicas (procesos de deshielo, heladas, sequías)	

1.2.3 Factores externos para la generación de procesos de remoción en masa

Anteriormente se mencionó que este trabajo sólo se enfocará en el estudio de los factores externos como causante de los movimientos en masa. A continuación se hace referencia al comportamiento de cada uno de ellos.

1.2.3.1 Geología

Los procesos geológicos ayudan a la formación del relieve y definen la morfología de las laderas; estos se relacionan directamente con los factores condicionantes en la formación de movimientos en masa (González-Vallejo, 2002, Hernández-Mena, 2008). A continuación se presentan los aspectos geológicos que influyen en los procesos de remoción en masa:

Litología

Está determinado por las propiedades físicas y de resistencia de los componentes de las rocas y está dado por el tipo de roca madre, la mineralogía, el tamaño de sus partículas (los porcentajes de los finos: arcillas-limos) textura, estructura, grado de fracturamiento, alteración y de meteorización, deformabilidad, porosidad y permeabilidad. Estas características posibilitan la rotura del terreno y, por lo tanto, la formación de deslizamientos aunados a factores desencadenantes (Pacheco-Gil, 2013), Hernández-Mena, 2008, González-Vallejo, 2002).

A continuación se muestran grupos lito-estructurales que engloban las características litológicas, de susceptibilidad y resistencia según Suárez-Díaz (1998) con base a Nicholson y Hencher (1997).

- *Roca fuerte masiva*: Presente en granitos, gabros, doleritas, basaltos, riolitas, metacuarcitas, gneises, calizas y mármoles. Son resistentes a procesos de deterioro de masas de roca, aunque también son susceptibles a la meteorización. Puede ocurrir desintegración alrededor de discontinuidades mayores, conduciendo a caídos de bloques. Generalmente, los caídos de granos acurren en las rocas más débiles.
- *Roca fuerte discontinua*: Las rocas presentes son areniscas con uniones de sílice y conglomerados, ortocuarcita, piroclásticos, calizas, dolomitas, mármoles y rocas ígneas fisuradas. Son susceptibles a distintas formas de deterioro dependiendo del fracturamiento. Los caídos son predominantemente bloques de placas de rocas
- *Roca fuerte discontinua*: Las rocas presentes son areniscas con uniones de sílice y conglomerados, ortocuarcita, piroclásticos, calizas, dolomitas, mármoles y rocas ígneas fisuradas. Son susceptibles a distintas formas de deterioro dependiendo del fracturamiento. Los caídos son predominantemente bloques de placas de rocas.
- *Roca compuesta*: Presente en intercalaciones de estratos firmes y blandos, rocas con bandeamiento o con intrusiones ígneas. Contempla intercalaciones de estratos duros y blandos, rocas bandeadas o con intrusiones ígneas. Son susceptibles a

meteorización diferencial que conduce al colapso de los *overhangs* con caídos de bloques.

- *Roca debilitada tectónicamente*: Se encuentra en rocas falladas o bandeadas con fracturas y zonas de brechas. Presente en zonas trituradas o cortadas y altamente fracturadas, susceptibles a colapso, desmoronamiento, caídos de roca y bloques.
- *Roca débil granular*: Las rocas susceptibles son la arenisca friable, arcillolita, arenisca o conglomerado con matriz de yeso, arcillas margas y calizas débiles. Se caracterizan por ser susceptibles a la meteorización del material y debilitamiento seguido por formación de láminas, caída de granos, lavado de granos y ocasionalmente colapso y caída de bloques. La fragmentación es por resultado de la penetración de elementos extraños entre las fisuras.
- *Roca kárstica*: Se presenta generalmente en calizas y el comportamiento se asocia a la formación de cavidades de disolución y colapso. Se pueden desarrollar diversos tipos de formaciones kársticas.
- *Roca anisotrópica*: A este grupo pertenecen las lutitas, pizarras, filitas y esquistos en forma laminar. Estos tipos de rocas son susceptibles a la formación de láminas que pueden colapsar, al lavado superficial y a procesos de erosión.
- *Roca con apariencia de suelo*: Se presenta en areniscas, rocas altamente meteorizadas y suelo residual. Son susceptibles a la erosión, surcos y cárcavas debido al lavado superficial y caída de granos con flujos de detritos y colapso de manera secundaria.

Aguiló-Alonso et al. (2006) hace una relación sintética que involucra las características mecánicas de los principales grupos de rocas, ya que consideran que estos grupos litológicos son aptos para trabajos aplicados (tabla 2). En este trabajo se utilizará esta clasificación (erosión potencial) para generar el insumo de litología que ayudará en el modelo de susceptibilidad a través de las afectaciones por la escorrentía superficial asociada a procesos hidrológicos generales.

Tabla 2. Tipos de rocas y su comportamiento con base a su grado de cohesión, erosión potencial y comportamiento mecánico. Tomado de Aguiló-Alonso et al., (2006). Modificado.

Grupo de materiales/familias o tipo de roca		Coherencia	Erosión potencial	Comportamiento mecánico
Ígneas	Volcánicas (tipo coladas basálticas)	Alta	Media	Variable
	Plutónicas (tipo granioide)	Alta	Muy baja	Alta
	Filonianas (tipo cuarzo)	Alta	Muy baja	Alta
Metamórficas (según el grado)	Gneis	Alta	Muy baja	Alta
	Esquistos feldespáticos	Media	Media	Baja
	Esquistos micáceos	Baja	Media	Muy baja
	Cuarcita	Alta	Baja	Alta
	Mármoles/calizas cristalinas	Alta	Baja	Alta
	Metapizarras-filitas	Baja	Alta	Baja
	Metaarenita	Alta	Baja	Alta
Sedimentarias				
<i>Detríticas</i>	Areniscas/conglomerado silíceo	Media	Baja	Baja-media
	Arena/aglomerado silíceo	Baja-M.Baja	Baja	Muy baja
	Arcosa (mixto silíceo-arcilloso)	Media	Media	Baja-media
	Arcillas y similar (lutita/pizarra)	Muy baja	Muy alta	Baja
<i>Mixtas</i>	Margas	Baja	alta	Baja
<i>Químicas y organógenas</i>	Caliza/dolomía	Alta	Baja	Baja
	Yeso/sales	Baja-M.Baja	Baja	Baja
	Orgánicas	Baja	Baja	Baja

Lineamientos geológicos

Se definen como estructuras lineales que pueden ser cartografiadas de forma rectilínea o ligeramente curvilínea y que representan fenómenos superficiales; están representados por fallas, fracturas geológicas y discontinuidades en la roca subyacente. Estos rasgos pueden producir zonas de debilidad en la roca al alterarse su permeabilidad. Las probabilidades de que ocurran movimientos en masa incrementan al encontrarse en cercanía con este tipo de estructuras (Recondo et al., 2001). Este parámetro se utilizará en la generación de los criterios de susceptibilidad a través de las distancias a los lineamientos presentes en el área de estudio.

1.2.3.2 Relieve

El relieve juega un papel importante en la generación de movimientos en masa, está condicionado por la geología del área y esta a su vez se ha encargado de modificarlo. Los movimientos en masa pueden ocurrir en cualquier tipo de relieve si se cumplen las características condicionantes y detonantes. Los tipos de relieves más susceptibles son los taludes escarpados, áreas de concentración de drenaje y filtración y las áreas de concentración de fracturas (Grases, Contreras y Grases, 1997). Para saber la susceptibilidad a movimientos en masa del relieve, se requiere saber el grado de pendiente del terreno debido a su influencia en determinados tipos de inestabilidades.

Pendiente

Se define como uno de los factores dinámicos en los procesos de remoción en masa más importantes, ya que determina la cantidad de energía cinética y potencial de una masa estable; a mayor grado de inclinación mayor será la susceptibilidad. La pendiente auxilia a los procesos de erosión y transporte de agua y materiales, asimismo define el movimiento del agua en el paisaje (Pacheco-Gil, 2013). La inclinación de la pendiente indicará si un área es propensa a deslizarse, pero esto no lo convierte en una constante, generalmente la pendiente de unos pocos grados deriva pocos deslizamientos. La mayoría de los movimientos en masa se desarrollan entre los 28° y 45° y regularmente cuando las laderas son muy abruptas se pueden registrar varios deslizamientos, en su mayoría se relacionan con fuertes precipitaciones y otros factores detonantes y/o condicionantes (Gutiérrez-Elorza, 2008). Según Alcántara-Ayala (2000), la pendiente mínima para iniciar un deslizamiento es a partir de 5° de inclinación, por lo tanto se tomará como referencia para la generación de un insumo del modelo de susceptibilidad.

1.2.3.3 Edafología

Las características en las que se desarrolla un suelo pueden ayudar a inferir el comportamiento mecánico y su influencia en el proceso de desestabilización para la ocurrencia de los procesos de remoción en masa. Se clasifican según su origen en suelos residuales y transportados, el primero se forma *in situ* provenientes de una roca o material depositado, estabilizado y sin riesgo de ser desplazado mediante procesos geológicos; el segundo se forma a través de materiales que han sido transportados de su lugar de origen y se incorporan a nuevas condiciones de formación (Henández-Mena, 2008).

Según Pacheco-Gil (2013), la estabilidad y susceptibilidad de los suelos se estima con base a su estructura y dinámica del agua. El agua está controlada por las propiedades fisicoquímicas y biológicas; cuando existe un exceso de agua en el perfil actúa incrementando el peso de la masa y ayuda al flujo a desplazarse. Esto como consecuencia de la reducción del límite plástico y consecuentemente ayuda al proceso de fluidez. Al entrar en contacto con los poros, ésta ejerce presión intersticial ayudando al desplazamiento de los materiales. Cuando pasa por los suelos puede infiltrarse, escurrirse, ascender y almacenarse dependiendo de las características del suelo, específicamente de la capacidad de almacenamiento y retención de humedad.

La erosión juega un papel importante dentro de los procesos de remoción en masa y es causada por el agua de escorrentía aguas subterráneas, olas corrientes y viento, está determinada por la susceptibilidad del suelo a ser disgregado (Grases, Contreras y Grases, 1997). El estudio de la erodabilidad de los suelos está en función de cuatro componentes: textura, estructura, materia orgánica y permeabilidad. Dadas las condiciones regionales del área de estudio, sólo se utilizó la calidad textural de los suelos la cual es detallada a continuación:

Clasificación textural

Se clasifican en intervalos de clase, la primera categoría incluye material muy fino a fino, se caracteriza por comportarse de manera impermeable, por lo tanto, imposibilita la filtración del agua, ante esta condición el agua avanza en su mayoría por la superficie del terreno; caso contrario, las texturas muy gruesas a gruesas, son permeables y el agua se filtra a través de los espacios intersticiales debido a la penetración excesiva de agua, por lo tanto su movilización del material no se puede controlar a diferencia del material más fino. Respecto a las texturas medias, controlan la erosión, ya que permiten una mejor regulación del agua y aire, esto permite generar un 'equilibrio' entre los factores suelo-agua-aire (Pacheco-Gil, 2013).

1.2.3.4 Vegetación

La vegetación tiene una influencia en los procesos de remoción en masa, principalmente en deslizamientos superficiales. La presencia de vegetación mitiga en gran parte la erosión, ya que reduce la infiltración de agua por absorción y evaporación, reforzamiento del suelo por acción de las raíces aumentando la resistencia al cizallamiento. La presencia de vegetación también puede generar efectos adversos. La ocurrencia de raíces y tallos aumentan la infiltración y el flujo superficial de agua, asimismo las raíces absorben el agua de los suelos provocando pérdida de humedad, por lo tanto, conduce al agrietamiento y posteriormente una capacidad mayor de infiltración superficial. Se debe tomar en cuenta el peso de los árboles (dependiendo de la especie, diámetro, altura y separación), ya que una sobrecarga aumenta el esfuerzo de cizalla en una ladera y la presión en los poros (Gutiérrez-Elorza, 2008). Si bien es cierto que la presencia de la vegetación en ocasiones es una desventaja, la mayoría de las veces los procesos de remoción en masa específicamente los deslizamientos, ocurren en lugares desprovistos de vegetación, es por eso que se deben tomar en cuenta los otros factores detonantes de estos procesos.

Con base a lo anterior, en este trabajo la vegetación no se consideró como un factor condicionante directo para la identificación de la vulnerabilidad a procesos de remoción, sino que se incorporó a través de índices de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) en el proceso de detección de cambios que se abordará más adelante (apartado 2.2.7.1.).

1.3 Herramientas geotecnológicas

Para el desarrollo de estudios geomáticos se debe disponer de las herramientas adecuadas y oportunas que se adapten a las necesidades propias que el estudio requiera y las características de las zonas de interés. Entre estas herramientas se encuentran las Herramientas Geotecnológicas tales como la Percepción Remota y los Sistemas de Información Geográfica.

A continuación se hace mención de los conceptos básicos utilizados y su caracterización (Martínez-Muñoz y Díaz Ponce, 2005):

1.3.1 Percepción Remota

Es la ciencia encargada de obtener información de un objeto analizando los datos adquiridos mediante algún dispositivo que no está en contacto con el objeto de manera física (Martínez-Muñoz y Díaz-Ponce, 2005). Utiliza detectores diminutos que captan imágenes a través de un sensor que mide la radiación electromagnética (energía) que refleja la superficie de la Tierra y los objetos que hay en ella. Según Chuvieco (2010), la relación está dada por la reflexión de la energía solar o de un haz energético solar y este sea transmitido a la superficie terrestre para ser interpretada por una aplicación. Los elementos que componen este sistema están determinados por (fig. 5):

a) *Fuente de energía*: Es el responsable del flujo energético. Pueden tratarse de un foco externo del sensor o de un haz energético.

b) *Cubierta terrestre*: Constituida por una cubierta terrestre constituida por vegetación, suelo, agua o infraestructura humana, reflejan la señal energética de acuerdo a sus características físicas.

c) *Sistema sensor*: Se encarga de captar la energía emitida por la cubierta terrestre, codificarla y enviarla al sistema receptor.

d) *Sistema de recepción-comercialización*: Se recibe la información transmitida por la plataforma, se corrige y distribuye a los intérpretes.



Figura 5. Esquema general de las funciones de la percepción remota o teledetección. Tomado de Martínez-Muñoz y Díaz Ponce, (2005).

1.3.1.1 Radiación electromagnética

La radiación electromagnética consta de un campo eléctrico que varía en magnitud en una dirección perpendicular a la dirección en la que la radiación está viajando, y un campo magnético orientado en ángulo recto con el campo eléctrico. Estos dos campos se desplazan a la velocidad de la luz (fig. 6). Las características más importantes para la comprensión de la teledetección son la *longitud de onda* y la *frecuencia*; la primera mide la distancia entre crestas de las olas sucesivas, mide en metros (m), nanómetros

(nm), micrómetros (micras), centímetros (cm); la frecuencia se refiere al número de ciclos de una onda que pasa en un punto fijo por unidad de tiempo. La frecuencia se mide normalmente en hertz (Hz), equivalente a un ciclo por segundo, y varios múltiplos de Hertz (Natural Resources Canada, 2015).

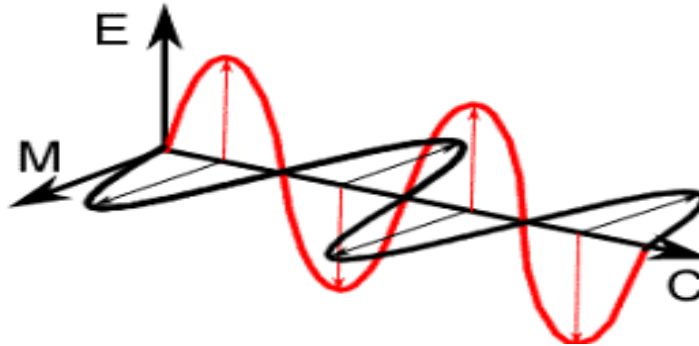


Figura 6. Esquema general de la radiación electromagnética. Tomado de Natural Resources Canada (2015).

1.3.1.2 Espectro electromagnético

El espectro electromagnético se extiende desde las longitudes de onda más cortas (incluyendo gamma y Rayos X) a las longitudes de onda más largas (como microondas y ondas de radio emitidas). Algunos materiales de la superficie de la Tierra, principalmente rocas y minerales, fluorescen o emiten luz visible cuando se ilumina por la radiación UV. Las longitudes de onda visibles cubren una gama de aproximadamente 0.4 a 0.7 micras. La longitud de onda visible más larga es de color rojo y la más corta es Violeta. Las longitudes de onda perciben los colores más comunes, se enumeran a continuación (Natural Resources Canada, 2015):

- Violeta: 0.4-0.446 μm
- Azul: 0.446-0.500 μm
- Verde: 0.500-0.578 μm
- Amarillo: 0.578-0.592 μm
- Naranja: 0.592-0.620 μm
- Rojo: 0.620-0.7 μm

De acuerdo a Chuvieco (2010), las bandas espectrales más usadas en la Teledetección son (fig.7):

- *Espectro visible (0.4 a 0.7 μm)*. Es la banda capaz de ser percibida por nuestros ojos. Presenta tres bandas denominadas así por los colores primarios que percibimos a esas longitudes de onda: azul (0.4 a 0.5 μm); verde (0.5 a 0.6 μm) y finalmente la rojo (0.6 a 0.7 μm).

- *Infrarrojo próximo (0.7 a 1.3 μm):* Es el encargado de discriminar masas vegetales y concentraciones de humedad.
- *Infrarrojo medio (1.3 a 8 μm):* Resulta de la mezcla de los procesos de reflexión de la luz solar y de emisión de la superficie terrestre. Su utilidad radica en estimar contenidos de humedad en la vegetación y detección de focos de alta temperatura.
- *Infrarrojo lejano térmico (8 a 14 μm):* Detecta las emisiones espectrales terrestres a través del calor proveniente de las cubiertas terrestres.
- *Micro-ondas (a partir de 1 μm):* Es la energía transparente a la cubierta nubosa.

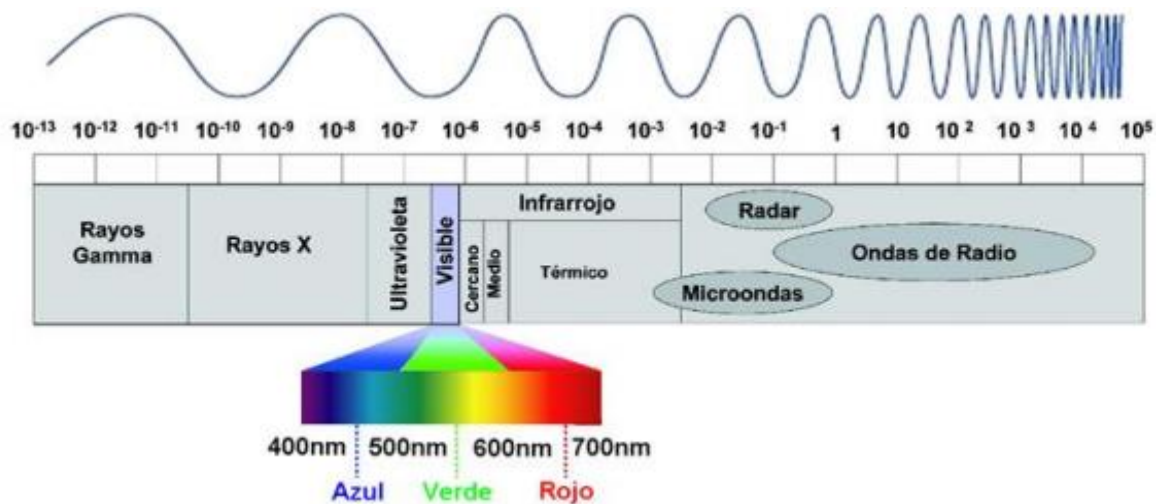


Figura 7. Espectro electromagnético. Tomado de Martínez-Muñoz y Díaz-Ponce, (2005).

1.3.1.3 Plataformas y sensores

Las plataformas son instrumentos que sirven para portar un sensor que captará y registrará la energía reflejada en una superficie. Las plataformas pueden ser terrestres, aéreas y espaciales.

Por otra parte, los sensores permiten capturar la información de los objetos sin tener contacto directo con ellos a través de la detección de energía. Los sensores se dividen en las siguientes categorías:

- *Sensores activos:* Proporcionan su propia fuente de energía para la iluminación, el sensor emite radiación que se dirige hacia el objetivo a ser investigado.
- *Sensores pasivos:* Detectan la energía cuando esta se produce de manera natural cuando el sol está iluminando a la Tierra.

1.3.1.4 Resolución de un sistema sensor

Se define como la habilidad para discriminar la información de detalle perteneciente a cada sensor. Dicha información depende del efecto de sus componentes y está determinado por 4 apartados que engloban la resolución (Chuvieco, 2010):

Resolución Espacial: Se define como el objeto más pequeño distinguido en una imagen y es la mínima separación de la cual los objetos aparecen distintos y separados en las imágenes. Se mide en unidades de longitud (metros sobre el terreno) y su medición está dada por la longitud focal del sensor y su altura sobre la superficie. La unidad mínima corresponde al pixel, la cual es la medida generalizada (Martínez-Muñoz y Díaz-Ponce, 2005, Chuvieco, 2010).

Resolución Espectral: Indica el número de bandas espectrales y rango en longitudes de onda, que reconoce el sensor. En este sentido, un sensor con un mayor número de bandas supone la caracterización espectral de distintas cubiertas; a su vez, cuando las bandas son más estrechas entre sí recoge mejor información del espectro, por el contrario si son más anchas sólo registrará información promedio de las cubiertas de interés. Básicamente el número de bandas, su ancho y localización de las bandas que incluye el sensor, dependerá del objetivo de su diseño y el enfoque de su funcionalidad (Chuvieco, 2010).

Resolución Radiométrica: Se refiere a la capacidad del sensor para detectar las variaciones en la radiancia espectral. En el caso de los sistemas ópticos-electrónicos, la imagen se presenta en formato digital y está dada por una conversión analógico-digital realizada a bordo del satélite. La mayoría de los sistemas ofrecen 256 niveles por pixel, es decir de 0 a 255 (Martínez-Muñoz y Díaz-Ponce, 2005). Chuvieco, (2010) afirma que “inicialmente los Landsat-MSS ofrecían un rango de 128 niveles de codificación (7 bits, $2^7=128$) por pixel, con 64 (6 bits) para el infrarrojo cercano”. Hoy en día la mayoría de los sistemas ofrecen 256 niveles por pixel es decir 8 bits, otros como el NOAA-AVHRR que trabaja con 1.024 niveles igual a 10 bits y unos más como Landsat que opera con (12 bits).

Resolución temporal: Se define como a la periodicidad de cobertura del sensor en la adquisición de imágenes de la superficie terrestre. Esta frecuencia está determinada por las características de la plataforma (altura, velocidad, inclinación). La información que proporciona depende de los objetivos del sensor, por ejemplo, los satélites meteorológicos deben ofrecer periodos de tiempo cortos ya que observan fenómenos muy dinámicos a diferencia de los satélites de recursos naturales que ofrecen información con menor frecuencia y normalmente, el periodo de revista de este tipo de sensores es de 16 días.

1.3.1.5 Características de las imágenes

Los sensores almacenan electrónicamente la energía como una matriz numérica en formato digital. La teledetección presenta datos visualizados y representados, ya sea

en formato gráfico o digital; ambos pueden ser intercambiables ya que transmiten la misma información (fig. 8).

La información de una gama de longitud de onda estrecha se recopila y se almacena en un canal, al cual se hace referencia como una banda. Se puede combinar y visualizar la información digital utilizando los tres colores primarios (azul, verde y rojo); y dependiendo de la relación del brillo (es decir, el valor digital) de cada píxel en cada banda, los colores primarios combinados en diferentes proporciones representan una gama diferente de colores. Cuando se usa este método para mostrar un sólo rango de longitudes de onda, se presentan a través de los tres colores primarios. Debido a que el nivel de brillo de cada píxel es el mismo para cada color primario, se combinan para formar una imagen en blanco y negro, que muestra varios tonos de gris desde el negro hasta el blanco. Cuando se muestra más de un canal cada uno como un color primario diferente, entonces los niveles de brillo pueden ser diferentes para cada combinación de color de canal primario y que se combinarán para formar una imagen de color (Natural Resources Canada, 2015).

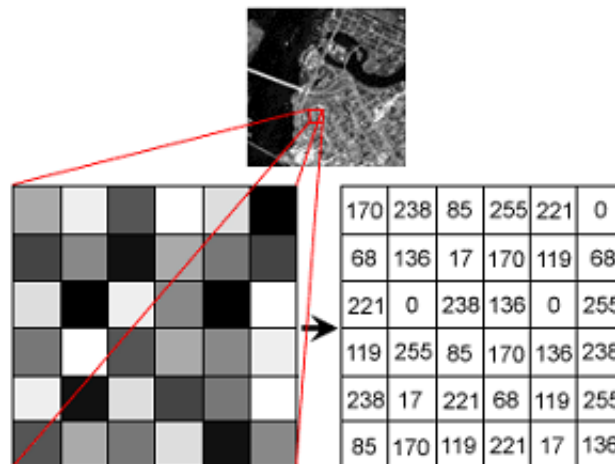


Figura 8. Esquema de una imagen satelital y su configuración en números digitales que corresponden a cada píxel. Tomado de Natural Resources Canada, (2015).

1.3.1.6 Misiones satelitales

Las misiones satelitales se encargan del estudio de los recursos naturales, los cuales operan en ondas heliocéntricas o en órbitas de sincronización terrestre llamadas geosincrónicas. Las misiones satelitales más importantes son LANDSAT 8, Sentinel, Sentinel 2, ERS-1 Y 2 (ESA) Landsat 5 y 7 (USA), IKONOS SPOT, RADARSAT (Canadá), JERS-1 (Japón) y ASTER, este último se describe de manera detallada a continuación, debido a que es el producto utilizado en el estudio de este trabajo.

1.3.1.6.1 Sensor Aster (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer)

El sensor ASTER está emplazado en el satélite TERRA (tabla 3) y fue lanzado en 1999, fue creado por la NASA y el Ministerio de Comercio Economía e Industria de Japón (METI) (USGS, 2009).

Tabla 3. Características del Satélite TERRA (USGS, 2009)

Institución responsable:	NASA, EEUU
Satélite:	TERRA (EOS-AM1)
Anchura de barrido:	60 kilómetros
Altitud:	705 kilómetros
Inclinación	98.2 grados
Tiempo de duración de la órbita:	98.1 min.
Vehículo de lanzamiento:	Atlas IIAS
Fecha de lanzamiento:	18/12/1999
Tipo de órbita:	Polar heliosíncrona
Tiempo de vida proyectado:	6-7 años
Paso ecuatorial:	10:30 a. m.
Sensores:	ASTER, MODIS, MISR, CERES Y MOPPIT

El sensor ASTER gira en una órbita heliosincrónica a 705 kilómetros en ciclos repetitivos de 16 días. El ancho del barrido es de 60 kilómetros y la distancia entre sus órbitas es de 172 km. En el espectro electromagnético presenta tres regiones; con resolución espacial de 15 metros (VNIR), 6 bandas en el infrarrojo de onda corta (SWIR) con una resolución espacial de 30 metros y 5 bandas en el infrarrojo térmico con una resolución espacial de 90 metros (ERSDAC, 2001 en Azcurra et al., 2003) (tabla 4).

Tabla 4. Características del sensor ASTER (USGS, 2009)

Subsistema	Banda	Rango espectral (µm)	Resolución espacial	Resolución radiométrica
VNIR	1	0.52-0.60	15 m	8 bits
	2	0.63-0.69		
	3N	0.78-0.86		
	3B	0.78-0.86		
SWIR	4	1.600-1.700	30 m	8 bits
	5	2.145-2.185		
	6	2.185-2.225		
	7	2.235-2.285		
	8	2.295-2.365		
TIR	9	2.360-2.430	90 m	12 bits
	10	8.125-8.475		
	11	8.475-8.825		
	12	8.925-9.275		
	13	10.25-10.95		
	14	10.95-11.65		

1.3.2 Sistemas de Información Geográfica (SIG)

Existe una estrecha relación entre la Percepción Remota, los Sistemas de Información Geográfica y las herramientas de análisis y modelado espacial, interactuando y complementándose entre sí bajo marcos teóricos de disciplinas específicas que estudios con fines específicos demandan; desde la adquisición de la información por sensores remotos, su posible integración en Sistemas de Información Geográfica, su análisis y modelado, concluyendo con la generación de productos finales a través de mapas, informes, gráficos o datos estadísticos; todo ello bajo el marco global de la ciencia Geomática. (Vázquez-Jiménez, 2017).

Los inicios de los Sistemas de Información Geográfica se desarrollaron como necesidad de las agencias gubernamentales para el manejo masivo de datos espaciales de imágenes en Canadá y Estados Unidos hace más de 40 años y desde entonces la enseñanza y aprendizaje del manejo de SIG se ha incrementado significativamente (Pacheco-Gil, 2013).

Los Sistemas de Información Geográfica pueden entenderse como modelos de conocimiento, ya que integra distintas disciplinas para el desarrollo de nuevos esquemas transdisciplinarios; asimismo, desde la perspectiva tecnológica dan soporte a la solución de problemas relacionados con la ocupación, uso y gestión del territorio. Los recursos de los que se apoyan los SIG están íntimamente ligados a recursos humanos, software, hardware, tecnologías de la comunicación, datos y marcos teóricos (Vázquez-Jiménez, 2017) (fig. 9).



Figura 9. Esquema de los componentes principales de un sistema de Información Geográfica. Tomado de: <https://gacano.files.wordpress.com/2010/03/sigcomponentes.jpg> (Consultado el 30 de septiembre de 2017).

Según Moreno (2006), los Sistemas de Información Geográfica son representaciones abstractas de la realidad relacionada a sistemas terrestres cuyo objetivo es la información generada a partir del análisis espacial. La combinación de la información, desde el punto de vista de atributos, permite interpretar o investigar aspectos que no son tan claros cuando se analizan las fuentes de información de manera separada, la finalidad de los Sistemas de Información Geográfica es la de asociar parámetros distintos y con ayuda del análisis espacial determinar la relación intrínseca de los atributos (Pacheco-Gil, 2013).

1.3.3 Análisis Espacial

Como parte de las funciones integradoras en la Geomática, se encuentra el análisis espacial, que es un conjunto de técnicas matemáticas y estadísticas aplicadas a los datos distribuidos sobre el espacio geográfico; se encarga de procesar, clasificar y presentar criterios cartográficos de un estudio cuantitativo y cualitativo de fenómenos que se manifiestan en el espacio. Estas herramientas en su mayoría se integran en un Sistema de Información Geográfica (SIG), lo que permite describir, inferir o predecir cuantitativamente estos fenómenos (Royo-Pérez, 2014).

A través del intercambio del análisis espacial con las Tecnologías de la Información Geográfica (TIG's), se visualizan los procesos ocurridos en el espacio a través del tiempo; y la visualización espacial de variables que pueden ser de distinta índole como poblaciones individuales, la calidad de vida o los índices de ventas de las compañías en una región; siempre que estas puedan tener una expresión espacial mediante el uso de mapas (Mazo, 2010).

Según Mazo (2010), el análisis espacial es una serie de conjuntos de métodos genéricos de análisis exploratorio y la visualización de datos a través de mapas (f

ig. 10). Entre los procedimientos iniciales del análisis espacial incluyen tres grandes grupos:

- Variación continua: considera procesos estocásticos cuyos valores pueden ser conocidos en todos los puntos del área de estudio.
- Variación discreta: Se refieren a la distribución de eventos cuya localización se asocia a las zonas delimitadas por polígonos. Objetivo: modelar el patrón de distribución espacial de los fenómenos geográficos.
- Procesos puntuales: Conjunto de puntos distribuidos en un terreno, cuya ubicación fue generado por un mecanismo estocástico. Objetivo: comprensión del mecanismo generador de dicha localización.

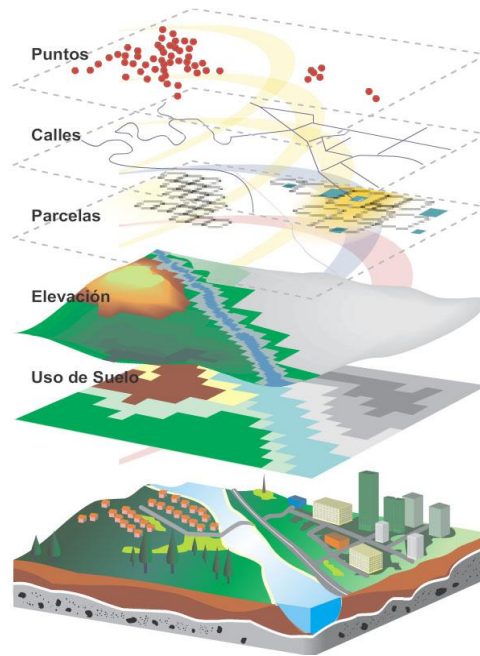


Figura 10. Visualización de datos a través de mapas. Tomado de <http://www.aulati.net/wp-content/uploads/2009/04/capas-raster-vectorial.jpg> (Consultado el 27 de junio de 2017).

1.3.4 Modelado Espacial

Una de las herramientas de la Geomática que conjuga a su vez el análisis espacial es el modelado espacial, el cual consiste en un conjunto de técnicas diseñadas para auxiliar la visualización espacial de datos. Se entiende por modelo a la representación abstracta de la realidad y es utilizada para comprender las características más complejas (Vázquez-Jiménez, 2011). Los modelos espaciales pretenden generar estructuras esquemáticas de la realidad de manera inexacta, selectiva y subjetiva de la realidad, pero enfatizan el fenómeno estudiado de forma precisa.

El modelado espacial necesita de información que permita identificar los aspectos básicos para su representación como en el análisis de imágenes, encuestas o censos o unidades morfológicas o administrativas. Cuando los objetivos se han identificado se procede a medir los cambios que puedan dar sentido al modelo y que también se adecúen en la escala espacial. En casos donde el modelo es complejo se implementan varios modelos (Vázquez-Jiménez, 2011):

- Modelos cartográficos (realizados a través de un SIG) que represente la distribución y relación espacial.
- Un modelo estadístico que represente las relaciones entre las variables del objetivo.
- Modelos matemáticos que afronte la evolución global del estado de un cierto número de variables.

- Modelo multi-agente que explique los efectos de la integración de varios agentes.

Cuando se concluye esta etapa, el fenómeno modelado puede brindar de manera explícita la información de la organización espacial, la localización de elementos de interés, la creación de nuevos elementos o fenómenos derivados de este y sobre todo pre-visualizar el futuro en lugares determinados (Vázquez-Jiménez, 2011).

Goodchild et al. (1992) identifica los siguientes argumentos del análisis espacial en estudios bajo un enfoque territorial:

1. El espacio ofrece un esquema de indexación simple pero muy útil a través de la representación de la posición de elementos espaciales en mapas y sistemas de referencias y coordenadas.
2. Un enfoque espacial permite identificar el efecto de eventos u objetos a otros elementos espaciales con base a las posiciones relativas y su proximidad, siendo a menudo la distancia entre fenómenos u objetos espaciales, un factor importante de interacción.
3. El análisis espacial permite que eventos y/o elementos de distintos tipos se vinculen entre sí o con otros de distintos tipos, a través de su integración en Sistemas de Información Geográfica.

Como parte de los marcos teóricos de la Geomática, existen herramientas orientadas al análisis y modelado espacial. El uso del álgebra de mapas y su relación directa con la Percepción Remota, suponen la superación inicial de una serie de procesos de manipulación y consulta básica de datos que las plataformas de los Sistemas de Información Geográfica permiten, para ahora modelar la información presentada en formato raster (imágenes), que permiten y facilitan el desarrollo de tareas dinámicas complejas de análisis y simulación de fenómenos espacio-temporales que cada vez son más requeridos (Sarría 2006, Soares-Filho et al. 2009).

1.4 Hipótesis

Con base a los antecedentes descritos previamente, se establece la siguiente hipótesis:

Es posible el desarrollo de un modelo geomático de las zonas susceptibles a deslizamientos de laderas, a través de la caracterización de los factores condicionantes y desencadenantes relacionados a los procesos de remoción en masa en la zona centro del Estado de Guerrero; aplicando marcos teóricos y herramientas geotecnológicas propias de la ciencia Geomática.

CAPÍTULO 2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Marco de referencia

2.1.1 Localización

El área de estudio se localiza en la zona centro del estado de Guerrero, entre los municipios de Chilpancingo de los Bravo, Leonardo Bravo, General Heliodoro Castillo y Coyuca de Benítez, presenta una superficie de 128,646 hectáreas; se encuentra dentro de la provincia fisiográfica conocida como Sierra Madre del sur (Morán-Zenteno, 1984) en la subprovincia cordillera Costera del Sur (INEGI, 2015). Los principales poblados que se incluyen dentro de la zona corresponden a Izotepec, Yextla, Cruz de Ocote, Chautipan, Alcaparrosa, Inscuinatoyac, Coacoyulillo y Jaleaca de Catalán (fig. 11):

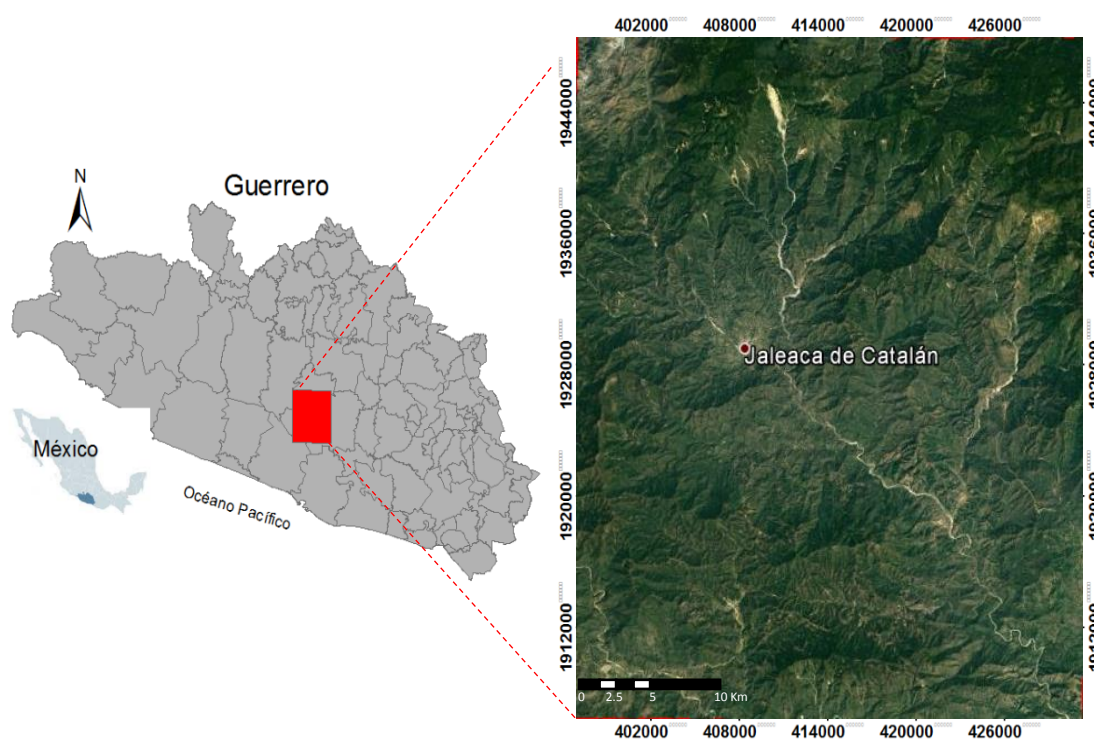


Figura 11. Ubicación de la zona de estudio (recuadro en rojo).

2.1.2 Componentes abióticos

2.1.2.1 Clima

El clima predominante es el cálido subhúmedo con lluvias en verano [A(w)] (41.06%), semicálido húmedo con abundantes lluvias en verano (ACm) (28.89%), semicálido subhúmedo con lluvias en verano (ACw), de humedad media (9.33%), templado húmedo con abundantes lluvias de verano [C(m)] (7.04%), templado subhúmedo con lluvias en verano de menor humedad [C(w)] (6.78%). La temperatura varía de 14 a 28°C y el rango de precipitación oscila entre los 800 y 2500 mm (INEGI,

2009). Los eventos hidrometeorológicos están caracterizados por tormentas tropicales y huracanes.

2.1.2.2 Precipitación

La estación climatológica más cercana es la N. 00012229 de Chilpancingo, la cual reporta una precipitación media anual de 881.1 mm. El promedio de la mínima anual se estima en 607.3 mm y corresponde al registro del año más seco; el promedio de la precipitación máxima para el año más lluvioso es de 1,188.2 mm. Por su parte, el registro de la precipitación mensual mínima es de 4.0 mm y corresponde al mes de marzo y una máxima mensual de 187.5 mm en el mes de julio, la precipitación media mensual pertenece al mes de octubre y es de 79.1 mm (CAPASEG, 2009).

2.1.2.3 Hidrología

Los ríos principales están dentro de las regiones hidrológicas RH18 denominadas “Balsas” y R20 “Costa chica-Río Verde”, las cuales cubren el 27.19 % de la superficie de Guerrero (Martínez, 2015); la cuenca de mayor relevancia y a la cual pertenece este estudio es la del Río Papagayo y la subcuenca del mismo nombre, la cual tiene una extensión de 2,587 km². El río principal del área de estudio es el Río Papagayo y tiene afluentes a los arroyos Las Trojas, Los Limones, Santo Domingo, Llano Grande, Agua Hernández y Santa Rita. Hacia la parte sureste y este se encuentra el río Grande, el cual tiene una orientación NW-SE y los arroyos afluentes son Cordoncillo y Santa Gertrudis (SGM, 2012). Hacia la parte norte, cerca del poblado de Yextla, se localiza el drenaje controlado por los ríos Yextla, Istepec y El Salitre y los arroyos Tabacal, Coapalote, Arroyo Piedras Grandes, río Piedras Grandes y Coloapa. Al suroeste se observan drenajes paralelos pertenecientes a los arroyos El Zapote, El Ahuejote, El Rincón, Huecapa y Agua Fría. Los drenajes de la porción centro-sur presentan drenajes radiales y el segundo drenajes paralelos y al oeste cambia a dirección NE-SW y el drenaje representativo es el subdendrítico (SGM, 2005).

2.1.2.4 Suelos

Los tipos de suelo presentes son Luvisol, Regosol, cambisol y Leptosol (INEGI, 2009), los cuales presentan tres subtipos: calcáricos, distrícos y éutricos, asociados a Acrisoles, órticos, Cambisoles éutricos, dístricos, cálcicos y crómicos, Rendzinas, Litosoles, Solinchak órtico, Luvisol crómico, Fluvisol éutrico, Feozem háplico y cálcico, Vertisol pélico y crómico, y Castañozem cálcico. Se presentan a poca profundidad y débil desarrollo, se encuentran en fase lítica, lítica profunda, pedregosa y gravosa y son de susceptibilidad media a la erosión hídrica. Por su parte, en las planicies costeras se observan horizontes más profundos con textura gruesa y se caracterizan por sufrir colapsos (CAPASEG, 2009).

2.1.3 Componentes bióticos

2.1.3.1 Vegetación

La vegetación típica es la de bosque, la cual incluye bosque de pino, bosque de pino encino, bosque de encino, bosque de oyamel, bosque mesófilo de montaña y bosque de Tásbate. Las especies predominantes son roble (*Pinus oocarpa*), encino (*Quercus magnoliifolia*), pino chino (*Pinus teocote*), trompillo (*Pinus oocarpa*) y encino blanco (*Quercus laurina*) (Martínez, 2015, INEGI, 2015).

2.1.4 Geología

2.1.4.1 Estratigrafía

El área de estudio se localiza fisiográficamente en la Sierra Madre del Sur y la suprovincia Cuenca Balsas-Mezcala (Raisz, 1964). Se encuentra dentro de los terrenos tectonoestratigráficos de Xolapa, Guerrero, y la plataforma Guerrero-Morelos. El terreno Xolapa está representado por el complejo Xolapa, cuya composición es de rocas metamórficas (SGM, 2012); consiste en esquistos y gneises de biotita y cuarcita; se presenta en contacto tectónico con el terreno Guerrero, el cual está representado por dos unidades, una vulcanosedimentaria metamorfozada llamada Formación Villa de Ayala, correspondiente al subterreno Teloloapan; la segunda unidad corresponde a la Formación Acapetlahuaya y está constituida por una secuencia de sedimentos metavolcánicos y metasedimentos del Aptiano, la cual se encuentra cubriendo de manera concordante a la primera unidad (Pérez, 2005). Finalmente, la Plataforma Guerrero-Morelos consiste en afloramientos extensos de calizas depositadas sobre la Formación Morelos en un ambiente de plataforma marina (Cerca, 2004). Las unidades presentes en el área de estudio representan la cubierta de la Plataforma Guerrero-Morelos y corresponden a la Formación Chapolapa, la cual presenta rocas metavolcánicas con influencia sedimentaria; la Formación Zicapa está formada por capas rojas continentales constituida de limolitas, areniscas y conglomerados; la formación Morelos presenta un paquete de rocas carbonatadas pertenecientes a la Plataforma Guerrero-Morelos. También hay presencia de rocas de composición granítica correspondientes al Granito Xaltianguis y finalmente, como consecuencia de vulcanismo del Oligoceno-Mioceno, se registran rocas riolíticas. Las rocas más jóvenes corresponden a los depósitos de aluvión presentes en los márgenes y cauces de ríos (SGM, 2012). Las descripciones y distribución a detalle se presentan a continuación.

2.1.4.2 Terreno Xolapa

El Terreno Xolapa está constituido por un basamento llamado Complejo Xolapa y está representado por rocas metamórficas. En el área de estudio se localizaron dos conjuntos metamórficos pertenecientes al mismo complejo, los cuales son descritos a continuación.

2.1.4.2.1 Complejo Xolapa JK (?) CM

Consiste en un conjunto de esquistos, mármol, ortogneis deformados caracterizados por foliaciones con rumbos contrastantes (De Cserna, 1965). Las edades reportadas del Jurásico Inferior al Cretácico inferior; según las relaciones de campo del Servicio Geológico Mexicano (2012), el Complejo Xolapa al suroccidente afloran gneises y granitos milonitizados. Los gneises se encuentran de forma intemperizada de color castaño y de color blanco en roca fresca, presentan estructuras foliadas, texturas gnéisica constituida por cuarzo, muscovitas y hornblendas; hacia la parte sur-centro de la carta Jaleaca E14-C17 se observan texturas granoblásticas y mineralogía de cuarzo, feldespatos, muscovita y hornblendas. Presenta óxidos de hierro como hematita y limolita. Por su parte, los granitos milonitizados son de color gris y color ocre en su forma intemperizada, presentan estructura foliada, textura granoblástica con mineralogía de cuarzo, feldespatos, biotita y ferromanesianos. Hacia la región sur-centro presenta texturas nematoblástica con presencia de cuarzo, plagioclasas, biotitas y hornblendas.

2.1.4.3 Terreno Guerrero (Subterreno Teloloapan)

Está representado por dos unidades conformado por rocas volcánicas y metamórficas de las formaciones Villa de Ayala y Acapetlahuaya (SGM, 2005).

2.1.4.3.1 Formación Villa de Ayala (Kbeap MA-Ms)

Consiste en lavas, derrames y brechas de composición andesítica y basáltica metamorfoseados e intercalaciones de pizarras. Afloran a 7.5 km al NW de la comunidad de Jaleaca de Catalán. Presentan una edad de Necomoano-Aptiano. Hacia Yextla se observan metaandesitas intercaladas con pizarras. Las metalavas andesíticas presentan fuerte fracturamiento y foliación. Las brechas volcánicas están constituidas por clastos de andesita y toba andesítica de forma angulosa o subredondeadas en matriz tobácea, se encuentra intemperizada y de aspecto arenoso deleznable. Estratigráficamente, se encuentra cubierta por la caliza de la Formación Teloloapan y al oriente es cubierta discordantemente por la formación Tetelcingo (SGM, 2005).

2.1.4.3.2 Formación Acapetlahuaya (Knap MV-Ms)

Presenta dos conjuntos litoestratigráficos: uno volcánico y otro metasedimentario con intemperismo de tonalidad amarillenta a rojiza. Consiste en filitas, metaandesitas y pizarras hacia el sector noreste-este. Las filitas se encuentran intemperizadas, con estructura foliada y moderadamente fracturada. La composición principal es de cuarzo y muscovita con textura foliada y pizarrosa y se encuentra fuertemente plegada, se estima un espesor mínimo de 400 m. Hacia la parte de suroccidental, occidental y noroccidental afloran metatobas riolíticas, metariolitas, metatobas andesíticas con intercalaciones de filita, metaareniscas y metaconglomerados polimícticos (SGM, 2005). Hacia el sur se observan metatobas riolíticas con estructura foliada; el material está muy fracturado y forma micropliegues tipo chevrón.

Estratigráficamente se encuentra sobreyaciendo de manera concordante y discordante a la Formación Villa de Ayala. Está cubierta de manera concordante por la Formación Teloloapan y de manera discordante por la Ignimbrita-Riolita (Tom Ig-R).

2.1.4.3.3 Formación Teloloapan (Kapa Cz)

Está constituido por calizas e intercalaciones de lutita ocasionales y conglomerados polimícticos. Hacia la parte NW aflora un conglomerado polimíctico con clastos de cuarzo, metatoba, pizarra, filita, cuarcita, esquistos y calizas, Al NE se aprecian calizas tipo mudstone y wackestone con rudistas con algunos horizontes recrystalizados, y hacia el NW presenta mudstone y grainstone con estructuras tipo lapiaz. En la parte de Cruz de Ocote muestra estratos masivos de mudstone y wackestone con rudistas y carpetas de algas, en algunos casos presenta fracturas rellenas de calcita y existe intensa disolución provocando zonas cásticas. Hacia el Este afloran mudstone y packstone con intenso fracturamiento y carsticidad (SGM, 2005).

Al NW de Ojo de Agua la Formación Teloloapan sobreyace concordantemente a la Formación Pachivia y al NW de Cruz de Ocote cubre concordantemente a la Formación Villa de Ayala. Hacia la porción centro y sur se encuentra en contacto discordante con la Formación Acapetlahuaya.

2.1.4.3.4 Formación Pachivia (Kase Ar-Lu)

Consiste en alternancia de lutitas y areniscas intercaladas con calizas. Las lutitas se encuentran en estratos laminares con estructura foliada de aspecto sedoso; por su parte, las areniscas se presentan en estratos de 3 a 8 cm con textura clástica de grano fino y medio. Por otro lado, las calizas se encuentran imbricadas en estratos de 5 a 15 cm de espesor, también se encuentran calizas arcillosas foliadas en estratos de 3 a 40 cm con estructura foliada. La caliza presenta ocasionalmente recrystalizada con vetillas de calcita y la presencia de foraminíferos y algas remplazados por calcita. Hacia la parte sur de Corral de Piedra afloran areniscas y lutitas. La arenisca se encuentra en estratos de 4 a 40 cm, de grano fino, medio y grueso, constituida por clastos volcánicos; por su parte, la lutita presenta estratificación delgada y en laminaciones, hacia el río Yextla, presenta intercalaciones de caliza arcillosa de color gris oscuro (SGM, 2005).

Estratigráficamente, cubre de manera concordante y transicional a la Formación Teloloapan y se encuentra cubierta discordantemente por las Formaciones Tetelcingo (Tpae BvA Da) e Ignimbrita-Riolita (Tom Ig-R).

2.1.4.4 Plataforma Guerrero-Morelos.

Se caracteriza por afloramientos extensivos de calizas depositadas en un ambiente de plataforma marina de N-S a 170 km de largo y 80 km de ancho. Hacia la parte sur de Chilpancingo se encuentran en contacto tectónico con rocas del Complejo Xolapa.

2.1.4.4.1 Formación Chapolapa (Khb MV)

Está clasificada por secuencias de tobas, areniscas, lutitas y conglomerados de color verde, conformado por clastos volcánicos andesíticos y el otro de color morado con contenido de cuarzo (De Cserna, 1965). Hacia la parte basal está constituida por metavolcánicos, metatobas, areniscas filitas y esquistos cuarzofeldespáticos (Salazar et al, 1999). Presenta metamorfismo en facies de esquistos verdes y muestra deformación dúctil milonítica en la secuencia de los metavolcánicos (Torres de León et al., 2004). Se localizan en una zona con deformación intensa entre los límites del Terreno Mixteco (que no aflora en el área) y el Complejo Xolapa (Cerca, 2004).

Estratigráficamente estas unidades están en contactos discordantes con la Formación Morelos y en contacto tectónico con el Complejo Xolapa, a través de una falla lateral derecha llamada La Esperanza. La edad determinada a esta formación es del Hauteriviano-Barremiano (SGM, 2012).

2.1.4.4.2 Formación Zicapa (Khap Cgp-A)

Consiste en conglomerados de clastos subangulosos y subredondeados de limolita, arenisca, cuarzo lechoso y andesita embebidos en una matriz arcillosa; areniscas estratificadas compuesta por cuarzo y feldespatos, limolitas compuesta por material arcilloso, fracturamiento moderado y con intercalaciones de areniscas; andesitas masivas y muy fracturadas; brechas andesíticas con pseudoestratificación con fragmentos de andesitas; se presentan algunos lentes de calizas en intercalaciones (SGM, 2012).

Estratigráficamente, subyacen a lo largo de la Formación Morelos y se le asignó una edad de Hauteriviano-Aptiano (Fitz-Díaz et al, 2002).

2.1.4.4.3 Formación Morelos (Kace Cz)

Consiste en secuencias de mudstone-wackestone en estratos delgados de 5 cm a 1 m de espesor con bandeamiento de pedernal, huellas de disolución, líneas estilolíticas y vetillas de calcita. Presenta nerineas, rudistas, amonitas, calciesferulidos y globigerínidos.

Estratigráficamente, cubre de forma transicional a la Formación zicapa y está cubierta concordante y transicionalmente por la Formación Mezcala. Corresponde a una edad de Albiano-Cenomaniano (Salazar, 1999).

2.1.4.4.4 Formación Mezcala (Ktc Lu-Ar)

Está representada por lutitas y areniscas intercaladas con calizas y conglomerados polimícticos. Las lutitas presentan colores oscuros en estratos de 3 a 30 cm, en algunos puntos al sur se encuentra de forma deleznable, fuertemente fracturada; por su parte, la arenisca se encuentra en capas de 10 a 40 cm, de grano fino y grueso, se observa calcita, cuarzo y óxidos de hierro. Por otro lado, las limolitas presentes se encuentran en estratos

de 1 a 10 cm de espesor y con fracturamiento moderado. Las calizas se presentan en color gris oscuro en estratos no mayores a 20 cm de espesor y muestra vetillas de calcita, ocasionalmente presenta bandeamiento de pedernal negro (SGM, 2005).

Estratigráficamente, cubre concordantemente a la Formación Morelos y cubierta en discordancia angular por la Formación Tetelcingo. La edad de esta formación es Turoniano-Campaniano (Salinas, 1986).

2.1.4.5 Magmatismo de la sierra Madre del Sur

Está constituido por rocas terciarias y están agrupadas por las siguientes formaciones (SGM, 2012):

2.1.4.5.1 Granito Xaltianguis (To Gd-Gr)

Corresponde a rocas masivas de composición granítica de textura fanerítica, con minerales de cuarzo, feldespato, biotita y ferromagnesianos. Hacia la parte norte está representada por apófisis de granodiorita de tonalidad morada con “motas” blancas, la parte intemperizada es de color rosáceo y beige, un poco más al sur se encuentra en colores verdes, se encuentra de forma compacta y masiva con estructura fanerítica. El granito no aflora en el área de estudio (SGM 2012).

Estratigráficamente, estas rocas afectan a las formaciones Villa de Ayala, Teloloapan y la Plataforma Guerrero-Morelos. La Edad correspondiente a esta unidad es de Eoceno-Oligoceno (Moran-Zenteno, 1990).

2.1.4.5.2 Formación Tetelcingo (TpaBvA-Da)

Está constituida por brechas volcánicas andesíticas, tobas riolíticas, tobas andesíticas, aglomerados volcánicos y areniscas tobáceas. En el área de estudio afloran sólo la brecha volcánica andesítica de estructura compacta y textura piroclástica, constituida por fragmentos de andesita, dacita y riolita en matriz tobácea. Presenta niveles de toba andesítica en estructura arenosa y pseudoestratificación de 10 y 25 cm de espesor con textura epiclástica. Hacia la parte este se encuentra con fuerte alteración y con material deleznable, muestra fragmentos de riolita, dacita, andesita y caliza en matriz arcillo-tobácea (SGM, 2012).

Estratigráficamente, esta formación cubre discordantemente a rocas del subterreno Teloloapan y la Plataforma Guerrero-Morelos y se encuentra cubierta discordantemente por la unidad ignimbrita-Riolita cubriendo a la Formación Teloloapan y Villa de Ayala. La edad correspondiente es Eoceno temprano (Salinas, 1986).

2.1.4.5.3 Ignimbrita- Riolita (Tom Ig-R)

Consiste en ignimbritas, riolitas, tobas riolíticas y aglomerados. Las riolitas presentan tonalidades rosáceas y verdes, textura porfídica. Se observan pseudoestratos de arenisca volcánica. Hacia el noroeste afloran ignimbritas de estructura compacta y

textura afanítica con fracturamiento moderado; las riolitas muestran estructura fluidal y textura afanítica. Las tobas riolíticas presentes exhiben estructura masiva y textura piroclástica, se encuentra muy fracturada (SGM, 2005).

Estratigráficamente cubre la discordancia paralela a la Formación Tetelcingo y se encuentra discordantemente al subterreno Teloloapan y la Plataforma Guerrero-Morelos. La edad estimada es del Oligoceno-Mioceno.

2.1.4.6. Depósitos cuaternarios

Están constituidos por la siguiente unidad:

2.1.4.6.1 Aluvión (Qhoal)

Se caracteriza por depósitos recientes que se encuentran rellenando los valles y cauces de ríos de la parte sur y suroeste de la zona de estudio, hacia la parte noroeste presenta clastos redondeados y subredondeados de riolita, andesita, dacita, caliza, areniscas y tobas de 1 a 10 cm embebidos en sedimentos arenosos (SGM, 2005).

2.1.5 Geomorfología

El área de estudio hacia la parte centro-sur comprende formas topográficas muy abruptas relacionadas a las rocas metamórficas del Complejo Xolapa, tales expresiones están dadas por cordilleras con elevaciones promedio de 500 msnm en arroyos profundos hasta elevaciones de 1,900 msnm; los cerros Morelos, El Molino, El Molinillo, Cerro del Chivo y El Ranchito son los más representativos y presentan altitudes de entre 1,400 m y 1,900 m. Hacia la parte este, la topografía se suaviza y las elevaciones de los cerros no pasan los 1,200 msnm (SGM, 2012). Hacia la parte nororiental está representada por sierras abruptas alargadas con orientación preferente N-S, E-W y NE-SW. La elevación máxima es de 2,900 msnm y la mínima de 1100 msnm. Los cerros que presentan las mayores elevaciones son Cacho de Oro con 2,900 msnm, El Pedregoso 2,800 msnm, El Panteón 2,700 msnm y Pachón con 2,500 msnm. Los cerros Cacho de Oro y Pachón se encuentran más hacia el centro-sur y tienen orientaciones este-oeste, noreste y suroeste, respectivamente. Al noroeste se localiza la sierra El Panteón cuya orientación preferente es NE-SW, hacia su parte sur la topografía es abrupta y al norte muestra pendientes y lomeríos (SGM, 2005).

2.1.6 Contexto sociodemográfico

La población en el estado de Guerrero ha tenido variaciones importantes en su crecimiento demográfico en las últimas décadas; el incremento de la población entonces supone la demanda de una mayor y mejor infraestructura urbana y los servicios básicos. Este aumento establece atender la situación de usos de suelo, servicios de infraestructura y ordenamiento territorial para satisfacer las necesidades de la población (Ramírez-Barragán, Rivera-Herrera, Ledezma-Elizondo, 2005). Según la encuesta intercensal del INEGI (2015b), se ha observado un incremento de 0.2 millones de

personas entre los años 2010 y 2015 (fig. 12), dicha población en Guerrero está constituida por población urbana en un 58% de la totalidad, mientras que el 42% vive en zonas rurales (fig. 12).

El último estudio sociodemográfico realizado por el INEGI (2015b) indica que el municipio de Chilpancingo de los Bravo presenta un total de 273 106 personas, lo cual representa el 7.7% del total de la población estatal y comprende el 3.4 % del territorio estatal; por su parte, la densidad de población es de 125.2 hab/km². El total de las viviendas habitadas es de 66 406, lo que representa el 7.4 % del total estatal.

Por otro lado, el municipio de Leonardo Bravo tiene una población de 26 342, equivalente al 0.7% de la población estatal. La superficie total es del 1.1% de la totalidad del territorio del estado de Guerrero y una densidad de población de 36.6 hab/km². Presenta un total de viviendas habitadas de 6 057, equivalente a 0.7% de la totalidad estatal.

Por su parte, el municipio de General Heliodoro Castillo presenta una población de 37 340 personas, lo que constituye el 1.1% de la totalidad de la población estatal. La distribución territorial indica que ocupa el 2.7% del territorio estatal y la densidad de población es de 21.6 hab/km². El total de viviendas existentes habitadas es de 7 616 y se estima que es el 0.9% del total estatal.

**Población total del estado de Guerrero
(1900-2015)**

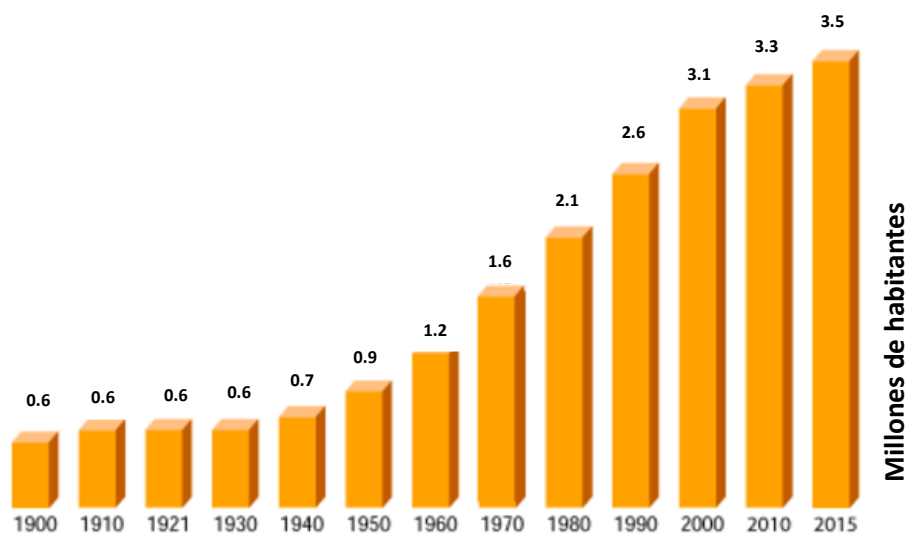


Figura 12. Crecimiento de la población en el Estado de Guerrero que muestra un incremento importante a partir de 1940. Tomado de INEGI (2015b).

2.2 Materiales y métodos

La realización de este trabajo incluyó el análisis y procesamiento a detalle de cada uno de los factores que intervienen en el modelo de susceptibilidad a procesos de remoción en masa a través de la realización de análisis estadísticos; Los resultados están expresados a través de mapas temáticos e imágenes satelitales. La realización e información de los procesos de cada insumo se describen a continuación:

2.2.1 Imágenes satelitales Aster

Las imágenes satelitales fueron obtenidas del Satélite Terra sensor ASTER (*Advanced Space-borne Thermal Emission and Reflection Radiometer*, por sus siglas en inglés), con fecha de adquisición del 10 de diciembre de 2012 y 13 de diciembre de 2013. Las bandas que componen este sensor están divididas en tres subsistemas: el VNIR (región espectral del infrarrojo cercano) que presenta 3 bandas con una resolución espacial de 15 metros; el SWIR (región espectral del infrarrojo de onda corta) de 6 bandas con resolución espectral de 30 metros; finalmente TIR (región del infrarrojo térmico), con 5 bandas y una resolución espacial de 90 metros. El barrido de cada imagen es de 60 x 60 kilómetros; además de los subsistemas, ASTER cuenta con un telescopio encargado del escaneo en la región espectral de la banda 3B, lo que permite la creación de modelos digitales de terreno por pares estereoscópicos (Vargas-González, 2012).

Las imágenes presentan formato comprimido HDF (Hierarchical Data Format), y las claves de referencia son:

- AST_L1T_0031210201272346_20150613190007_37759 correspondiente a la fecha 12 de diciembre de 2012.
- AST_L1T_00312132013172400_20150618231947_94098 para la fecha 13 de diciembre de 2013 (fig. 13).

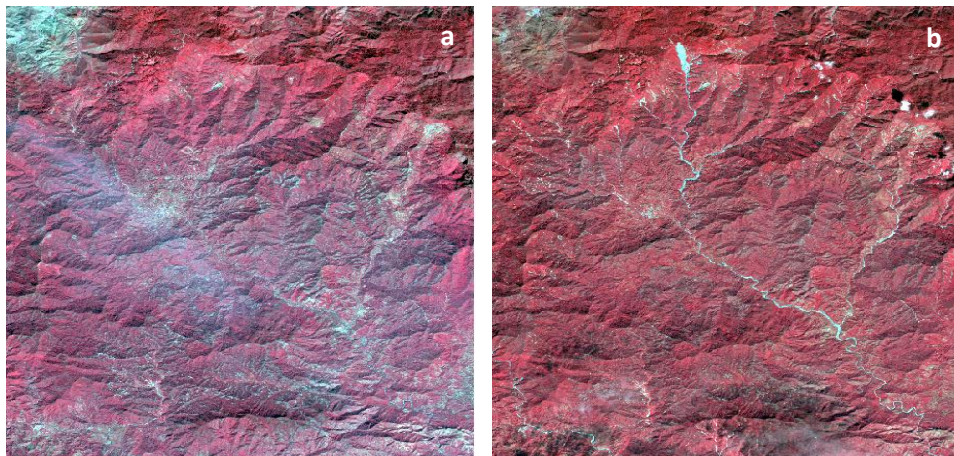


Figura 13. Combinación de las bandas 1, 2 y 3N de las imágenes satelitales del sensor ASTER del área de estudio. a) Imagen de la fecha 10 de diciembre de 2012. b) Imagen de la fecha 13 de diciembre de 2013.

Las imágenes se obtuvieron de la página web del Servicio Geológico de los Estados Unidos de Norte América (USGS), Earth Resources Observation and Science (EROS) Center y Global Visualization Viewer (Gonzaga-Aguilar, 2014).

Los productos ASTER presentan dos tipos de niveles de datos (Abrams y Hook, 2002):

ASTER L1A. Se caracterizan por presentar datos crudos, es decir, no se aplican los coeficientes de calibración, lo que permite conservar los datos de origen. Estos datos son utilizados por la ERSDAC para la generación de DEM's.

ASTER L1B. Este producto presenta los coeficientes de calibración radiométrica y geométrica aplicados a la imagen a través de la telemetría de los telescopios, una vez producidos los datos en el GDS (sistema de datos) en Tokio Japón, se envían al EDC (EROS Data Center) y posteriormente al DAAC (Centro Activo de Distribución de Archivos para el procesamiento final y distribución) (USGS, 2009 en Gonzaga-Aguilar, 2016).

Los datos que se utilizaron en este trabajo fueron de los archivos HDF del nivel AST_L1A. Las imágenes adquiridas fueron de fechas cercanas entre sí con un año de diferencia entre una y otra, esto con la finalidad de comparar los deslizamientos ocurridos entre una fecha y otra. Posteriormente se realizó un polígono mediante ArcGis en el cual se incluyeron ambas imágenes, con la finalidad de que una vez traslapadas quedaran dentro de la misma área.

2.2.2 Cartas geológico-mineras

Se requirieron cinco cartas geológico-mineras pertenecientes al área de estudio, con la finalidad de incorporar la información litológica y estructuras geológicas presentes. La descarga se realizó a través del Servicio Geológico Mexicano en formato PDF y escala 1:50,000. Las claves de cada una son las siguientes: E14-C27 Chichihualco, E14-C28 Chilpancingo, E14-C37 Jaleaca, E14-C38 Mazatlán, E14-C47 Xaltianguis.

2.2.3. Cartas topográficas

Se utilizaron seis cartas topográficas para la realización de diversos mapas temáticos y el Modelo Digital de Terreno (MDE). La instancia encargada de los datos vectoriales es el Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI). Las cartas se encuentran en formato vectorial y en escala 1:50,000, las claves de cada una de ellas son las siguientes: E14C27 Chichihualco, E14C26 Chilpancingo, E14C37 Jaleaca, E14C38 Mazatlán, E14C47 Xaltianguis, y E14C48 Tierra Colorada.

2.2.4 Carta edafológica

Se utilizaron datos edafológicos perteneciente a la información de la carta edafológica de la República Mexicana proporcionados por el INEGI. La carta presenta

una escala 1:1,000,000 y al igual que los datos topográficos, también se encuentra en formato vectorial. Los datos recabados se utilizaron para la generación del mapa de clasificación textural del cual se tratará más adelante (2.2.10.6).

2.2.5. Software ArcGis

Para la realización de los mapas temáticos fue necesario el uso de software especializado en el tratamiento de información geográfica. En este trabajo se requirió el uso del software ArcGis, cuya función es la edición, análisis, tratamiento, diseño e impresión de información espacialmente referenciada, asimismo permite recopilar, organizar, administrar, compartir y distribuir la información que requiera un análisis detallado (ESRI, 2017). Su uso fue fundamental para la construcción de los mapas temáticos y el modelo de susceptibilidad y el análisis espacial de los mismos y la interpretación y evaluación del mapa de susceptibilidad obtenido.

2.2.6 Software Dinamica EGO

Otra herramienta imprescindible en este trabajo fue el software Dinamica EGO, el cual permite modelar distintos aspectos ambientales, ayudado de un sistema de información geográfica (SIG), ya que este último permite almacenar y visualizar la información en forma de cartografía. El proceso consiste en el diseño del modelo espacial a través de algoritmos espaciales complejos, vinculando submodelos que pueden implementar enfoques multi-región y multi-escala en la simulación de fenómenos espacio-temporales (Dinamica EGO, 2016).

2.2.7 Pre procesamiento de las imágenes

Previo a la utilización de las imágenes satelitales es necesario la implementación de procesos para obtener información adicional derivada, tal como Tasselled Cap, índices de vegetación, Componentes Principales, entre otros. En este estudio sólo se abordaron los índices de Vegetación, específicamente los NDVI y los Componentes Principales, los cuales son descritos a continuación:

2.2.7.1 Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI)

Para la generación de uno de los insumos finales del modelo de susceptibilidad, se realizaron los índices NDVI a partir de las imágenes Aster de las dos fechas (10 de diciembre de 2012 y 13 de diciembre de 2013), los cuales estiman la fracción de la radiación fotosintética activa interceptada por la vegetación (Speranza y Zerda, 2002, Monteith, 1981) asumida por un rango de valores que van desde -1 a +1 calculados mediante la ecuación 1:

$$NDVI = (NIR - R)/(NIR + R) \quad (1)$$

Donde:

NDVI: Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada.

NIR: Reflectancia corregida atmosféricamente correspondiente al Infrarrojo cercano (banda 3N).

R: Reflectancia corregida atmosféricamente correspondiente al Rojo (banda 2).

El cálculo de las imágenes NDVI se realizó por álgebra de mapas con el software Dinamica EGO (fig. 14.).

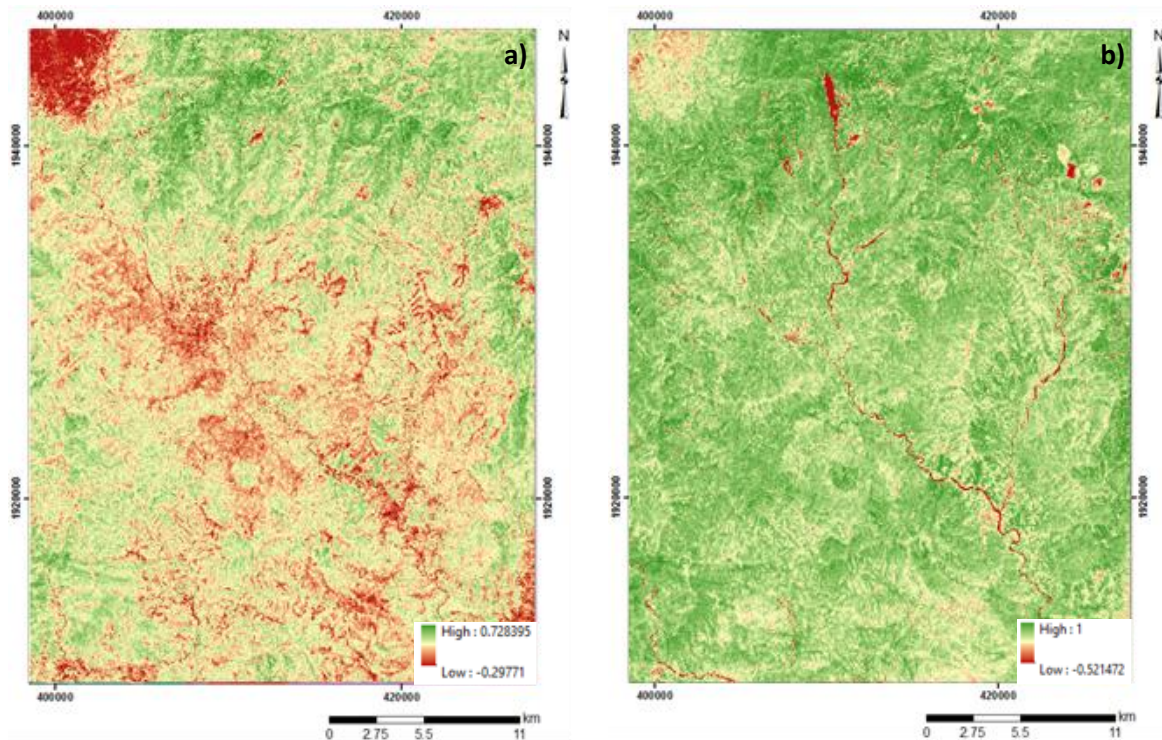


Figura 14. Índices de Vegetación de Diferencia Normalizada correspondientes a las fechas 10 de diciembre de 2012 (a) y 13 de diciembre de 2013 (b). En ambos casos, las zonas en color verde indican zonas cubiertas por vegetación, caso contrario a las zonas en color rojo las cuales indican zonas desprovistas de la misma.

2.2.7.2 Análisis de Componentes Principales (ACP).

Otro proceso que se desarrolló fue el Análisis de Componentes Principales (ACP), con lo cual se busca resumir un grupo amplio de variables en un conjunto más pequeño sin perder la parte significativa de la información original (Guerrero, 2010). Las bandas a las cuales se aplicó el ACP fueron la 1 (Verde), 2 (Rojo) y 3N (Infrarrojo cercano), mediante el software ArcGis se obtuvieron los tres CP de los cuales se utilizó el Componente Principal 1 de ambas fechas (CP1-F_{anterior} y CP1-F_{posterior}) (fig. 15).

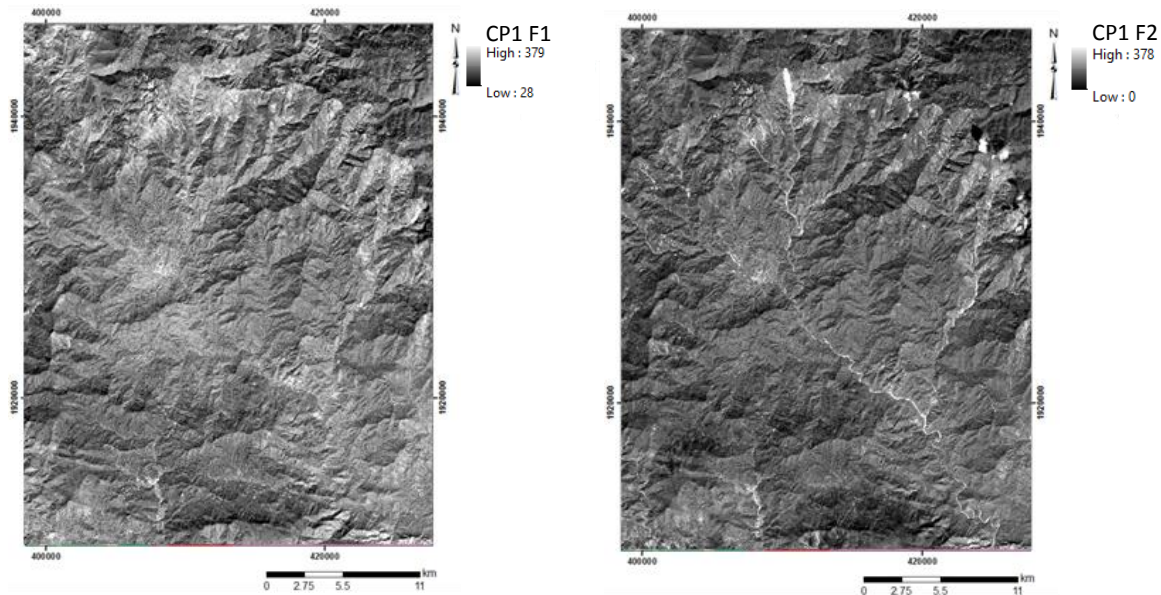


Figura 15. Componentes Principales 1 (CP1) de la fecha 1 (10 de diciembre de 2012) y de la fecha 2 (13 de diciembre de 2013) de las imágenes correspondientes al área de estudio.

Otro insumo utilizado en el proceso de detección de deslizamientos fue el mapa de pendientes, el cual se obtuvo de un modelo digital de elevaciones (MDE) generado a partir de las cartas topográficas escala 1:50,000 de la zona de estudio, con precisión vertical de 20 m, cortesía del Instituto Nacional de Estadística y Geografía de México (INEGI) descrito anteriormente.

La presencia de nubosidad del área de estudio implicó la construcción de máscaras de nubes para las imágenes de ambas fechas, para omitir su comportamiento reflexivo y por lo tanto, opaco en las imágenes, anulando la información de las categorías de la cubierta terrestre (Cea et al., 2005).

2.2.8 Reproyección al sistema UTM

Originalmente las imágenes ASTER presentan un sistema de coordenadas geodésicas cuyos valores están representados por el elipsoide de referencia WGS-84 (*World Geodestic System 84* por sus siglas en inglés) cuyos datos están expresados en grados, minutos y segundos (latitud y longitud). Se realizó la reproyección a coordenadas UTM (*Universal Transverse Mercator*, por sus siglas en inglés) para estimar valores proyectados en metros, con la finalidad de facilitar cálculos de distancia y superficie. Se utilizó en software ArcGis 10.1 en el módulo Projections and Transformations.

2.2.9 Mapas temáticos

La interpretación y caracterización de los factores que intervienen en los procesos de remoción en masa están representados por distintos mapas temáticos que en su conjunto ayudaron a la generación del mapa de susceptibilidad. El proceso consistió en identificar un conjunto de variables que involucraron factores físicos como la geología

regional, el relieve, la edafología y la precipitación. A continuación se muestra el resumen de los mapas temáticos y sus mapas finales (fig. 16).

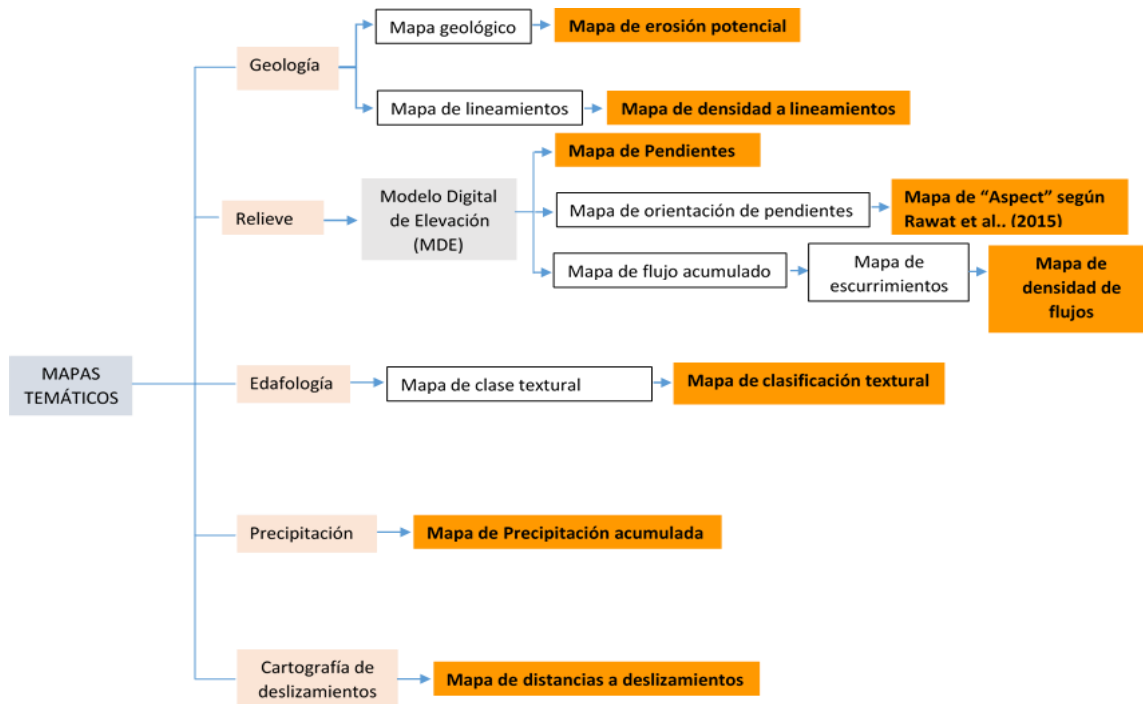


Figura 16. Resumen de mapas temáticos iniciales y su producto que servirán como insumos en el modelo de susceptibilidad a procesos de remoción en masa (recuadros en color naranja).

2.2.9.1 Erosión potencial

La caracterización geológica provee información sustancial de los materiales que conforman e influyen en la construcción del relieve a través de sus propiedades mecánicas, físicas y químicas. Para involucrar esta información, en este trabajo se incluyó la información geológica como insumo del modelo de susceptibilidad, de la cual, se utilizaron los conjuntos de datos geológicos. Para este caso, se realizó el mapa litológico que muestra las unidades aflorantes en el área de estudio (fig.17). Se utilizaron 5 cartas geológico-mineras en formato *pdf* del Servicio Geológico Mexicano, escala 1:50 000 con clave E14-C27, E14-C28, E14-C37, E14-C38, E14-C47. Inicialmente, se tomaron puntos de control para la georreferenciación de cada uno de los archivos pdf usando el datum de los datos cartográficos iniciales y las imágenes satelitales a través de ArcGis; posteriormente se generaron polígonos a través de archivos en formato vectorial (shp) individuales de cada unidad litológica, respetando los límites de cada una de ellas y se les asignó el color correspondiente a la edad de cada formación, con base al *Chronostratigraphic chart* (International Commission on Stratigraphy, 2017). Se realizó la unión de todos los archivos resultantes y finalmente se hizo la conversión a imagen en formato raster.

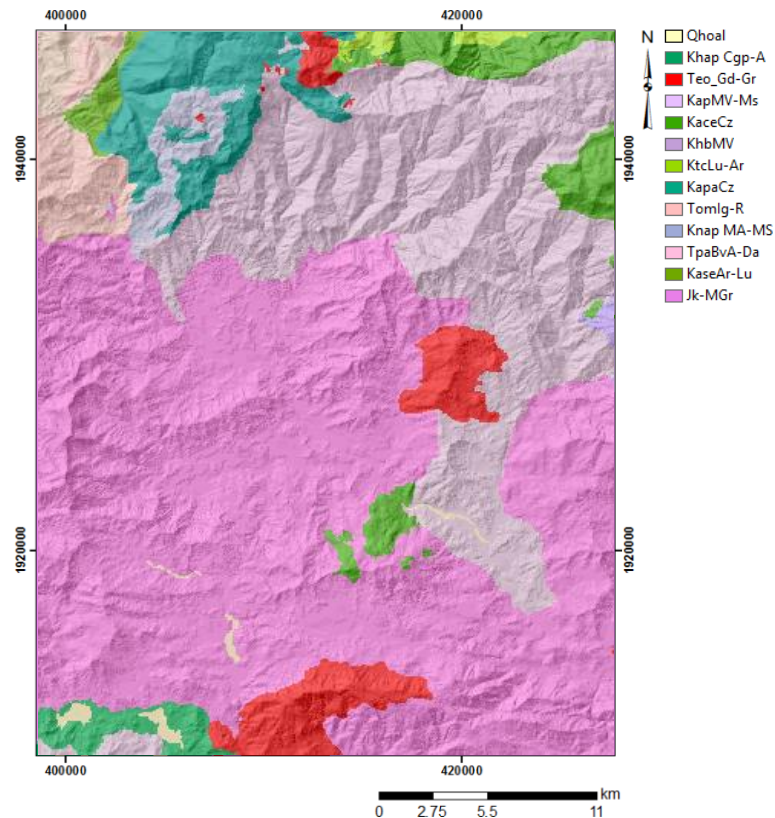


Figura 17. Mapa litológico del área de estudio con el registro de 13 unidades litológicas.

Finalmente, con el uso del mapa de las unidades litológicas se realizó un mapa que englobó las características físicas y mecánicas de las formaciones geológicas del área de estudio. De acuerdo al mapa litológico, se categorizaron las unidades litológicas con base a Aguiló-Alonso et al. (2006) el cual hace referencia al grado de cohesión, erosión potencial y comportamiento mecánico de cada tipo de roca, según estas características, les asignó una clasificación de susceptibilidad a procesos de remoción en masa (tabla 5). Para este trabajo, se determinó utilizar el parámetro de ‘erosión potencial’ debido a que hace referencia a la erosión por escorrentía superficial por factores hidrológicos, ya que teóricamente, el factor agua es uno de los principales detonantes en los procesos de remoción en masa. El mapa final se categorizó del 1 al 5 (muy bajo, bajo, medio, alto y muy alto respectivamente) con base al análisis del contenido litológico de las rocas presentes en el área de estudio, el proceso utilizó el software Dinamica EGO para su clasificación; el mapa de erosión potencial resultante se incorporó en el modelo de susceptibilidad a procesos de remoción en masa.

Tabla 5. Categorización de unidades litológicas con base a Aguiló-Alonso et al., (2006).

Grupo de materiales/familias o tipo de roca		Coherencia	Erosión potencial	Comportamiento mecánico
Ígneas	Volcánicas (tipo coladas basálticas)	Alta	Media	Variable
	Plutónicas (tipo graniode)	Alta	Muy baja	Alta
	Filonianas (tipo cuarzo)	Alta	Muy baja	Alta
Metamórficas (según el grado)	Gneis	Alta	Muy baja	Alta
	Esquistos feldespáticos	Media	Media	Baja
	Esquistos micáceos	Baja	Media	Muy baja
	Cuarcita	Alta	Baja	Alta
	Mármoles/calizas cristalinas	Alta	Baja	Alta
	Metapizarras-filitas	Baja	Alta	Baja
	Metaarenita	Alta	Baja	Alta
Sedimentarias				
<i>Detríticas</i>	Areniscas/conglomerado silíceo	Media	Baja	Baja-media
	Arena/aglomerado silíceo	Baja-M.Baja	Baja	Muy baja
	Arcosa (mixto silíceo-arcilloso)	Media	Media	Baja-media
	Arcillas y similar (lutita/pizarra)	Muy baja	Muy alta	Baja
<i>Mixtas</i>	Margas	Baja	alta	Baja
<i>Químicas y organógenas</i>	Caliza/dolomía	Alta	Baja	Baja
	Yeso/sales	Baja-M.Baja	Baja	Baja
	Orgánicas	Baja	Baja	Baja

2.2.9.2 Densidad a lineamientos

Los lineamientos o estructuras geológicas son insumos cartografiables que reflejan fenómenos superficiales de los materiales litológicos del área de estudio. La cercanía a los lineamientos implica vulnerabilidad a la ocurrencia de procesos de remoción debido al desarrollo de un plano estructural débil, lo que conduce a la fragmentación y al desgaste de la roca (Wang et al., 2017); aunado a lo anterior, la incidencia de uno o más planos de discontinuidades incrementa el grado de fracturación de la roca y, por lo tanto, una mayor susceptibilidad a procesos de remoción.

Con base a lo anterior, se construyó un mapa de lineamientos con ayuda de datos vectoriales de la geología del INEGI cuya información corresponde a los datos 1:250 000 del estado de Guerrero. De esta información sólo se requirieron los datos vectoriales de las estructuras geológicas que involucraran al área de estudio, dicho proceso se generó a través del recorte de la zona mediante ArcGis. Por otro lado, se realizaron los trazos de los elementos estructurales a partir de las 5 cartas geológico-mineras del SGM antes mencionadas. El proceso fue similar al realizado para el mapa de unidades litológicas, solo que en este caso el proceso se realizó a través del módulo de líneas y puntos. Posteriormente, se realizó la conversión a formato raster y para finalizar, se realizó la unión entre el mapa raster de los datos estructurales del SGM con el raster de los lineamientos del INEGI (fig. 18).

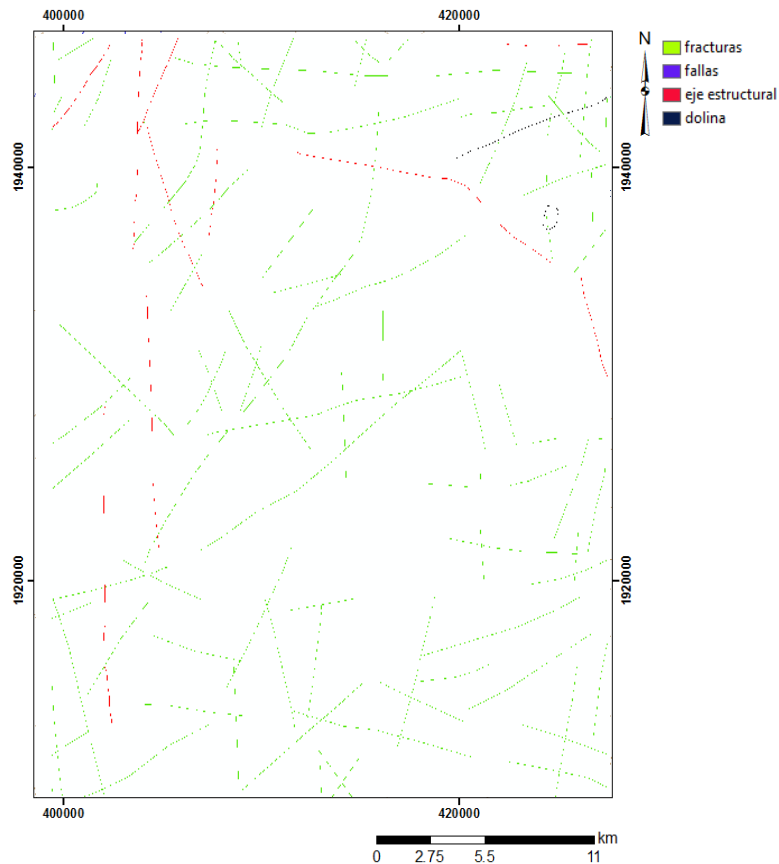


Figura 18. Lineamientos del área de estudio: fallas, fracturas, ejes estructurales y dolinas.

Para la integración final se generó un mapa de densidad de lineamientos en ArcGis, con el fin de calcular una magnitud por unidad de área de un lineamiento que se encuentra dentro de un radio específico alrededor de cada pixel, sin especificar el tipo de lineamiento presente. En este caso, se utilizó un radio de 500 metros de acuerdo al promedio de las distancias de los deslizamientos del inventario a los lineamientos. El mapa final servirá como insumo en el modelo de susceptibilidad.

2.2.9.3 Pendientes

Las características geomorfológicas del área de estudio se obtuvieron a través de la generación de mapas que involucran inicialmente el modelo digital de elevación (MDE), dichos procesos se realizaron a través de un Sistema de Información Geográfica (SIG) utilizando los datos vectoriales de 6 cartas topográficas escala 1:50 000 del INEGI, cuyas claves son E14C27, E14C26, E14C37, E14C38, E14C47, E14C48. Los datos descargados se encuentran en formato vectorial y fueron tratados en ArcGis a través de la herramienta *3D Analyst Tool*; el proceso consiste en la creación de un conjunto de datos de una Red Irregular Triangulada (TIN). Se generó la unión de las 6 cartas y posteriormente se hizo el recorte al área de estudio. El MDE final se ajustó a la resolución

espacial de 15 metros por pixel para igualarlo con la resolución espacial de las imágenes ASTER (fig.19).

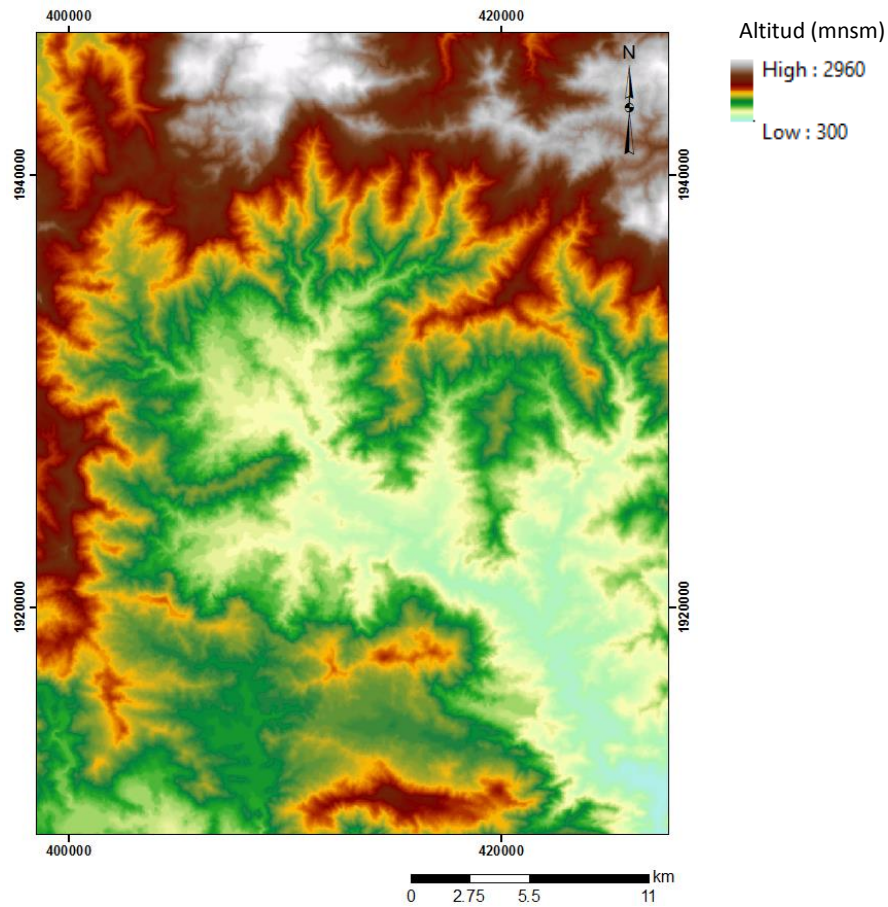


Figura 19. Modelo digital de elevación (MDE) del área de estudio.

La pendiente juega un papel importante en la generación de los procesos de remoción en masa, en ocasiones aún las pendientes más bajas pueden ser propicias para la generación de estos procesos, es por eso que la caracterización de este factor está dentro de los insumos en el modelado de susceptibilidad a procesos de remoción de masa.

Los valores de altura obtenidos a través del MDE permitieron la creación del mapa de pendientes a través de la función *slope* en *Spatial Analyst Toolbar* en ArcGis, cuyos rasgos son establecidos a través del análisis de perfiles topográficos; se calcula la tasa de cambio máxima en Z entre cada célula y sus vecinas. El cálculo se realiza con la función gradiente, es decir, las diferencias de alturas vs.diferencias de distancias (fig. 20).

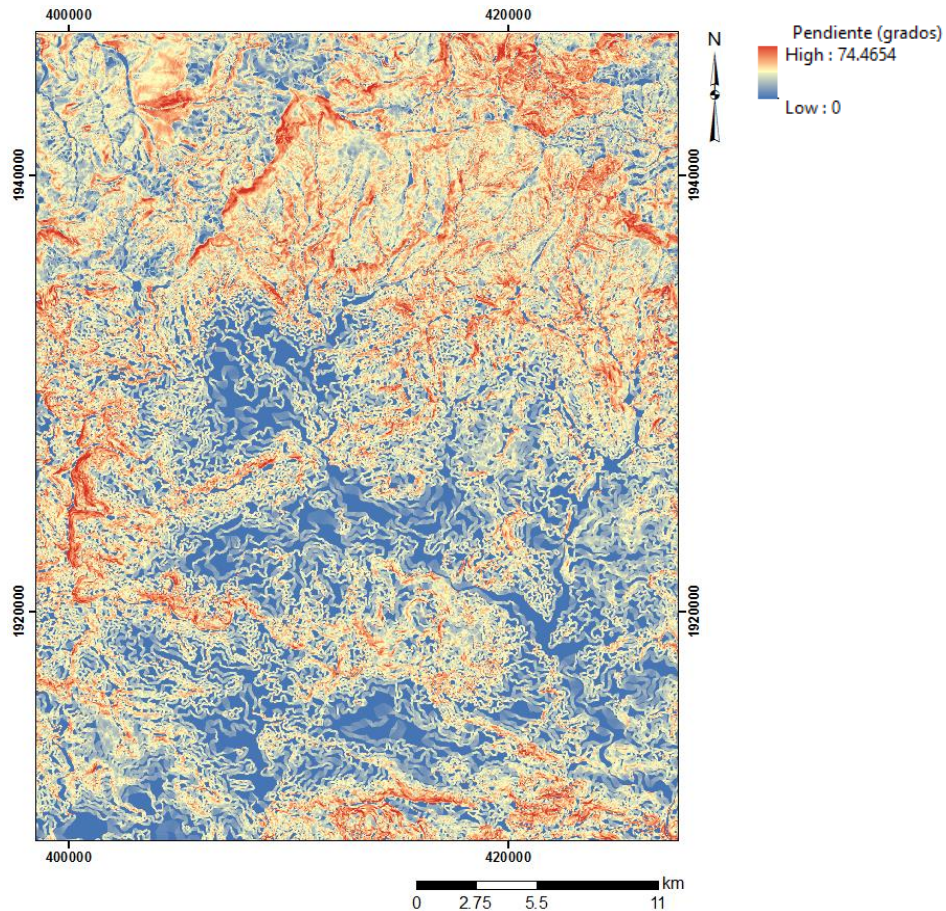


Figura 20. Distribución espacial de las pendientes del terreno

Una vez construido el mapa de pendientes se procedió a la categorización de este insumo, donde se tomó una pendiente de 5° como valor mínimo a considerar para la generación de movimientos en masa, según Alcántara-Ayala (2000). El mapa final se categorizó con la pendiente mínima y se asignó el valor de 1 a todas aquellas pendientes mayores o iguales a 5° con la ayuda del software Dinamica EGO.

2.2.9.4 Orientación de las pendientes

De acuerdo a Rawat et al., (2015), se generó un mapa de orientación de las pendientes del terreno donde se estimó el rumbo preferencial de los deslizamientos. El proceso consistió en la integración del MDE a través de *3D Analyst Tools* en el apartado de *Raster Surface* y finalmente *Aspect*, en el cual se identifica la dirección de la pendiente descendiente de la tasa máxima de cambio de valor de cada célula a sus vecinos más cercanos. Los valores que muestra el mapa refleja la dirección del azimut en sentido horario de la pendiente a partir del Norte (fig. 21).

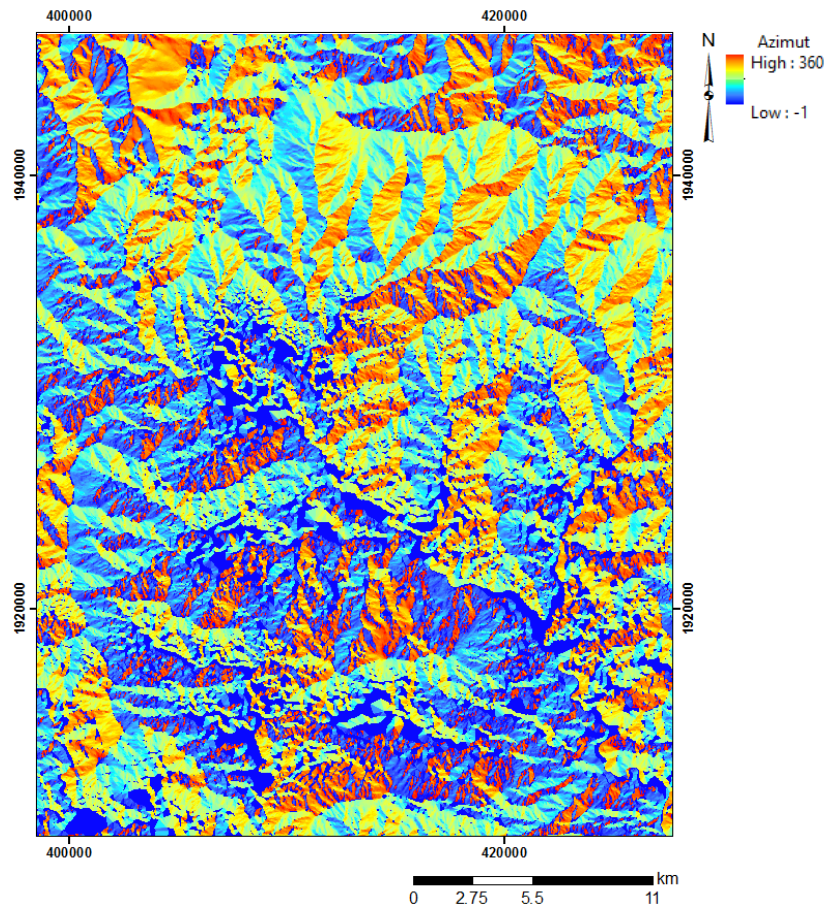


Figura 21. Mapa de la orientación de las pendientes.

Con el mapa final de la orientación de las pendientes, se generaron 8 clases distintas en el software de Dinamica EGO, la clasificación fue propuesta por Rawat et al., (2015), y están desglosadas en la tabla 6 y representadas en la figura 22:

Tabla 6. Clasificación de los frentes de las pendientes con base al azimut según Rawat et., (2015).

Azimut	Grados
Frente Norte	337.50-22.50
Noreste	22.50-67.50
Frente Este	67.50-112.50
Sureste	112.50-157.50
Frente Sur	157.50-202.50
Suroeste	202.50-247.50
Frente oeste	247.50-292.50
Noroeste	292.50-337.50

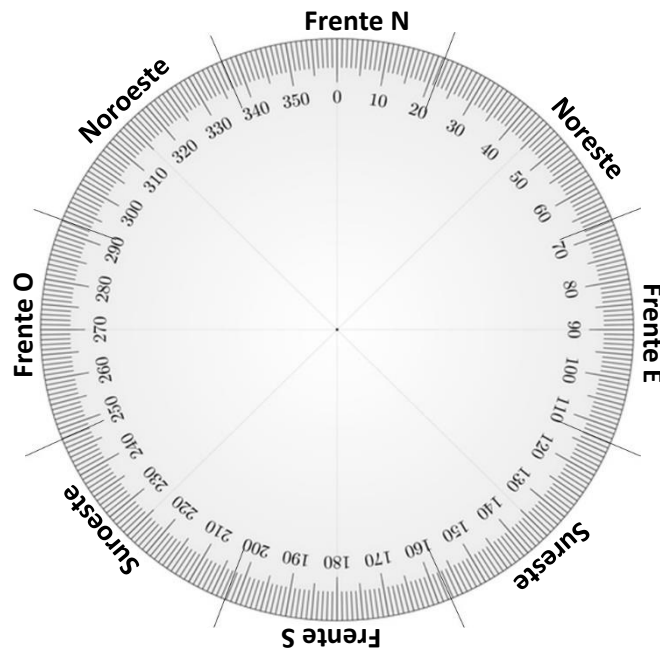


Figura 22. Representación gráfica de las clases propuestas por Rawat et al., (2015).

2.2.9.5 Densidad a flujos

Dada la importancia de las características hidrológicas del área de estudio y considerando su relevancia como factor detonante, es necesario conocer las trayectorias y la concentración de los flujos o corrientes. La idea principal radica en que aquellos materiales cercanos a la superficie son susceptibles a fluir en relación con las trayectorias hídricas superficiales (Pou, 2013), por lo tanto, sugieren una relación con los procesos de remoción en masa. La caracterización de este factor está determinada por los movimientos hidrológicos lineales, los cuales están representados a través de mapas de flujos. Como etapa inicial del mapa de distancia a flujos, se realizó el mapa de flujo acumulado el cual mide el número de líneas de flujo que atraviesa cada pixel a través de su trayectoria (Hernández-Mena, 2008) y ayuda al cálculo del área de aporte del flujo en la superficie (Pacheco-Gil, 2013). El proceso consistió en incorporar el MDE inicial del cual, a partir de las elevaciones de cada pixel, se obtiene la dirección del flujo de agua que atraviesa por cada pixel; este proceso se realizó a través de ArcGis en el módulo *spatial analyst tools, hidrology* (fig. 23).

Con el mapa resultante, se generó el mapa de escurrimientos a partir del mapa de flujo acumulado. Se realizó una reclasificación de la información de los pixeles para la obtención de un mapa binario, a través de ArcGis, con el módulo *Spatial Analyst Tools, Reclassify*. El ejercicio consistió en categorizar los pixeles con base a su valor, la premisa indicó que los pixeles que contuvieran valores ≥ 750 se consideraran como un flujo y en consecuencia se les asignó el número 1 y por defecto a los pixeles con valores <750 se les asignó el valor de 0 (Fig. 24).

El insumo final consistió en la generación de un mapa de densidad de flujos y cuya realización es similar al procedimiento del mapa de densidad a lineamientos. Inicialmente, como requerimiento del proceso de *line density* de ArcGis, fue necesario transformar el mapa de escurrimientos a formato vectorial. Finalmente se calcularon los flujos que se interceptaran en un punto a partir de un radio máximo de 200 metros de acuerdo a trabajos previos (Wang et al., 2017).

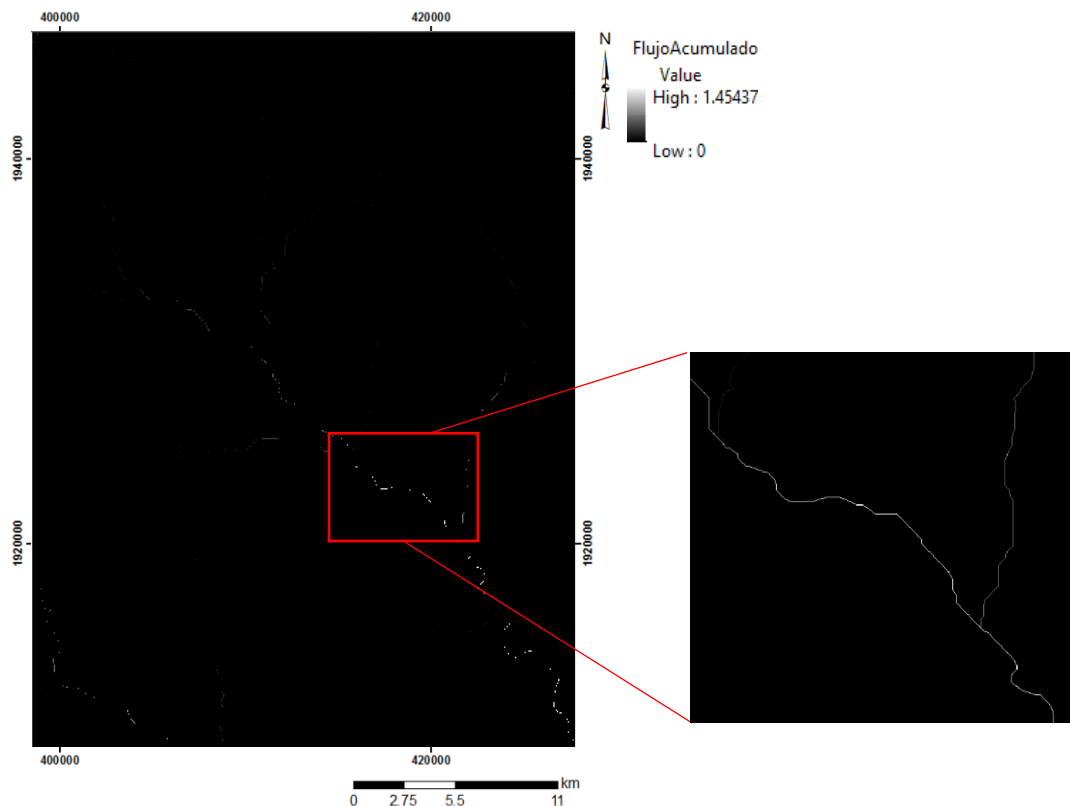


Figura 23. Mapa de flujo acumulado. Las áreas de colores claros muestran los pixeles con mayor acumulación de flujo, caso contrario a las zonas oscuras con nula aparición de flujos superficiales.

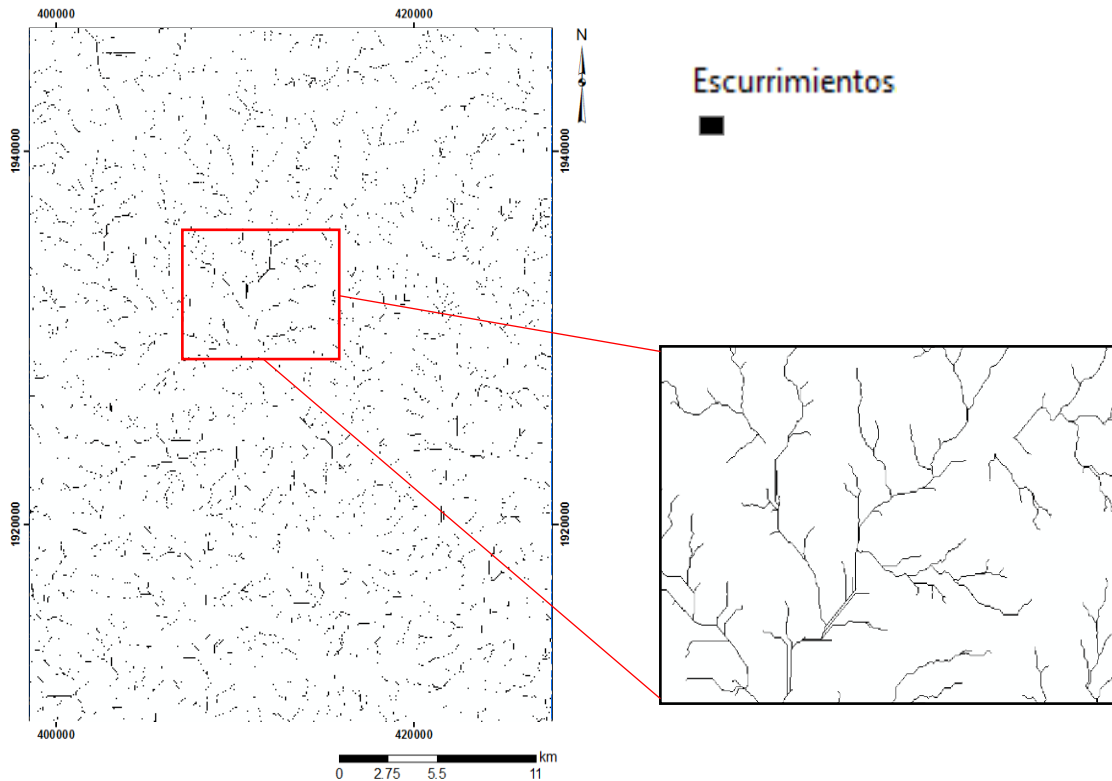


Figura 24. Mapa de escurrimientos binario que indica en color negro los valores de flujo acumulado ≥ 750 .

2.2.9.6 Suelos-Clasificación textural

El tipo de suelo presente en el área de estudio proporciona información del comportamiento mecánico y su influencia en los procesos de remoción de masa. Como parte de los insumos, se generó un mapa con base a su clasificación textural. Se utilizó la carta edafológica del INEGI 1:1000 000 de México (INEGI, 2014), cuya información muestra la distribución de suelos y su clasificación con base al sistema FAO/UNESCO (1970); los datos de salida se encuentran en formato vectorial.

De la disponibilidad de los datos de la carta, sólo se requirieron los correspondientes a la clasificación textural; se identificaron tres clases: fino, medio y grueso. Con base a esta información se realizó el recorte del área de estudio y la conversión de formato vectorial a raster (fig. 25).

Posteriormente se generó la categorización del insumo final en tres categorías, de acuerdo a su grado de susceptibilidad y con base a la granulometría presente (tabla 7). El mapa final se incluyó como insumo del modelo de susceptibilidad.

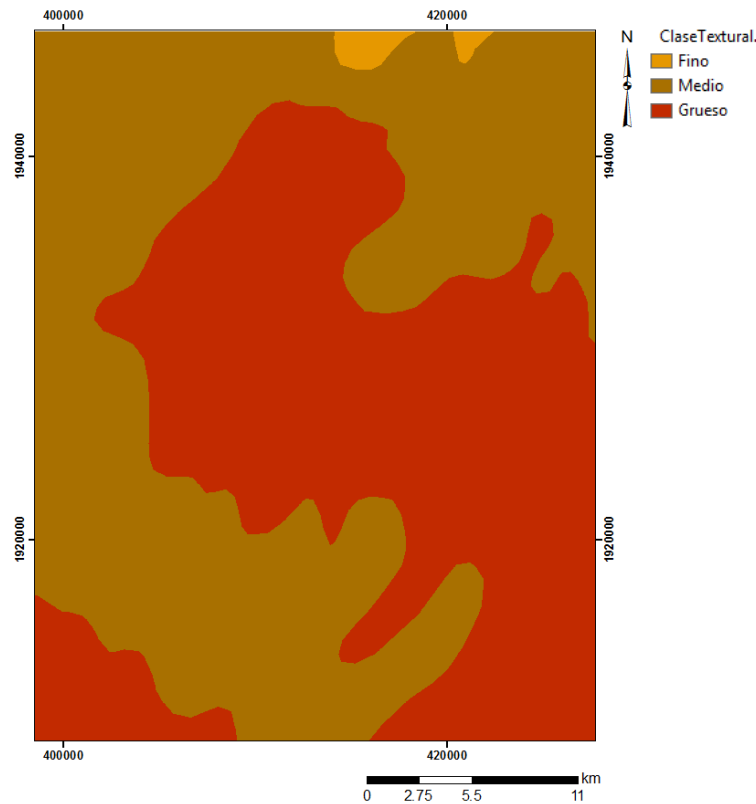


Figura 25. Mapa de clase textural de los suelos del área de estudio.

Tabla 7. Categorización de la clase textural de los suelos.

Clase textural	Grado de susceptibilidad
Fino	Baja
Medio	Media
Grueso	Alta

2.2.9.7 Precipitación

La precipitación es uno de los factores más importantes en la influencia del desarrollo de procesos de remoción. La infiltración de lluvia en las rocas reduce la resistencia al corte del suelo, así como la fricción entre el suelo y la roca madre, lo que induce de manera más rápida la incidencia de procesos de remoción (Wang et al., 2017). En esta fase se identificaron las estaciones meteorológicas pertenecientes al Servicio Meteorológico Nacional (SMN) que estuvieran dentro del área de estudio y cercanas a ella. Resultaron 29 estaciones en total, de las cuales, se obtuvo información de la precipitación acumulada de los meses enero a septiembre del año 2013 (tabla 8).

Tabla 8. Datos de precipitación acumulada y su ubicación

Nº. de estación	Nombre	Coordenadas UTM		Precipitación acumulada
1	Omiltemi	427038.4195	1941300.7571	4120.70
2	Tierra Colorada	442391.1661	1897151.1329	2348.60
3	San Juan de las Flores	351426.4047	1915126.4451	2168.50
4	Atoyac (DGE)	349361.8393	1903368.3504	2153.60
5	Río Santiago	360000.0594	1908119.1275	2002.00
6	Acapulco de Juárez (SMN)	403538.3334	1864995.5877	1820.50
7	Acapulco Km. 21	427243.0878	1874150.2916	1774.70
8	Laguna Tres Palos	417075.0932	1860881.2979	1624.90
9	Tlacotepec	396510.9948	1967190.9032	1617.50
10	Laguna de Nuxco	313139.1601	1903450.0318	1359.40
11	El Ocotito	437960.6055	1907305.3223	1340.30
12	Arroyo Frío	329313.5437	1926120.3732	1275.00
13	Zacualpan	358900.8684	1889899.0363	1243.00
14	Tecpan	333237.6243	1907888.6785	1237.00
15	Huitziltepec	448998.1127	1963206.7991	1185.10
16	Carrera Larga	381158.4084	1884503.8462	1172.80
17	San Jerónimo	338364.4522	1894936.6250	1167.00
18	Mezcala	436309.7669	1982666.8803	1121.80
19	Tehuehuetla	352962.6149	1971769.0785	1118.70
20	Chilpancingo (SMN)	446847.4669	1940624.1466	1065.00
21	Petaquillas	451812.3173	1933328.2533	1030.00
22	Nancintla	372483.3245	1962689.0529	1024.50
23	Chichihualco	425641.0997	1954060.2068	909.00
24	Cacalutla	356179.2896	1893882.9424	856.50
25	Zumpango del Río	444284.9462	1952094.2152	724.20
26	Laguna de Coyuca	384241.6145	1880675.3460	627.60
27	Tepetixtla	381742.2005	1903863.8408	623.50
28	Yextla	400972.7674	1946544.6778	618.60
29	La sabana	408194.6518	1867371.8678	407.70

En la tabla 8 se aprecia mayor acumulación de precipitación, principalmente hacia la zona Este del área de estudio, se ve reflejado en la estaciones correspondientes a Omiltemi y Tierra Colorada, municipio de Juan R. Escudero, esto en resultado a la interacción de las partes más elevadas de la serranía Noreste del área de estudio; en contraparte se observan precipitaciones acumuladas menores hacia la parte Sur del área de estudio y en particular en zonas planas desprovistas de vegetación. La discusión de los datos de precipitación será abordada a detalle más adelante.

Los datos se incorporaron a través de una tabla que fue exportada como un vectorial de puntos en ArcGis. Posteriormente los datos de identificación de cada estación

meteorológica, su ubicación X y Y (coordenadas) y la precipitación acumulada, permitieron la generación de un Modelo Digital de Precipitaciones. El producto final de precipitación acumulada, en conjunto con el mapa de clase textural y el mapa de pendientes, generaron el insumo denominado *efecto potencial de precipitación* para incorporarse en el modelo de susceptibilidad a procesos de remoción en masa, del cual se trata más adelante en el documento (apartado 3.1.7).

2.2.9.8 Distancia a deslizamientos

El mapeo de deslizamientos preexistentes sirve como fuente de información para entender las condiciones de desarrollo y ocurrencia de estos eventos. La cercanía de un punto determinado con un deslizamiento implica de cierto modo una zona de susceptibilidad para la ocurrencia de un evento nuevo debido a la alteración de las características iniciales del terreno.

Debido a la resolución espacial de las imágenes usadas en este trabajo, es difícil caracterizar el tipo de proceso de remoción ocurrente, por tal motivo se utilizará el término “deslizamiento” para referir a cualquier tipo de evento cartografiado que haga referencia a los procesos de remoción de masa.

2.2.9.8.1 Cartografía de deslizamientos

Existen varios estudios de teledetección enfocados en la generación de la cartografía de susceptibilidad a procesos de remoción en masa, muchos de ellos parten de técnicas que incorporan métodos estadísticos cuya función es la predicción, modelado y generación de dicha cartografía a partir de inventarios que permitan la visualización de los procesos de remoción de masa con la intención de ayudar a la “capacidad predictiva de los modelos”. La generación de inventarios puede tener una mejor respuesta utilizando técnicas de fotointerpretación aérea, investigación histórica y trabajo de campo, esto con la finalidad de detallar el proceso y caracterizarlo en caso de tener dificultades con la información histórica y su integración en el modelo (Ramos-Bernal et al., 2015)

Para la generación de esta etapa es necesario la generación de insumos que en su conjunto permitiera la realización del modelo para la cartografía de deslizamientos, estos procesos son mencionados a continuación:

2.2.9.8.2 Integración de polígonos de deslizamientos

Se integró un inventario de una muestra de deslizamientos, generado mediante herramientas de Google Earth. El objetivo del inventario es contar con información veraz y oportuna y considerarla verdad terreno para ser aplicada como polígonos de entrenamiento en la calibración del modelo creado y para la validación de los resultados obtenidos del proceso global de detección de deslizamientos.

Sobre la imagen Google Earth del 12 de agosto de 2014, la cual es la más cercana después de registrados los deslizamientos causados por la tormenta “Manuel” y el

huracán “Ingrid”; se identificaron y digitalizaron los polígonos de deslizamientos visibles con áreas mayores a 450 m², que corresponden a deslizamientos mayores a 2 píxeles en las imágenes ASTER con resolución espacial de 15 m (fig. 26).

El inventario final presenta un total de 70 polígonos que fueron transformados en formato raster y contiene un total de 26,520 píxeles, de los cuales 7,613 fueron categorizados como deslizamientos y 18,907 fueron categorizados como No-deslizamientos.

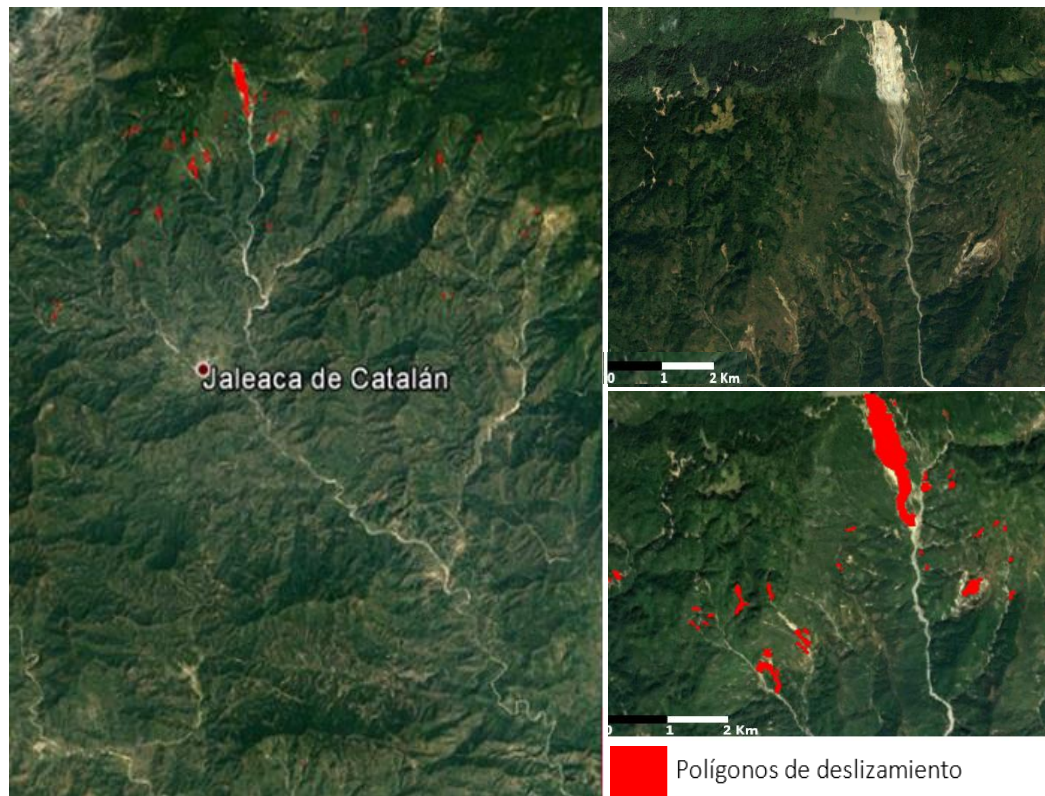


Figura. 26 Inventario de deslizamientos del área de estudio utilizando imágenes de Google Earth correspondientes al 12 de agosto de 2014.

2.2.9.8.3 Proceso de detección de cambios

Se desarrolló una regresión lineal con las imágenes NDVI y CP1, con el fin de estimar los valores esperados por el modelo de regresión (modelados) para la segunda fecha y luego determinar las variaciones existentes con los valores reales correspondientes (residuales). Estas relaciones son representadas a partir de observaciones entre ambas variables, en las cuales se ajusta una ecuación que las relaciona numéricamente, esta relación está dada por la ecuación 2.

$$y = mx + b \quad (2)$$

Donde:

x = Imagen de Fecha_{anterior}.

y = Imagen de Fecha_{posterior}.

Los parámetros m y b corresponden a la pendiente y la ordenada de la línea de regresión de la ecuación modelada. A partir de la ecuación de regresión lineal se calcularon los mapas de residuales (diferencias continuas) utilizando la ecuación 3.

$$Ri = y_{Ti} - yi \quad (3)$$

Donde:

Ri = Residual del pixel i .

y_{Ti} = Valor del pixel obtenido por Regresión Lineal (CP1 o NDVI).

yi = Valor del pixel i en la imagen de fecha_{posterior} (CP1 o NDVI).

Los valores obtenidos por el modelo de predicción en la imagen esperada serán iguales a los valores reales de los pixeles de la fecha posterior, siempre y cuando no se hayan registrado cambios durante el periodo analizado (Residual = 0). Por el contrario, en caso de haber cambios, estos estarán registrados en el correspondiente valor residual, cuya magnitud indicará la intensidad del cambio.

2.2.9.8.3.1 Método de umbralización

Los mapas de residuales resultantes con imágenes CP1 y NDVI contienen valores que representan la magnitud del cambio continuo de cada uno de los pixeles. Para generar un mapa binario final de cambio fue necesario segmentar las imágenes de residuales a partir de un umbral de cambio, con lo cual los pixeles con valores superiores al umbral se categorizaron como un cambio, o un No-cambio en caso contrario (Chuvieco, 2010). Esta condición de cambio fue definida mediante un análisis basado en la distribución de frecuencias, que involucra el cálculo de la media y la desviación estándar de las imágenes de cambios continuos (residuales), y fue representado por la ecuación 4.

$$T = \mu \pm 2\sigma \quad (4)$$

Donde:

T = Umbral (Threshold).

μ = Valor medio de la imagen residual (CP1 o NDVI).

σ = Desviación estándar de la imagen residual.

Los residuales se expresaron a través de un histograma en el cual se identificaron y categorizaron los cambios de los No-cambios. De acuerdo a la ecuación se obtuvieron dos valores de umbrales, uno para cada cola del histograma (fig. 27).

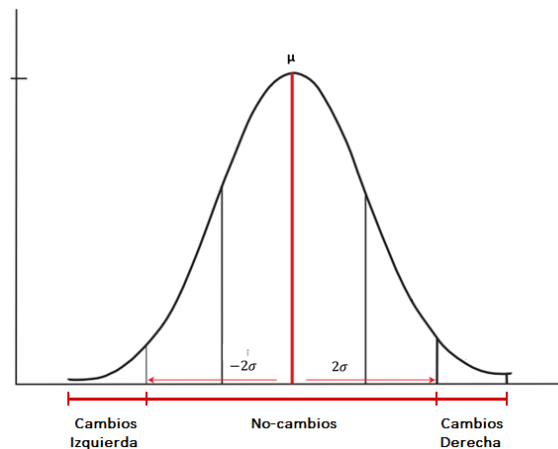


Figura 27. Distribución de los cambios y No-cambios de los valores de los píxeles resultantes del proceso de umbralización del histograma de frecuencias de residuales.

El cálculo del umbral permitió identificar los píxeles cuyos valores fueron menores que el umbral izquierdo o mayores que el umbral derecho (Fig. 27).

Los datos mostrados en el histograma encontrados hacia la cola de la derecha fueron los de importancia en este proceso, ya que evidenciaron cambios de áreas con vegetación a suelo desnudo, lo que indicó zonas con ocurrencia de deslizamientos. Aunado a lo anterior, para que se cumpliera la condición de un píxel categorizado, debió incluir una pendiente mayor o igual a 5° en la condición, el cual fue un umbral definido de acuerdo a estudios previos (Alcántara-Ayala, 2000).

2.2.9.8.4 Evaluación de la precisión de la detección

La evaluación de la precisión de los mapas finales de deslizamientos obtenidos, requirió de la construcción de matrices de confusión, cuya función fue generar una relación entre dos series de datos (Chuvieco, 2010), validando los resultados de detección de deslizamientos a través de la evaluación de los errores de omisión y comisión.

El cruce de datos se dio a partir del mapa resultante obtenido del modelo de detección, contra el mapa de inventario de deslizamientos (verdad terreno). Posteriormente se derivó el índice de concordancia Kappa cuyo objetivo fue cuantificar la diferencia del acuerdo entre el mapa de deslizamientos detectados, la verdad terreno y la diferencia esperada por azar a través de la definición del grado de ajuste mediante la precisión de la categorización (Chuvieco, 2010). La ecuación 5 que representa el Índice de Kappa.

$$k = (n\sum_{i=1,n}X_{ii} - \sum_{i=1,n}X_{i+}X_{+i}) / (n^2 - \sum_{i=1,n}X_{i+}X_{+i}) \quad (5)$$

Donde:

k : índice Kappa.

n : tamaño de la muestra.

X_{ii} : acuerdo observado.

$X_{i+}X_{+i}$: acuerdo esperado en cada categoría i .

El índice de Kappa ayudó a conocer el grado de diferencia entre el acuerdo observado y el aleatorio esperado. El acuerdo observado sobresale en la matriz de confusión, mientras que el acuerdo esperado se utiliza para generar el ajuste entre el mapa y la realidad (verdad terreno) mediante la aleatoriedad (Chuvienco, 2010). La figura 28 muestra el esquema general de la metodología aplicada en la detección de cambios.

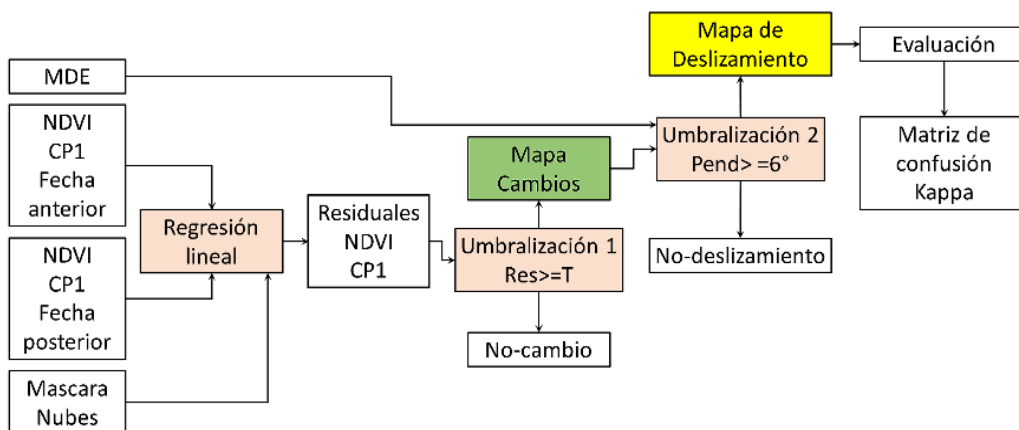


Figura 28. Esquema global de la metodología aplicada.

La modelación de la metodología mostrada, fue desarrollada a través de Dinamica EGO.

Posterior a la evaluación del mapa final del proceso de la cartografía de deslizamientos, se realizó el mapa de distancias a deslizamientos como insumo del modelo de susceptibilidad a procesos de remoción en masa. Inicialmente, el mapa resultante se procesó a través de Dinamica EGO, donde el punto inicial de partida para la medición de la distancia estuvo dado por la resolución espacial (15 metros por pixel). El pixel más cercano a un deslizamiento dio la distancia existente entre ellos. La premisa partió de que a menor distancia a un deslizamiento existente, mayor sería la probabilidad de ocurrencia de un deslizamiento nuevo, debido a la inestabilidad del material adyacente.

El producto final de este procedimiento es un mapa de distancias a deslizamientos y servirá como insumo adicional en la generación del modelo de susceptibilidad a procesos de remoción en masa.

2.2.10 Modelo de susceptibilidad a procesos de remoción en masa

La zonificación de las áreas propensas a sufrir procesos de remoción en masa consiste en generar una zonificación categorizada del terreno a partir del análisis de los factores que tienen influencia en el desarrollo de los movimientos, evaluando su grado de aportación; acumulando para cada pixel la aportación de cada factor en conjugación con otros; de esta manera se logra una contribución relativa al peligro global que presente una unidad de área.

2.2.10.1.1 Normalización de los mapas temáticos

Los mapas finales de los procesos explicados previamente representan las aportaciones individuales de cada uno de los factores considerados y dieron como resultados valores tanto continuos como categóricos, por lo tanto, es necesario normalizar los datos estableciendo valores mínimos y máximos para así asignarle un valor normalizado a cada uno.

De esta forma, por conveniencia se definió que los mapas normalizados registrarán valores entre 0 (aportación nula) ó 1 (aportación máxima.)

El proceso de normalización para cada uno de los mapas fue distinto, dependiendo del tipo de información que representan. Dicha normalización fue desarrollada con apoyo del software Dinamica EGO y se describen a continuación con mayor detalle.

2.2.10.1.2 Erosión potencial

Los valores finales del análisis de erosión potencial dieron como resultado un mapa categórico de cinco clases (1-5). A partir de estos datos se obtuvo la relación de cada clase y el valor máximo (5). Los valores normalizados representan el grado de aportación del factor de erosión potencial en el modelo global de susceptibilidad (tabla 9).

Tabla 9. Valores de normalización del mapa de erosión potencial

Clase	Normaliación	Valores Normalizados
1 (muy bajo)	1/5	0.2
2 (bajo)	2/5	0.4
3 (medio)	3/5	0.6
4 (alto)	4/5	0.8
5 (muy alto)	5/5	1

2.2.10.1.3 Densidad a lineamientos

El mapa de densidad a lineamientos contiene valores continuos de las densidades que se encuentran dentro de un límite establecido. En este caso, se estableció como límite un radio de 500 m, de forma que los pixeles que se encuentran fuera de este límite no aportan información útil para la generación del modelo de susceptibilidad y, por lo tanto, no son zonas susceptibles a procesos de remoción en masa.

El rango de valores del mapa de densidad va de 0 a 0.00254663. Tomando el valor máximo como base para la normalización; la ecuación (ec. 6) genera una relación del valor de densidad de cualquier pixel y el valor máximo.

$$P_{ni} = \frac{P_i}{V.M.} \quad (6)$$

Donde:

P_{ni} : Pixel normalizado i .

P_i : Densidad de lineamientos del pixel i .

$V.M.$: Valor máximo (0.00254663).

El rango de valores resultantes en el mapa normalizado es de 0 a 0.700423 y será usado en el modelo de susceptibilidad.

2.2.10.1.4 Pendientes

Según Alcántara-Ayala (2000) los valores mínimos para generar movimientos por procesos de remoción es a partir de los 5°. El mapa original, cuenta con valor mínimo de 0 y máximo de 74.4654 grados. El proceso para la normalización consistió en analizar el histograma de frecuencias, en el cual se observó que los pixeles de interés (valores altos que involucran procesos de remoción) eran pocos en comparación a los demás valores (fig. 29), por lo tanto, se requirió generar un umbral que identificara los pixeles de valores altos para darles un tratamiento unificado a partir del umbral.

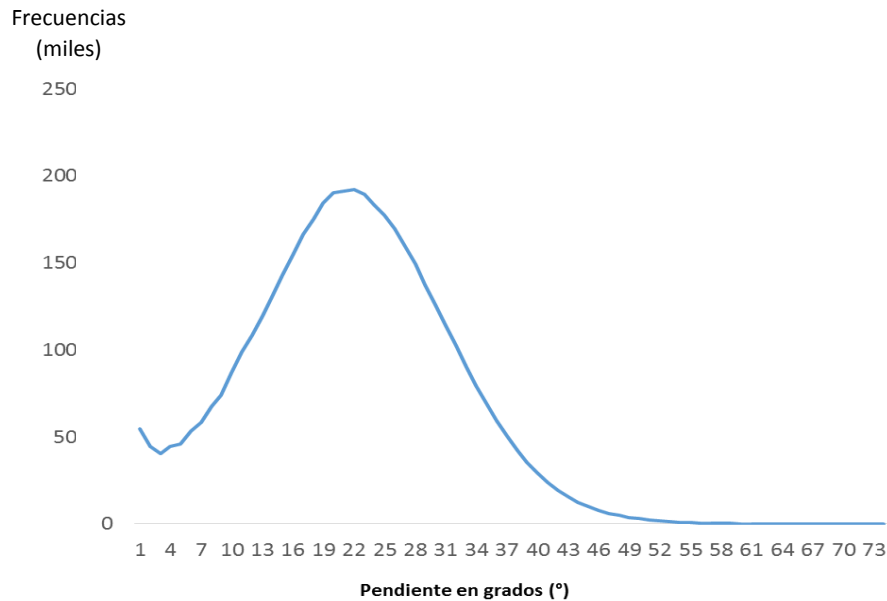


Figura 29. Histograma de frecuencias del mapa de pendientes.

Se identificaron los valores máximos a partir de los datos estadísticos y se determinó un umbral a partir de la media (μ) y la desviación estándar (σ). La ecuación 7 fue utilizada para determinar el límite máximo (L.M.):

$$L.M. = \mu + 2\sigma \quad (7)$$

La umbralización anterior resultó con un valor final de 42°. De esta forma, todos los pixeles a partir de este valor fueron considerados como máximos e igualados a 42°; con lo cual las ecuaciones 8 a 10 sirvieron para normalizar las pendientes.

$$S_{Ni} = 0 \quad \text{Para los pixeles con pendientes } \leq 5^\circ \quad (\text{Alcántara-Ayala, 2000}) \quad (8)$$

$$S_{Ni} = \frac{S(i)}{\mu + 2\sigma} \quad \text{Los pixeles con pendientes } > 5^\circ \text{ y } \leq 42^\circ \quad (9)$$

$$S_{Ni} = 1 \quad \text{Para los pixeles con pendientes } > 42^\circ \quad (10)$$

Donde:

S_{Ni} : Pendiente normalizada para el pixel i .

S_i : Valor de la pendiente original para el pixel i .

.2.2.10.1.5 Orientación de las pendientes

El procedimiento de normalización de la orientación de las pendientes consistió en un análisis empírico del histograma de frecuencias para determinar la orientación preferencial de la ocurrencia de procesos de remoción con base al inventario de los polígonos de verdad terreno.

Inicialmente se identificaron las clases con mayor incidencia de pixeles en la clasificación propuesta por Rawat et al. (2015). Con base a lo anterior, se determinó el grado de susceptibilidad en las clases: baja, alta, media, alta y muy alta, siendo esta última la clase con mayor frecuencia y la primera con la de menor. Finalmente, se reasignó una clase con base al grado de susceptibilidad, en la cual el número uno corresponde al grado “bajo” y el número ocho al grado “muy alto” (tabla 10).

Una vez asignadas las nuevas categorías; la normalización, consistió en encontrar la relación de cada clase con la de mayor valor (8). Como en los casos anteriores, el valor mínimo normalizado será 0 y el máximo 1.

Tabla 10. Valores de reclasificación y normalización del mapa de orientación de las pendientes.

Categoría	Orientación (Rawat et al., 2015)	Pixeles	Grado de susceptibilidad	Asignación numérica	Normalización	Valores normalizados
1	NORTE	79	BAJA	2	2/8	0.25
2	NORESTE	164	BAJA	3	3/8	0.375
3	ESTE	715	MEDIA	5	5/8	0.625
4	SURESTE	1277	ALTA	6	6/8	0.75
5	SUR	2743	MUY ALTA	8	8/8	1
6	SUROESTE	2042	MUY ALTA	7	7/8	0.875
7	OESTE	521	MEDIA	4	4/8	0.5
8	NOROESTE	29	MUY BAJA	1	1/8	0.125

Según los valores de la tabla, se observa que las orientaciones preferenciales son Sur y Suroeste y las de menor incidencia la Norte y Noreste; la discusión respectiva se incluye en el capítulo de resultados.

2.2.10.1.6 Densidad a flujos

El mapa de densidad a flujos involucra un mapa continuo similar al generado por el mapa de densidad a lineamientos analizado en el apartado 2.2.10.1.3. Para este caso el límite establecido es de 200 m, de acuerdo a la propuesta de Wang et al. (2017). El mapa original contiene valores desde 0 hasta 0.012571. El proceso de normalización se obtuvo a partir de la relación del valor de la densidad de cada pixel y el valor máximo de densidad registrado (ver ecuación 6).

El mapa de densidad de flujos normalizado registra valores entre 0 y 0.877316, y será usado en el modelo de susceptibilidad a procesos de remoción.

2.2.10.1.7 Efecto potencial de la precipitación

En el diseño del modelo se identificaron factores que requirieron ser combinados con otros, debido a que son inherentes uno del otro. Bajo este argumento se procedió a

construir un mapa que involucrara tres de los mapas temáticos: clase textural, pendientes (sin normalizar) y precipitación.

Se reconoce la precipitación como un factor muy importante detonador de procesos de remoción en masa y su efecto puede aumentar o disminuir si se considera la pendiente del terreno sobre la que cae y si se considera la textura del suelo.

En este sentido, se propone la generación de un mapa que represente el efecto potencial de la precipitación en combinación con la pendiente y la textura del suelo, calculado a partir de la ecuación 11.

$$EPP_i = P_i * CT_i * S_i \quad (11)$$

Donde:

EPP_i = Efecto Potencial de la Precipitación para el pixel i .

P_i = Precipitación acumulada.

CT_i = Clase Textural.

S_i = Pendiente.

Para obtener el mapa de Efecto Potencial de la Precipitación normalizado, se obtiene el valor máximo, la relación entre el valor EPP original y el valor máximo, tal como se ha explicado previamente.

El mapa EPP normalizado registra valores entre 0 y 0.876719 y será usado en el modelo de susceptibilidad a procesos de remoción.

2.2.10.2 Modelo de Susceptibilidad a Procesos de Remoción en Masa.

La generación del modelo de susceptibilidad consiste en la acumulación de la aportación individual de cada uno de los factores considerados a través de sus mapas normalizados. De esta forma, el valor acumulado de las aportaciones individuales de cada factor representará el índice de susceptibilidad a procesos de remoción en masa (ISPRM) y pueden ser expresados con la ecuación 12.

$$ISPRM = EP_N + DL_N + S_N + OS_N + DF_N + EPP_N \quad (12)$$

Donde:

ISPRM = Índice de Susceptibilidad a Procesos de Remoción en Masa.

EP_N = Erosión Potencial Normalizada.

DL_N = Densidad a Lineamientos Normalizada.

S_N = Pendiente Normalizada.

OS_N = Orientación de las Pendientes (Aspect) normalizada.

DF_N = Densidad a Flujos Normalizada.

EPP_N = Efecto Potencial de la Precipitación Normalizada.

El resultado de la ecuación es un mapa con valores continuos, a partir de los cuales se aplicó con la herramienta de ArcGis una clasificación en función del histograma, con el fin de obtener valores categóricos, de acuerdo a la tabla (tabla 11):

Tabla 11. Rango de valores para ISPRM y su categoría correspondiente

No.	Rango ISPRM	Categoría
1	0.250-1.159	Muy bajo
2	1.159-1.690	Bajo
3	1.694-2.175	Medio
4	2.175-2.710	Alto
5	2.710-4.796	Muy alto

Para validar la información resultante, se aplicó una validación empírica con base a los polígonos de verdad terreno mediante estimaciones visuales.

2.2.10.2.1 Efecto de los remanentes de procesos de remoción antiguos

Como se mencionó anteriormente, en el área de estudio existen registros de antiguos procesos de remoción en masa, por lo cual es importante explorar su efecto en el modelo ISPRM, debido a que el material procedente del fenómeno puede encontrarse de manera poco competente y por lo tanto incrementar la susceptibilidad en el modelo.

En este sentido, se desarrolló un análisis adicional, considerando como un nuevo factor condicionante la cercanía de los pixeles estables a deslizamientos antiguos. Para ello se obtuvo un mapa de distancias entre los pixeles sin procesos de remoción y zonas con la presencia de ellos. Dicho mapa resulta con valores mínimos de 15 metros (por la resolución espacial de las imágenes usadas), siendo estos los pixeles inmediatos a zonas con ocurrencia de procesos de remoción y por ello los más susceptibles a la ocurrencia de nuevos procesos.

De acuerdo a este análisis y con el fin de normalizar el mapa de distancias con valores entre 0 y 1, para incorporarlo al modelo de ISPRM y explorar su efecto, se aplicó la ecuación 13.

$$DN_i = \frac{RE}{D_i} \quad (13)$$

Donde:

DN_i = Distancia Normalizada del pixel i .

RE = Resolución espacial (15 m).

Di = Distancia a un deslizamiento del pixel i .

Una vez obtenidos los valores normalizados correspondientes a cada pixel, se ajustó a la ecuación inicial del modelo (ec. 11) de tal manera que se incorporó la distancia resultante de cada deslizamiento (ec. 14):

$$ISPRM = EP_N + DL_N + S_N + OS_N + DF_N + EPP_N + DN_N \quad (14)$$

Donde:

ISPRM= Susceptibilidad a Procesos de Remoción en Masa.

EP_N = Erosión Potencial Normalizada.

DL_N = Densidad a Lineamientos Normalizada.

S_N = Pendiente Normalizada.

OS_N = Orientación de las Pendientes (Aspect) normalizada.

DF_N = Densidad a Flujos Normalizada.

EPP_N = Efecto Potencial de la Precipitación Normalizada.

EN_N : Distancia normalizada a deslizamientos antiguos.

El resultado del análisis anterior es un mapa con valores continuos; el cual también fue categorizado en 5 clases, de la misma forma que se explicó anteriormente (tabla 11).

CAPÍTULO 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Mapas temáticos

3.1.1 Erosión potencial

La geología regional muestra afloramientos consistentes en rocas de edad cretácica y jurásica cubiertas por rocas volcánicas terciarias relacionadas al vulcanismo de la Sierra Madre del Sur. Se identificaron 13 unidades litológicas y, debido a su naturaleza tectónica y de formación, presentan conjuntos de rocas poco competentes, fuerte fracturamiento, foliación con rumbos contrastantes, además de alto grado de intemperismo; generalmente, este comportamiento se encuentra en las formaciones con material metavolcánico y metasedimentario aflorante en el 70% del área de estudio, lo que es favorable para la presencia de material inestable propicio para los procesos de remoción.

En la figura 30 se muestra el mapa de erosión potencial obtenido a partir de la metodología explicada.

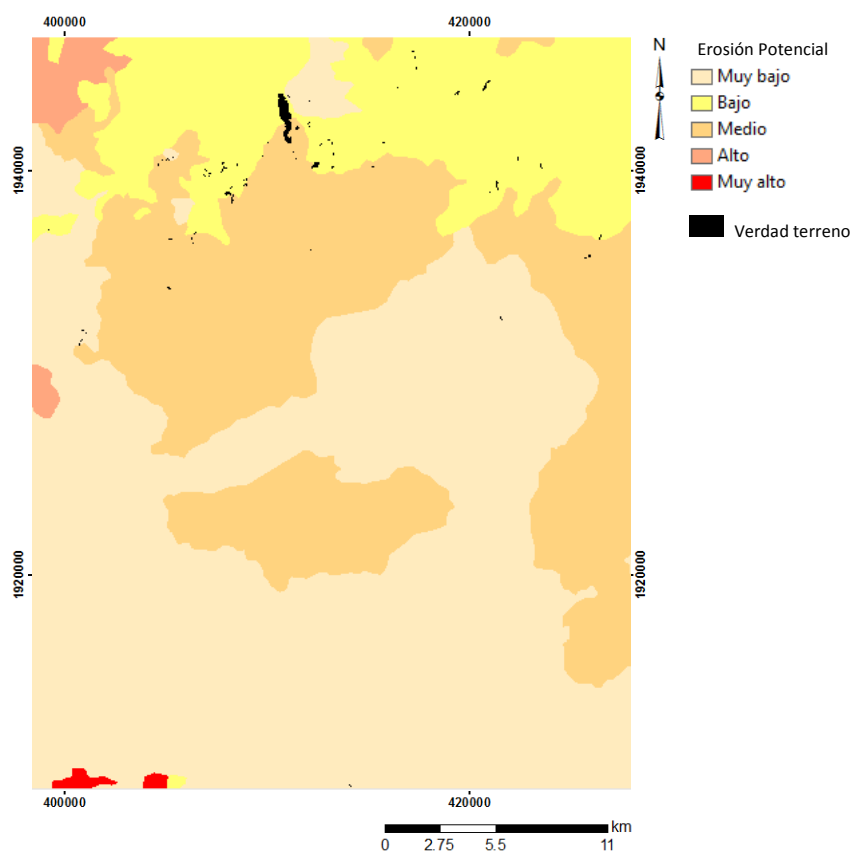


Figura 30. Mapa de clase textural de los suelos del área de estudio. Los polígonos en color rojo representan la verdad terreno y su relación con las zonas susceptibles a procesos de remoción.

Según la categorización realizada con base a Aguiló-Alonso et al., (2006) y la comparación con los polígonos de verdad terreno, hacia la parte centro-sur del área de

estudio se aprecia una erosión potencial ‘muy baja’ seguido por el grado ‘medio’ y ‘bajo’ hacia la parte centro-norte, evidenciando que la escorrentía superficial en condiciones normales no afecta directamente el comportamiento mecánico de las rocas. La diversidad litológica encontrada en cada una de las formaciones geológicas de área limita a una clasificación homogénea que permite indicar las particularidades de cada formación.

Con base a los polígonos de la verdad terreno, los principales deslizamientos se presentaron en formaciones que exhiben filitas, metaandesitas, pizarras, rocas volcánicas intemperizadas, calizas y lutitas, lo que evidencia que las características físicas superficiales de las rocas son fuerte fracturamiento, planos de foliación dominantes o estratificación, intemperismo y contacto litológico de las unidades, lo que influenciaron a la inestabilidad del terreno aunado a otros factores superficiales propicios para la generación de procesos de remoción en masa.

3.1.2 Densidad a lineamientos

La figura 31 muestra el mapa final de densidad a lineamientos obtenido:

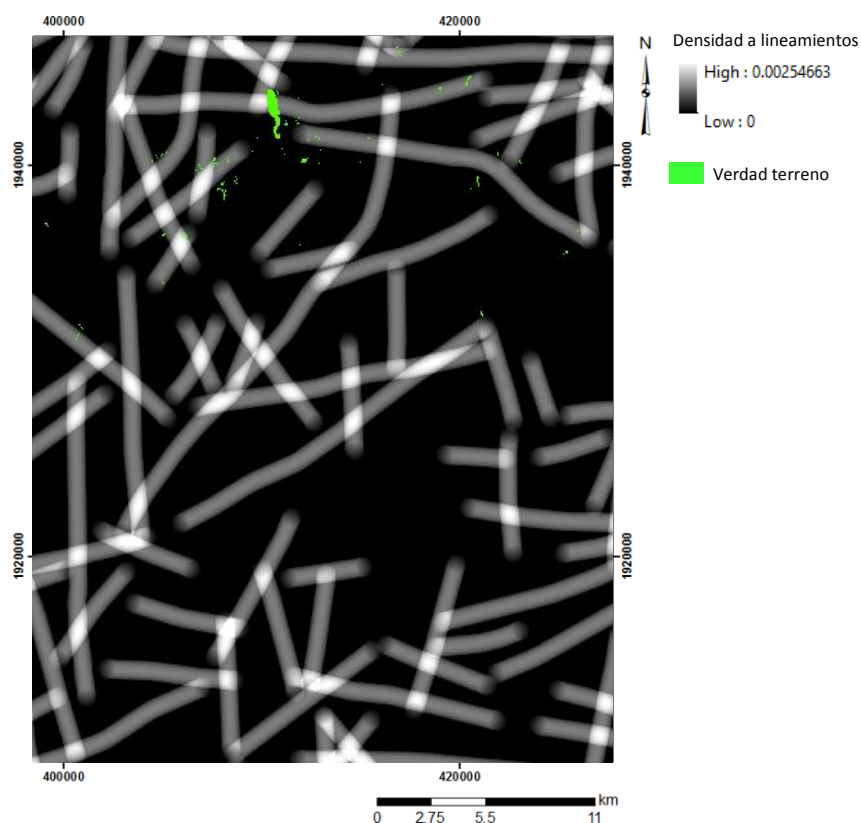


Figura 31. Mapa de densidad a lineamientos. Se muestra la distribución de los lineamientos y su rumbo preferencia NE-SW. Los polígonos en color verde corresponden a la verdad terreno y exhiben su relación con los conjuntos estructurales que interceptan entre sí.

El mapa de la figura 31 muestra la intersección de los lineamientos entre sí en varias direcciones y lugares cuya orientación preferencial es NE-SW y E-W. Los valores resultantes indican valores mínimos de 0 y máximos de 0.00254663. Este último indica

pixeles cercanos al intersecto entre uno o más lineamientos. La densidad implementada fue un radio de 500 metros, en el cual se pueden observar lineamientos únicos y otros interceptados de hasta ocho veces por otros lineamientos con mayor incidencia hacia el W del área de estudio. Con base a los polígonos de verdad terreno, se puede observar que la mayoría de los procesos de remoción están siendo atravesados por algún lineamiento o se encuentran cercanos al radio asignado como zona de material vulnerable, específicamente hacia la parte NE.

Según Wang et al., (2017) las zonas cercanas a fallas o que intercepten entre ellas o con otro tipo de lineamiento serán extremadamente proclives a generar material inestable y, por lo tanto, al desarrollo de procesos de remoción. Generalmente la ocurrencia de estos fenómenos puede estar dominada directamente en los bordes del área de los procesos de remoción por la presencia de lineamientos.

3.1.3 Pendientes

En la figura 32 se muestra el mapa de pendientes.

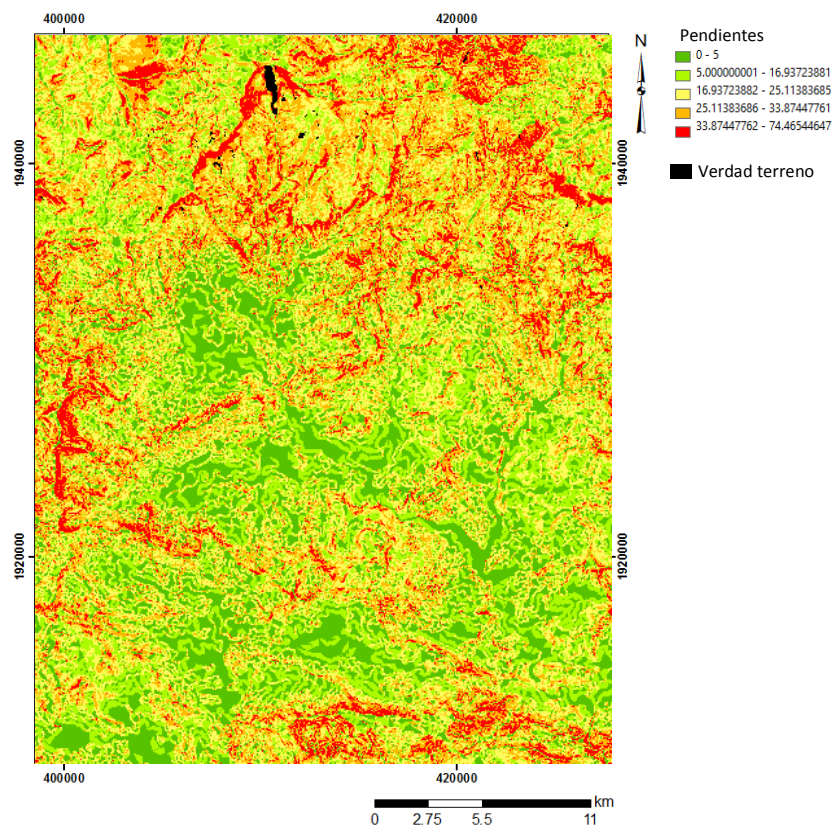


Figura 32. Mapa de la distribución espacial de las pendientes con valor $\geq 5^\circ$. Los polígonos en color rojo muestran la verdad terreno y su relación con las pendientes.

Para la realización de este mapa fue necesaria la intervención del MDE (Fig. 19) del área de estudio donde se observaron elevaciones de 300 a 2960 msnm. Las

elevaciones más prominentes se encuentran hacia el norte y corresponden a la serranía sur de la localidad de Chichihualco y las elevaciones más bajas hacia el sureste

Los valores obtenidos de las pendientes oscilan entre los 0° y 74°, los valores de mayor altitud se encuentran entre los 33° y 74°, ubicándose hacia la zona N, W y en menor proporción hacia el SE correspondientes a los escarpes de la serranía del área de estudio. Como se observa en el mapa de pendientes (fig. 32), la mayor parte del relieve presenta pendientes susceptibles a movimientos del tipo gravitacionales, ya que tomando en cuenta a Alcántara-Ayala, (2000) se han registrado movimientos en masa con pendientes menores a 5° y considerando además que al aumentar el gradiente en una ladera se incrementa la probabilidad de falla (Hernández-Mena, 2008). Finalmente, el análisis realizado con los polígonos de verdad terreno indican que la mayoría de ellos se distribuyen en las pendientes que oscilan entre los 25° y 33°, lo que podría indicar que las zonas con pendientes similares pueden ser susceptibles a procesos de remoción en masa. De acuerdo a los antecedentes, se tomó como zonas susceptibles las mayores a 5° y el grado de su efecto depende del valor de la pendiente.

Según el mapa categorizado donde se tomó el valor mínimo de 5° de pendiente, los valores que no cumplen con esta condición se encuentran hacia la parte central del área de estudio correspondientes a los valles, la cima de las montañas y lomeríos y los arroyos profundos; caso contrario, en la porción norte muestra un incremento considerable de pixeles que cumplen con la premisa y además se observa la presencia de todos los polígonos de verdad terreno hacia la zona de sierras alargadas.

3.1.4 Orientación de las pendientes

El mapa de la figura 33 muestra los resultados de la metodología empleada en la generación del mapa de orientación de las pendientes.

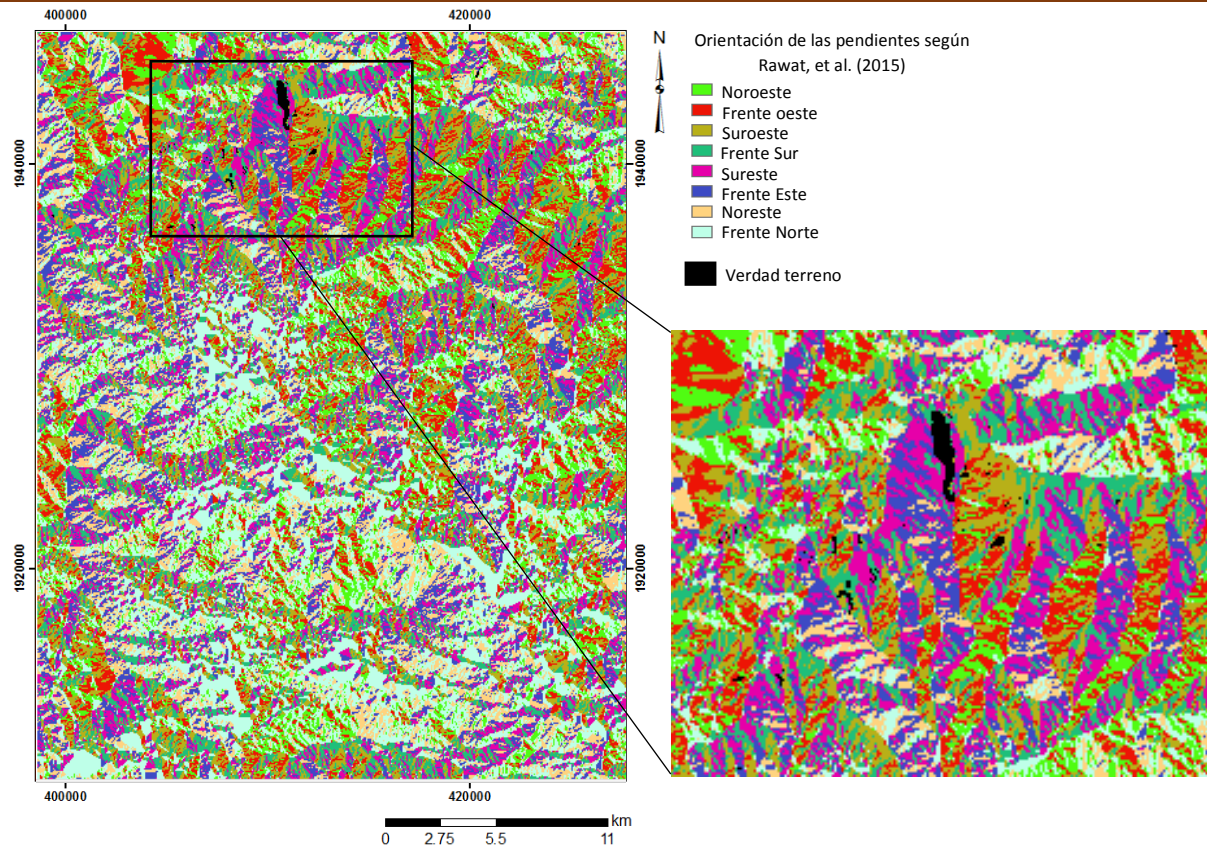


Figura 33. Distribución espacial de la orientación de las pendientes según Rawat et al. (2015) y su relación con el inventario de los polígonos de verdad terreno (polígonos en color negro) del área de estudio.

Los valores resultantes que involucran la orientación de las pendientes según Rawat et al. (2015) muestran distribuciones preferentes hacia los frentes Norte y Sur, hacia la parte noreste y sur del área de estudio, esto en consecuencia a la región montañosa representada por sierras abruptas alargadas con una orientación E-W (SGM, 2005); por lo tanto, las pendientes N y S corresponden a los flancos de la serranía. Asimismo, se aprecian zonas al centro-sur con influencia de la mayoría de las clasificaciones realizadas y esto como resultado de la intensa foliación y estratificación en distintas direcciones de las rocas que moldearon el paisaje (fig. 30). En el caso de los polígonos de verdad terreno, tuvieron un rumbo preferencial hacia las caras SE, S y SO, lo que indica que los procesos en remoción en masa no tan solo están controlados por la orientación de los flancos de las geoformas del área de estudio, sino que existen otros factores aunados a la generación de estos procesos en los que podrían incluirse la intensa foliación y la litología presente en la zona.

3.1.5 Densidad a flujos

El mapa de densidad a flujos muestra la distribución espacial de los pixeles que convergen en una celda y cuyo valor representa el área de distribución del agua superficial de la zona de estudio. En la figura 34 se muestra el mapa resultante.

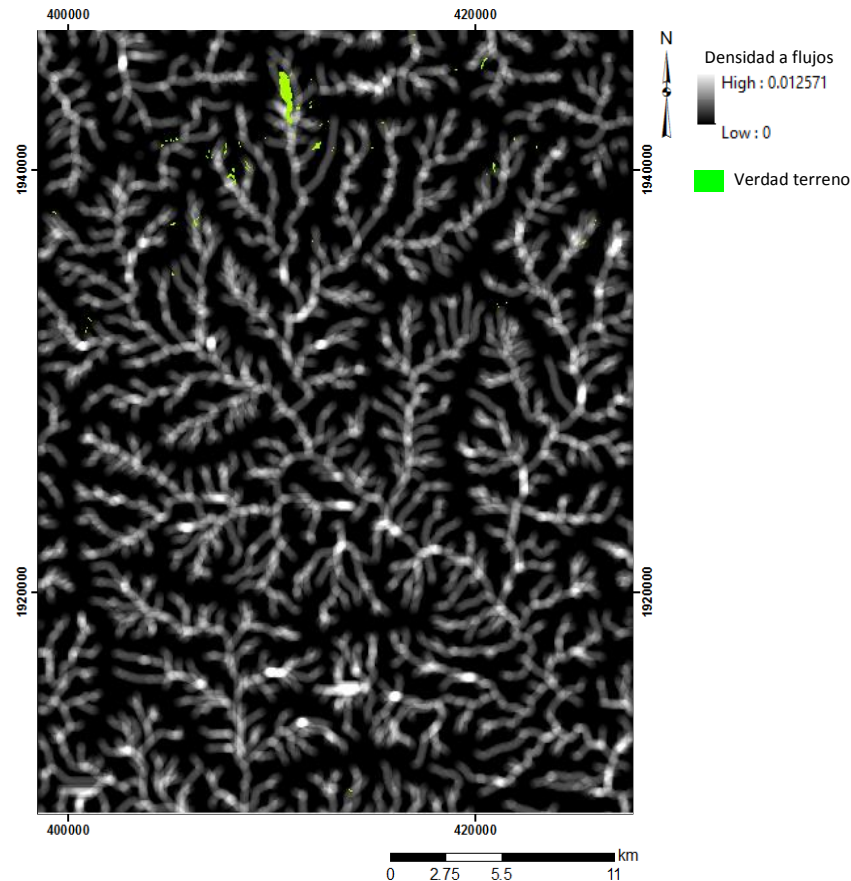


Figura 34. Mapa de densidad a flujos y su relación con los polígonos de verdad terreno (color verde).

En este caso la densidad de los flujos presenta valores mínimos de 0 y 0.012571 como valor máximo, este último indica que los pixeles iguales o cercanos a ese valor están relacionados a la unión de uno o más flujos que convergen en una misma celda o en una cercana a ella. Los canales de drenaje expuestos en este mapa expresan drenajes dendríticos típicos de zonas de inicio de laderas, pendientes moderadas y rocas muy alteradas (Cortéz-Farfán, 2008), dichas características son muy representativas del área de estudio. Los flujos presentes, en su mayoría, se encuentran unidos mínimo a un flujo y presentan continuidad con la distribución de los rasgos estructurales de la zona.

Por otra parte, la comparación realizada con los polígonos de verdad terreno muestra relaciones intrínsecas con la distribución de los polígonos. La mayoría se encuentran en la unión de varios flujos secundarios o en la vecindad de ellos, por lo que podría afirmarse que la distribución espacial de los flujos juega un papel muy importante en la denudación natural del paisaje y en conjunto con factores externos condicionaron la generación de procesos de remoción en masa.

3.1.6 Clasificación textural

Los valores resultantes del mapa de clasificación textural indican el grado de porosidad intersticial de los materiales del área de estudio.

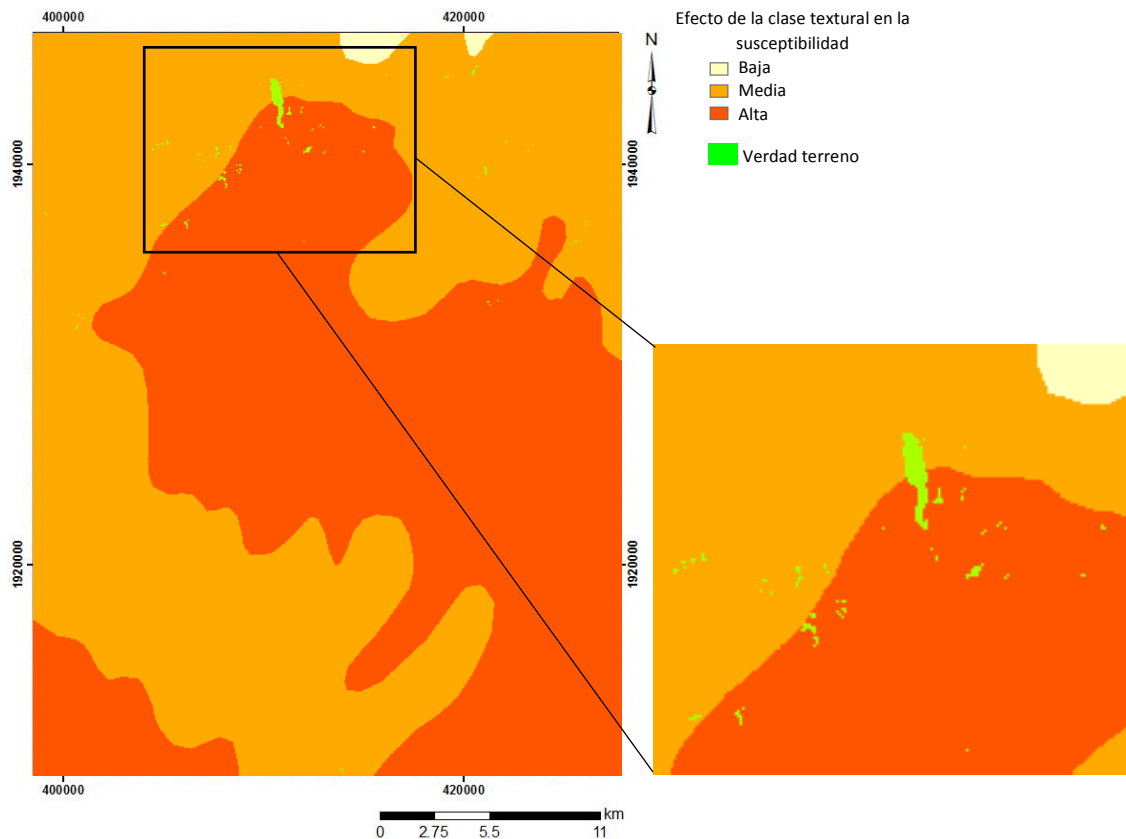


Figura 35. Mapa de clase textural y su distribución espacial respecto a los polígonos de verdad terreno (polígonos en color verde) del área de estudio.

El mapa resultante identifica tres clases de susceptibilidad: baja, media y alta, de las cuales, las clases media y alta predominan en la zona, lo que significa que los materiales presentes poseen una alta capacidad de filtración de agua y los poros al ser saturados incrementan la presión intersticial, lo que facilita el desplazamiento de los materiales (fig. 35).

Los polígonos de verdad terreno se encuentran distribuidos entre las zonas de las clases media y alta, lo que implica que el material donde se desarrollaron jugaron un rol importante para su generación; un punto clave es que la mayoría de ellos se encuentran entre la zona de transición de material medio y grueso. Al existir diferencia textural entre los materiales adyacentes y una escorrentía superficial que se infiltre en los poros, el material se vuelve inestable, afectando no solo a la zona de transición sino que también vuelve vulnerable el material circundante.

3.1.7 Precipitación acumulada

La precipitación acumulada es la cantidad de precipitación de todos los meses; en este trabajo, se utilizaron las fechas 1 de enero al 30 de septiembre de 2013 (fig. 36).

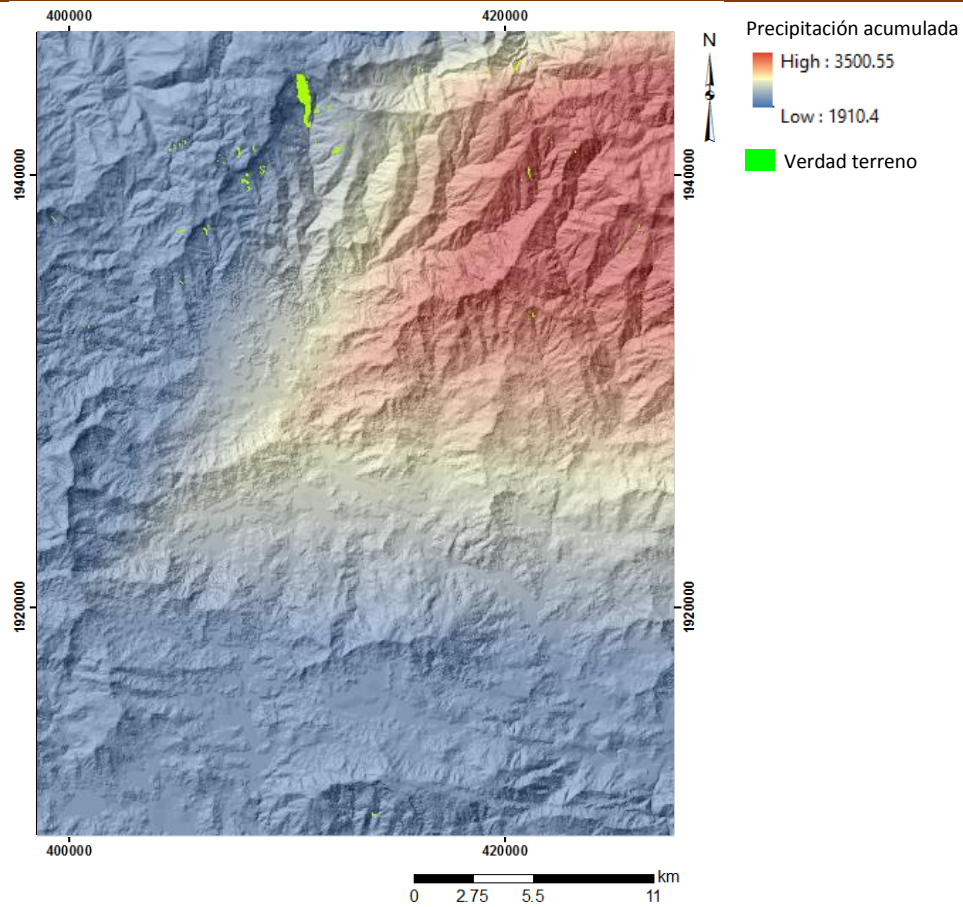


Figura 36. Mapa de precipitación acumulada y la relación existente con el inventario de verdad terreno (polígonos en verde) del área de estudio.

Las precipitaciones acumuladas indican valores mínimos de 1910.4 y máximos de 3500.55. Según el Modelo Digital de Precipitaciones acumuladas en el área de estudio, la menor cantidad de precipitación se localizó en la zona Noroeste y Sur y los valores de mayor precipitación hacia la parte Noreste. Esto en consecuencia de la presencia de la serranía sur de la localidad de Chichihualco, lo que favorece una mayor cantidad de precipitación debido al ascenso y enfriamiento adiabático del aire por la presencia de vientos húmedos (García-Amaro de Miranda, 2003).

La distribución de los polígonos de verdad terreno indican que la influencia de la precipitación acumulada en la zona es importante, ya que según su distribución espacial, los polígonos se encuentran entre los valores medios-altos de precipitaciones, lo que puede indicar una alta influencia de este factor para la ocurrencia de los procesos de remoción en masa

3.1.8 Distancias a deslizamientos

3.1.8.1 Mapas de cambios continuos (Residuales)

Los resultados parciales o intermedios de la etapa inicial de detección de cambios están expresados a través de los mapas residuales realizados tanto para NDVI como para CP1, resultado de las regresiones lineales aplicadas y que determinan las zonas de cambio y No-cambios (fig. 37).

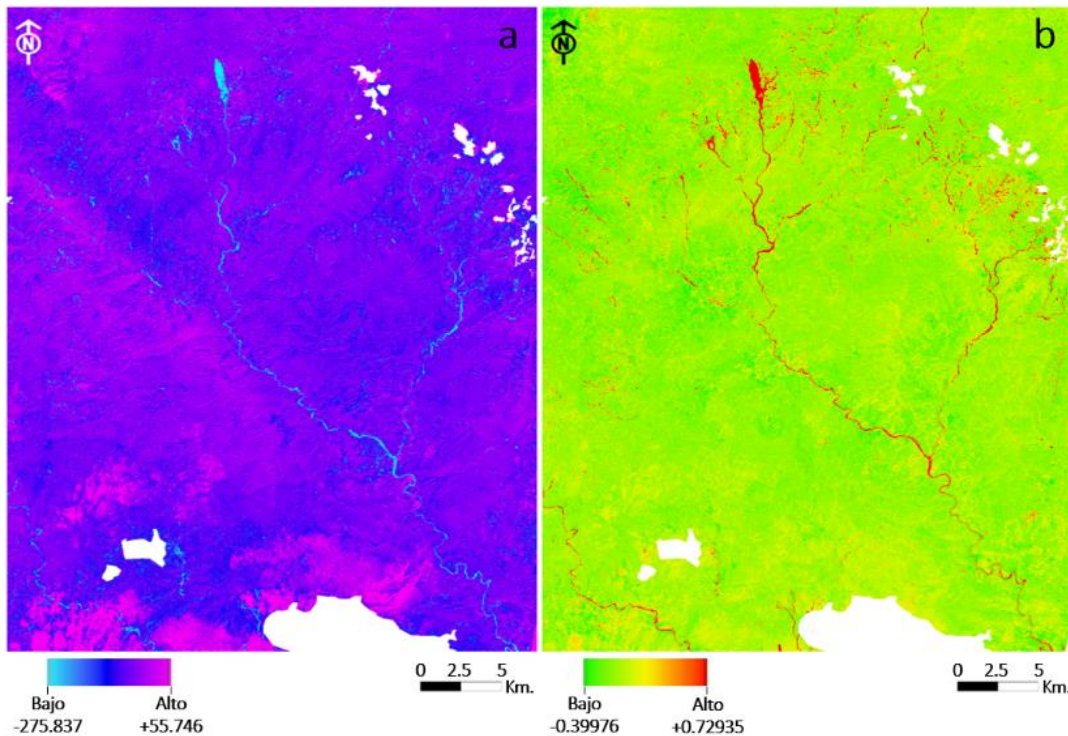


Figura 37. Mapas de residuales de CP1(a) y NDVI (b).

En la figura 37a el color azul oscuro indica zonas de residuales mínimos que pueden interpretarse como de No-cambio, mientras que los colores magenta y cian representan las zonas con valores de residuales altos, que pueden interpretarse como cambios en los dos extremos de la distribución del histograma. Se puede observar que los píxeles en color cian que corresponden a los residuales del extremo izquierdo (negativos), son los que se relacionan con cambios, entre otros por deslizamientos; mientras que para los píxeles de cambio en magenta, corresponden a residuales del extremo derecho (positivos) de la distribución y aunque también corresponden a cambios, estos no están relacionados con deslizamientos.

En el mapa de residuales usando imágenes NDVI (fig. 37b), se muestran los píxeles que representan zonas con valores relacionados a No-cambios en color cercano al amarillo; mientras que los píxeles en color rojo corresponden a valores residuales bajos del extremo derecho (positivos) y comprenden cambios entre los cuales están los generados por deslizamientos. Por otra parte los píxeles más intensos en color verde también representan cambios que corresponden al extremo izquierdo (negativos) y no están relacionados con cambios por deslizamientos, de acuerdo a la comparación con la información del inventario de los polígonos de verdad terreno. Las zonas delimitadas en

color blanco en ambos mapas, representan los pixeles omitidos que corresponden a las nubes o sus sombras y no son consideradas en este análisis.

3.1.8.2 Mapas de cambios

La figura 38 muestra los mapas binarios categóricos de deslizamientos finales utilizando imágenes CP1 y NDVI resultado de la siguiente etapa del proceso, que corresponde a la de umbralización estadística de residuales y del proceso de umbralización de las pendientes.

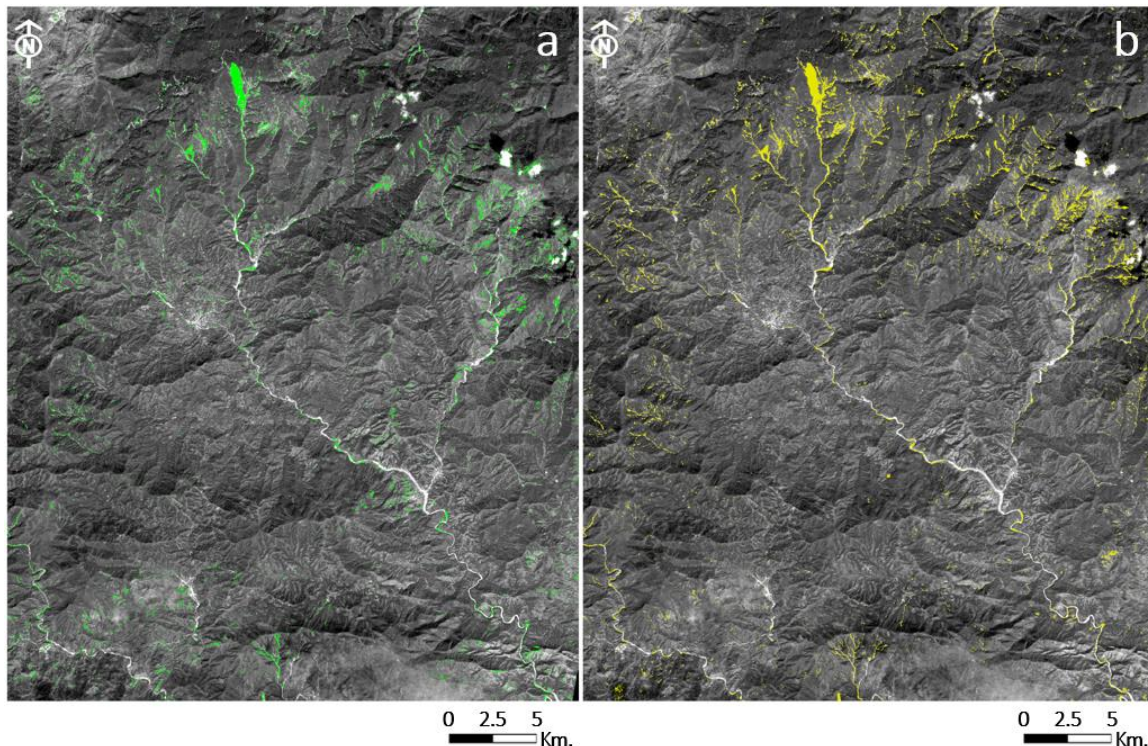


Figura 38. Mapas categóricos de deslizamientos usando CP1 en color verde (a) y usando NDVI en color amarillo (b), sobre banda 2 de la imagen ASTER de fecha 13 de diciembre de 2013 (posterior).

Los mapas parecen similares; sin embargo, el mapa de deslizamientos usando NDVI detecta un 2.18% como deslizamientos, mientras que usando CP1 el mismo proceso detecta 1.43% como deslizamientos.

Es importante hacer notar que la primera umbralización aplicada (con parámetros estadísticos) en cualquiera de los casos podría generar un radio de detección de cambios máximo de $\approx 4.6\%$ ($100\% - \mu \pm 2\sigma$). En este caso los valores finales de porcentaje de cambio del párrafo anterior reflejan también el resultado del segundo criterio de umbralización (Pendientes $\geq 5^\circ$).

En la figura 39 se muestra un acercamiento a zonas con presencia de deslizamientos para hacer un comparativo visual entre los mapas de deslizamientos con imágenes CP1 y NDVI tomando como referencia el inventario de deslizamientos (verdad terreno).

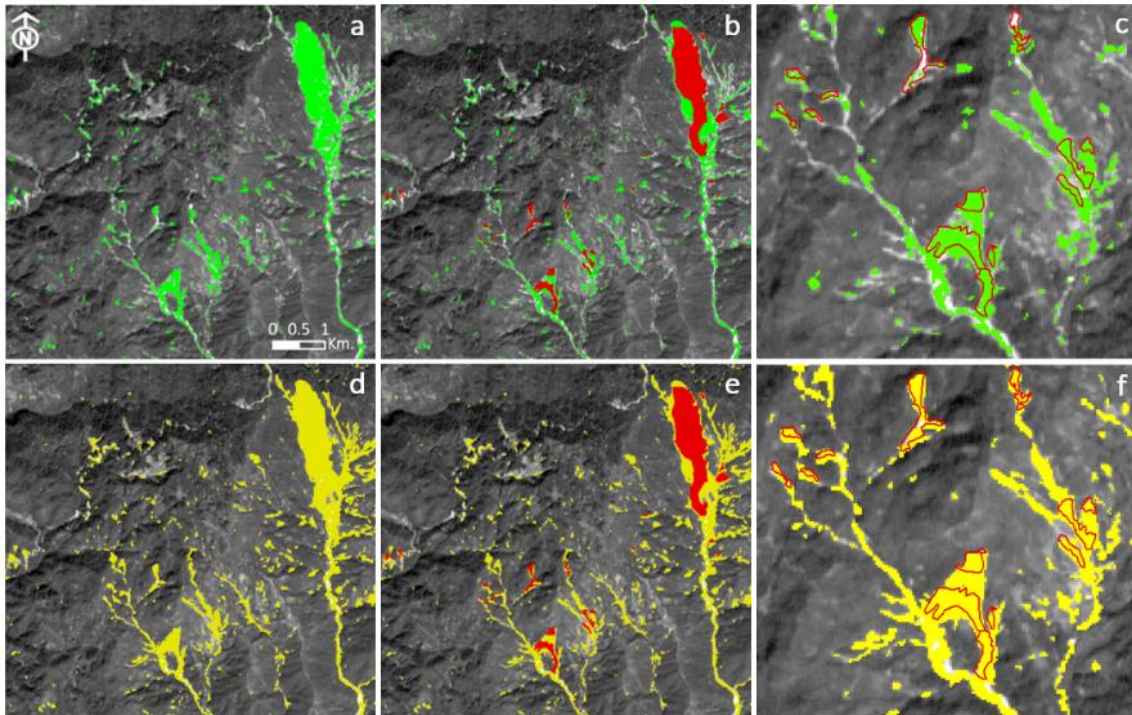


Figura 39. Acercamiento a zonas de los mapas de deslizamientos de CP1-Verde y NDVI-Amarillo (a y d). Traslape de inventario de deslizamientos en rojo sobre deslizamientos detectados por el modelo (b y e). Traslape de inventario de deslizamientos vector sobre mapas de deslizamientos (c y f).

En las imágenes de acercamientos (figs. 39e y 39f), es posible observar con mayor detalle las diferencias en la delimitación de los deslizamientos para ambos tipos de datos. Se observa la mayor cobertura de los polígonos detectados como deslizamientos usando NDVI (amarillo en figs. 39d, 39e y 39f) respecto los polígonos detectados como deslizamientos usando CP1 (verde en figs. 39a, 39b y 39c).

En las figuras del traslape del inventario (figs. 39c y 39f) se observa en general que ambos resultados corresponden con los polígonos del inventario. Sin embargo, los deslizamientos detectados usando imágenes NDVI presentan visualmente mayor precisión en el ajuste de los bordes de los deslizamientos detectados.

3.1.8.3 Evaluación de la precisión de los mapas de deslizamientos

La variación del porcentaje de píxeles detectados como deslizamiento usando CP1 o NDVI (0.75%), indica que el mapa generado con valores de NDVI incluye más píxeles detectados como deslizamientos. Para evaluar la precisión de la detección, los resultados

se comparan con el inventario de polígonos de la verdad terreno a través de matrices de confusión. (fig. 40).

COMPONENTE PRINCIPAL 1						ÍNDICE DE VEGETACIÓN DE DIFERENCIA NORMALIZADA					
	No-deslizamiento	deslizamiento	TOTAL	Aciertos User	Errores Comisión		No-deslizamiento	deslizamiento	TOTAL	Aciertos User	Errores Comisión
No-deslizamiento	18532	1622	20154	92.0	8.0	No-deslizamiento	18286	798	19084	95.8	4.2
deslizamiento	375	5991	6366	94.1	5.9	deslizamiento	621	6815	7436	91.6	8.4
Total	18907	7613	26520			Total	18907	7613	26520		
Aciertos Pr	98.0	78.7		88.4	93.0	Aciertos Pr	96.7	89.5		93.1	93.7
Errores	2.0	21.3		11.6	7.0	Errores	3.3	10.5		6.9	6.3
Omisión				Índice de concordancia Kappa 80.7		Omisión				Índice de concordancia Kappa 86.8	

Figura 40. Matrices de confusión de la detección de deslizamientos. Usando (izq.) CP1, (der.) NDVI.

En la diagonal principal de las matrices se observan los aciertos globales del mapa generado por el modelo de detección de deslizamientos con los polígonos del inventario, tanto de deslizamientos como de No-deslizamientos. Puede observarse que para el mapa de deslizamientos usando CP1 (fig. 40 Izq.) los errores de omisión son del 21.3% (1,622 píxeles); mientras que para el mapa de deslizamientos usando NDVI (fig. 40 Der.) los errores de omisión (deslizamientos en el inventario no detectados por el modelo) son del 10.5% (798 píxeles). Para el caso de los errores de comisión (píxeles detectados como deslizamientos por el modelo que no son deslizamientos en el inventario), el mapa de deslizamientos CP1 (fig. 40 Izq.), registra un 5.9% (375 píxeles); mientras que el mapa de deslizamientos NDVI (fig.40 Der.), registra un 8.4% (621 píxeles).

En general ambos resultados parecen aceptables, sin embargo, la valoración global indica que el mapa de deslizamientos usando imágenes NDVI tiene un mayor índice de aciertos y un menor índice de errores, por lo que el valor global de concordancia Kappa es mayor que 86.8% respecto al Kappa del mapa de deslizamientos usando imágenes CP1 con un 80.6%; lo cual confirma los resultados de la evaluación visual.

3.2 Modelo de susceptibilidad a procesos de remoción en masa

La integración final de todos los insumos mencionados en este trabajo está considerada en el mapa final procedente del modelo de susceptibilidad. A continuación se muestran las clases categorizadas y su influencia en el área de estudio (fig. 41).

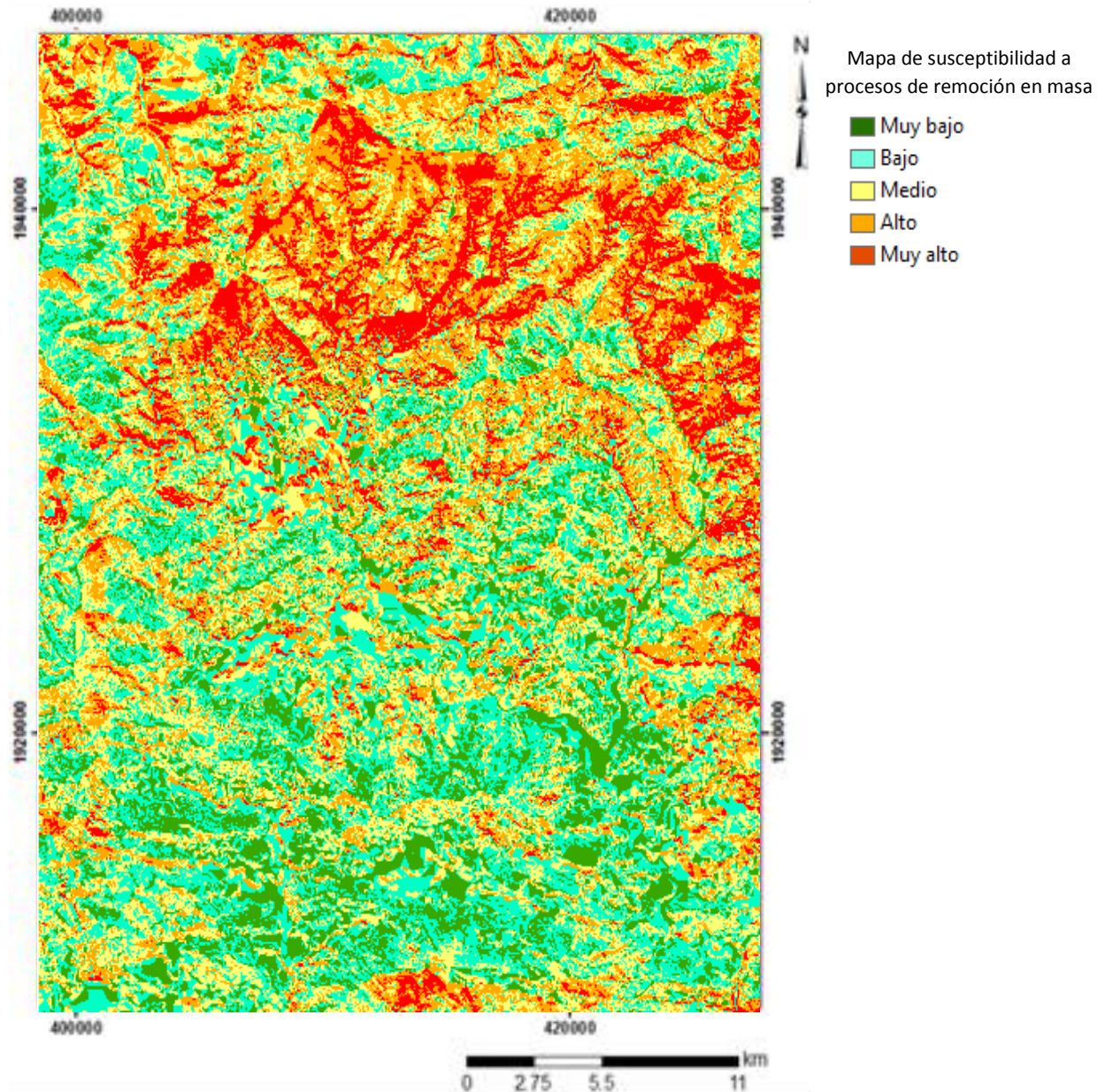


Fig. 41 Mapa de susceptibilidad a procesos de remoción en masa de la zona de estudio.

La acumulación de los valores de los mapas normalizados dio como resultado cinco clases de susceptibilidad a procesos de remoción en masa: muy bajo, bajo, medio, alto y muy alto. Según la información de los píxeles, las categorías de susceptibilidad ‘media’ y ‘baja’ obtuvieron el mayor número de píxeles dentro de las áreas de estas clasificaciones, seguido por la susceptibilidad ‘alta’, ‘muy baja’ y finalmente la ‘muy alta’.

Las zonas de muy baja a baja y media susceptibilidad se encuentran preferentemente hacia la parte centro-sur y los límites norte del área de estudio; esta zona se caracteriza por presentar rasgos topográficos suaves en comparación a la serranía sur de Chichihualco y pendientes que oscilan entre los 10°.

Los valores de la precipitación acumulada oscilan entre los 2500 y 1100 mm, los cuales para este estudio se consideran bajos en comparación a los valores encontrados hacia el NE. Por su parte, la litología presente en esas zonas corresponde en menor superficie a filitas, metaandesitas y pizarras hacia la parte E y SW; gneises y granitos milonitizados, estas últimas hacia la parte central y representan mayor extensión de área; finalmente hacia la parte S presenta conglomerados, granitos y depósitos de aluvi3n. Las rocas graníticas presentan una buena resistencia a procesos de deterioro; por su parte, las rocas metam3rficas son susceptibles al colapso laminar, lavado superficial y procesos de erosión, esto dependiendo del grado de alteraci3n que presente la roca y la direcci3n de la foliaci3n presente (Su3rez-Díaz, 1998); aunado a lo anterior, la erosión potencial exhibe valores bajos en las zonas de muy baja a baja susceptibilidad, debido a que la mayoría de las rocas en el área son impermeables a procesos hidrol3gicos y por lo tanto son poco susceptibles a la erosión por escorrentía superficial. Caso similar ocurre en la clase textural debido a que los valores más bajos de susceptibilidad se encuentran hacia las zonas media-alta, lo que sugiere que el material presente exhibe componentes que pudiesen permitir el paso del agua entre los espacios intersticiales de la roca, pero, según los valores de flujos, las zonas con susceptibilidad muy baja a baja generalmente coinciden con áreas de valores mínimos, por lo tanto el agua que pudiese interactuar con estas zonas es principalmente proveniente de las precipitaciones.

Por otro lado, al igual que los flujos de agua, la mayoría de los lineamientos se encuentran alejados de las zonas menos susceptibles a procesos de remoci3n; existen zonas que sí presentan intersecci3n de uno o más lineamientos, pero según el modelo con base al valor acumulativo, existió uno o varios factores que indicaron valores bajos y por lo tanto el resultado de la funci3n fue de un grado de susceptibilidad bajo o medio.

De acuerdo al inventario de polígonos de verdad terreno ninguno de los polígonos se desarrolló en estas, zonas ya que la mayoría de ellos tuvieron presencia en zonas de susceptibilidad alta a muy alta.

Las zonas de susceptibilidad alta a muy alta están caracterizada por elevaciones mayores a los 2400 msnm, pendientes mayores a los 33°. La litología presente en esta zona consiste en metaandesitas, filitas y pizarras, cubren casi toda el área de susceptibilidad alta a muy alta; hacia el E se encuentran afloramientos de tobas, areniscas, lutitas y conglomerados y al NW presenta brechas volcánicas, ignimbritas, riolitas, tobas y aglomerados en menor proporci3n. La mayoría de las rocas presentes muestran gran contenido de micas las cuales en estado alto de meteorizaci3n producen suelos ricos en arcillas mostrando gran capacidad de retenci3n de agua y baja resistencia mecánica (Alcántara-Ayala, 2000), tal es el caso de las filitas y pizarras cuya extensi3n es predominante en las áreas de susceptibilidad alta y muy alta. Los planos de discontinuidad presentes indican foliaci3n en distintas direcciones, esta característica probablemente controla algunos procesos de remoci3n ya que existe la posibilidad de que el buzamiento sea paralelo a la direcci3n de inclinaci3n de las laderas. Asimismo este tipo de rocas generar material deleznable, altamente fracturado y susceptible al

colapso. Por último, muestra un conjunto de rocas caracterizado por areniscas y lutitas con un grado alto de meteorización y suelo residual las cuales son susceptibles a la erosión, debido al lavado superficial (Suárez-Díaz, 1998).

Las áreas hacia el sur con susceptibilidad alta están relacionadas a rocas competentes a la erosión y la escorrentía superficial, pero presenta una zona de contacto litológico, lo que representa un área de debilidad en la roca, además de mostrar la transición entre el grado textural de medio a alto. La forma en que interactúa el agua en esta zona está determinada principalmente por el grado de erosión potencial y la clase textural de la roca. La clasificación textural juega un papel importante, debido a la presencia de rocas permeables, es decir con espacios intersticiales capaces filtrar el agua y, por lo tanto, la movilización de materia no se puede controlar a diferencia de material más fino. A pesar de que existe presencia de material fino, se supondría una mayor permeabilidad y por lo tanto la filtración de agua sería nula pero en el tipo de roca presente en esta área muestra alto grado de meteorización por lo que las vuelve poco coherente en la resistencia.

Por otro lado, los rasgos estructurales muestran una relación importante con la zona de alta y muy alta susceptibilidad, los lineamientos que atraviesan esta zona contienen más de una intersección de otros lineamientos; asimismo los flujos presentes muestran influencia de los valores más altos hacia las zonas de alta y muy alta susceptibilidad, además de que forman parte de la escorrentía superficial. Aunado a estos datos la precipitación acumulada en esas fechas jugó un rol importante en los procesos de remoción, ya que en estas zonas se registró la mayor concentración pluvial con valores que oscilan entre los 2000 mm y 3500.55 mm, esta última la de mayor precipitación registrada.

Los valores que dieron como resultado las zonas de mayor potencial a procesos de remoción en masa pueden ser corroborados a través de la ubicación espacial de los polígonos de verdad terreno. Se aprecia claramente su distribución hacia las zonas con los valores de mayor susceptibilidad, asimismo el deslizamiento de mayor tamaño es un ejemplo claro de un proceso de remoción ya que cumple con la presencia tanto de factores condicionantes como los detonantes para su generación: presencia de una roca poco coherente, fuertemente fracturada y foliación en distintas direcciones, se desarrolló en una pendiente pronunciada mayor a los 33°, interacción de un flujo que lo atraviesa longitudinalmente y por lo tanto el aporte de agua es significativo. La parte estructural indica que la orientación de uno de los lineamientos cruza perpendicularmente al deslizamiento, lo cual es un factor importante en el desarrollo del movimiento.

3.2.1 Efecto de los remanentes de procesos de remoción antiguos

Los valores resultantes del análisis del efecto potenciador de los antiguos procesos de remoción en masa indicaron que la existencia de remanentes de estos fenómenos influye en el incremento de susceptibilidad, debido a que el material existente no se

encuentra estable dado que sus condiciones físicas y mecánicas no son iguales al momento de su depósito (fig. 42).

Según el contenido de número de píxeles del mapa con influencia de procesos de remoción antiguos, el índice de susceptibilidad incrementa en las clases, es decir que el área de susceptibilidad es mayor a la inicial, por lo tanto, algunos de los valores que tenían en el modelo de susceptibilidad pasan a pertenecer a la clase subsecuente.

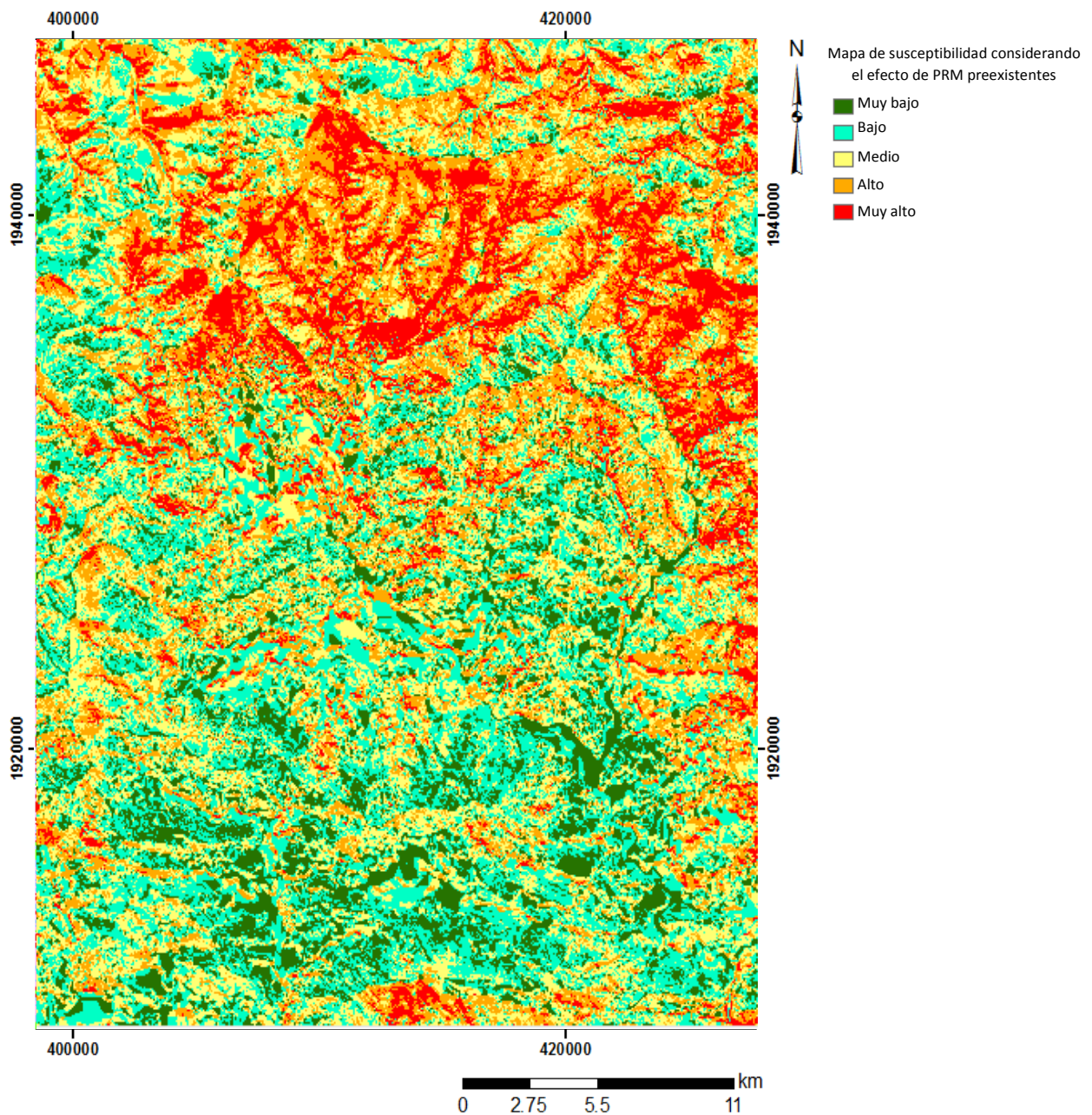


Figura 42. Mapa de susceptibilidad considerando el efecto de los remanentes de procesos de remoción antiguos.

A partir del análisis realizado entre los mapas finales, las zonas de susceptibilidad muy alta presentan un incremento significativo en su extensión ocupando zonas inicialmente identificadas como susceptibilidad alta (fig. 43).

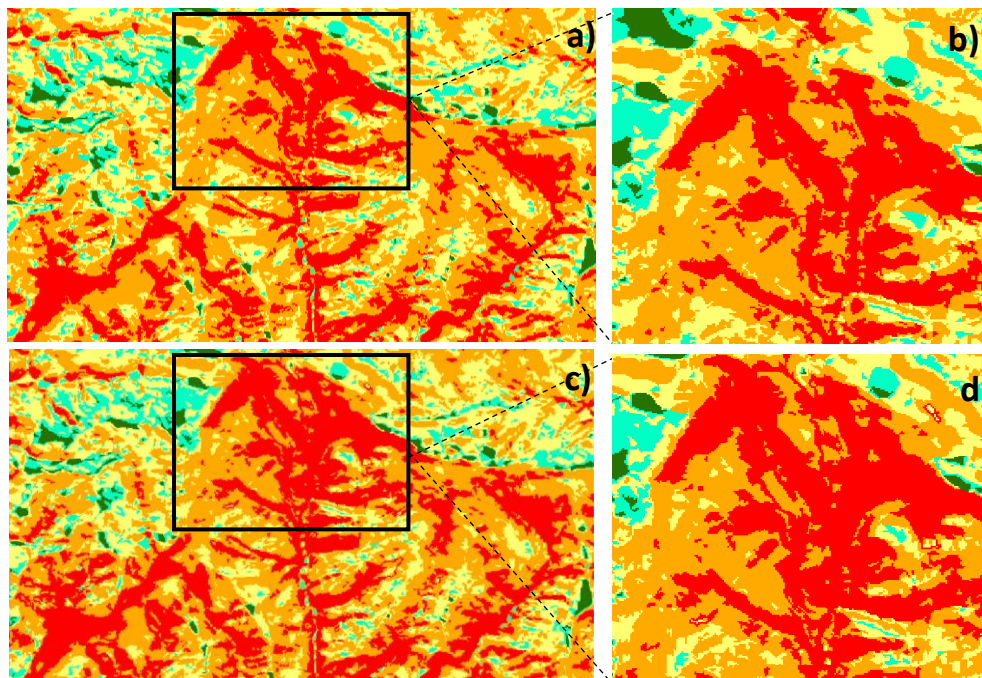


Figura 43. Comparación de diferencias entre el modelo de susceptibilidad inicial (a) y el modelo con PRM preexistente (c).

El incremento del área inicial de susceptibilidad (43 b) es inferior en comparación con el segundo modelo (43 c), lo que propicia una extensión de área con susceptibilidad muy alta a procesos de remoción. Otro caso apreciable es el que registra la categoría “alta”, que ahora adquirió valores de la clase media y de manera sucesiva ocurre con el de la susceptibilidad baja, pero en esta última los cambios son casi imperceptibles. A continuación se muestra una tabla comparativa de las áreas correspondientes a cada modelo (tabla 12).

Tabla 12. Comparación de extensión de área entre el mapa de susceptibilidad inicial y el mapa de susceptibilidad con PRM preexistentes

Categoría	Área (ha) del mapa de susceptibilidad	Área (ha) del mapa de susceptibilidad con PRM preexistentes	Diferencias de área (ha) entre ambos modelos
Muy baja	15872.6925	15744.3525	-128.34
Baja	28510.8075	28323.1575	-187.65
Media	33507.0225	33249.1275	-257.895
Alta	27478.08	27497.7225	19.6425
Muy alta	11734.92	12289.1625	554.2425

Inicialmente los polígonos de verdad terreno se veían comprometidos en las áreas de muy alta susceptibilidad, pero sus contornos no estaban involucrados del todo, además de que ocasionalmente se encontraban en áreas de susceptibilidad menores. En el modelo de susceptibilidad que involucra antiguos deslizamientos, se aprecia un cambio importante con base a la distribución espacial de los polígonos, ya que los incluye directamente con las áreas de mayor susceptibilidad, lo que evidencia un mayor control de las áreas propensas a procesos de remoción.

Otro factor importante es que algunos polígonos de verdad terreno se encuentran en cercanía entre ellos, lo que incrementa la vulnerabilidad a sufrir nuevos procesos de remoción; por tal motivo el área de susceptibilidad muy alta tiende a incrementar considerablemente en algunas zonas además de incorporar los valores altos de los otros factores vinculados a los procesos de remoción mencionados anteriormente (fig. 44).

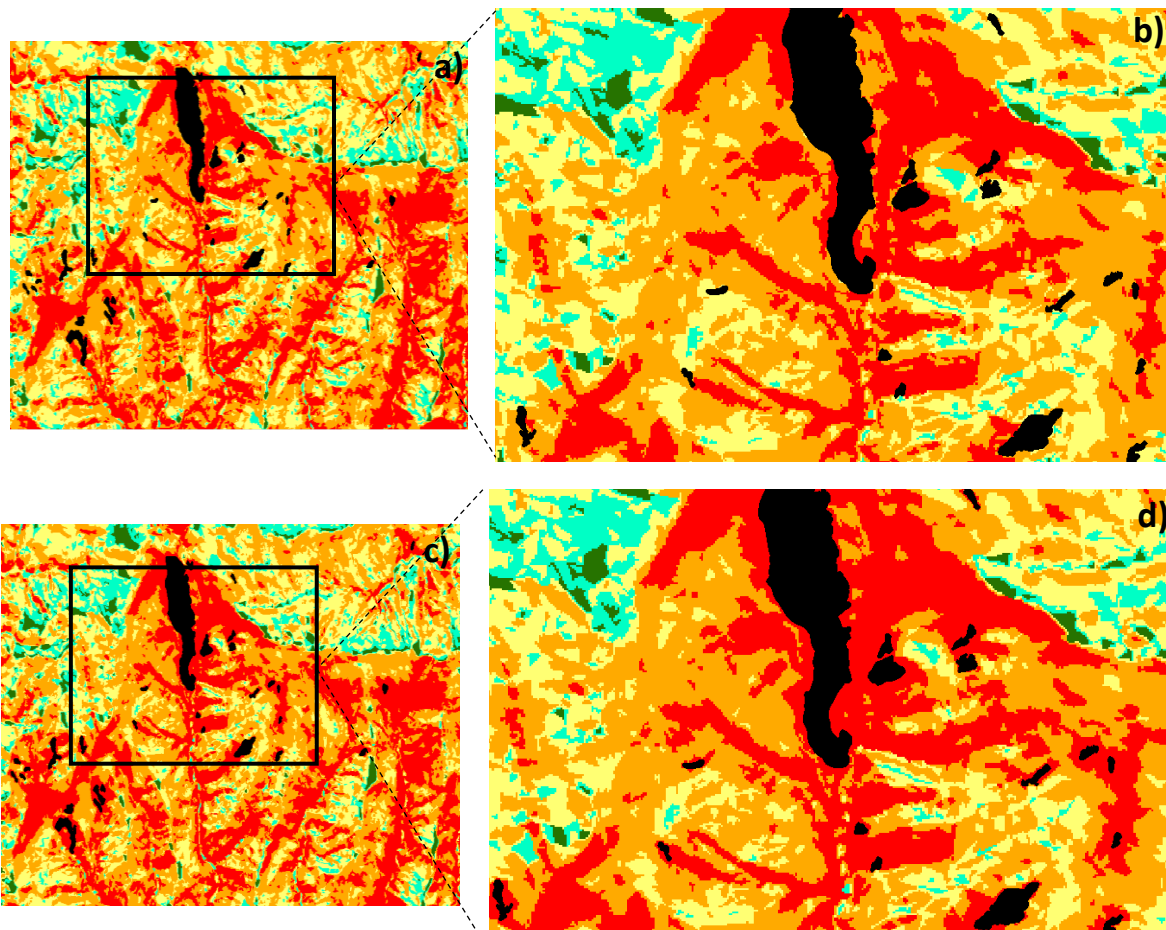


Figura 44. Imágenes de los comparativos de las diferencias entre el modelo de susceptibilidad inicial (a), el modelo con PRM preexistente (c) y los polígonos de verdad terreno (polígonos en color negro).

Según la figura 44, la distribución espacial de los polígonos respecto al modelo inicial (b) incorpora más de una clase de susceptibilidad lo que dificulta controlar la

distribución de las zonas susceptibles en una sola clase. Por su parte el segundo modelo (d) exhibe zonas de mayor extensión de alta y muy alta susceptibilidad con base a los polígonos de verdad terreno; se observan zonas que inicialmente no eran contempladas dentro de estas zonas de mayor susceptibilidad y que por las características físicas y mecánicas del material presente, deberían estar incluidas dentro de las zonas de mayor vulnerabilidad aunque cabe la posibilidad de que su exclusión esté dada por factores que no dieron valores acumulativos importantes dentro del modelo. Con base a la esto, es importante la incorporación de los procesos de remoción preexistentes ya que este considera las variables que pudiesen omitirse en el modelo inicial por lo tanto, asume una mejora considerable en la detección de zonas vulnerables a procesos de remoción en masa.

CONCLUSIONES

Los resultados de los mapas finales muestran que se pueden obtener resultados satisfactorios y congruentes a través del uso de la Percepción Remota y software especializado en los Sistemas de Información Geográfica, para generar información relevante sobre técnicas que involucre el reconocimiento de fenómenos de remoción en masa a nivel regional, como es el caso de la región Centro del estado de Guerrero.

El desarrollo del modelo de susceptibilidad a procesos de remoción en masa ayudó a diferenciar las zonas susceptibles con base a los valores de los factores detonantes y condicionantes, siendo el tipo de roca, específicamente filitas, pizarras, lavas y brechas, y las discontinuidades inherentes a ellas, es decir, intensa foliación y clase textura; los lineamientos, las pendientes de las laderas y la precipitación acumulada asociada a los eventos hidrometeorológicos extraordinarios del 2013, como los principales factores que provocaron la incidencia de los deslizamientos posteriores al 2013. A pesar de que la vegetación no se tomó en cuenta como un factor directo en el modelo, este tuvo resultados favorables para el cumplimiento satisfactorio de los objetivos.

La generación de los polígonos de verdad terreno sirvió satisfactoriamente como un insumo de validación de los mapas temáticos y de los modelos finales, específicamente en la generación del modelo del efecto en el mapa de susceptibilidad de los remanentes de procesos de remoción antiguos.

Los valores máximos de amenaza se distribuyen en su mayoría en la parte noreste del área de estudio. Los poblados con mayor impacto a las zonas de mayor riesgo son Tierra Colorada y Jaleaca de Catalán, ya que presentan zonas de susceptibilidad media a muy alta.

Finalmente, es preciso indicar que actualmente la implementación de los SIG han mejorado las técnicas de análisis de muchos fenómenos naturales a través de la implementación de mapas que muestren los resultados del análisis espacial. Hoy en día el uso de las herramientas geotecnológicas ha permitido combinar distintas disciplinas para la generación de información precisa y fiable sobre susceptibilidad a procesos de remoción en masa, con la finalidad de mitigar el riesgo a la población y ayudar en la ordenación y uso del territorio.

Con base a este estudio es recomendable seguir profundizando los resultados a partir de las variables que intervienen en este proceso; asimismo se sugiere integrar nuevas pruebas con datos de precipitación de años actuales, años con precipitaciones acumuladas menores (años con baja precipitación) a las de los eventos extraordinarios aquí descritos y la propagación de esta información en otras zonas con características similares, esto con el objeto de validar a detalle el funcionamiento de estos modelos, su posible mejora y sobre todo, estar en posibilidad de generar cartografía de susceptibilidad en otras áreas.