

Evaluar el Potencial de Dos Productos Satelitales para el Análisis de Amenaza por
Deslizamientos en la Provincia de Guantán, Santander

Edinson Daniel Perilla Martínez y Julián Arturo Beltrán García

Trabajo de Grado para Optar al Título de Ingeniero Civil

Director

Wilfredo del Toro Rodríguez

Ing. Civil -Esp.-Ms.C

Codirector

Derly Estefanny Gómez García

Ing. Civil -Ms.C.

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingeniería Físico-Mecánica

Escuela de Ingeniería Civil

Ingeniería Civil

Bucaramanga

2022

Dedicatoria

La presente tesis está dedicada primeramente a Dios, ya que gracias a Él hemos logrado concluir nuestra carrera.

A nuestros padres, porque siempre estuvieron a nuestro lado brindándonos su apoyo y sus consejos para ser mejores personas.

A nuestros amigos, compañeros, profesores, y todas aquellas personas que de una u otra manera han contribuido para el logro de nuestros objetivos.

Agradecimientos

Agradecemos al profesor Wilfredo Del Toro Rodríguez por su seguimiento y apoyo, no solo durante su cargo como nuestro director de proyecto, sino como director de nuestra Escuela de Ingeniería Civil.

Agradecemos inmensamente a nuestra Codirectora Derly Estefanny Gómez García, por su dedicación y apoyo incondicional para la elaboración de esta investigación.

Agradecemos a Dios y a nuestras familias, Perilla Martínez y Beltrán García por el amor, apoyo y crianza brindado, valores que también cimentaron nuestro triunfo académico.

Tabla de Contenido

	Pág.
Introducción	12
1. Marco Referencial.....	14
1.1 Antecedentes	14
1.2. Marco Teórico.....	16
1.2.1 Movimientos en Masa.....	16
1.2.2. Gestión del Riesgo	17
1.2.3. Correlación de Pearson	19
1.3. Base de Datos.....	19
1.3.1. Inventario de Movimientos en Masa.....	19
1.3.2. Datos de Precipitación y Humedad del Suelo.....	20
2. Metodología	20
2.1. Recolección de Base de Datos	20
2.1.1. Datos de Deslizamientos.....	20
2.1.2. Datos de Lluvia Terrestre y Lluvia Satelital	22
2.1.3. Datos Satelitales de Humedad del Suelo	22
2.2. Análisis de las Variables Condicionantes de Deslizamientos.....	23
2.3. Análisis de las Correlaciones	25
3. Resultados	25
3.1. Evaluación de Integridad	25
3.2. Correlación de las Mediciones de Lluvia (Terrestre y Satelital)	26
3.3. Correlación de Humedad del Suelo con las Mediciones de Lluvia	29

3.4. Correlación de las Bases de Datos con los Indicadores Topográficos.....	30
4. Conclusiones	32
5. Recomendaciones	34
Referencias Bibliográficas	34

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1 Mapa de amenaza de Santander y la Provincia de Guantán.	15
Figura 2 Modelo de un movimiento en masa.....	16
Figura 3 Clasificación de los movimientos en masa.....	17
Figura 4 Registros de deslizamientos en la Provincia de Guantán 21	21
Figura 5 Estaciones hidrológicas en la Provincia de Guantán 22	22
Figura 6 Asociación de deslizamientos a las estaciones mediante polígonos de Thiessen 23	23
Figura 7 Modelo digital de elevación (DEM).....	24
Figura 8 Variables condicionantes de deslizamientos 24	24
Figura 9 Diagrama de valores faltantes de humedad del suelo.....	26
Figura 10 Coeficiente de correlación de Pearson para las mediciones de lluvia terrestre y lluvia satelital diaria.....	27
Figura 11 Coeficiente de correlación de Pearson para las mediciones de lluvia acumulada semanal 28	28
Figura 12 Coeficiente de correlación de Pearson para las mediciones de lluvia acumulada mensual 28	28
Figura 13 Coeficiente de correlación de Pearson para las mediciones de lluvia acumulada trimestral 28	28
Figura 14 Coeficiente de correlación de Pearson entre humedad del suelo y mediciones de lluvia acumulada mensual.....	29
Figura 15 Coeficiente de correlación de Pearson entre la Pendiente y las bases de datos de lluvia y humedad del suelo.....	31

Figura 16 Coeficiente de correlación de Pearson entre el Índice de Humedad Topográfica y las bases de datos de lluvia y humedad del suelo.....	31
Figura 17 Coeficiente de correlación de Pearson entre la Elevación y las bases de datos de lluvia y humedad del suelo.....	32

Glosario

ALOS PALSAR: es un satélite que está compuesto de 3 sistemas independientes (PRISM, AVNIR-2, PALSAR) que adquieren simultáneamente imágenes ópticas e imágenes de RADAR con diversas resoluciones y coberturas.

ArcGIS: proporciona herramientas para el mapeo y el razonamiento espacial. Es un completo sistema que permite recopilar, organizar, administrar, analizar, compartir y distribuir información geográfica.

CHIRPS v2: es una estimación satelital que ofrece datos diarios de precipitación desde hace más de 30 años y con una resolución de 0,05 y 0,25 grados (5,5 y 28 km aproximadamente) en formatos BIL, TIF o NetCDF.

Coefficiente de correlación de Pearson: es una prueba que mide la relación estadística entre dos variables continuas. Si la asociación entre los elementos no es lineal, entonces el coeficiente no se encuentra representado adecuadamente.

Estimación satelital: las estimaciones de la precipitación de los satélites pueden proporcionar información crítica de las precipitaciones en las regiones donde los datos de medidores o de radar no están disponibles o poco fiables, como los océanos o regiones escasamente pobladas.

Indicadores topográficos: son variables que permiten describir aspectos morfológicos del terreno a través del cálculo y sectorización de las pendientes.

LPRM_AMSR2_DS_A_SOILM3: es un conjunto de datos de Nivel 2 (franja). Sus parámetros de la superficie terrestre, la humedad del suelo superficial, la temperatura de la superficie terrestre y el contenido de agua de la vegetación se derivan de los datos de sensores remotos.

Polígonos de Thiessen: consisten en delimitar áreas de influencia a partir de un conjunto de puntos. El tamaño y la configuración de los polígonos depende de la distribución de los puntos originales.

TWI: es una variable geomorfológica que permite identificar los potenciales lugares donde se concentra la humedad o las zonas de acumulación de agua.

Resumen

Título: Evaluar el Potencial de Dos Productos Satelitales para el Análisis de Amenaza por Deslizamientos en la Provincia de Guantán, Santander*

Autor: Edinson Daniel Perilla Martínez y Julián Arturo Beltrán García**

Palabras Clave: Movimientos en Masa, Gestión de Riesgo, Susceptibilidad, Amenaza, Humedad del suelo.

Descripción: Con el desarrollo tecnológico de sensores remotos, las estimaciones de humedad del suelo y precipitaciones obtenidas a partir de satélites han sido con el tiempo de mayor acceso. Por esto, y teniendo en cuenta la escasez de mediciones de dichas variables terrestres, importantes ante la necesidad de distintos análisis relacionados con amenaza y riesgo de diferentes fenómenos naturales, estudiar el potencial de uso de dichas estimaciones satelitales se ha tornado relevante. Por lo anterior, en este estudio se evaluó el potencial de dos productos satelitales, uno de lluvia y otro de humedad del suelo, para estudiar la relación de dichas bases de datos de lluvia y humedad respectivamente con mediciones terrestres de lluvia y diferentes variables morfológicas referidas a estudios de amenaza por movimientos en masa. Este estudio se centra en la provincia de Guantán, una zona situada al suroriente del departamento de Santander, conformada por los municipios de San Gil, Barichara, Charalá, Villanueva y Zapatoca, entre otros. A su vez, se analizaron las variables condicionantes y detonantes de deslizamiento en la zona de estudio en áreas con determinada susceptibilidad para posteriormente validar dos bases de datos satelitales, una de lluvia y otra de humedad del suelo, a partir de la evaluación de correlaciones entre dichas estimaciones satelitales, con el fin de determinar finalmente si las estimaciones satelitales son útiles para el análisis de riesgo por movimientos en masa (Instituto Nacional de Defensa Civil, 2014).

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ingeniería Físico-Mecánica. Escuela de Ingeniería Civil. Ingeniería Civil. Director: Wilfredo Del Toro Rodríguez. Maestría en Ingeniería Civil. Codirector: Derly Estefanny Gómez García. Maestría en Ingeniería Civil.

Abstract

Title: Evaluate the Potential of Two Satellite Products for Landslide Hazard Analysis in the Province of Guantán, Santander*

Author(s): Edinson Daniel Perilla Martínez and Julián Arturo Beltrán García**

Key Words: Mass Movements, Risk Management, Susceptibility, Threat, Soil Moisture

Description: Due to the technological development of remote sensing, soil moisture and precipitation estimates obtained from satellites have become more accessible over time. For this reason and taking into account the scarcity of measurements of these terrestrial variables, important before the need for different analyses related to threat and risk of different natural phenomena, studying the potential use of these satellite estimates has become relevant. Therefore, this study evaluated the potential of two satellite products, one for rainfall and the other for soil moisture, to study the relationship of these rainfall and moisture databases, respectively, with terrestrial measurements of rainfall and different morphological variables related to mass movement hazard studies. This study focuses on the province of Guantán, an area located in the southeast of the department of Santander, comprising the municipalities of San Gil, Barichara, Charalá, Villanueva and Zapatoca, among others. At the same time, the conditioning and triggering variables of landslides in the study area were analyzed in areas with certain susceptibility in order to subsequently validate two satellite databases, one for rainfall and the other for soil moisture, based on the evaluation of correlations between these satellite estimates, in order to finally determine whether the satellite estimates are useful for the analysis of risk due to mass movements.

* Degree Work

** Faculty of Physicomechanical. School of Civil Engineering. Civil Engineering. Director: Wilfredo Del Toro Rodríguez. Magister of Civil Engineering. Co-director: Derly Estefanny Gómez García. Magister of Civil Engineering.

Introducción

Colombia es uno de los países más afectados del mundo por deslizamientos, generados principalmente por las lluvias que ocasionan un reblandecimiento del terreno, sumando que el país está pasando por unos de los inviernos más largos de su historia. Estas condiciones generan movimientos en masa. De acuerdo con algunos estudios realizados por los Comités Nacionales de la gestión de riesgo, el 18% de los colombianos están potencialmente amenazados por deslizamientos, siendo un factor importante la topografía, ya que estos deslizamientos tienen un gran potencial en la Región Andina, principalmente en Boyacá, Cundinamarca, Risaralda, Antioquia, Caldas y en Santander (Baas, Ramasamy , De Prick, & Battista, 2009; Instituto Nacional de Defensa Civil, 2014).

Es importante mencionar que el área total de la región Andina es de 282.540 km², eso quiere decir que equivale al 30% del territorio nacional, con una densidad poblacional de 121.82 Hab/km². Diferentes áreas de la región Andina se caracterizan por su abrupta topografía con diferencias de elevación en cortas distancias (Inundación y deslizamiento; Kuliah & Kuliah, 2019; Levizzani, y otros), generando una alta energía del relieve, el cual son un medio muy importante en los desplazamientos de masas, incluidos los flujos, caídas de rocas, detritos, etc. (El Tiempo, 2015).

De acuerdo con lo mencionado anteriormente, los movimientos en masa generan una gran amenaza para las infraestructuras, poniendo en riesgo las vidas humanas. Es relevante mencionar el incremento notorio de lluvias fuertes ocasionadas por el cambio climático, que, a su vez,

aumentan la frecuencia de deslizamientos de tierra ocasionados por estas fuertes lluvias (Zhao, y otros, 2021).

La información recopilada de la humedad del suelo y la precipitación sirve para suministrar información valiosa para alertas tempranas de deslizamientos. En la literatura se han desarrollado umbrales de humedad del suelo como lo mencionan los autores Zhou, Zhuo, & Krähenbühl, s.f., llevando un monitoreo de deslizamientos de tierra en diferentes condiciones ambientales, como el tipo de suelo y la pendiente, con el fin de dar alertas tempranas de deslizamientos de tierra a nivel regional.

Esta investigación va dirigida al campo de la Geotecnia, específicamente a la gestión de riesgo y amenaza presente en la provincia de Guantán (Instituto Nacional de Defensa Civil, 2014). En la cual se espera aportar al estado del arte por medio de la evaluación de dos bases de datos satelitales, una de precipitación y otra de humedad del suelo, y adicionalmente, proveer la cartografía de los factores desencadenantes o condicionantes de movimientos de masa en la región estudiada (Baas, Ramasamy , De Prick, & Battista, 2009).

Por lo tanto, este estudio tiene como objeto principal evaluar el potencial de los productos satelitales de lluvia y humedad del suelo: CHIRPS v2 y LPRM_AMSR2_DS_A_SOILM3, respectivamente; para el análisis de amenaza por deslizamientos en la Provincia de Guantán, ubicada en el Departamento de Santander, y que se pueda realizar un aporte importante para promover aún más el uso de datos satelitales (Zhao, y otros, 2021).

1. Marco Referencial

1.1 Antecedentes

El departamento de Santander con el paso del tiempo se ha caracterizado por ser una zona de mucha susceptibilidad a movimientos en masa, ya que presenta una topografía con muchas pendientes, ocasionando un alto nivel de potencial de deslizamientos (D. D. E. L. A. Tierra and S. S. Wizard, 2021).

El área es montañosa y altamente propensa a peligros de deslizamientos, ya sea por deslizamientos traslacionales o flujos de tierra lentos. La información de los datos de deslizamientos de tierra para este estudio, fueron suministrados por el Servicio Geológico Colombiano (Servicio Geológico Colombiano, s.f.), del mapa de Santander, el cual almacena información de deslizamientos de varias fuentes, informes, medios de periodismo nacionales y documentos de investigación (Instituto Nacional de Defensa Civil, 2014).

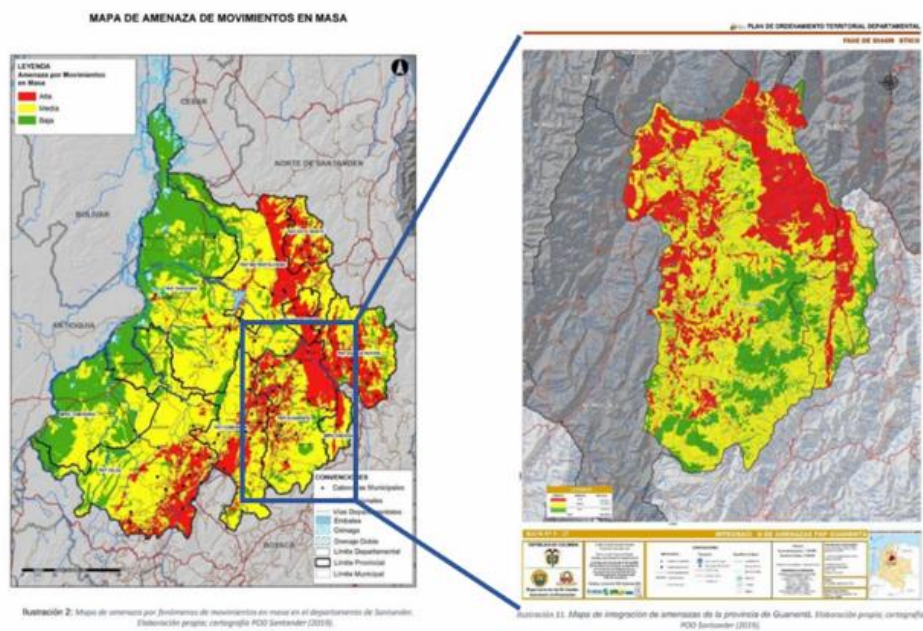
En la literatura a nivel mundial, se han venido implementando estimaciones satelitales de bases de datos de lluvia por diferentes autores (Connor, s.f.).

Específicamente, en la región Andina también se han venido utilizando información de estimaciones satelitales de lluvia como CHIRPS y MSWEP, para la gestión de riesgo relacionado con deslizamientos (Gómez, García-Aristizábal, & E., 2021). No obstante, según el estudio de comparaciones de diferentes estimaciones satelitales (Valencia, Marín, Salazar, Villegas, & Gómez, 2020), la base de datos CHIRPS parece adaptarse mejor como producto satelital para ser empleado en el país.

Teniendo en cuenta lo dicho anteriormente, para la zona de estudio se tomó el mapa de amenaza de Santander, del servicio Geológico colombiano (SGC) (Servicio Geológico Colombiano, s.f.), donde se puede analizar en la Figura 1, que el color rojo representa un alto nivel de amenaza, el amarillo un valor medio y el verde un valor bajo. De acuerdo con estos criterios, esta investigación se centró en las zonas donde se presentan mayores deslizamientos, seleccionando el área de estudio a partir del mapa de amenaza del servicio Geológico Colombiano, de la disponibilidad de información de lluvia terrestre en la zona según las estaciones del IDEAM, de los inventarios de deslizamientos y noticias de medios de comunicación donde se evidencia su susceptibilidad a los movimientos en masa (DesInventar; United Nations Office for Disaster Risk Reduction, 2020; SIMMA, 2020).

Figura 1

Mapa de amenaza de Santander y la Provincia de Guanentá.



Nota. Tomado del Servicio Geológico Colombiano (SGC), s.f.

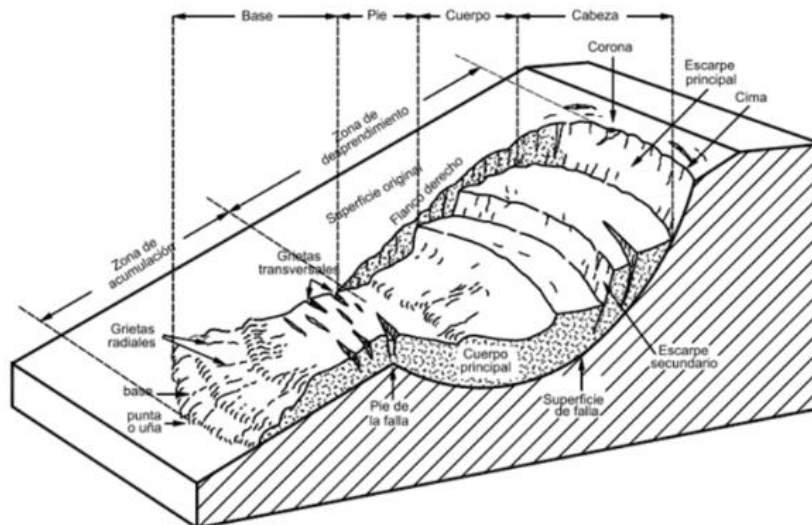
1.2. Marco Teórico

1.2.1 Movimientos en Masa

Los movimientos en masa afectan de manera directa y destructiva vidas humanas y su infraestructura produciendo daños ambientales y del terreno de manera considerable. Estos deslizamientos pueden definirse como el movimiento de una masa de roca, tierra, o escombros que descienden por una pendiente. Su clasificación dependerá de diferentes atributos utilizados como criterios de reconocimiento e identificación, entre los cuales pueden resaltarse el tipo de movimiento o material, la velocidad del movimiento, la geometría del área de falla, entre otros, como el mostrado en la Figura 2 (Osorio, 2010).

Figura 2

Modelo de un movimiento en masa

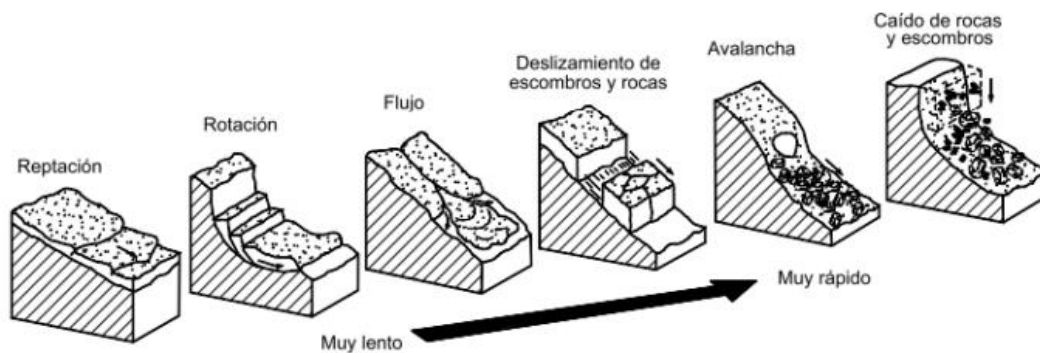


Nota. Tomado de Guía sistemas de gestión de riesgo de desastre, por Baas, Ramasamy , De Prick, & Battista, 2009.

Para la clasificación de los movimientos en masa se presentan los principales tipos propuestos por (Varnes) Caída, inclinación o volcamiento, reptación o creep, deslizamientos traslacionales, rotaciones, compuestos y flujos. Que a su vez consideran de gran importancia la velocidad del movimiento debido a la influencia sobre el poder destructivo de un deslizamiento. Es decir, los deslizamientos rápidos corresponden a catástrofes de gran violencia ocasionando pérdidas humanas, que, en contraste con los deslizamientos lentos casi imperceptibles, presentan riesgo a pérdidas humanas (Tarbuck & F., 2018).

Figura 3

Clasificación de los movimientos en masa



Nota. Tomado de Guía sistemas de gestión de riesgo de desastres por Baas, Ramasamy , De Prick, & Battista, 2009.

1.2.2. Gestión del Riesgo

Para dar más enfoque y poner en contexto sobre los factores causantes de los desastres ocasionados por los movimientos de masas, y los factores detonantes como las lluvias es importante tener presente los siguientes conceptos (Equipo editorial, Etecé, 2020).

- **Riesgo:** Se define como la combinación de la probabilidad de que se produzca un evento y sus consecuencias negativas. Los factores que lo componen son la amenaza y la vulnerabilidad (Baas, Ramasamy , De Prick, & Battista, 2009).
- **Susceptibilidad:** Es el grado de fragilidad interna de un sujeto, objeto o sistema para enfrentar una amenaza y recibir un posible impacto debido a la ocurrencia de un evento adverso (Baas, Ramasamy , De Prick, & Battista, 2009).
- **Amenaza:** Es un fenómeno, sustancia, actividad humana o condición peligrosa que puede ocasionar la muerte, lesiones u otros impactos a la salud, al igual que daños a la propiedad, la pérdida de medios de sustento y de servicios, trastornos sociales y económicos, o daños ambientales. La amenaza se determina en función de la intensidad y la frecuencia (Baas, Ramasamy , De Prick, & Battista, 2009).
- **Factores condicionantes y detonantes de movimientos en masa:** Para estar en contexto es importante conocer lo factores causantes o detonantes de los movimientos en masa, que por consiguiente lleva a desastres naturales. Los factores desencadenantes son: las precipitaciones, los eventos sísmicos y los factores antrópicos, en áreas con determinada susceptibilidad. Dicho esto, una zona con mayor grado de precipitación y movimientos sísmicos es más propensa a los movimientos en masa. Por otra parte, los factores condicionantes son aquellos que forman parte de las propiedades, como lo son: el relieve, la litología, la humedad, la geología, la pendiente, los aspectos de la ladera, entre otros. Dichos factores son cambiantes en tiempo e intensidad (Instituto Nacional de Defensa Civil, 2014).

1.2.3. *Correlación de Pearson*

El coeficiente de correlación de Pearson es en estadística una medida de dependencia lineal entre dos variables aleatorias cuantitativas. A diferencia de la covarianza, la correlación de Pearson es independiente de la escala de medida de las variables. Podemos definir el coeficiente de correlación de Pearson como un índice que puede utilizarse para medir el grado de relación de dos variables siempre y cuando ambas sean cuantitativas y continuas. El valor del índice en la correlación tiene un rango de [-1,1], el cual el signo expresa el sentido de la relación y se expresa de la siguiente manera (Ortega, 2019)

$$r = \frac{n \sum (O_i - \bar{O})(S_i - \bar{S})}{\sqrt{n \sum (O_i - \bar{O})^2} * \sqrt{n \sum (S_i - \bar{S})^2}} \quad (1)$$

Donde,

O_i : Valor unitario de observaciones terrestres

\bar{O} : valor medio de observaciones terrestre

S_i : Valor unitario de estimación satelital

\bar{S} : Valor medio de estimación satelital

1.3. Base de Datos

1.3.1. *Inventario de Movimientos en Masa*

El inventario de movimientos en masa se construyó a partir de la compilación de dos bases de datos nacionales. La primera base de datos corresponde a la del Sistema de Inventario de Desastres de DesInventar; United Nations Office for Disaster Risk Reduction, 2020. La segunda, corresponde al Sistema de Información de Movimientos en Masa (SIMMA) de SIMMA, (2020).

1.3.2. Datos de Precipitación y Humedad del Suelo

Se recopilaron datos de precipitación terrestre del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), disponibles en el sitio web: <http://dhime.ideam.gov.co/atencionciudadano/>). Referente a los productos satelitales, se utilizaron las siguientes estimaciones de lluvia y humedad del suelo respectivamente, y la base de datos “LPRM_AMSR2_DS_A_SOILM3” de resolución temporal diario espacial de 10 km x 10 km, disponible desde mayo de 2012 al presente (Climate Hazard Center UC Santa Barbara, USAID, & UC SANTA BARBARA GEOGRAPHY, 2020).

2. Metodología

Las primeras fases para el desarrollo del proyecto consistían en realizar una búsqueda de información en la literatura, sobre trabajos en los que se evalúe el potencial de diferentes estimaciones satelitales de lluvia y humedad del suelo, para determinar cuáles se pueden implementar en la Provincia de Guanentá, y para realizar sus respectivos análisis para el periodo de tiempo seleccionado, correspondiente al 1 de enero del 2013 hasta el 31 de diciembre del 2019 (Equipo editorial, Etecé, 2020).

2.1. Recolección de Base de Datos

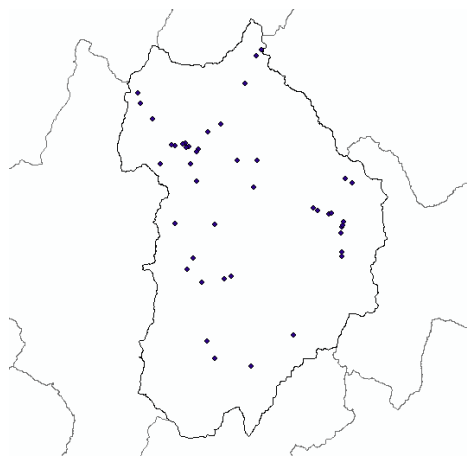
2.1.1. Datos de Deslizamientos

Los registros de deslizamientos de movimientos en masa en la provincia de Guanentá fueron suministrados de dos bases de datos: La primera corresponde a la del Sistema de Inventario

de Desastres (DesInventar; United Nations Office for Disaster Risk Reduction ;, 2020). La segunda, corresponde al Sistema de Información de Movimientos en Masa, del Servicio Geológico Colombiano (SGC) (Servicio Geológico Colombiano, s.f.). Los registros de deslizamientos corresponden al periodo de tiempo seleccionado, y a su vez se filtraron los que se presentaron en la zona de estudio. En la Figura 4, se muestran los 45 deslizamientos seleccionados con sus respectivas coordenadas en el software ArcGIS.

Figura 4

Registros de deslizamientos en la Provincia de Guanentá



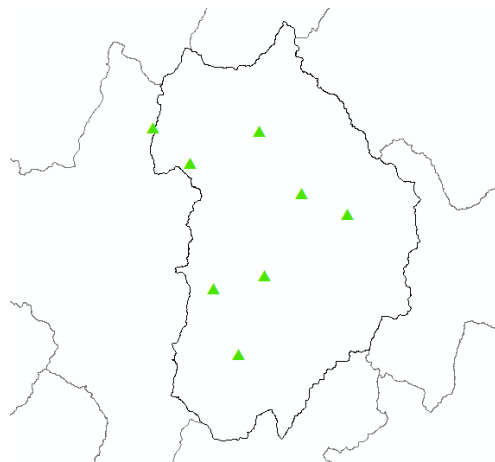
Cabe resaltar que la mayoría de los datos de deslizamientos no tenían las coordenadas donde ocurrieron esos eventos. Sin embargo, contaban con una descripción del deslizamiento y donde ocurrió. Es por ello que se utilizó el software Google Earth Pro, para agregar la coordenada correspondiente al deslizamiento, teniendo en cuenta la descripción de este (PROCALCULO, MVM, DHIME, & IDEAM, 2018).

2.1.2. Datos de Lluvia Terrestre y Lluvia Satelital

Se recopilaron datos de lluvia de mediciones terrestres del IDEAM y mediciones del producto satelital CHIRPS (El Tiempo, 2015). Cada una de estas bases de datos contenía información acerca de la altitud, coordenadas y valor de precipitación diaria, cubriendo toda la zona de estudio para un total de 8 estaciones (Bui, Lofman, Revhaug, & Dick, 2011), como se muestra en la Figura 5.

Figura 5

Estaciones hidrológicas en la Provincia de Guanentá



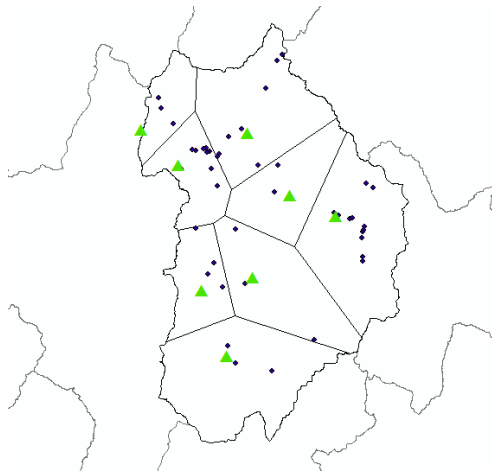
2.1.3. Datos Satelitales de Humedad del Suelo

Los datos de humedad del suelo fueron proporcionados del satélite LPRM_AMSR2_DS_A_SOILM3; a su vez, estos datos fueron tomados para el periodo de tiempo seleccionado, en la coordenada correspondiente de cada uno de los 45 deslizamientos y las estaciones del IDEAM.

Para relacionar los datos de lluvia terrestre y satelital en las estaciones, con los datos de humedad del suelo de los deslizamientos, se realizó un análisis espacial y temporal en el software ArcGIS. Para ello, se asociaron los deslizamientos a las estaciones más cercanas, por medio de unos polígonos de Thiessen como se muestra en la Figura 6, y así tener los datos de lluvia y humedad del suelo en cada uno de los deslizamientos. Estos polígonos de Thiessen tienen la función de delimitar áreas de influencia a partir de un conjunto de puntos; en este caso las 8 estaciones seleccionadas del IDEAM. El tamaño de los polígonos depende de la distribución de los puntos originales.

Figura 6

Asociación de deslizamientos a las estaciones mediante polígonos de Thiessen

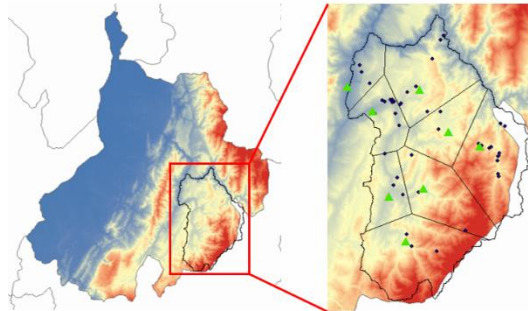


2.2. Análisis de las Variables Condicionantes de Deslizamientos

Se obtuvo el modelo digital de elevación (DEM) a partir del satélite ALOS PALSAR a una resolución de 12.5[m], para realizar el respectivo análisis de las variables geomorfológicas que tienen relación con la lluvia y la humedad del suelo, como se muestra en la Figura 7.

Figura 7

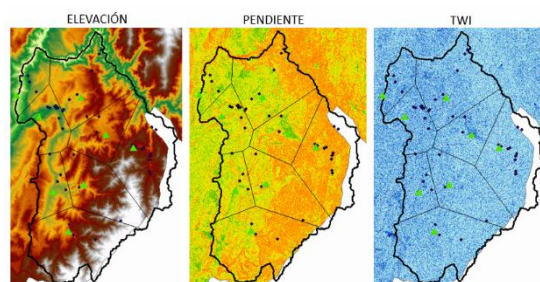
Modelo digital de elevación (DEM)



A partir del modelo de elevación digital (DEM), se seleccionaron y analizaron las diferentes variables condicionantes de deslizamientos en la zona de estudio, correspondientes a la elevación, la pendiente y el índice de humedad topográfica (TWI). Estas variables tienen gran influencia en el análisis del potencial de los productos satelitales de lluvia y humedad del suelo: CHIRPS v2 y LPRM_AMSR2_DS_A_SOILM3, respectivamente, ya que son un indicador directo de la humedad del suelo y la lluvia acumulada en la predicción de deslizamientos de tierra.

Figura 8

Variables condicionantes de deslizamientos



2.3. Análisis de las Correlaciones

Una vez obtenidas todas las bases de datos filtradas por el periodo de tiempo en la zona de estudio para cada uno de los deslizamientos, y también ya seleccionadas las variables condicionantes de movimientos en masa, se realizaron una serie de correlaciones entre las estimaciones satelitales y mediciones terrestres de lluvia (IDEAM), como también con las variables condicionantes. Finalmente, se analizaron los resultados obtenidos en esta investigación, que se mostrarán a continuación.

3. Resultados

3.1. Evaluación de Integridad

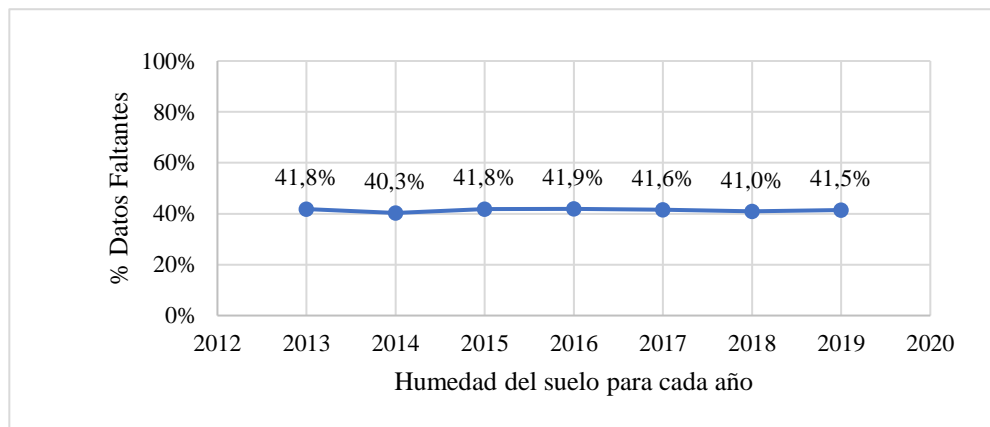
En la investigación de deslizamientos de tierra, el análisis basado en la información sobre la humedad del suelo depende en gran medida de la continuidad de los datos. Sin embargo, debido a problemas técnicos y operativos, normalmente faltan valores en el conjunto de datos. Si bien los valores perdidos individuales tienen poco efecto sobre la efectividad de la información, los valores perdidos múltiples e intermitentes podrían provocar la pérdida de información y afectar la aplicabilidad de los datos. Por lo tanto, primero se evalúa la integridad del conjunto de datos satelitales de humedad del suelo mediante el análisis de los valores faltantes.

En la Figura 9, se muestra el diagrama de valores faltantes para cada año, del producto de datos satelitales de humedad de suelo (LPRM_AMSR2_DS_A_SOILM3), en cada uno de los deslizamientos ocurridos en la provincia de Guanentá para el periodo del 1 de enero de 2013 al 31 de diciembre de 2019.

La proporción de valores faltantes de esta estimación satelital para todo el periodo seleccionado marcó una tendencia con una media del 41.4% y varía poco según las diferentes ubicaciones, ya que los valores faltantes están intercalados con uno faltante por cada uno o dos registros. Esto indica que, los grandes valores faltantes intercalados entre registros dificultan el análisis de investigación para la prevención de deslizamientos de tierra. Por lo tanto, los valores faltantes se tomaron con un valor de 0, para continuar con la evaluación del potencial de esta estimación satelital (Urrea, Ochoa, & Mesa, 2019; Zhao, y otros, 2021).

Figura 9

Diagrama de valores faltantes de humedad del suelo



3.2. Correlación de las Mediciones de Lluvia (Terrestre y Satelital)

Para verificar la validez de las mediciones de lluvia terrestre del IDEAM y lluvia satelital de CHIRPS, se calculó el coeficiente de correlación de Pearson (r) entre estas dos mediciones, para diferentes periodos de lluvia acumulada (diaria, semanal, mensual y trimestral), con el fin de determinar cuál fue la mejor correlación entre dichas mediciones.

En las Figuras 10, 11, 12 y 13, se muestra los histogramas correspondientes a cada periodo de lluvia acumulada para cada una de las 8 estaciones presentes en la zona de estudio. Se observó que, para la correlación diaria, los valores de r son bajos, mientras que, para la correlación semanal, los valores de r aumentan para todas las estaciones con una media del 0,6. Sin embargo, la correlación mensual y trimestral arrojaron mejores valores de r con una media del 0,8. Esto indica que la lluvia acumulada antecedente generalmente se usa como un indicador indirecto de la humedad del suelo en la predicción de deslizamientos de tierra. Por lo tanto, se escogió la correlación mensual para el análisis del potencial de los conjuntos de datos de lluvia y humedad del suelo (Zhao, y otros, 2021).

Figura 10

Coefficiente de correlación de Pearson para las mediciones de lluvia terrestre y lluvia satelital diaria

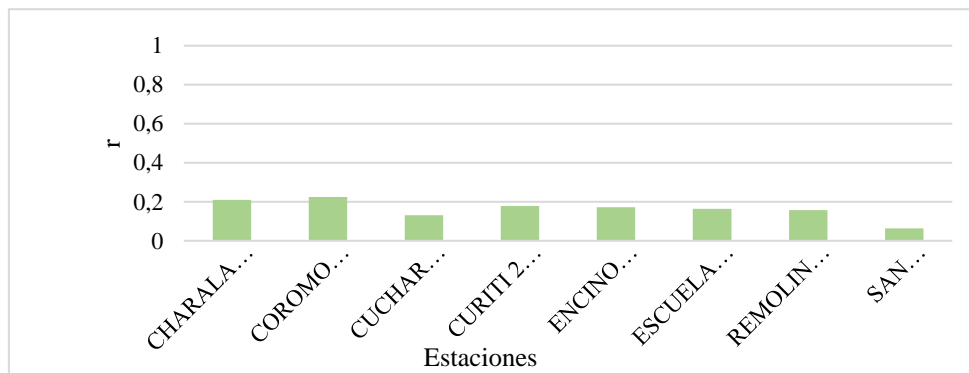


Figura 11

Coefficiente de correlación de Pearson para las mediciones de lluvia acumulada semanal

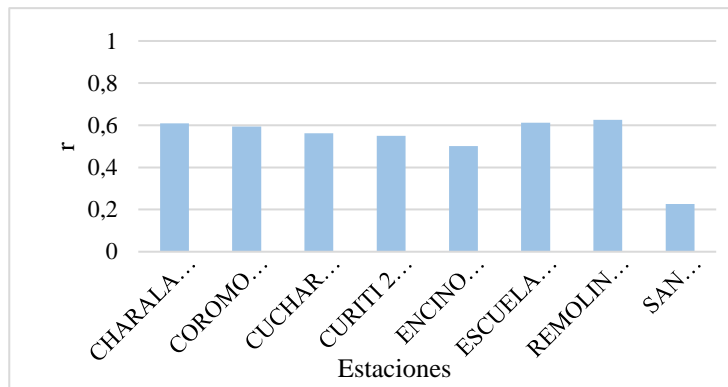


Figura 12

Coefficiente de correlación de Pearson para las mediciones de lluvia acumulada mensual

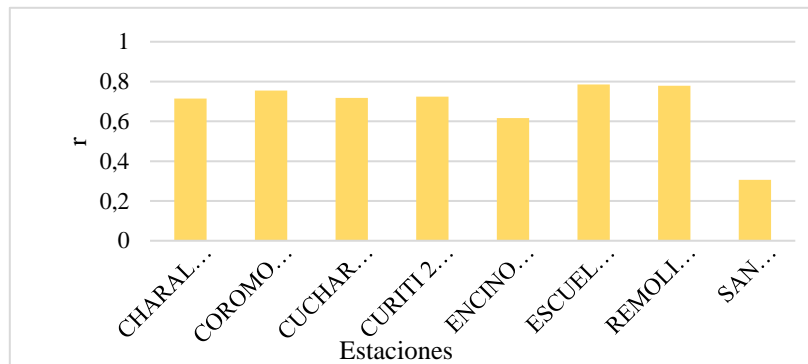
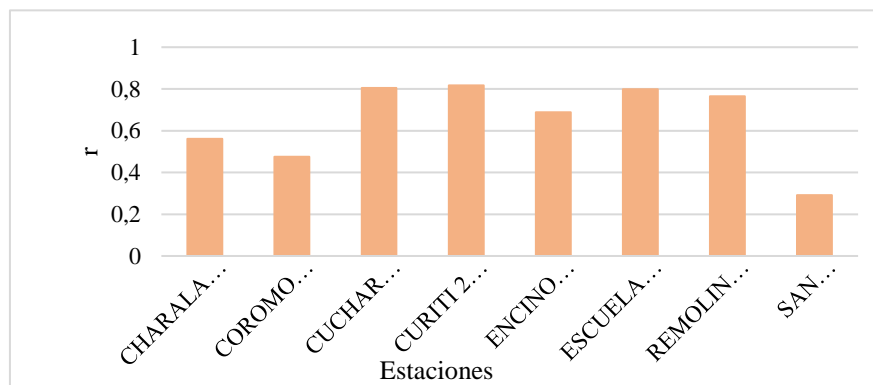


Figura 13

Coefficiente de correlación de Pearson para las mediciones de lluvia acumulada trimestral

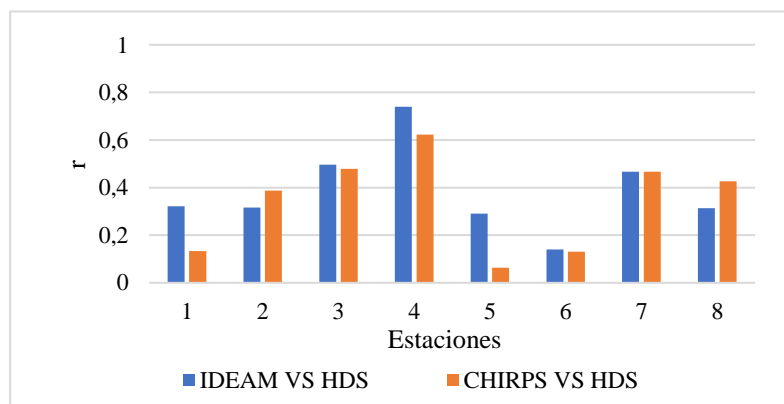


3.3. Correlación de Humedad del Suelo con las Mediciones de Lluvia

La variación temporal de la humedad del suelo se basa en el cambio de las condiciones meteorológicas, especialmente las condiciones de lluvia. A medida que la información sobre la humedad del suelo se vuelve más accesible, se sugiere usar directamente la información sobre la humedad del suelo en las predicciones de deslizamientos de tierra. Para la investigación de la relación entre la humedad del suelo y la información de lluvia comúnmente utilizada, se calculó el coeficiente de correlación de Pearson (r) entre la humedad del suelo y la lluvia acumulada antecedente, que se muestra con histogramas en la Figura 14, donde se identificó una buena correlación de Pearson para las dos comparaciones (Shirvani, 2020; Zhao, y otros, 2021).

Figura 14

Coefficiente de correlación de Pearson entre humedad del suelo y mediciones de lluvia acumulada mensual



La humedad del suelo está correlacionada con la precipitación acumulada antecedente, lo que explica por qué se ha utilizado esta precipitación acumulada con cierto éxito para las predicciones de deslizamientos de tierra en estudios previos, teniendo en cuenta que existen otros

factores que controlan la variación de la humedad del suelo, como la evapotranspiración y el flujo lateral (Bui, Lofman, Revhaug, & Dick, 2011; Zhao, y otros, 2021).

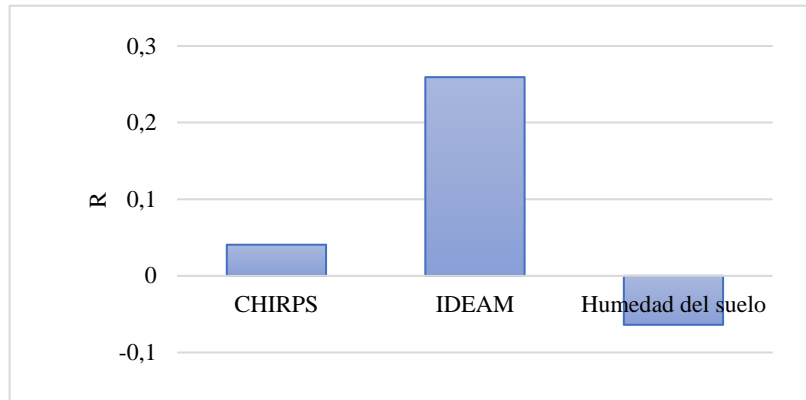
3.4. Correlación de las Bases de Datos con los Indicadores Topográficos

Aunque las dos comparaciones anteriores, muestran valores diferentes de coeficiente de correlación de Pearson, se determinó que existe un patrón similar en esos dos histogramas. Para explicar este patrón, se investigó el control topográfico sobre la distribución espacial de los coeficientes de correlación considerando la elevación, la pendiente y el índice de humedad topográfica (TWI).

Dado que el coeficiente de correlación se basa en los deslizamientos, el valor promedio de los indicadores topográficos (elevación, pendiente y TWI) también se calculó para cada uno de los 45 deslizamientos presentes en la zona de estudio. A continuación, en las Figuras 15, 16 y 17, se muestran unos histogramas del coeficiente de correlación de Pearson (r), frente a los indicadores topográficos para la estimación satelital de humedad de suelo, y para las mediciones de lluvia acumulada terrestre del IDEAM y lluvia acumulada satelital de CHIRPS, donde cada barra hace referencia a cada uno de los conjuntos de datos (Zhao, y otros, 2021).

Figura 15

Coeficiente de correlación de Pearson entre la Pendiente y las bases de datos de lluvia y humedad del suelo

**Figura 16**

Coeficiente de correlación de Pearson entre el Índice de Humedad Topográfica y las bases de datos de lluvia y humedad del suelo

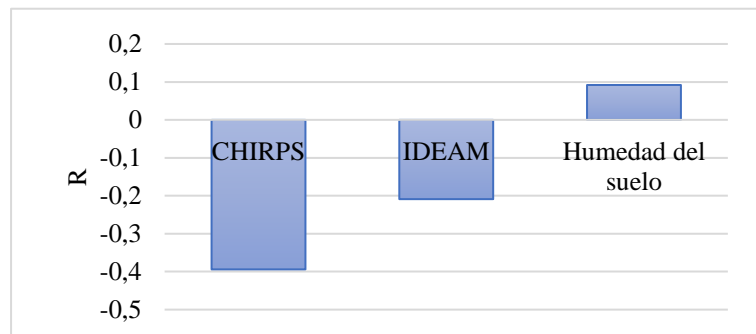
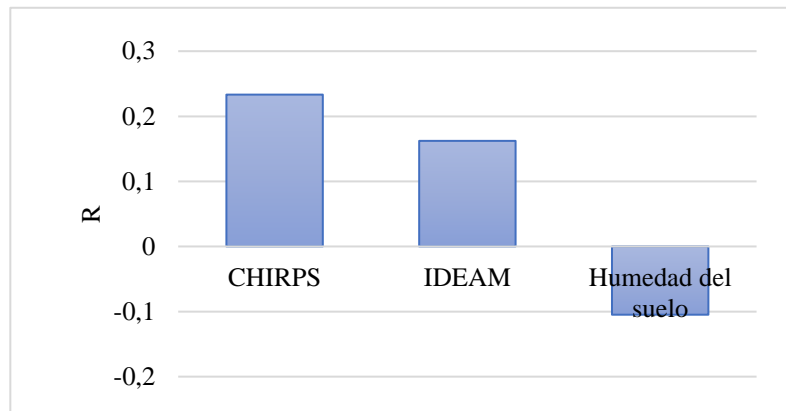


Figura 17

Coefficiente de correlación de Pearson entre la Elevación y las bases de datos de lluvia y humedad del suelo



Como se observa en la Figura 16, tiene sentido que el TWI tenga una correlación positiva con la serie de tiempo de humedad satelital, porque entre mayor es el valor de TWI, el potencial de almacenar agua es mayor, lo que indicaría que esta variable esté relacionada con la tendencia del suelo a la generación de escorrentías, debido a que los perfiles con mayor humedad son más propensos a saturarse, por lo que la precipitación caída sobre ellos puede convertirse fácilmente en escorrentía.

4. Conclusiones

Se determinó que la base de datos satelital de humedad del suelo LPRM_AMSR2_DS_A_SOILM3, no cumple lo establecido por la Organización Meteorológica Mundial, en el cual especifican que cuando se tiene más del 10% de datos faltantes, no se deben utilizar estos datos. Sin embargo, en Colombia no es común tener acceso a mediciones terrestres

de humedad del suelo; es por ello que, se utilizó la base de datos satelital de humedad de suelo LPRM_AMSR2_DS_A_SOILM3 SMAP.

Se concluyó que los datos diarios de lluvia terrestre y lluvia satelital no tienen buenas correlaciones entre sí. Por lo tanto, la mejor opción es acumular los datos de lluvia satelital de CHIRPS para un periodo de 30 días acumulado, con el fin de que se puedan usar y se parezcan a los datos de la medición terrestre de lluvia acumulada del IDEAM para el mismo periodo.

El valor del coeficiente de correlación de Pearson aumenta notoriamente con el incremento de los días antecedentes y alcanza su mejor desempeño cuando la duración del periodo antecedente es de 30 días. Por ende, se determinó que la lluvia acumulada antecedente se usa como un indicador indirecto de la humedad del suelo en la predicción de deslizamientos de tierra, teniendo en cuenta por supuesto, el cambio de las condiciones meteorológicas.

Aunque las correlaciones de Pearson entre la humedad del suelo y los indicadores topográficos (pendiente, elevación, TWI) son bajas, se observó que los diagramas de TWI, tienen un sentido diferente a los diagramas de pendiente y elevación. Esto indica que existe una relación negativa entre estas variables, es decir, cuando TWI es mayor, el flujo lateral tiene un papel importante en la variación de la humedad del suelo.

En este estudio, se evaluó el potencial de dos productos satelitales de lluvia y humedad del suelo, en la evaluación del peligro de deslizamientos de tierra en la Provincia de Guanentá. Se determinó que el producto satelital de lluvia CHIRPS, se desempeña mejor en este estudio comparativo, mientras que el producto satelital de humedad de suelo

LPRM_AMSR2_DS_A_SOILM3 SMAP tiene el 41.4% de valores faltantes intermitentes, estos datos faltantes son inviables para analizar las variaciones temporales de la humedad del suelo.

5. Recomendaciones

Esta investigación sirve como base para futuros estudios en los que se quiera analizar el potencial de diferentes estimaciones satelitales de lluvia y humedad del suelo, tomando como referencia cada una de las correlaciones establecidas anteriormente.

En el caso que se quiera realizar un estudio de alertas tempranas o cualquier trabajo de amenaza por movimientos en masa en la región Andina, se recomiendan los datos satelitales de lluvia CHIRPS acumulados de por lo menos una semana ya que mostraron un buen desempeño, a diferencia de los datos del producto satelital de humedad usado en este trabajo el cual no mostró un buen desempeño.

Referencias Bibliográficas

- ARISTIZÁBAL, E., & YOKOTA, S. (2006). GEOMORFOLOGÍA APLICADA A LA OCURRENCIA DE DESLIZAMIENTOS EN EL VALLE DE ABURRA. 73(149).
Obtenido de http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0012-73532006000200001
- Baas, S., Ramasamy, S., De Prick, J. D., & Battista, F. (2009).
- Beltrán Rincón, L. C. (2019). *ELABORACIÓN DE UN INVENTARIO DE MOVIMIENTOS EN MASA MEDIANTE TÉCNICAS GEOMÁTICAS EN EL MUNICIPIO DE VILLETÁ*

- CUNDINAMARCA*. Trabajo de Grado, UNIVERSIDAD DE CIENCIAS APLICADAS Y AMBIENTALES, Bogotá.
- Bui, D., Lofman, O., Revhaug, I., & Dick, O. (2011). Landslide susceptibility analysis in the Hoa Binh province of Vietnam using statistical index and logistic regression. *Natural Hazards*, 59(3), 1413-1444. doi:10.1007/s11069-011-9844-2.
- Climate Hazard Center UC Santa Barbara, USAID, & UC SANTA BARBARA GEOGRAPHY. (2020). CHIRPS: Rainfall Estimates from Rain Gauge and Satellite Observations. 20-22. Obtenido de <https://www.chc.ucsb.edu/data/chirps>
- Connor, E. (s.f.). Validation Statistics Comparing the Performance of Daily Satellite. 1-13. Obtenido de https://www.researchgate.net/figure/Validation-statistics-comparing-the-performance-of-daily-satellite-rainfall-estimates_tbl2_249603656 1/13
- D. D. E. L. A. Tierra and S. S. Wizard. (2021). 001, 2-3.
- DesInventar; United Nations Office for Disaster Risk Reduction ;. (2020). <https://db.desinventar.org/>. Recuperado el 2022, de <https://db.desinventar.org/DesInventar/profiletab.jsp?countrycode=col&continue=y>
- El Tiempo. (19 de mayo de 2015). Inundación y deslizamiento. *El Tiempo*.
- Equipo editorial, Etecé. (28 de agosto de 2020). *concepto.de*. Recuperado el 2022, de <https://concepto.de/geomorfologia/#ixzz7IIonE2rX>
- Gómez, D., García-Aristizábal, E., & E., A. (2021). Spatial and temporal patterns of fatal landslides in Colombia. *13th International Symposium on Landslides*, (págs. 1-8).
- Instituto Nacional de Defensa Civil. (2014). *Capítulo II Análisis de la Susceptibilidad Ante Peligros por Movimientos en Masa*.
- Kuliah, M., & Kuliah, M. (2019). 33-35.

Levizzani, V., Kidd, C., Kirschbaum, D., Kummerow, C., Nakamura, K., & Turk, F. (s.f.). 2.

Obtenido de <http://www.springer.com/series/5588>

Ortega, C. (2019). *QuestionPro*. Obtenido de <https://www.questionpro.com/blog/es/coeficiente-de-correlacion-de-pearson/>

Osorio, S. (2010). *geotecnia-sor.blogspot.com*. Recuperado el 2022, de https://geotecnia-sor.blogspot.com/2010/11/consistencia-del-suelo-limites-de_19.html

PROCALCULO, MVM, DHIME, & IDEAM. (2018). Obtenido de <https://www.intesco.com.co/wp-content/uploads/2019/09/MANUAL-DEL-USUARIO-CONSULTA-DATOS-HIDROMETEOROLOGICOS-DHIME-IDEAM.pdf>

Servicio Geológico Colombiano. (s.f.). *sgc.goc.co*. Obtenido de <https://www.sgc.gov.co/>

Shirvani, Z. (2020). A holistic analysis for landslide susceptibility mapping applying geographic object-based random forest: A comparison between protected and non-protected forests. *Remote Sens (Basel)*, 12(3). doi:10.3390/rs12030434.

SIMMA. (Mayo de 2020). *SIMMA Sistema de Información de Movimientos en Masa*. Obtenido de <http://simma.sgc.gov.co/>

Tarbuck, E., & F., L. (2018). *Ciencias De La Tierra 1* (Vol. 1).

Urrea, V., Ochoa, A., & Mesa, O. (mayo de 2019). Seasonality of Rainfall in Colombia. *Water Resour Res*, 55(5), 4149-4162. doi:10.1029/2018WR023316

Valencia, S., Marín, E., Salazar, J., Villegas, C., & Gómez, D. (2020). Evaluación espacio-temporal de las estimaciones remotas de precipitación a lo largo de gradientes topográficos y climáticos en la Amazonía y Orionoquía Colombiana. *Seminario nacional de hidráulica e hidrología Barranquilla*.

Varnes, D. J. (s.f.). Slope Movement Types and Processes.

Zhao, B., Dai, Q., Zhuo, L., Zhu, S., Shen, Q., & Han, D. (2021). Assessing the potential of different satellite soil moisture products in landslide hazard assessment. *Remote Sensing of Environment*, 264. doi:10.1016/j.rse.2021.112583

Zhou, X., Zhuo, J., & Krähenbühl, P. (s.f.). Bottom-up Object Detection by Grouping Extreme and Center Points. Obtenido de <https://github.com/xingyizhou/>