

Identification of hazard areas due to landslides on slopes due to soil saturation in the Mariño river catchment, Abancay - Apurímac

Guillermo Aguilar ^{*,a} , Ángel Maldonado ^b 

^aPrograma de Maestría Gestión de Cuencas Hidrográficas, Universidad Nacional Agraria La Molina, Lima, Perú.

^bEscuela Profesional de Ingeniería Civil, Universidad Tecnológica de los Andes, Apurímac, Perú.



<https://doi.org/10.54139/revinguc.v30i1.347>

Abstract.- In the present research, the problem of land mass movements is analyzed through an integrating approach between saturation conditions and landslides, evaluating slope stability by the infinite slope stability model using the SINMAP program (Stability Index Mapping), this being the application of a deterministic and probabilistic method in the environment of a geographic information system, for which the geotechnical and geohydraulic data available for the study area were collected in order to create a landslide hazard susceptibility map. The analysis was carried out on a regional scale through a geographic information system, obtaining detailed information through satellite images to obtain the geotechnical and hydrological characteristics with a field evaluation. For the validation of the SINMAP model, it was calibrated based on the literature of the values obtained and a detailed inventory of superficial landslides that occurred during the last 60 years, the simulated scenario being with eight calibration regions or land uses, the simulation was quite successful in describing slope failure landslides in the study area, identifying 70,69 % of landslides, out of a total of 58 inventoried landslides in areas classified as unstable. The reliability of the simulation was assessed using a ROC curve classification model with 96,7 % overall accuracy.

Keywords: soil saturation; infinite slope; geomechanical properties; stability rate.

Identificación de las zonas de riesgo por deslizamientos de laderas debido a la saturación de suelos en la microcuenca del río Mariño, Abancay Apurímac

Resumen.- En el presente trabajo de investigación se analiza el problema de los movimientos de masa de tierra a través de un enfoque integrador entre las condiciones de saturación y los deslizamientos, evaluándose la estabilidad de taludes por el modelo de estabilidad de pendiente infinita utilizando el programa SINMAP (Mapeo del Índice de Estabilidad), siendo este la aplicación de un método determinístico y probabilístico en el entorno de un sistema de información geográfico, para lo cual se recopilaban los datos geotécnicos y geo hidráulicos disponibles para el área de estudio con el fin de crear un mapa de susceptibilidad al peligro de deslizamientos de tierra. El análisis se realizó a escala regional a través de un sistema de información geográfica obteniendo información detallada a través de imágenes satelitales para obtener las características geotécnicas e hidrológicas con una evaluación de campo. Para la validación del modelo de SINMAP fue calibrado en base a la literatura de los valores obtenidos y un inventario detallado de deslizamientos de tierra superficial ocurridos durante los últimos 60 años, siendo el escenario simulado con ocho regiones de calibración o usos del suelo, la simulación tuvo bastante éxito describiendo los deslizamientos de tierra por falla de taludes en la zona de estudio, identificando el 70,69 % de los deslizamientos de tierra, de un total de 58 deslizamientos inventariados en áreas clasificadas como inestables. La fiabilidad de la simulación fue evaluada mediante un modelo de clasificación de la curva ROC con un 96,7 % de precisión global.

Palabras clave: saturación de suelos; pendiente infinita; propiedades geomecánicas; índice de estabilidad.

Recibido: 07 de febrero, 2023.

Aceptado: 03 de abril, 2023.

1. Introducción

En diversos estudios que realizó [1], debido a la constante actividad geodinámica en la zona de estudio, y que los eventos recientes de deslizamientos en el sector de Fonavi–Moyocorral han sido materia de una evaluación geológica, geodinámica

* Autor para correspondencia:

Correo-e: aggc@lamolina.edu.pe (G. Aguilar)

y geotécnica del sector Fonavi–Abancay, en el que se indica que la ciudad de Abancay se encuentra en una unidad geomorfológica de llanura aluvial, donde muchos asentamientos humanos, se establecen sobre el piedemonte aluvial con materiales no consolidados. Así como el caso anterior muchos sectores donde también existen centros poblados se conforman de areniscas, calizas y niveles volcánicos del grupo Mitu, debido a la ubicación geomorfológica, litológica y buzamiento inclinado a favor de la pendiente por lo que en la zona se producen de manera constante deslizamientos del tipo rotacional debido a la saturación de los materiales aluviales de porosidad alta.

Así mismo, en un estudio realizado para el Instituto Geofísico del Perú, presentó el informe peligro geológico en Tamburco, provincia de Abancay, departamento de Apurímac en el que describe los eventos geológicos de los deslizamientos de Ccocha Pumarana, Pucaorcco, derrumbes en la carretera Abancay–Cusco, reptación de los suelos de Moyocorral y eventos geológicos menores como el puente Chinchichaca, quebrada Ñacchero y sectores de Limapata–San Luis. Analizando el comportamiento geodinámico que se genera en la zona de estudio estableciendo los niveles de peligrosidad por efecto de la saturación de suelos y efectos sísmicos [2].

La presente investigación es un aporte al pleno conocimiento de la problemática del comportamiento de los fenómenos naturales y antrópicos, que debido a la constante actividad de la geodinámica externa del suelo en la microcuenca del río Mariño, vienen generándose diversas dificultades en el crecimiento demográfico, del cual este estudio es un aporte a la planificación del crecimiento urbano en concordancia y armonía con el entorno rural, para el manejo racional de los recursos naturales y del desarrollo sostenible en la microcuenca de estudio.

Lo que se pretende también es reorientar la tendencia del cambio de uso del suelo y al crecimiento caótico de la ciudad de Abancay; peligrosa para sus habitantes, actuando sobre la seguridad física (para reducir el riesgo) con la finalidad de que sea una ciudad sostenible y

competitiva a largo plazo.

Para lograr la identificación de las zonas de riesgo por deslizamientos de laderas debido a la saturación del suelo generadas por precipitaciones en la microcuenca del río Mariño, ha sido necesario recopilar las variables hidrológicas que intervienen en la saturación de suelos así como las variables geomecánicas que intervienen en la susceptibilidad a los deslizamientos de laderas, procesándose dicha información en sistemas cartográficos y generándose mapas temáticos los que se integraron a través de un SIG las variables hidrológicas y geotécnicas para determinarse el índice de estabilidad de taludes o laderas, lográndose obtener el mapa de identificación de deslizamientos producidos por saturación de suelos.

2. Descripción del área de estudio

El ámbito de estudio corresponde a la unidad hidrográfica del río Mariño, este a su vez se ubica en la unidad hidrográfica del río Pachachaca como se presenta en la Figura 1, siendo esta unidad hidrográfica parte de la intercuenca del Alto Apurímac en el área central y oriental del territorio peruano y que conforma la red principal de drenaje de la unidad hidrográfica del río Amazonas, así mismo la cuenca del río Mariño cuenta con un área de 222,5 km² y un perímetro de 71,5 km.

Políticamente, comprende los distritos de Abancay y Tamburco, cuyos límites distritales está conformado por el norte con los distritos de Huanipaca y San Pedro de Cachora, por el este con el distrito de Curahuasi, por el sur con los distritos de Lambrama y Pichirhua, y por el oeste con el distrito de Huancarama este último pertenece a la provincia de Andahuaylas y los demás distritos mencionados pertenecen a la provincia de Abancay ubicado en el norte de la región Apurímac.

El área de trabajo es la cuenca del río Mariño, en la cual han realizado estudios poco detallados de estabilidad de taludes, y los estudios donde se han obtenido mapas de susceptibilidad fueron realizados métodos heurísticos que resultan de la combinación de varios factores físicos ponderados de la cuenca con ayuda de un sistema de información geográfica SIG y la función de algebra

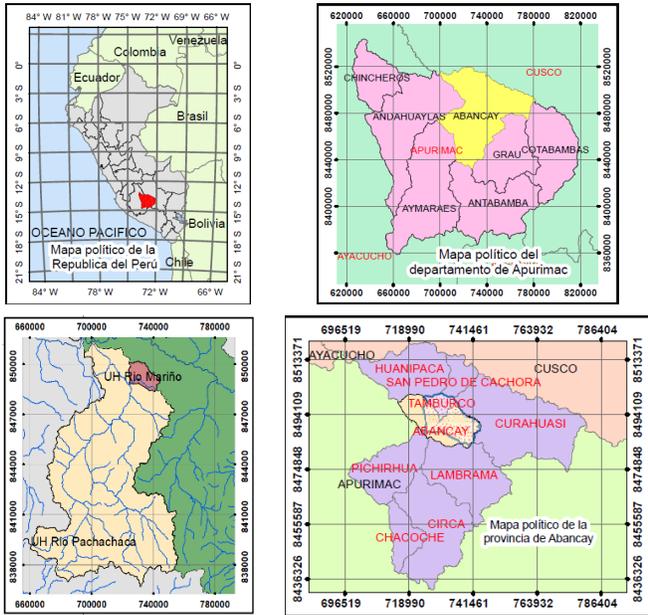


Figura 1: Ubicación espacial de la unidad hidrográfica del río Mariño

de mapas con imágenes vectoriales y raster (Spatial Analyst), para elaborar mapas de estratificación de niveles de susceptibilidad a movimientos en masa.

3. Materiales y métodos

La metodología considera una combinación de procesos determinísticos y probabilísticos en base a parámetros físicos y variables climáticas a fin de lograr áreas con mayor susceptibilidad a la ocurrencia de deslizamientos mediante el cálculo del índice de estabilidad evaluados en base a los factores causantes de dichos eventos (Figura 2). La información de las variables y parámetros han sido compilados mediante el sistema de información geográfica [3].

El modelo de susceptibilidad combina distintos mapas temáticos, mediante la aplicación de la función de probabilidad denominada factor de seguridad, y con dicho parámetro se obtiene el mapa de estabilidad de taludes o laderas, el cual se generó a partir del Modelo Digital del Terreno (MDT), empleando el software SINMAP por su nombre en inglés: Stability Index Mapping [4].

Una vez obtenidos los índices de estabilidad de taludes o laderas se realizó una inspección comparada con el inventario de deslizamientos en

la cuenca el cual sirvió para calibrar el mapa de susceptibilidad y por consiguiente su validación para poder obtener el mapa de predicción de deslizamientos.

Metodología

El índice de estabilidad (SI) fue mapeado en base a seis clases: estable, moderadamente estable, casi estable, umbral inferior de estabilidad, umbral superior de estabilidad y defensa. De acuerdo con [4], el “umbral inferior” y “umbral superior” caracterizan a regiones donde el rango de incertidumbre de los parámetros cuantificados por el modelo representa la probabilidad de inestabilidad menor o superior al 50 % respectivamente.

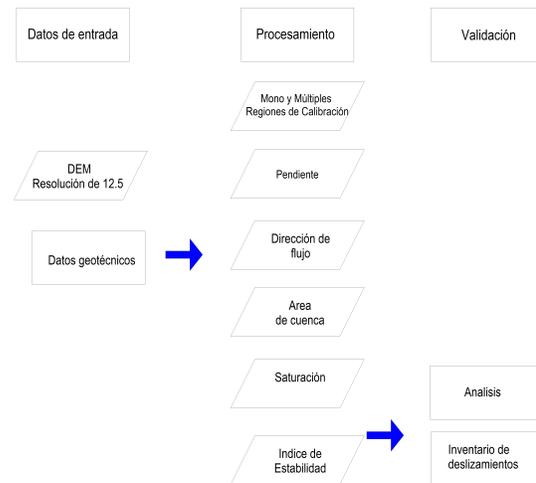


Figura 2: Diagrama de flujo de metodología generalizada que adopta diferentes enfoques de calibración basados en el modelo SINMAP (Estabilidad INdex MAPping)

El Modelo de Elevación Digital del proyecto fue obtenida a partir de la base de datos Alaska Satellite Facility (ASF-NASA), el cual es una fuente de base de datos y cuenta una estación terrestre de rastreo satelital dentro del Instituto Geofísico de la Universidad de Alaska, del cual se obtuvo la imagen satelital ALOS PALSAR, cuyas imágenes tienen una resolución de píxeles de 12,5 m, cuyas imágenes son de tipo ráster el cual brinda datos característicos de altitud que puede ser procesadas en imágenes geomorfológicas del área de estudio generando y obteniendo el Modelo Digital del Terreno (Figura 3). El inventario de deslizamientos

de tierra relacionados con eventos lluviosos como el de marzo del 2012, fueron mapeados con la ayuda de fotografías aéreas a escala de 1:20 000 y visitas de campo georreferenciando e inventariando en un mapa de deslizamientos. Muchas de estas evidencias están relacionadas con deslizamientos de tierra poco profundos, flujo de escombros y avalanchas, que ocurrieron en el límite entre el suelo y el basamento rocoso. Se registraron 58 evidencias de deslizamientos de tierra ocurridos en los últimos 60 años. El mapa de deslizamientos de tierra tiene la forma de un punto, formato utilizado por SINMAP (Figura 4). En la Figura 5 se muestra la frecuencia de deslizamientos de tierra según ángulos de pendiente en la microcuenca del río Mariño. En la Figura 6 se muestra un ejemplo de deslizamiento.

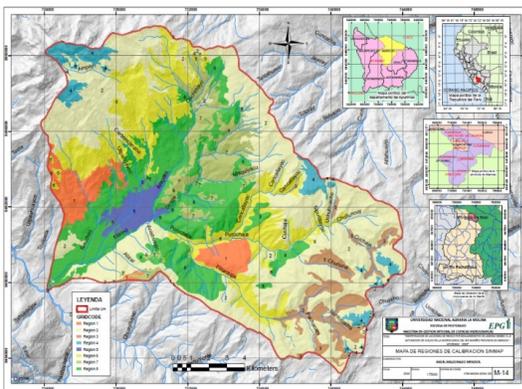


Figura 3: Mapa de regiones de calibración

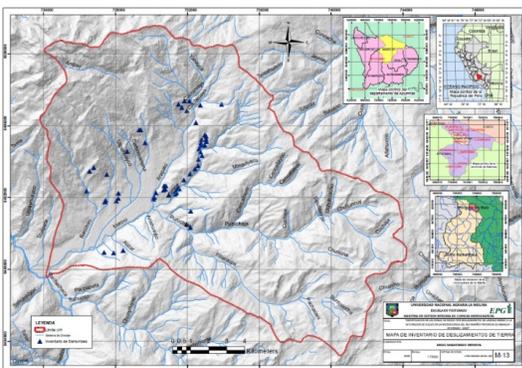


Figura 4: Mapa de inventario de deslizamientos de tierra en los últimos 60 años

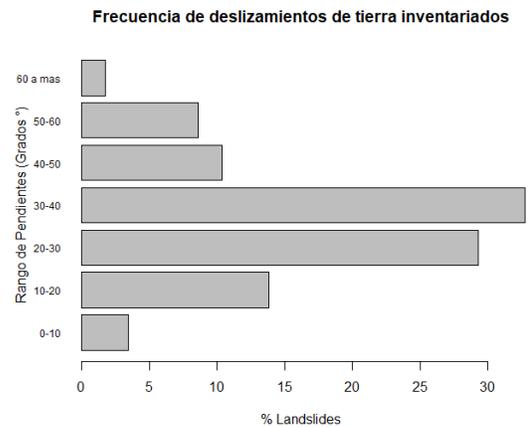


Figura 5: Frecuencia de deslizamientos de tierra inventariados en cada rango de ángulos de pendiente en la microcuenca del río Mariño



Figura 6: Deslizamiento ocurrido el 17 de marzo del 2012 en el sector de Chullurpata Tamburco

Parámetros geotécnicos y geohidráulicos

Los valores de los parámetros geotécnicos y geohidráulicos en SINMAP, fueron considerados lo descrito en la Tabla 1. Se consideró el suelo saturado como una condición inicial ya que el modelo requiere esta definición. Una vez el suelo en condición de saturado, sin embargo, la cohesión adoptada tendría un valor igual a cero, sin tener en cuenta el efecto de las raíces, por lo que se asumió valores de cohesión de 0,00 a 0,28 kPa. Para la conductividad hidráulica saturada, se atribuyó el valor de 2,0 a 3,1 cm/h, siendo estos valores el promedio de un suelo de clasificación intermedia como son arenas y grava de origen aluvial con arenas mal graduadas con grava con pocos finos y sin finos, que caracteriza a suelos con más probabilidad de falla por la excesiva saturación debido a altas tasas de infiltración (<https://www.geotesting.info/parameter/soil-porosity.html>), el espesor de suelo fue 1,5 m en promedio ya que los deslizamientos en

promedio empiezan con espesores de 0,5 a 3,0 m.

Transmisividad (T)

El valor de la transmisividad se determinó como el producto del coeficiente de permeabilidad multiplicado por el espesor de suelo saturado. Para el modelo con resolución de pixel de 12,5 m, el área fue 156,25 m² y la acumulación de flujo fue determinada con la Ley de Darcy (Q_{in} en m/s). Según [5], el flujo o caudal en celdas del flujo acumulado de un mapa ráster para un SIG se calcula de acuerdo con la siguiente ecuación (1):

$$Q_{in} = \frac{q_R \cdot FlowAcumulation \cdot cellsize^2}{t_R} \quad (1)$$

Donde q_R es la cantidad de lluvia (en metros) y t_R es la duración de la lluvia (en segundos). Si la lluvia proviene de una sola estación meteorológica, R es en número que representa la cantidad de lluvia a lo largo de la duración del evento en el tamaño de la celda.

Sin embargo, para una celda ($FlowAcumulation = 1$) se tiene la ecuación (2):

$$Q_{in} = \frac{q_R \cdot cellsize^2}{t_R} \quad (2)$$

Considerando el mismo criterio por analogía a la ecuación de la transmisividad es expresada a través de la ecuación (3):

$$T = K_a \cdot D \cdot cellsize^2 \quad (3)$$

Donde K_a es el coeficiente de permeabilidad en m/día, D es el espesor saturado del suelo en metros y $cell.size$ es el factor de escala que depende de la resolución del DEM, en este caso 12,5 m, así se obtuvieron valores de transmisividad por pixel (imagen ráster), con el valor correspondiente a toda su área y la relación T/R dividiendo la transmisividad entre la recarga R (precipitación en m/día), obteniéndose valores de esta relación que están considerados en [6, 7], al momento de calibrar el modelo SINMAP. También es importante indicar que los valores se encuentran comprendidos entre 2000 y 3000 que corresponden a un rango de precipitación real en la cuenca entre 50 y 30 mm/da [8], para este caso el rango determinado es de

1750 a 2650, valores conservadores ya que el programa SINMAP puede simular con valores de la relación T/R desde un rango de 1 a 30 000,00 para intensidades de precipitación promedio de 20 a 100 mm/h [9]. Además la relación T/R , es muy sensible a la variación de los coeficientes de permeabilidad y se debe tener cuidado en la obtención de este valor ya que requiere de mucha experiencia la interpretación de dichos valores para obtener una modelación adecuada y real (Tabla 1).

Recarga Neta (R)

El valor de R (Recarga Neta) fue asumida considerando la precipitación máxima de 24 horas y para 100 años de tiempo de retorno, así como el suelo en condiciones saturadas [10]. Los valores de la T (Transmisividad), fueron considerados homogéneos para las ocho regiones. Estos valores han sido ordenados para una máxima extensión de zona potencialmente inestables sin embargo al tener poca información de permeabilidad se ha considerado un valor medio de $5,5 \times 10^{-4}$ a $8,3 \times 10^{-4}$ cm/s para las ocho regiones del modelo, tomando en consideración la evaluación realizada por Gómez [2] en la cuenca del río Shullcas, con valor de tasa de infiltración aproximada igual a 2,07 cm/h ($5,5 \times 10^{-4}$) que están dentro del rango asumido de la permeabilidad.

La validez del rango de valores de los parámetros del suelo obtenidos de la correlación empírica fue verificada con valores estándar aceptados en textos de ingeniería geotécnica. Luego se calcularon los parámetros del modelo SINMAP a partir de estas propiedades del suelo (Tabla 2). La fricción interna del suelo, es una de las propiedades que se obtuvo de la literatura disponible [12, 13], ensayos y estudios realizados en la zona del proyecto (Tabla 3). El rango de cohesión se derivó de la cohesión del suelo y el peso unitario, con los valores mínimos y máximos de la cohesión de las raíces extraídas de estudios publicados.

Relación de transmisividad (T/R)

Finalmente, el parámetro de la relación transmisividad / tasa de recarga (T/R) se calculó a partir de la conductividad hidráulica del suelo mencionada anteriormente y una tasa de lluvia de 64,52 mm en

Tabla 1: Parámetros hidráulicos asumidos para el modelo

Parámetros hidráulicos	MIN	MAX	Fuente
Clasificación de suelo	Arena y grava de origen aluvial (GM)	Arena mal gradada, arenas con grava con pocos o sin finos (SP)	Geotechdata.Info, 2013
Conductividad hidráulica, K_s (m/h)	2,00E-02	3,00E-02	Geotechdata.Info, 2013
Transmisividad, T (m^2/d)	0,73	1,11	
Factor de escala (Resolución $12,5 \times 12,5$)	156,25	156,25	Chalkias et al, 2016
Transmisividad en cada pixel (cell size), T (m^2/d)	114,17	173,44	
Recarga hídrica (lluvia en 24 horas), R (mm/día)	64,52	64,52	Senamhi-Elaboración propia
Espesor promedio de suelo (Profundidad) $Dh(m)$	1,5	1,5	Observación de campo
Relación entre la transmisividad del suelo y la recarga T/R	1750	2650	

Tabla 2: Parámetros hidráulicos asumidos para el modelo [11]

Región	Descripción	Fuerza cohesiva, $C(kPa)$		Ángulo de fricción interna Φ (deg)		Fuerza de compresión no confinada (kPa)		Peso unitario (kN/m^3)		Conductividad hidráulica (cm/h)	
		Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max
1	Depósitos aluviales heterogéneos	0	25	20	30	0	40	13,8	21	2	3
2	Residuos morrénicos heterogéneos	0	21	28	36	0	100	14,1	20,4	2	3
3	Depósitos de grano fino y arcillas	5	40	15	30	100	170	18,8	20,4	2	3
4	Afloramiento rocoso	50	200	34	45	45	190	18,8	22	2	3
5	Depósitos aluviales - suelo franco arenoso	0	25	20	30	0	40	13,8	21	2	3
6	Depósitos aluviales heterogéneos con poca vegetación	0	25	20	30	0	40	13,8	21	2	3
7	Depósitos aluviales heterogéneos con vegetación densa	0	25	20	30	0	40	13,8	21	2	3
8	Depósitos aluviales heterogéneos con áreas de cultivo	0	25	20	30	0	40	13,8	21	2	3

24 horas correspondiente a una intensidad de lluvia de 100 años de tiempo de retorno de la estación Abancay (Tabla 1).

Debido a la magnitud del área de estudio la recolección de muestras de suelo y las pruebas de laboratorio estuvieron fuera del alcance para definir algunos parámetros de la geología, vegetación y otros, estos fueron obtenidos de la literatura valores de diferentes autores que trabajaron en proyectos similares y se utilizaron bajo el enfoque de múltiples regiones de calibración, el área de estudio fue dividido en ocho regiones de acuerdo con las unidades litológicas del mapa y características de uso del suelo (Figura 3). En todas las regiones

de calibración se utilizó como datos de entrada aceleración de la gravedad igual a $9,81 m/s^2$ y una densidad del suelo húmedo igual a $2000 (kg/m^3)$. Adicionalmente, teniendo en cuenta lo sugerido por [12, 13], el valor promedio de la profundidad del suelo paralelo al nivel freático fue igual a 1,50 m para la totalidad de área de estudio.

4. Resultados y discusión

La información topográfica es muy importante para el modelo por lo que opto por trabajar con una resolución de 12,5 m para el DEM obtenido y fue muy útil para el procedimiento del cálculo de la estabilidad de laderas y taludes, basados en

Tabla 3: Parámetros geomecánicos asumidos para el modelo. [11, 14, 15]

Región	Descripción	T/R (m)		Densidad de suelo (kg/m ³)		Cohesión (Adm)		Ángulo de fricción interna, Φ (deg)	
		Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max
1	Depósitos aluviales heterogéneos	1750	2650	1406,7	2140,7	0,12	0,28	20	30
2	Residuos morrénicos heterogéneos	1750	2650	1437,3	2079,5	15	0,47	25	35
3	Depósitos de grano fino y arcillas	1750	2650	1916,4	2079,5	0	0,42	15	30
4	Afloramiento rocoso	1750	2650	1916,4	2242,6	0,12	0,25	30	35
5	Depósitos aluviales - suelo franco arenoso	1750	2650	1406,7	2140,7	0,12	0,28	20	30
6	Depósitos aluviales heterogéneos con poca vegetación	1750	2650	1406,7	2140,7	0,12	0,28	20	30
7	Depósitos aluviales heterogéneos con vegetación densa	1750	2650	1406,7	2140,7	0,12	0,28	20	30
8	Depósitos aluviales heterogéneos con áreas de cultivo	1750	2650	1406,7	2140,7	0,12	0,28	20	30

Supuestos utilizados en la ejecución de calibración de modelo
 R = tasa de lluvia = 0,002688 m/h (64,52 mm en 24 horas que corresponde a un período de retorno de 100 años)
 Espesor de suelo = 1,5 m Aceleración de la Gravedad = 9,81 m/s²
 Cr = cohesión de la raíz (min) y 5 kPa (max)

modelos físicos y comprobar su validez a través de la calibración.

Debido a que el estudio de investigación es de carácter regional, la existencia de incertidumbres en la determinación de los parámetros geotécnicos e hidrológicos a nivel de toda la cuenca del río Mariño es variada, aun en una pequeña área, parcela o región de análisis. Los valores oscilan en cierto rango de aproximación, y que la aplicación del modelo de simulación del programa SINMAP se adapta a dicha incertidumbre ya que el modelo matemático asume una distribución estadística uniforme de los parámetros asignados para determinar el valor del índice de estabilidad a través de un modelo probabilístico.

El modelo requiere del inventario de deslizamientos de tierra en el área de estudio, para ello se recopiló información de las evidencias y rezagos de deslizamientos (Tabla 4 y Figura 7), así como de la literatura local especializada e imágenes de satélite del Google Earth y visita de campo dentro del área de estudio, para el cual se identificaron un total de 58 evidencias recientes de diferente magnitud ocurridas en los últimos 60 años que pudieran ser reconocidos por el programa siendo mucho mejor los deslizamientos mayores a 156,25 m² de área

debido a la resolución del DEM.

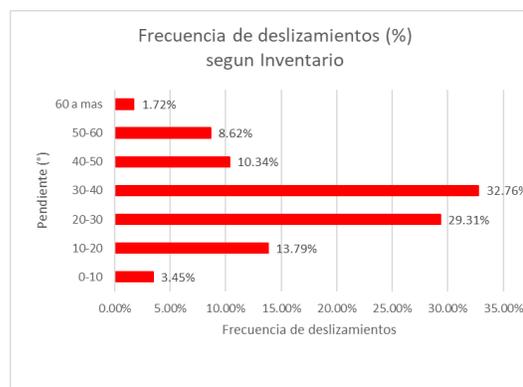


Figura 7: Frecuencia de deslizamientos según inventario

El resultado de los deslizamientos pronosticados por el modelo SINMAP es mostrado mediante la frecuencia de deslizamientos por cada rango de pendientes y región (Tabla 5 y Figura 8). Con respecto a la frecuencia de deslizamientos inventariados (Tabla 4) la mayor cantidad de deslizamientos se produce entre 10 a 60° de pendiente y según la predicción del SINMAP también existe la probabilidad de deslizamientos en zonas con pendiente menores a 10°, situación

Tabla 4: Frecuencia de deslizamientos obtenidos a partir del inventario por rango de pendientes y región

Inventario	Pendientes(°)							Total
	0-10	10-20	20-30	30-40	40-50	50-60	60 a más	
Región 1	0	0	1	0	1	1	0	3
Región 2	0	0	0	1	0	0	0	1
Región 3	0	0	0	0	0	0	0	0
Región 4	0	0	0	0	0	0	0	0
Región 5	1	1	1	0	0	0	0	3
Región 6	0	1	1	5	0	0	0	7
Región 7	1	1	6	6	1	1	0	16
Región 8	0	5	8	7	4	3	1	28
Frecuencia de deslizamientos	2	8	17	19	6	5	1	58
Porcentaje de deslizamientos, %	3,45	13,79	29,31	32,76	10,34	8,62	1,72	100

Tabla 5: Frecuencia de deslizamientos obtenidos a partir del pronóstico del modelo SINMAP por rango de pendientes y región

Inventario	Pendientes(°)							Total
	0-10	10-20	20-30	30-40	40-50	50-60	60 a más	
Región 1	1	8	18	22	3	0	0	52
Región 2	34	85	99	58	27	4	0	307
Región 3	26	18	5	6	0	0	0	55
Región 4	3	4	9	5	1	0	1	23
Región 5	17	11	1	1	0	0	0	30
Región 6	5	33	52	45	23	1	0	159
Región 7	3	19	38	14	4	0	0	78
Región 8	35	47	49	33	8	2	0	174
Frecuencia de deslizamientos	124	225	271	184	66	7	1	878
Porcentaje de deslizamientos, %	14,12	25,63	30,87	20,96	7,52	0,80	0,11	100

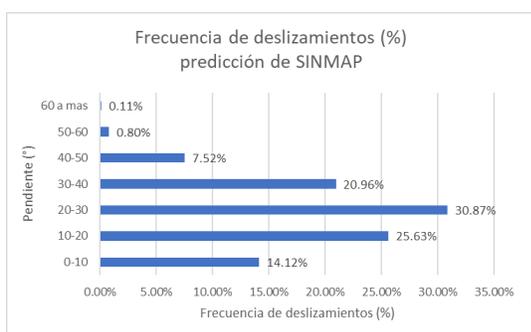


Figura 8: Frecuencia de deslizamientos según predicción de SINMAP

que requiere mayor análisis localizado ya que la incertidumbre del modelo puede generar falsas predicciones.

La fiabilidad de cada simulación fue evaluada mediante análisis ROC, que indica la necesidad de validar los modelos de predicción, a fin de garantizar las capacidades predictivas y valor

científico [16].

Por lo que la simulación tuvo bastante éxito en describir la modelación de las fallas de laderas de pendiente infinita en la microcuenca del río Mariño, identificando el 70,69% de 58 deslizamientos de tierra inventariados.

Acorde con los resultados del modelo, el 70,69% de los deslizamientos de tierra observados fueron identificados correctamente, 32,76% en la clase de umbral inferior de inestabilidad, 25,86% en la clase de umbral superior de inestabilidad y 12,07% en la clase limite muy inestable. Por otro lado, el 29,31% fue clasificado como terreno estable, 8,62% estable, 5,17% moderadamente estable y 15,52% cuasi estable.

La mayor densidad de deslizamientos fue determinada en el umbral inferior (Tabla 6) que representa el 32,76% del territorio. Las áreas propensas a deslizamientos de tierra se

Tabla 6: inventario de deslizamientos integrados al modelo SINMAP para la calibración en las ocho regiones de la microcuenca Mariño

Total	Estable	Moderadamente estable	Cuasi-estable	Umbral inferior	Umbral superior	No definido	Total
Área (km ²)	55,6	20,1	31,2	59,9	23	6,8	196,6
Porcentaje de Región, (%)	28,28	10,22	15,87	30,47	11,70	3,46	100,00
Frecuencia de deslizamientos	5	3	9	19	15	7	58
Porcentaje de deslizamientos, (%)	8,62	5,17	15,52	32,76	25,86	12,07	100,00
Densidad de deslizamientos (#/km ²)	0,09	0,15	0,29	0,32	0,65	1,03	0,30

caracterizaron por la pendiente entre 10 a 60 grados y áreas de acumulación por debajo de 1000 m².

Las áreas para fallar durante el evento de marzo de 2012 incluyeron con pendientes entre 10 y 60 grados (factor de seguridad por debajo de 1) y áreas de captación por debajo de 1000 m². Estos resultados están de acuerdo con [17], quienes señalan que la geomorfología del área del deslizamiento de marzo del 2012, se caracterizaron por presentar fuertes pendientes (entre 30° a 45°) y que la zona montañosa, donde tuvo origen el deslizamiento de Chuyllurpata, se caracteriza por pendientes fuertes, superiores a los 30° con predominancia de farallones rocosos que condicionan favorablemente el movimiento en masa de suelo [17].

El modelo de análisis para las ocho regiones de calibración individual, contribuyeron en el resultado final de diferentes maneras. La región 1 en la Figura 9, ha contribuido con el 5,2 % de los deslizamientos de tierra, considerado como correctamente estimado. La región 2 ha contribuido con el 1,7 % de los deslizamientos de tierra. La región 3 y 4 no han contribuido debido a que dichas áreas son en su mayoría planicies altoandinas y con pendientes mínimas para generar deslizamientos de tierra. La región 5 ha contribuido con el 1,6 % de los deslizamientos de tierra, siendo esta región la zona urbana ha tenido problemas de reptación y deslizamiento de tierras en el sector de FONAVI.

La región 6 ha contribuido con más del 10,3 % de los deslizamientos de tierra que se predijeron correctamente. La región 7 también ha contribuido con más del 20,7 % de los deslizamientos de tierra y

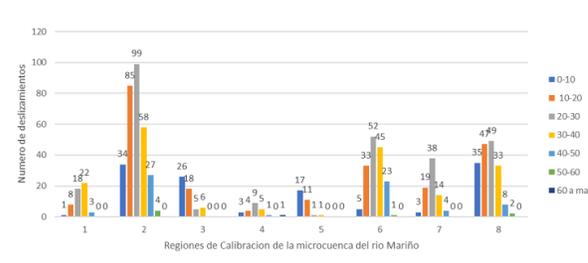


Figura 9: Número de deslizamientos de la predicción del modelo SINMAP para las 08 regiones de calibración con sus respectivos rangos de pendientes del terreno

que la mayoría de datos inventariados se predijeron correctamente dentro de esta zona y la región 8 ha contribuido más del 31,0 % de los deslizamientos de tierra, considerando también que la mayoría de los deslizamientos inventariados sucedieron dentro de esta zona.

Cabe resaltar que las regiones 3, 4 y 5 en la Figura 9 mostraron que una baja proporción de las áreas afectadas por deslizamientos se ubican en zonas con baja susceptibilidad, probablemente debido a limitaciones en la cantidad de datos inventariados, así como la falta de verificación de los parámetros geotécnicos en las regiones 2 y 3.

De la predicción del modelo, destaca la región de calibración 2 que presenta una alta probabilidad de deslizamientos por saturación del suelo, llegando a identificar de hasta 99 potenciales deslizamientos entre los 20 a 30 grados de pendiente del terreno y en mayor proporción la región 2 es la más inestable y las zonas 4 y 5 serían las más estables debido a la baja pendiente en las zonas altas y parte del valle.

Los resultados del proceso de SINMAP (Figura

ra 10), con diferentes predicciones según el índice de estabilidad que se genera en dicho modelo, se ha obtenido que cierto número de puntos de deslizamientos se encuentran en la zona inestable ($SI > 1$). De manera que se confirma la predicción con el inventario, siendo este punto verdadero positivo (Vp) lo que sirve para calibrar el modelo según la prueba ROC.

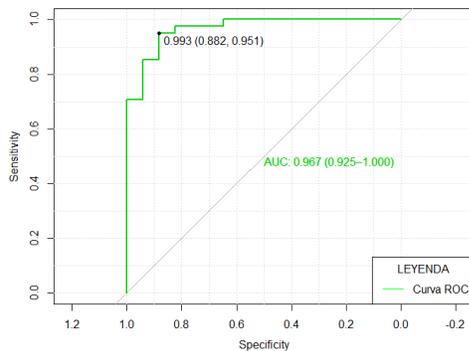


Figura 10: Curva ROC derivadas de simulaciones SINMAP con todas las regiones de calibración (verde). Área bajo la curva: 0,967 95 % CI: (0,9252-1,000)

El resultado del análisis de la curva ROC indica que la precisión global representada por el área bajo la curva (AUC) fue igual a 0,967 (Figura 10), siendo este un valor mayor a 0,50, tiene un valor de aceptación muy alto del modelo e indica que el 96,7 % de los valores corresponden a una predicción correcta y el 3,3 % de los datos el modelo predice en forma errónea.

Con el mapa del índice de estabilidad (Figura 11) y la utilización de la información temática que se encuentra en formato digital, permitió mejorar la capacidad de gestionar deslizamientos de tierra e información geomorfológica en los sistemas de información geográfica que han facilitado la preparación de modelos predictivos de deslizamientos de tierra para prevenir futuros eventos adversos.

El mapa de susceptibilidad de deslizamientos (Figura 13) fue generado a partir de las simulaciones con SINMAP, determinándose los índices de estabilidad, con una adecuada calibración de las ocho regiones. Los resultados obtenidos fueron analizados para cuantificar la discrepancia espacial

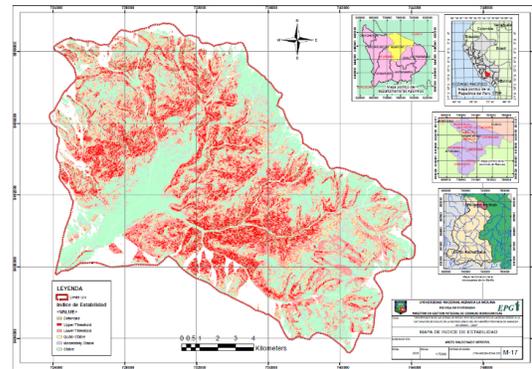


Figura 11: Precisión de la predicción del modelo SINMAP con 08 regiones de calibración

entre los deslizamientos de tierra provocados por la precipitación de diciembre a marzo que corresponden a períodos húmedos con alta saturación de suelos y su contraste con los resultados del modelo (Figura 12).

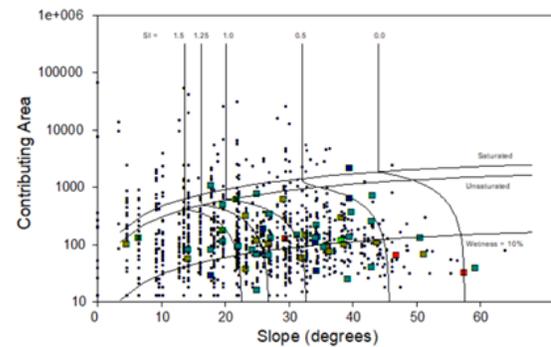


Figura 12: Gráfico de área de pendiente de deslizamientos de tierra inventariados (colores) y puntos de posibles deslizamientos (negro) vs. clases de índice de estabilidad

Una vez identificadas las zonas de derrumbes a través de su factor de seguridad o índice de estabilidad en taludes y laderas, se procedió generar el mapa de susceptibilidad en combinación con los mapas de uso potencial del suelo, uso actual del suelo y el mapa de inestabilidad, dando lugar al mapa de susceptibilidad por riesgo de deslizamientos (Figura 13).

El mapa de susceptibilidad se podrá usar en futuras evaluaciones de riesgo, con las mejoras y ajuste necesarios, mediante pruebas adicionales de campo y focalizadas en datos geotécnicos obtenidos en laboratorio, así como estudios

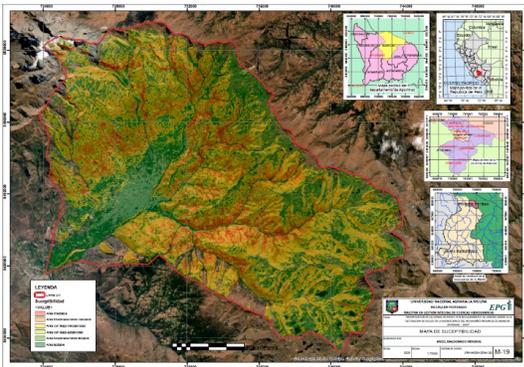


Figura 13: Mapa de susceptibilidad obtenida de acuerdo a la calibración del modelo

hidrológicos e hidrogeológicos en cada zona o región de la cuenca. La clasificación de las áreas estables e inestables de la microcuenca del río Mariño se muestra en la Tabla 7.

Tabla 7: Clasificación de áreas estables e inestables de acuerdo al mapa de susceptibilidad en la microcuenca del río Mariño

Descripción	Área (km ²)	Porcentaje (%)
Muy inestable	8	4,06
Moderadamente inestable	23,7	12,02
Con baja inestabilidad	60,2	30,54
Con baja estabilidad	31	15,73
Moderadamente estable	20,1	10,20
Estable	54,1	27,45
Total	197,10	100,00

5. Conclusiones

Las variables hidrológicas identificadas fueron la precipitación mensual 788,12 mm, y evaporación mensual obtenidas de la base de datos PISCO, con 1093,68 mm de promedio anual, así mismo la precipitación máxima de 24 horas obtenidas de los datos históricos de SENAMHI registrados en la estación San Antonio de Abancay, igual a 64,62 mm para un tiempo de retorno de 100 años.

Las variables geotécnicas para el cálculo del factor de seguridad utilizadas en las 8 regiones de calibración fueron: la profundidad del suelo saturado igual a 1,5 m, la cohesión adimensional

entre 0,0 y 0,47 considerando la cohesión de las raíces y la cohesión del suelo al grado de saturación, el ángulo de fricción interna del suelo entre 15° y 35°, los pesos unitarios del suelo entre 13,8 y 22,0 kN/m³.

Debido al alcance regional del estudio, fue necesario recopilar y generar mapas temáticos como el de uso de suelo, uso potencial del suelo, litografía, geología e hidrografía y mapas climáticos. La información topográfica básica del Modelo de Elevación Digital (DEM) fue obtenida de la base de datos satelital ALOS PALSAR, con resolución de sus píxeles de 12,5 m. Se realizó el inventario georreferenciado de los deslizamientos de tierra ocurridos en los últimos 60 años, que fueron utilizados para la validación del modelo.

La integración de las variables hidrológicas y geotécnicas fueron realizadas con el modelo SIN-MAP, a fin de determinar el índice de estabilidad. Durante el cálculo se utilizó la distribución de probabilidad uniforme para definir el rango de valores de la relación transmisividad y recarga hídrica, el ángulo de fricción interna y cohesión del suelo delimitados por un límite inferior y superior. La mayor cantidad de deslizamientos fueron determinados en áreas con suelos coluviales compuestos por una matriz de suelos arenoso, con presencia de lutitas y limo arcilloso, donde el 78,0 % de los 878 deslizamientos pronosticados se encuentran entre los 10° y 50° de pendiente de ladera. Estos tipos de suelo son similares a los deslizamientos de tierra que ocurrieron en los sectores de Ccocha Pumaramra (1997) y cerro Chullyurpata (2012), y que estos deslizamientos donde el rango de pendientes varía de 10° y 50°. El modelo simulación tuvo éxito al describir el deslizamiento de taludes en la microcuenca del río Mariño y que el 70,69 % de los deslizamientos de tierra inventariados fueron clasificadas como zonas inestables, sin embargo, sobre 29,31 % del área el modelo no predice correctamente los deslizamientos de masas de tierra.

El mapa de susceptibilidad muestra 92,00 km² de área inestable, que representa el 46,63 % de área total. Áreas muy inestables con 8,0 km² (4,07 % del área total), áreas moderadamente inestables con 23,7 km² (12,04 % del área total) y área con

baja inestabilidad con 60,2 km² (30,52 % del total total) y un área estable de 105,3 km² que cubren el 53,37 % m del área total. Así mismo, las áreas estables han sido clasificados como áreas con baja estabilidad con 31,0 km² (15,73 % del área total), áreas moderadamente estables con 20,1 km² (10,21 % del área total) y área muy estable con 54,1 km² (27,43 % del área total), en consecuencia la cuenca del río Mariño es altamente inestable ya que el 46,63 % de su área es susceptible a sufrir deslizamientos de tierra provocado por la saturación de suelos, por lo que requiere un estudio focalizado de áreas muy inestables para determinar el riesgo y vulnerabilidad de zonas con asentamientos humanos, zonas urbanas, periurbanas y comunidades aledañas.

6. Referencias

- [1] Instituto Geofísico del Perú IGP, “Evaluación geológica, geodinámica y geotécnica del sector fonavi – abancay,” Ministerio del ambiente, Lima, Perú, Reporte técnico, 2018.
- [2] J. Gómez, “Peligro geológico en tamburco provincia de abancay departamento de apurímac,” Instituto Geofísico del Perú IGP, Lima, Perú, Reporte técnico, 1998.
- [3] I. Cereceda, “Uso de los SIG en el análisis de susceptibilidad y predicción de deslizamientos,” in *Compendio de trabajos de investigación CNDG*. Perú: Biblioteca Instituto Geofísico del Perú, 2006.
- [4] R. Pack, D. Tarboton, C. Goodwin, and A. Prasad, *SINMAP User’s manual, A Stability Index Approach to Terrain Stability Hazard Mapping*. Canada: Canadian Forest Products Ltd., 2005.
- [5] C. N. Chalkias, N. Stathopoulos, K. Kalogeropoulos, and E. Karymbalis, “Applied Hydrological Modeling with the Use of Geoinformatics: Theory and Practice,” in *Empirical Modeling and Its Applications*, M. M. Habib, Ed. Intech Open Science, 2016, ch. 4. <https://doi.org/10.5772/62824>
- [6] D. W. Park, N. V. Nikhil, and S. R. Lee, “Landslide and debris flow susceptibility zonation using TRIGRS for the 2011 Seoul landslide event,” *Natural Hazards and Earth System Sciences*, vol. 13, no. 11, pp. 2833–2849, 2013. <https://doi.org/10.5194/nhess-13-2833-2013>
- [7] B. Thiebes, R. Bell, T. Glade, J. Wang, and S. Bai, “Application of SINMAP and analysis of model sensitivity – case studies from Germany and China,” *Revue roumaine de géographie*, vol. 60, no. 1, pp. 3–25, 2016. <https://hdl.handle.net/10863/6959>
- [8] H. Lan, C. Zhou, L. Wang, H. Zhang, and R. Li, “Landslide Hazard spatial analysis and prediction using GIS in the Xiaojiang watershed, Yunnan, China,” *Engineering Geology*, vol. 76, no. 1–2, pp. 109–128, 2004.
- [9] M. Morrissey, G. Wieczorek, and B. Morgan, “A comparative analysis of hazard models for predicting debris flows in madison county, virginia,” Department of the Interior, U.S. Geological Survey, Washington, D.C., USA, Report, 2011.
- [10] P. Biswajeet and B. Manfred, *Terrigenous Mass Movements, Detection, Modelling, Early Warning and Mitigation Using Geoinformation Technology*. Berlin, Germany: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2012. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-25495-6>
- [11] S. Mabee and C. Duncan, “Slope stability map of massachusetts,” Massachusetts Emergency Management Agency, the Federal Emergency Management Agency and The Massachusetts Department of Conservation and Recreation, Massachusetts, USA, Tech Report, 2013.
- [12] C. Cardozo, “A spatially integrated modelling approach to landslide risk assessment: A case study of the nova friburgo disaster - rj,” Tesis Doctoral, Brazil Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE, Brasil, 2018.
- [13] M. Marqués, R. Silva, J. Fraga, N. Coelho, and A. Sato, “The influence of vegetation cover and soil physical properties on deflagration of shallow landslides - nova friburgo, rj / brazil,” in *19th EGU General Assembly, EGU2017, proceedings from the conference held 23-28 April*, Vienna, Austria, 2017.
- [14] Instituto Nacional de Defensa Civil, Programa de Ciudades Sostenibles, “Mapa de peligros de la ciudad de abancay,” PROYECTO INDECI-PNUD-PER/02/051, Abancay, Perú, Informe técnico, 2007.
- [15] D. Apaza, *Estudio Geodinámico y Suelos del valle de Abancay – Plan Director de Abancay*, Municipalidad Provincia de Abancay Apurímac, Perú, 1997.
- [16] C. Chung-Jo and A. Fabbri, “Validation of spatial prediction models for landslide hazard mapping,” *Natural Hazards*, vol. 30, no. 3, pp. 451–472, 2003. <https://doi.org/10.1023/B:NHAZ.0000007172.62651.2b>
- [17] S. Villacorta y P. Valderrama, “Evaluación del flujo de detritos de tamburco, provincia de abancay, región apurímac,” Instituto Geológico Minero y Metalúrgico INGEMMET, Perú, Informe Técnico N°A6595, 2012.