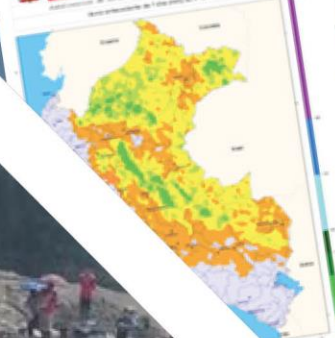


MANUAL DEL SISTEMA DE MONITOREO EN MASA POTENCIALES GENERADOS DE LLUVIAS INTENSAS DEL SENAMHI (SILVIA)



Sistema de Monitoreo y Pronóstico de Movimientos en Masa generados por Lluvias Intensas (SILVIA)

Lluvia antecedentes 7 días



Peligro de movimientos en masa



Mapa de peligros de movimientos en masa

Niveles de peligro

Desde el 2019, con la finalidad de mejorar la detección de las lluvias intensas, Senamhi...

**MANUAL DEL
SISTEMA DE MONITOREO
EN MASA POTENCIALES
GENERADOS DE LLUVIAS
INTENSAS DEL SENAMHI
(SILVIA)**





DIRECTORIO

PhD. Ken Takahashi Guevara
PRESIDENTE EJECUTIVO DEL SENAMHI

Ing. Oscar G. Felipe Obando
DIRECTOR DE HIDROLOGÍA DEL SENAMHI

PhD. Waldo Lavado Casimiro
SUBDIRECTOR DE ESTUDIOS E INVESTIGACIONES HIDROLÓGICAS DEL SENAMHI

REVISADO POR:

PhD. Waldo Lavado Casimiro
Subdirector de Estudios e Investigaciones Hidrológicas
wlavado@senamhi.gob.pe

ELABORADO POR:

Ing. Carlos Millán Arancibia
Especialista en Hidrología

Lima-Perú
Diciembre - 2019

Citar como:

Millán, C. Manual del sistema de monitoreo de movimientos en masa potenciales generados de lluvias intensas del Senamhi (SILVIA). Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú –SENAMHI. Dirección de hidrología -DHI. Diciembre 2019

CONTENIDO

I.	INTRODUCCIÓN	1
II.	MATERIALES Y METODOS	2
2.1	Datos de precipitación	2
2.2	Datos de susceptibilidad por movimientos en masa	2
2.3	Umbrales de precipitación	4
2.4	Área de análisis (cuencas nivel 12)	4
2.5	Marco de árbol de decisión	6
III.	RESULTADOS	8
3.1	Mapa de susceptibilidad por cuencas de nivel 12	8
3.2	Umbrales de precipitación en las cuencas seleccionadas	9
3.3	Bases de datos de eventos movimientos en masa	9
IV.	LIMITACIONES DEL PRODUCTO	10
V.	SILVIA	11
VI.	REFERENCIAS	12

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Centro poblado Mirave, 04 de febrero de 2019 (COER Tacna, 2019).....	1
Figura 2 Mapa de susceptibilidad por movimientos en masa del Perú (INGEMMET, 2010).....	3
Figura 3 Subcuencas de Nivel 12 (Proyecto HydroSheds, 2013).....	6
Figura 4 Combinación de clases de susceptibilidad y niveles de incidencia de lluvia en la matriz de peligro.	7
Figura 5 Árbol de decisiones para la emisión de alertas de peligro de la probabilidad de ocurrencia de movimientos en masa (SENAMHI, 2019).....	7
Figura 6 Mapa de susceptibilidad por movimientos en masa del Perú por cuenca de Nivel 12 - Pfastetter.	8
Figura 7 Umbrales de Índice de Lluvias Antecedente Ponderada a los percentiles 90 (a), 95 (b) y 99 (c).....	9
Figura 8 Distribución de los eventos de movimientos en masa registrados a la fecha.....	10
Figura 9 Plataforma de SILVIA	11

MANUAL DEL SISTEMA DE MONITOREO DE MOVIMIENTOS EN MASA POTENCIALES GENERADOS POR LLUVIAS INTENSAS DEL SENAMHI (SILVIA)

1. INTRODUCCIÓN

En el Perú, las lluvias intensas son el segundo fenómeno natural con mayores personas afectadas en las últimas décadas. Asimismo, uno de los peligros asociados a este fenómeno son los movimientos en masa, dentro de los cuales tenemos las caídas o desprendimientos, vuelcos, deslizamientos rotacionales y planares, expansiones laterales, flujos y deformación de pendientes; ya sean de rocas o suelos, según la clasificación de Varnes (1996), actualizada por Hungr y Picarelli (2013).

Siendo el más habitual el flujo de detritos, conocido como flujo de derrubios o flujo de escombros, también es comúnmente conocido en el Perú como huaycos. Dichos peligros naturales, sumados a una alta vulnerabilidad de las ciudades y poblaciones en el país, todavía representan un alto riesgo en el Perú.

Entre el 2015 y 2018, se han registrado 733 emergencias ocurridas por huaycos (INDECI, 2018).



Figura 1. Centro poblado Mirave, 04 de febrero de 2019
Fuente: (COER Tacna, 2019)

Es por esta razón que el SENAMHI, ha implementado un Sistema de monitoreo de movimientos en masa potenciales generados por lluvias intensas (SILVIA). Que tiene como factor desencadenante las lluvias intensas, debido a que numerosas investigaciones científicas a nivel global sobre el monitoreo de movimientos en masa por lluvias intensas (MLI), verifican que el uso conjunto de umbrales de lluvias y mapas de susceptibilidad de movimientos en masa son una buena herramienta en el monitoreo y pronóstico de MLI (Segoni et al., 2018).

2. MATERIALES Y MÉTODOS

a. Datos de precipitación

El SENAMHI, ha generado un producto grillado a nivel nacional denominado Peruvian Interpolated data of SENAMHI's Climatological and Hydrological Observations (PISCO), que cuenta con un producto operativo diario PISCO-prec_operativo (PISCOop_Pp), el cual fue generado en base a los datos pluviométricos de la red de estaciones pluviométricas del SENAMHI y presenta información de precipitación interpolada a nivel nacional en formato raster a una resolución espacial de 10 km x 10 km, que se actualiza diariamente de forma automática.

b. Datos de susceptibilidad por movimientos en masa

Para la implementación de SILVIA se ha utilizado el mapa de susceptibilidad por movimientos en masa elaborado por el Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico (INGEMMET, 2010) y que se presenta en la **Figura 2**, el cual cuenta con cinco (5) categorías de susceptibilidad cuyos criterios utilizados se presentan en la **Tabla 1** (Villacorta, 2012).

Tabla 1. Categorización de susceptibilidad por movimientos en masa del Perú)

CATEGORÍA/CRITERIO	
	Muy Alta: Laderas con zonas de falla, masas de rocas intensamente meteorizadas, saturadas y muy fracturadas; con discontinuidades desfavorables, depósitos superficiales inconsolidados, laderas con pendientes entre 30° a 45°, movimientos en masa anteriores y/o antiguos. En estos sectores existe alta posibilidad de que ocurran movimientos en masa.
	Alta: Laderas que tienen zonas de falla, masas de roca con meteorización alta a moderada, fracturadas con discontinuidades desfavorables; depósitos superficiales inconsolidados, materiales parcialmente a muy saturados, laderas con pendientes entre 25° a 45°, donde han ocurrido movimientos en masa o existe la posibilidad de que ocurran.
	Media: Laderas con algunas zonas de falla, erosión intensa o materiales parcialmente saturados, moderadamente meteorizados, laderas con pendientes entre 20° y 30°, donde han ocurrido algunos movimientos en masa y no existe completa seguridad de que no ocurran movimientos en masa. Estos pueden ser “detonados” por sismos y lluvias excepcionales
	Baja: Laderas con materiales poco fracturados, moderada a poca meteorización, parcialmente erosionados, no saturados, con pocas discontinuidades favorables. Pendientes entre 10° a 20°. Zonas que tienen pocas condiciones para originar movimientos en masa, salvo que puede ser afectada por movimientos en masa ocurridos en zonas de susceptibilidad alta a muy alta cercanas a ellas, detonadas principalmente por lluvias excepcionales
	Muy Baja: Laderas no meteorizadas, con discontinuidades favorables. Terrenos con pendientes menores a 5° donde no existen indicios que permitan predecir deslizamientos.

Fuente: INGEMMET, 2010

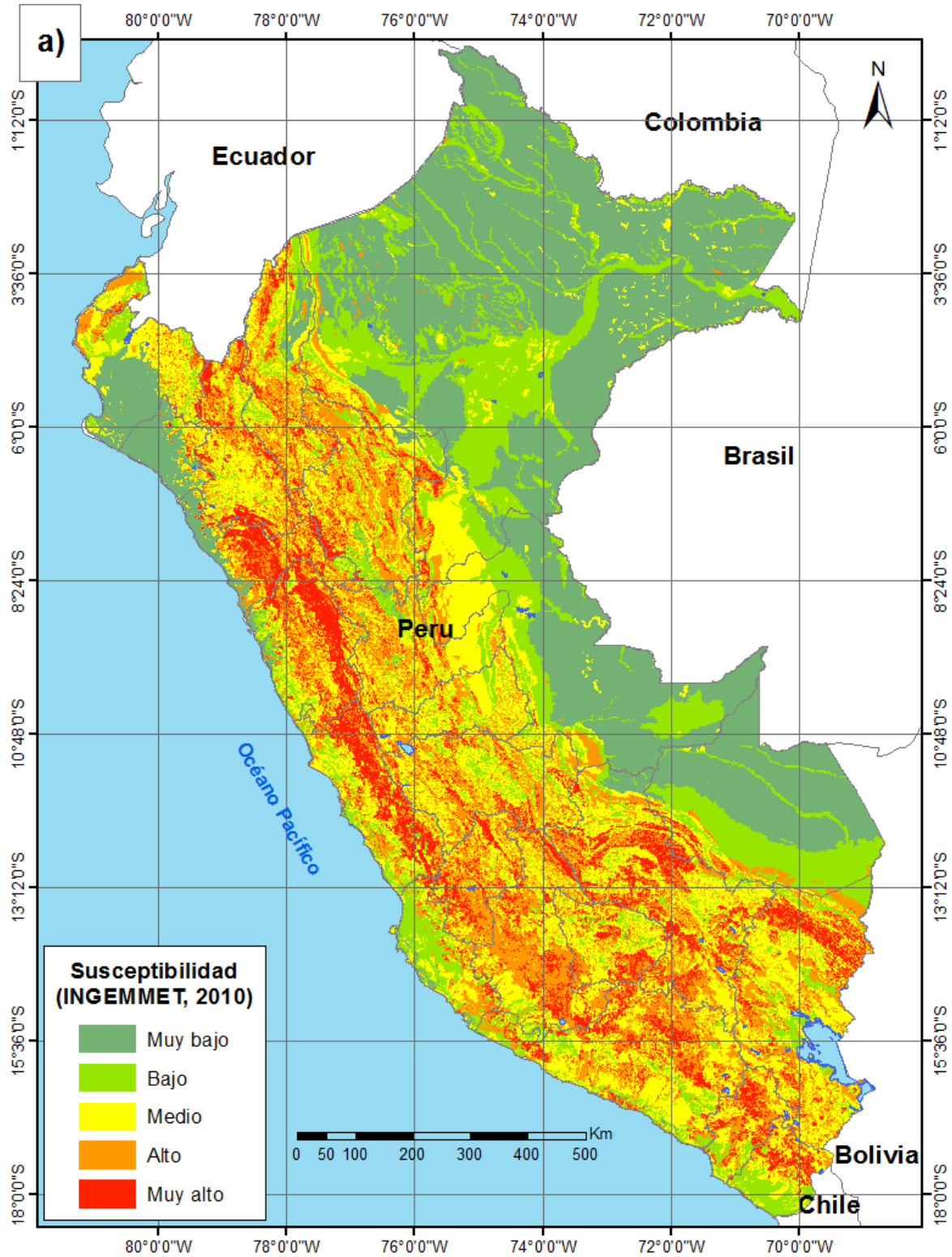


Figura 2. Mapa de susceptibilidad por movimientos en masa del Perú
 Fuente: INGEMMET, 2010

c. Umbrales de precipitación

Kirschbaum and Stanley (2018) determinaron un Índice de Lluvia Antecedente-ILA (*Antecedent Rainfall Index*) a nivel global, a partir del promedio ponderado de los últimos 7 días de lluvia. Dicha cantidad de días antecedentes fue el resultado de una calibración global con 949 eventos entre los años 2007 a 2013. Se adaptó esta metodología para establecer los umbrales utilizados en SILVIA v1.

ILA calcula un promedio ponderado de los últimos 7 días de lluvia. La función para determinar ILA se presenta en la ecuación 1:

$$ILA = \frac{\sum_{t=0}^6 p_t w_t}{\sum_{t=0}^6 w_t} \quad (1)$$

donde t es el número de días antes del presente, p_t es la precipitación en el tiempo t , y $w_t = (t+1)^{-2}$. El exponente de ponderación de -2 y la duración de la acumulación de 7 días se calibraron con 949 deslizamientos de tierra de los años 2007 a 2013 (Kirschbaum et al., 2018).

Se determinaron los ILA de las lluvias de los últimos 7 días como una ventana móvil, para los periodos húmedos de cada año entre los meses de noviembre a abril, en toda la serie histórica de PISCO Operativo de precipitación, considerando como periodo climatológico de referencia 1981-2010. A partir de los ILA se establecieron tres (3) umbrales en base a los percentiles de 90% (P90), 95% (P95) y 99% (P99).

En segundo lugar, se definieron tres (3) niveles de incidencia de la precipitación, el primero como Incidencia Baja (L1) con el ILA entre el P₉₀ y el P₉₅, Incidencia Media (L2) con el ILA entre el P₉₅, y el P₉₉, e Incidencia Alta (L3) con el ILA mayor a P₉₉.

d. Área de análisis (cuencas nivel 12)

En esta versión de SILVIA el área de análisis para la emisión de alertas son las cuencas de nivel 12 según el método Pfafstetter, obtenidas del producto HydroBASINS v1.0 del proyecto HYDROSHEDS¹ (Figura 2).

Lehner (2013), indica que HydroSHEDS (**H**ydrological data and maps based on **S**huttle Elevation Derivatives at multiple Scales), proporciona información hidrográfica para aplicaciones a escala regional y global. HydroSHEDS ofrece un conjunto de set de datos georreferenciados en formato ráster y vectorial, que incluyen redes de corrientes, límites de cuencas hidrográficas, direcciones de drenaje y capas de datos auxiliares, como acumulaciones de flujo, distancias e información de topología de ríos.

¹ <https://www.hydrosheds.org/>

HydroSHEDS ha sido desarrollado por el Programa de Ciencias de la Conservación del Fondo Mundial para la Naturaleza (WWF), en asociación o colaboración con el Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS); el Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT); The Nature Conservancy (TNC); Universidad McGill, Montreal, Canadá; la Universidad Nacional de Australia, Canberra, Australia; y el Centro de Investigación de Sistemas Ambientales (CESR), Universidad de Kassel, Alemania. JohnsonDiversey, Inc. y Sealed Air Corporation proporcionaron fondos importantes para este proyecto a WWF.

HydroSHEDS se deriva principalmente de los datos de elevación de la Misión de Topografía por Radar Shuttle (SRTM) a una resolución de 3 segundos de arco. Además, se utilizó una variedad de conjuntos de datos auxiliares para referencia y control de calidad, incluidos los Datos del Cuerpo de Agua SRTM (SWBD); la red fluvial de la Carta Digital del Mundo (también conocida como VMAP0); la Base de Datos Global de Lagos y Humedales (GLWD); y varios otros mapas de ríos digitales globales y regionales.

La cantidad de cuencas de nivel 12 de HydroSHEDS, incluidas dentro del territorio nacional son en total 10849, con un área media de 118.57 km².



Figura 3. Subcuencas de Nivel 12
Fuente: Proyecto HydroSheds, 2013

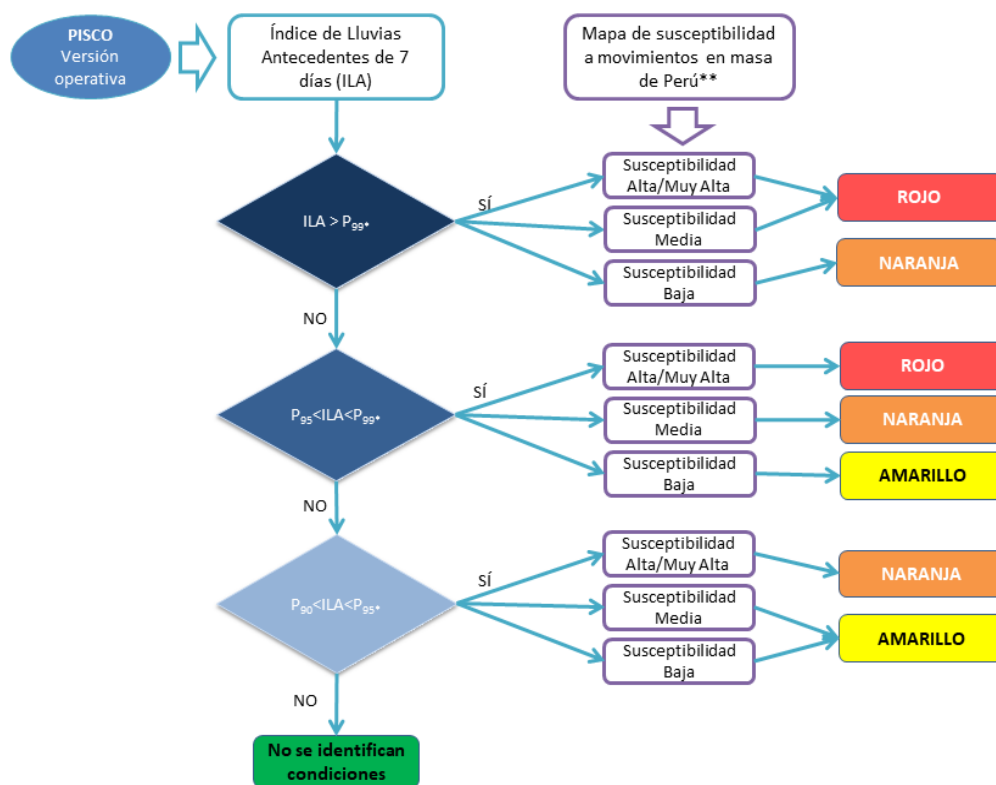
e. Marco de árbol de decisión

Se ha establecido un esquema para la determinación del nivel de peligro, que se presenta en la Figura 4, con la información de los niveles de susceptibilidad a movimientos en masa S1 (Nivel bajo), S2 (Nivel Medio) y S3 (Nivel Alto y Muy Alto) en la parte superior; y los niveles de incidencia de la precipitación L1 (Incidencia Baja), L2 (Incidencia Media) y L3 (Incidencia Alta). A partir del cual se ha contrastado ambos parámetros de ingreso y se ha definido tres Niveles de Probabilidad del Peligro de Ocurrencia de Movimientos en Masa P1 (Peligro Moderado), P2 (Peligro Fuerte) y P3 (Peligro Extremo).

	S2 Susc. Baja	S3 Susc. Media	S4 Susc. Alta y Muy Alta
L1 $P_{90} < ILA < P_{95}$	P1	P1	P2
L2 $P_{95} < ILA < P_{99}$	P1	P2	P3
L3 $ILA > P_{99}$	P2	P3	P3

Figura 4. Combinación de clases de susceptibilidad y niveles de incidencia de lluvia en la matriz de peligro.

A partir del esquema de la Figura 4, se ha establecido el árbol de decisiones para la emisión de alertas del peligro para la probabilidad de ocurrencia de movimientos en masa detonados por lluvias intensas, ver Figura 5.



* P99%, P95% Y P90%: Percentiles de ILA sobre la época de lluvia (NDEFMA)
 ** Mapa de susceptibilidad del INGEMMET (2010)

Figura 5. Árbol de decisiones para la emisión de alertas de peligro de la probabilidad de ocurrencia de movimientos en masa
 Fuente: SENAMHI, 2019

3. RESULTADOS

a. Mapa de susceptibilidad por cuencas de nivel 12

Las cuencas de nivel 12, fueron superpuestas con el Mapa de Susceptibilidad Adaptado de INGEMMET. Y para cada cuenca se ha determinado su nivel de susceptibilidad, considerando la moda de las categorías de susceptibilidad dentro de su área de extensión. Para el monitoreo en SILVIA, se están considerando dos restricciones, la primera es que no se consideró las zonas categorizadas con susceptibilidad Muy Baja pues no existen indicios para prever peligros por movimientos en masa, y la segunda es que no se están considerando las cuencas de nivel 12 que tengan una pendiente menor a 4.1° , se considera este valor para incluir en el monitoreo las zonas que contemplan las quebradas de alto impacto en el país, esta restricción responde a la disminución de falsas alarmas en zonas donde el relieve es plano y no hay una posibilidad para la activación de quebradas al no estar asociada a una pendiente fuerte. El resultado se presenta en la **Figura 6**.

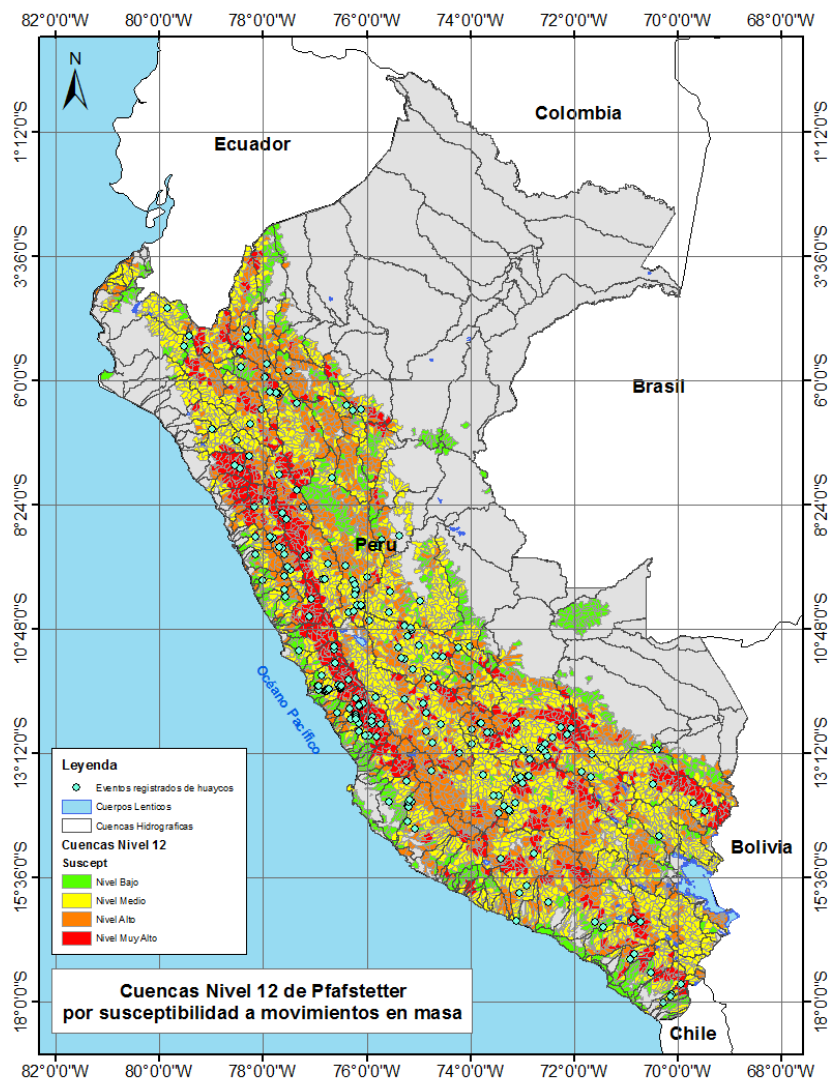


Figura 6. Mapa de susceptibilidad por movimientos en masa del Perú por cuenca de Nivel 12 – Pfafstetter

Fuente: Adaptado de INGEMMET

b. Umbrales de precipitación en las cuencas seleccionadas

A partir del análisis de la serie histórica de precipitación PISCO, se estimó una serie móvil de Índice de Lluvia Acumulada de 7 días. Luego del cual, se estimó los umbrales de precipitación desarrollados a partir de los percentiles de ILA, a los percentiles de 90, 95 y 99 (ver figura 7).

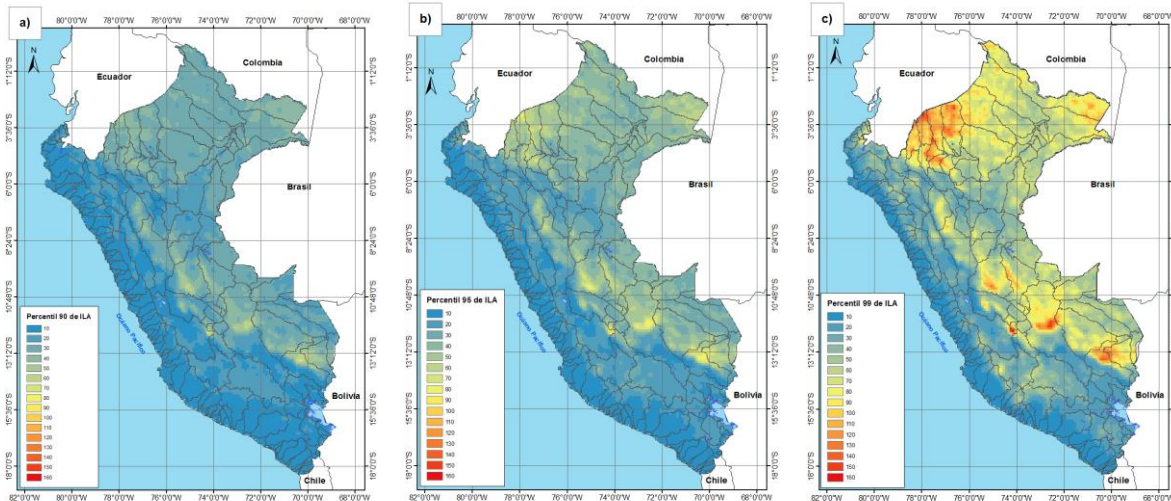


Figura 7. Umbrales de Índice de Lluvias Antecedente Ponderada a los percentiles 90 (a), 95 (b) y 99 (c)

c. Bases de datos de eventos movimientos en masa

Como parte del sistema de monitoreo de movimientos en masa, se ha implementado una plataforma para registrar eventos de movimientos en masa desencadenados por lluvias intensas (huaycos) que se presentan en el país. Dicha plataforma viene registrando 229 eventos desde el año 2017 a la actualidad.

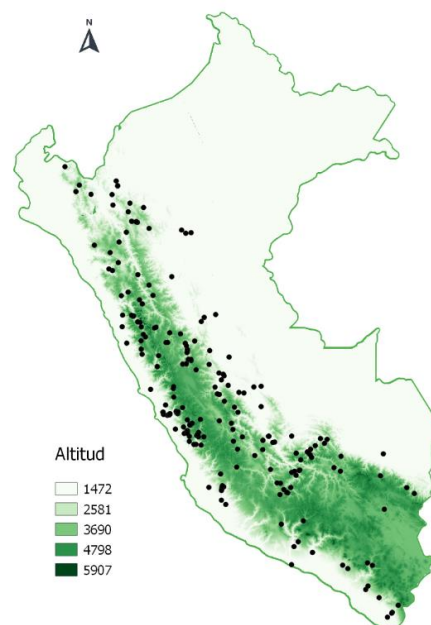


Figura 8. Distribución de los eventos de movimientos en masa registrados a la fecha

La implementación de este registro tiene como objetivo la generación, validación y/ o mejora de los umbrales predictores de movimientos en masa usados en SILVIA. Pues es necesario la sistematización de esta información, con el fin de obtener modelos confiables en el tiempo, con geolocalización y características principales de estos peligros.

La forma de ingresar los eventos es a través de un formulario que consta de once datos de ingreso, los cuales se detallan a continuación:

- i. Dirección de correo electrónico (De la persona responsable del registro)
- ii. Fecha (Fecha del evento)
- iii. Hora (Hora del evento)
- iv. Población más cercana (pueblo, distrito)
- v. Departamento
- vi. Latitud (en grados)
- vii. Longitud (en grados)
- viii. Observaciones (alguna observación acerca del evento)
- ix. Impactos
- x. Llenado por (Nombre de la persona responsable del registro)
- xi. Link web de noticia (Fuente de la información del evento)

4. LIMITACIONES DEL PRODUCTO

SILVIA, es una herramienta que depende únicamente de dos variables base: susceptibilidad y precipitación. Por lo que la principal limitación está dada por el nivel de representatividad, resolución y confiabilidad de dichas variables base del modelo.

Una segunda limitante es que SILVIA sólo considera la lluvia antecedente como factor desencadenante, y aunque se ha determinado que la lluvia es el factor más importante para originar los movimientos en masa, existen otras variables hidrometeorológicas temporales que proporcionan una idea de cómo se desarrollan las condiciones críticas de activación (Prenner, et al. 2018).

Una tercera limitante, es que SILVIA en la presente versión considera umbrales de precipitaciones fuertes, que superen los percentiles de 90, 95 y 99 de las series acumulada, el cual debe ser actualizado y ajustado a umbrales estimados a partir de eventos monitoreados.

Para poder mejorar el modelo se ha implementado la base de datos de eventos de movimientos en masa desencadenados por lluvias intensas que servirá para la validación del producto SILVIA, ajustando los umbrales de lluvia con la información de los eventos registrados.

5. SILVIA

La herramienta SILVIA se encuentra disponible en la plataforma del SENAMHI, en la siguiente dirección <https://www.senamhi.gob.pe/?p=monitoreo-silvia>. Dicho portal se actualiza a diario a las 10:30 de la mañana.

En la plataforma se visualiza lo siguiente: (1) El mapa de lluvia antecedente de los últimos 7 días de todo el Perú. (2) El mapa del nivel de peligro de ocurrencia de movimientos en masa desencadenados por lluvias intensas.

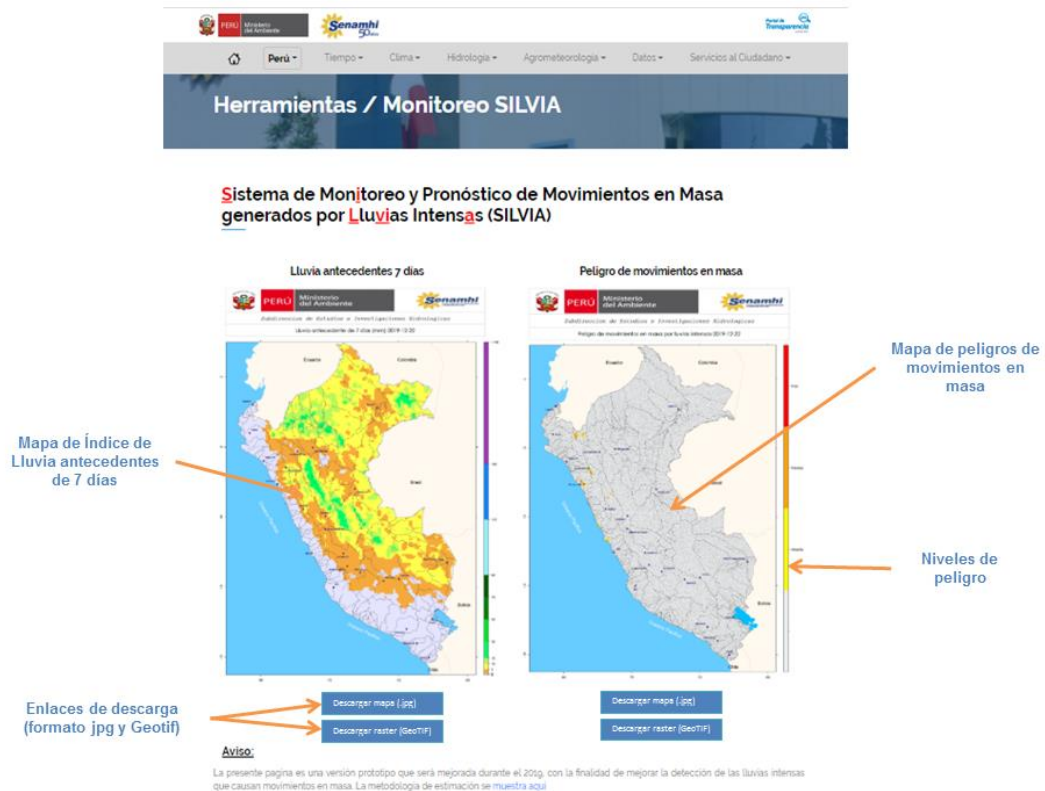


Figura 9. Plataforma de SILVIA

6. REFERENCIAS

- Hungr, O., Leroueil, S. & Picarelli, L. Landslides (2014) 11: 167. <https://doi.org/10.1007/s10346-013-0436-y>
- INGEMMET (2010) Mapa de susceptibilidad por movimientos en masa del Perú
- Kirschbaum, D., & Stanley, T. (2018). Satellite-Based Assessment of Rainfall-Triggered Landslide Hazard for Situational Awareness. *Earth's Future*, 6, 505–523. <https://doi.org/10.1002/2017EF000715>
- Lehner, B., Grill G. (2013): Global river hydrography and network routing: baseline data and new approaches to study the world's large river systems. *Hydrological Processes*, 27(15): 2171–2186. Data is available at www.hydrosheds.org.
- Prenner, D., Kaitna, R., Mostbauer, K., & Hrachowitz, M. (2018). The value of using multiple hydrometeorological variables to predict temporal debris flow susceptibility in an Alpine environment. *Water Resources Research*, 54. <https://doi.org/10.1029/2018WR022985>
- Segoni S, Tofani V, Rosi A, Catani F and Casagli N (2018) Combination of Rainfall Thresholds and Susceptibility Maps for Dynamic Landslide Hazard Assessment at Regional Scale. *Front. Earth Sci.* 6:85. doi: 10.3389/feart.2018.00085
- Villacorta, S., Fidel, L., Zavala B. (2012). Mapa de susceptibilidad por movimientos en masa del Perú. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 69 (3): 393 - 399 (2012)