



PERÚ

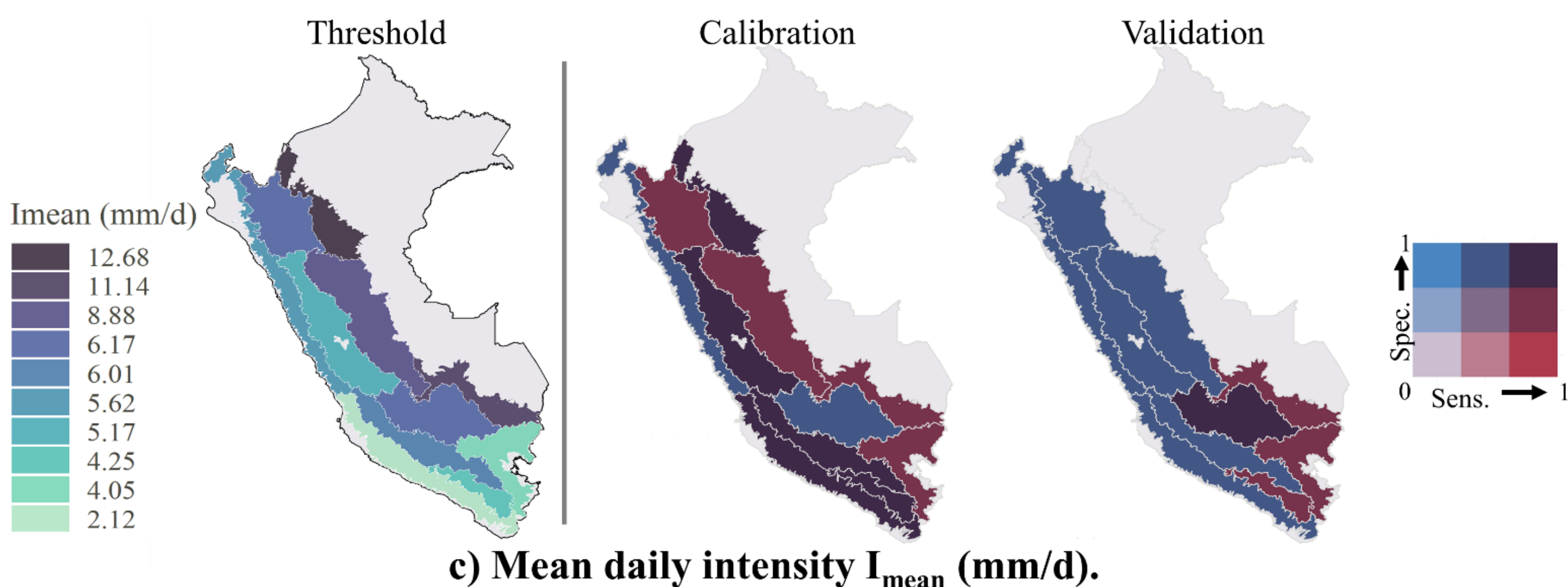
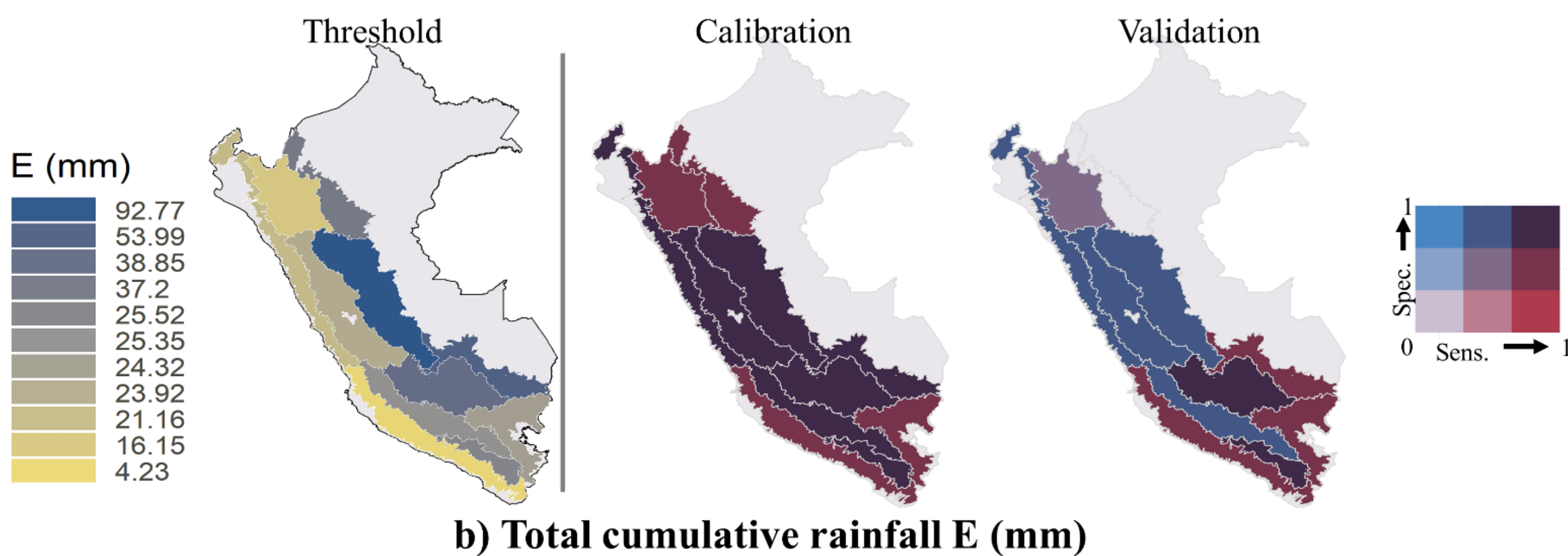
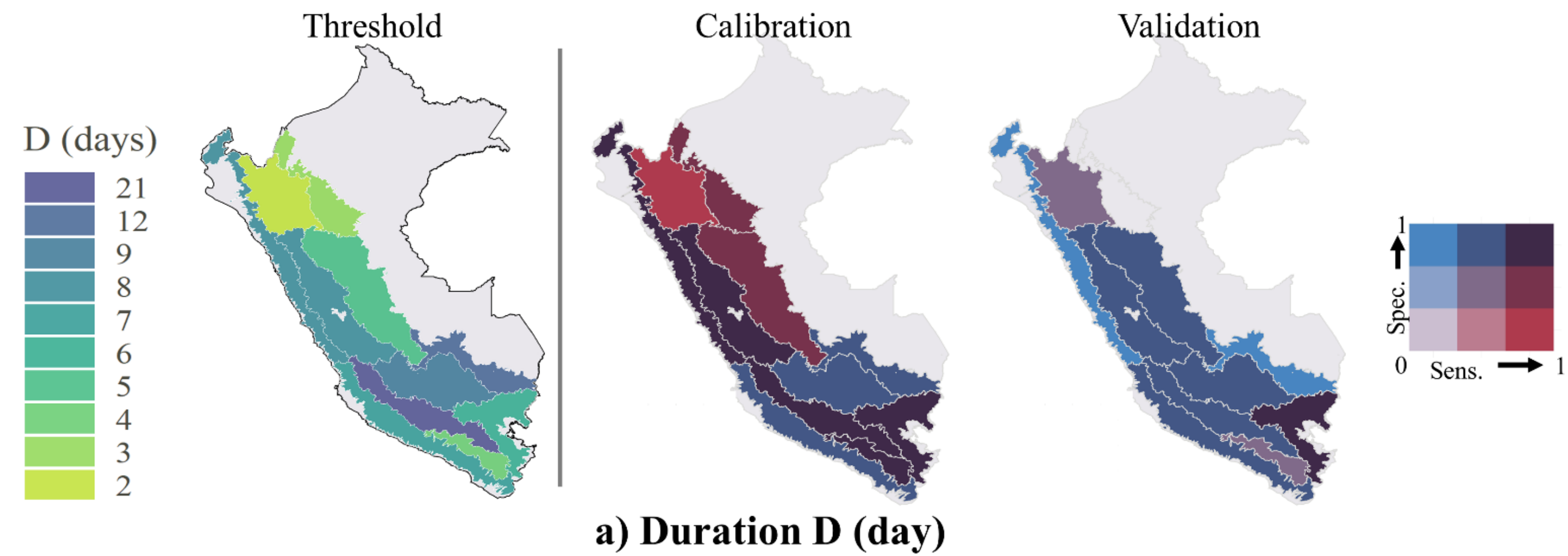
Ministerio del Ambiente



DIRECCIÓN DE HIDROLOGÍA (DHI)
SUBDIRECCIÓN DE ESTUDIOS E
INVESTIGACIONES HIDROLÓGICAS (SEH)



Siempre
con el pueblo



Estimación de umbrales de precipitación para el monitoreo de movimientos en masa a partir de datos grillados en el Perú

Carlos Millán Arancibia,
e-mail: cmillan@senamhi.gob.pe
SEH-DHI-SENAMHI

CONTENIDO

1. Introducción:
Problemática y servicios de SENAMHI
2. Fuentes de datos
3. Metodología
4. Resultados y discusiones
5. Conclusiones
6. Perspectivas



Introducción



- Movimientos en masa responsables de al menos el **17% de todas** las muertes por peligros naturales en todo el mundo (Chae et al., 2017)
- MM: **quinto peligro natural** que más **emergencias** ha generado en los últimos 16 años (INDECI, 2019).

Mapa mundial del Catálogo Global de MM (GLC) provocados por lluvias para el período 2007-2019 (última actualización 02.29.19)

11,033 eventos

Fuente: Kostis, 2019 <https://svs.gsfc.nasa.gov/4710>

¿Por qué lluvias para el monitoreo de MM?

- La lluvia es un **factor principal** desencadenante de los MM - flujos de detritos (terremotos, volcanismo o inundaciones de represas)
- Es el **factor más activo** cuando ocurren los movimientos en masa (huaycos)
- Determina la distribución **temporal** y **espacial** de este peligro



¿Por qué lluvias antecedente?



USGS DEBRIS-FLOW FLUME

Debris flows on wet vs. dry erodible beds (each flow is 6m³ water-saturated sand/gravel/20% loam initially).

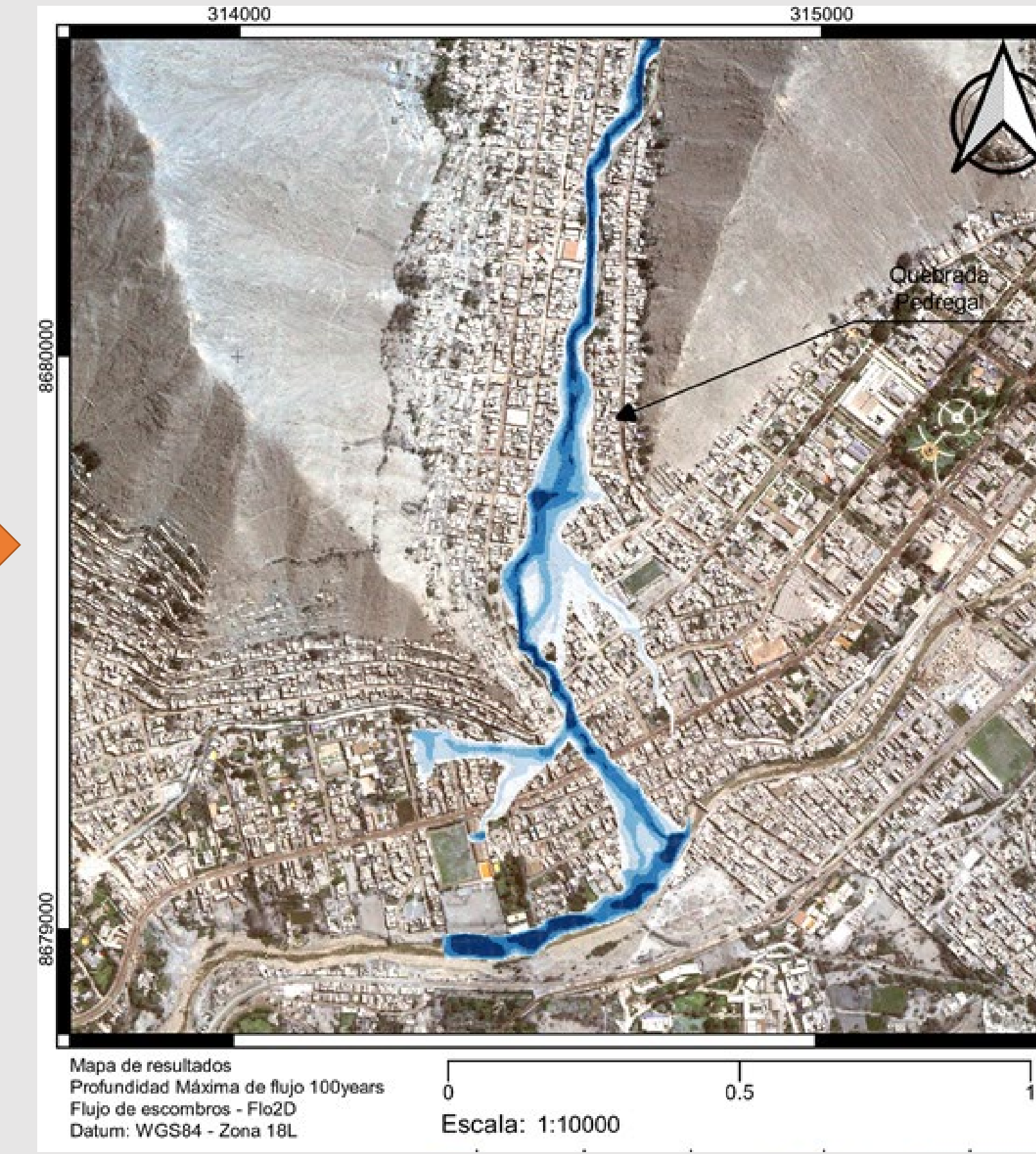
Flujo de detritos:
lecho húmedo
vs lecho seco

Peligro por movimientos en masa

ESCALA LOCAL

Caracterización del peligro

Mapas de peligro



Monitoreo a tiempo real

SAT



Pluviómetros

ESCALA NACIONAL

PISCOpd_Op

Umbrales

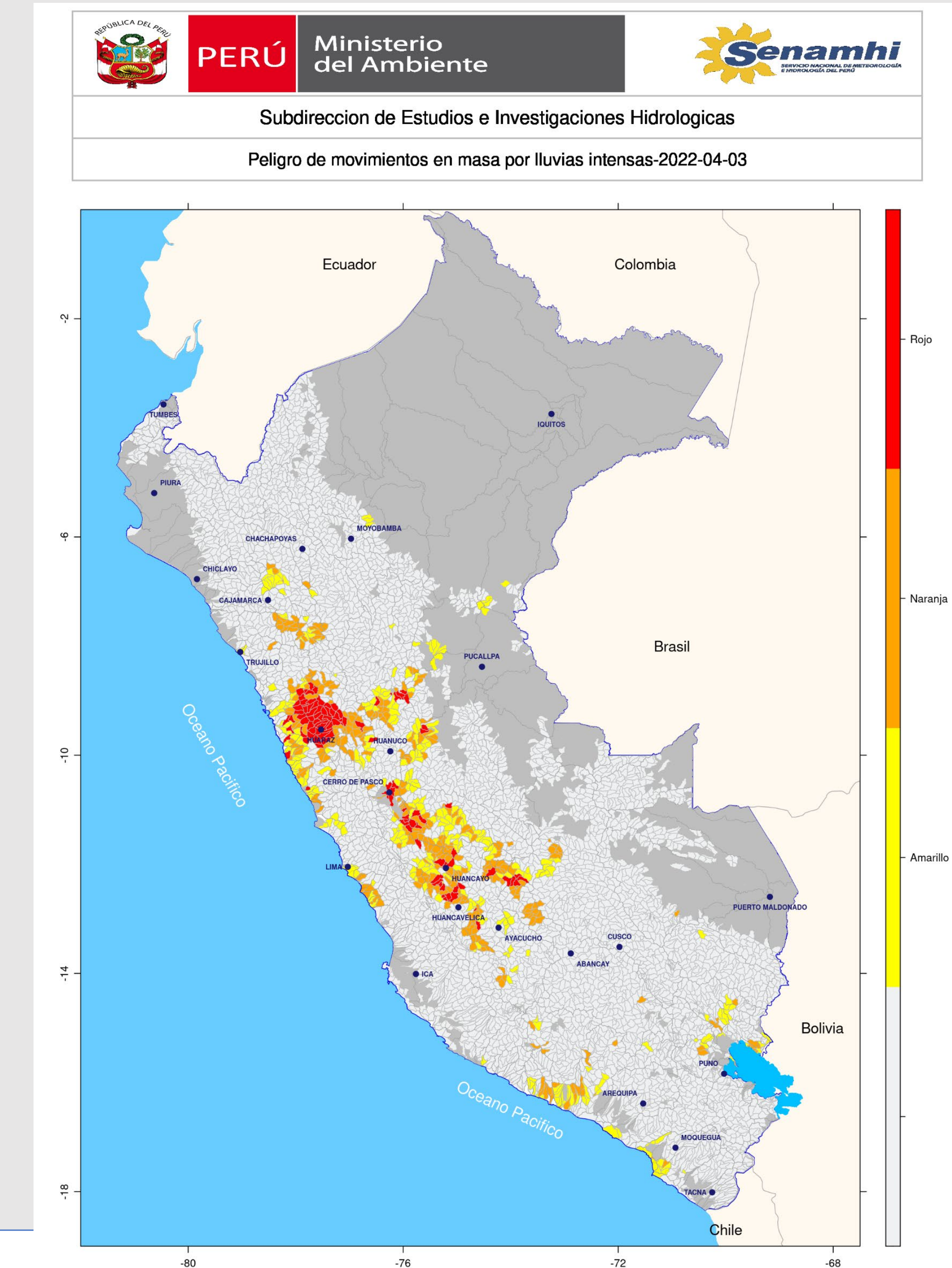
SILVIA

Sistema de Monitoreo de Movimientos Potenciales en Masa generados por Lluvias Intensas

Pronóstico de lluvias

Activación Quebradas

Aviso ante posible activación de quebradas



Monitoreo local a tiempo real: Rímac

- Red de **Sistema de Monitoreo de Lluvias en la cuenca media baja del río Rímac**.
- Red de pluviómetros con mayor densidad de SENAMHI en Perú.



Pluviómetro Torre Blanca (Carabayllo, Lima)



Pluviómetro Progreso (Carabayllo, Lima)

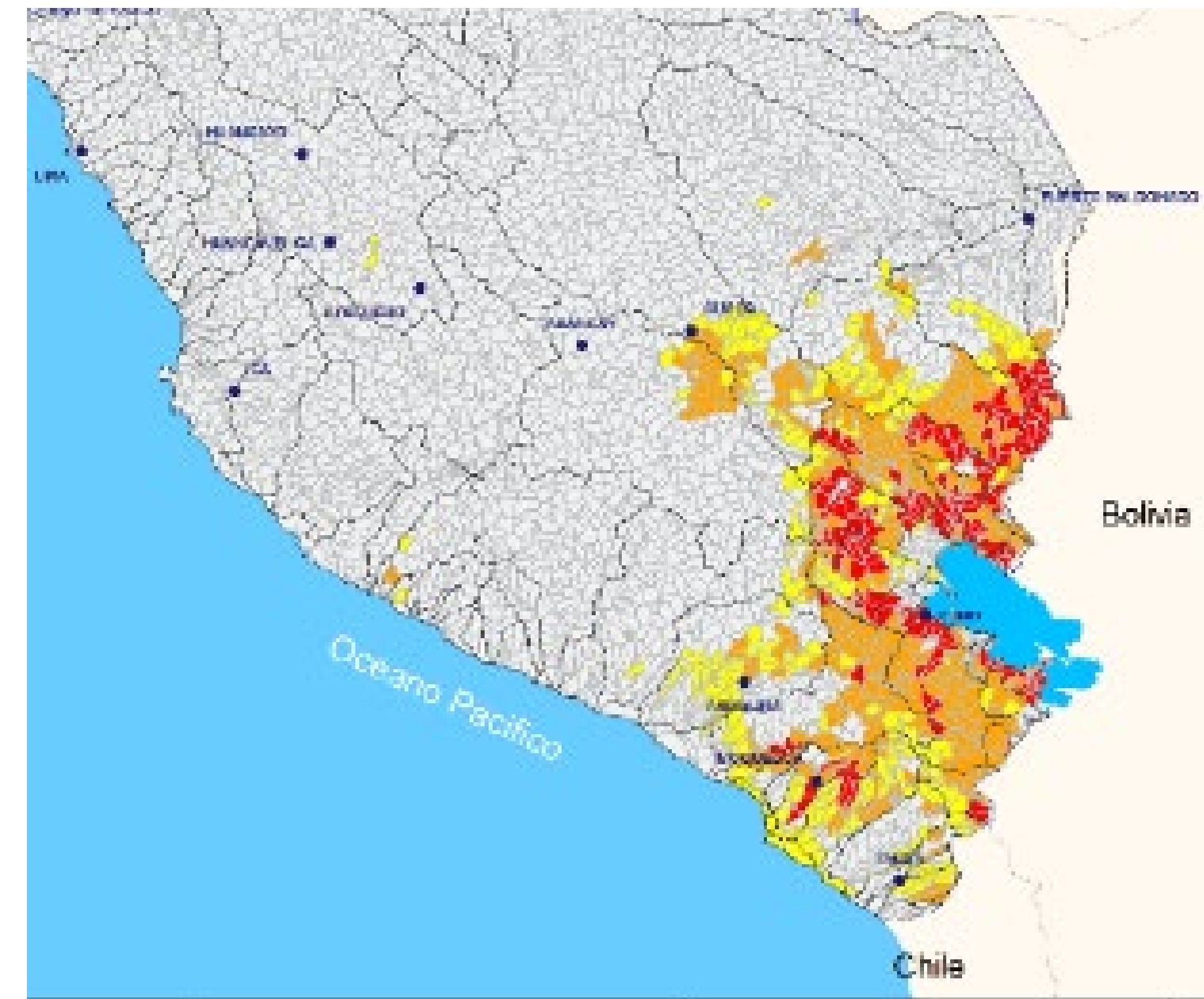


Pluviómetro Cantuta (Chosica, Lima)



Pluviómetro San Miguel de Viso (Matucana, Lima)

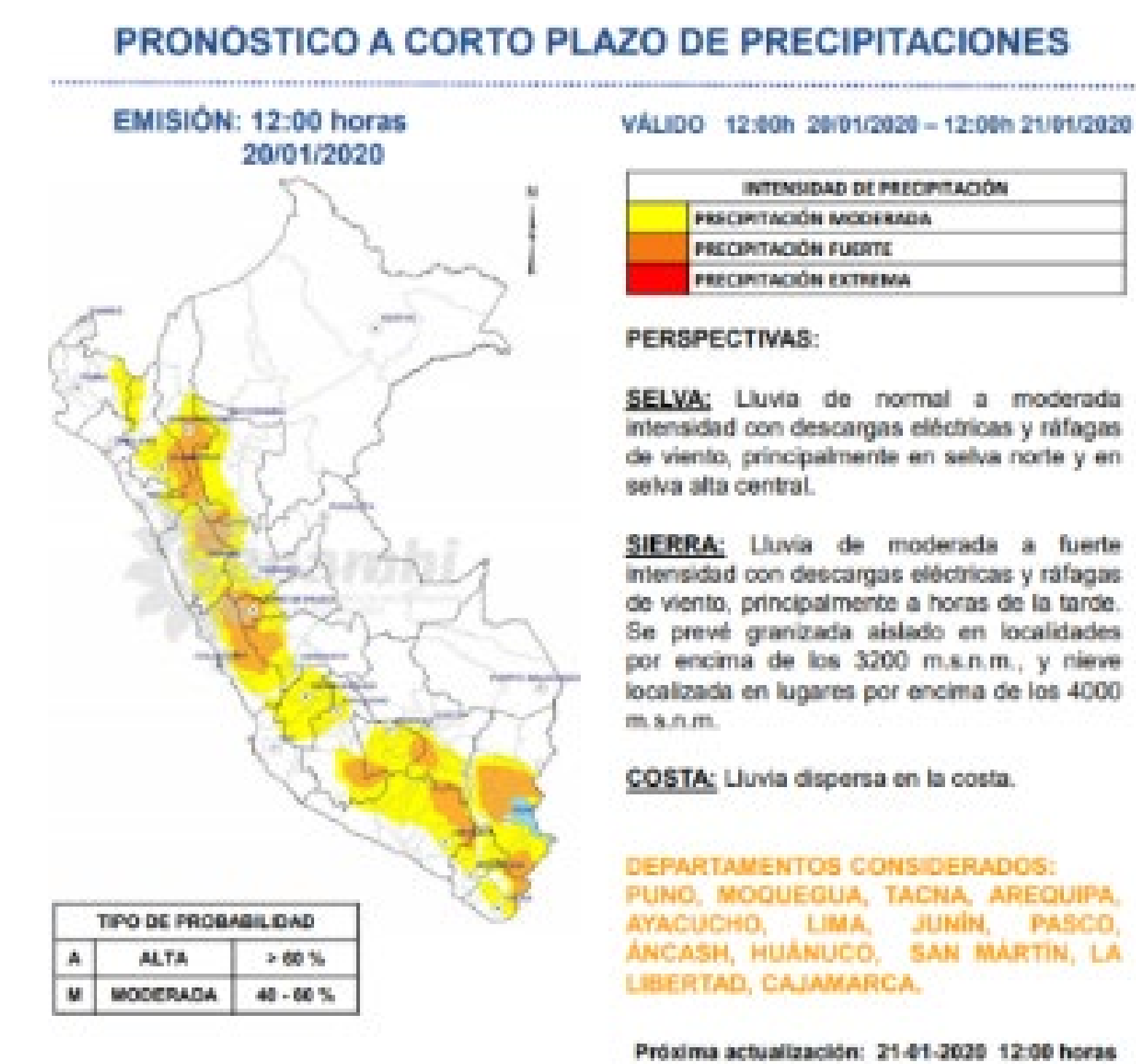
AVISOS ANTE POSIBLE ACTIVACIÓN DE QUEBRADAS



SILVIA
Sistema de Monitoreo de Movimientos Potenciales en Masa generados por Lluvias Intensas

PRONÓSTICO 24H

SUPERPOSICIÓN IDENTIFICACION DE AREAS POSIBLES A SER ACTIVADAS



Vigencia: 24 horas

AVISO A CORTO PLAZO (2 horas)

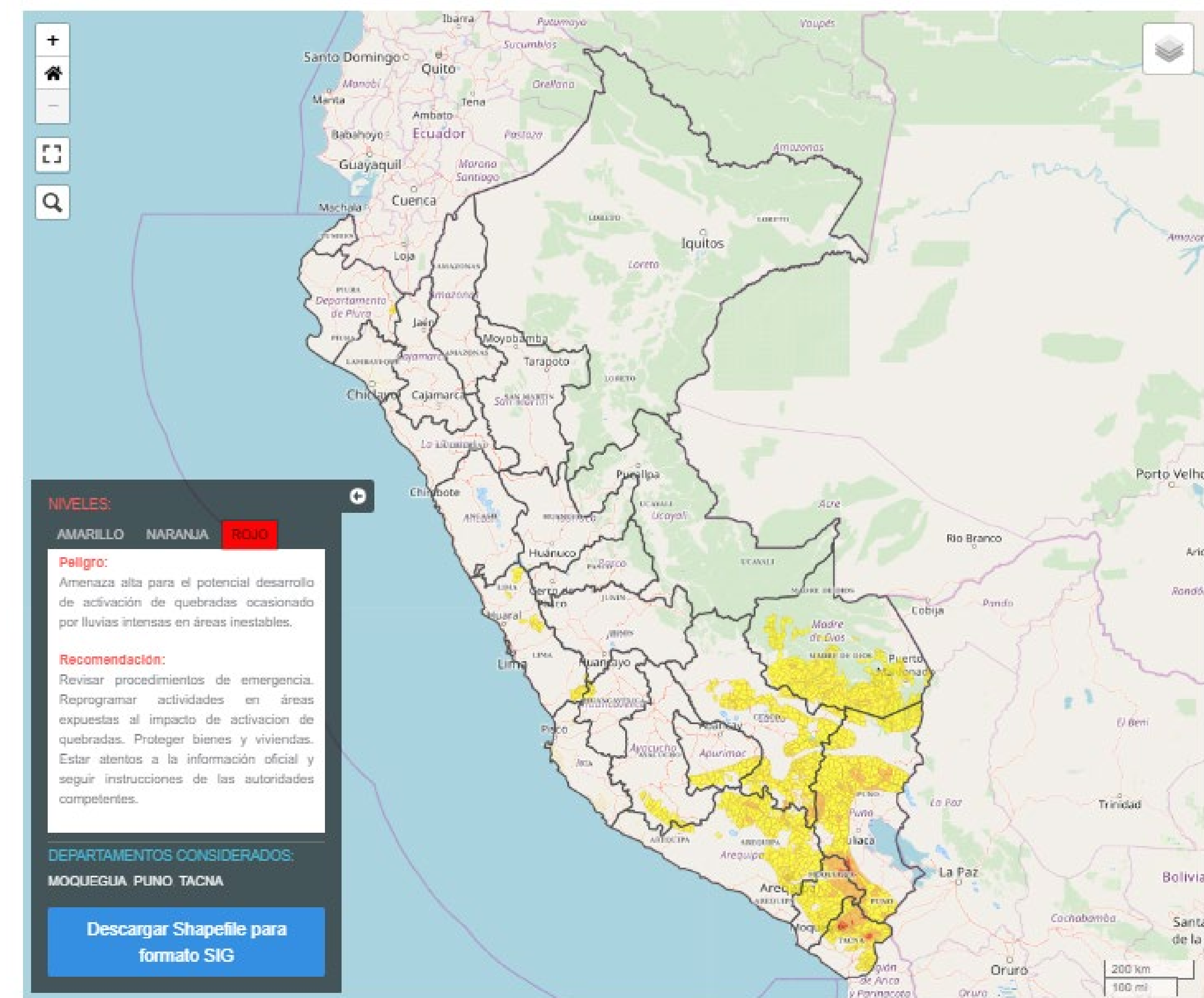
Aviso N°023 **NIVEL ROJO**

AVISO ANTE POSIBLE ACTIVACIÓN DE QUEBRADAS

Fecha de inicio: Martes, 21 de Enero de 2020 (12:00) horas
Duración: **24 hrs**
Plazo: Corto Plazo

Estos avisos indican la posibilidad de activación de quebradas asociada a las lluvias pronosticadas para las siguientes 24 horas (aviso de corto plazo), considerando la lluvia de los 7 días antecedentes y la susceptibilidad a movimientos en masa.

En el contexto de estos avisos, la activación de quebradas (o huaycos) se refiere a los flujos de agua y movimientos en masa rápidos en quebradas o cuencas pequeñas resultantes de la acción de las lluvias precedentes y actuales y las condiciones geológicas. Incluye flujos de lodo, crecidas de detritos, y flujo de detritos.



[Link de aviso](#)

SEVERIDAD DE PELIGRO



RM N°049-2020-PCM: Protocolo para la emisión de avisos, alertas y alarmas ante lluvias intensas y peligros asociados

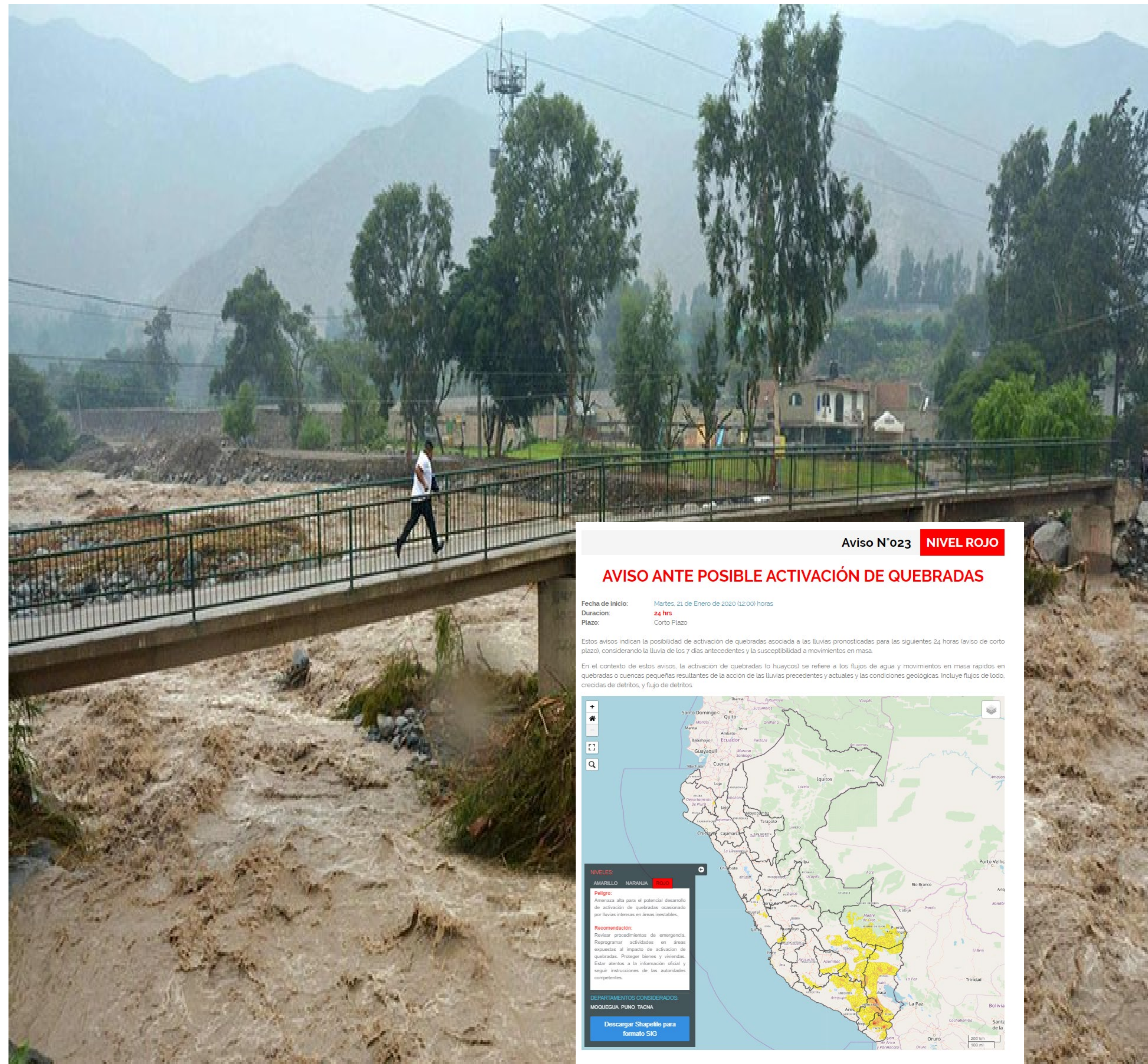
Motivación

- **Brecha** en el estudio de la interrelación entre las lluvias y los MM
- Mejorar los sistemas de monitoreo de movimientos en masa a nivel regional (SILVIA)
- Aprovechamiento de bases de datos de lluvias y movimientos en masa a escala de todo el Perú
- Tener una base de umbrales explicativos de movimientos en masa superficiales desencadenados por lluvias



Objetivo:

Estimar umbrales regionales de lluvia para la ocurrencia de movimientos en masa poco profundos desencadenados por lluvias a partir de eventos de movimientos en masa registrados.



Área de Estudio

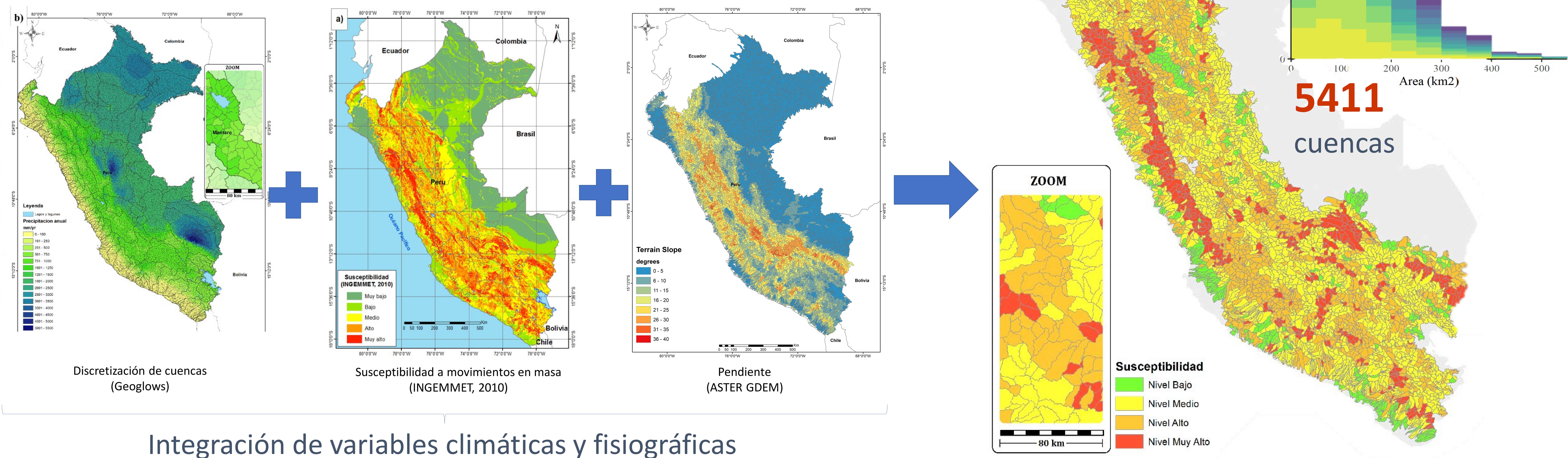
Perú incluye un total de **10849** cuencas (producto global GEOGlows)

Área promedio: **115 km²**

Se aplicó un análisis multicriterio.

Reglas básicas:

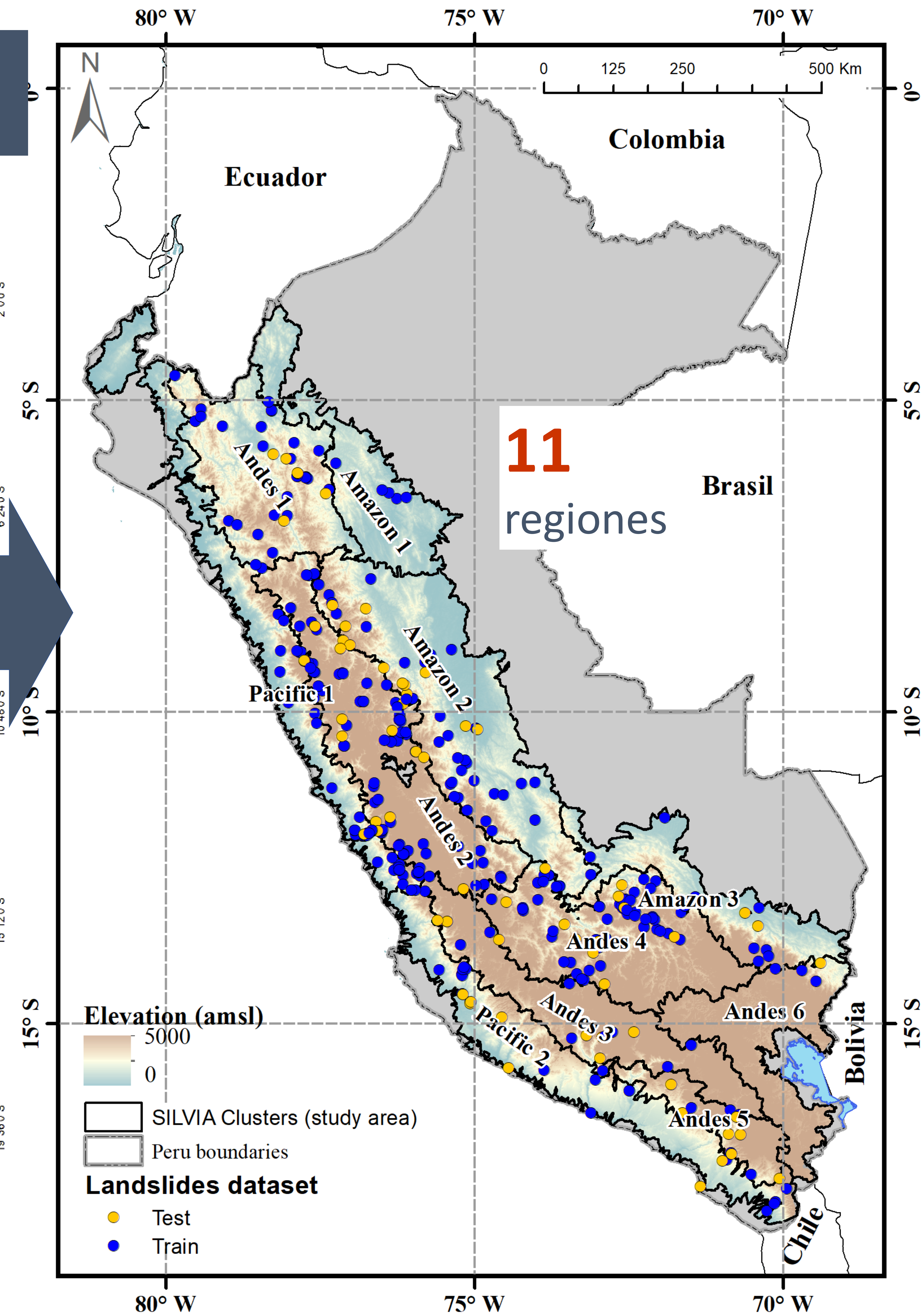
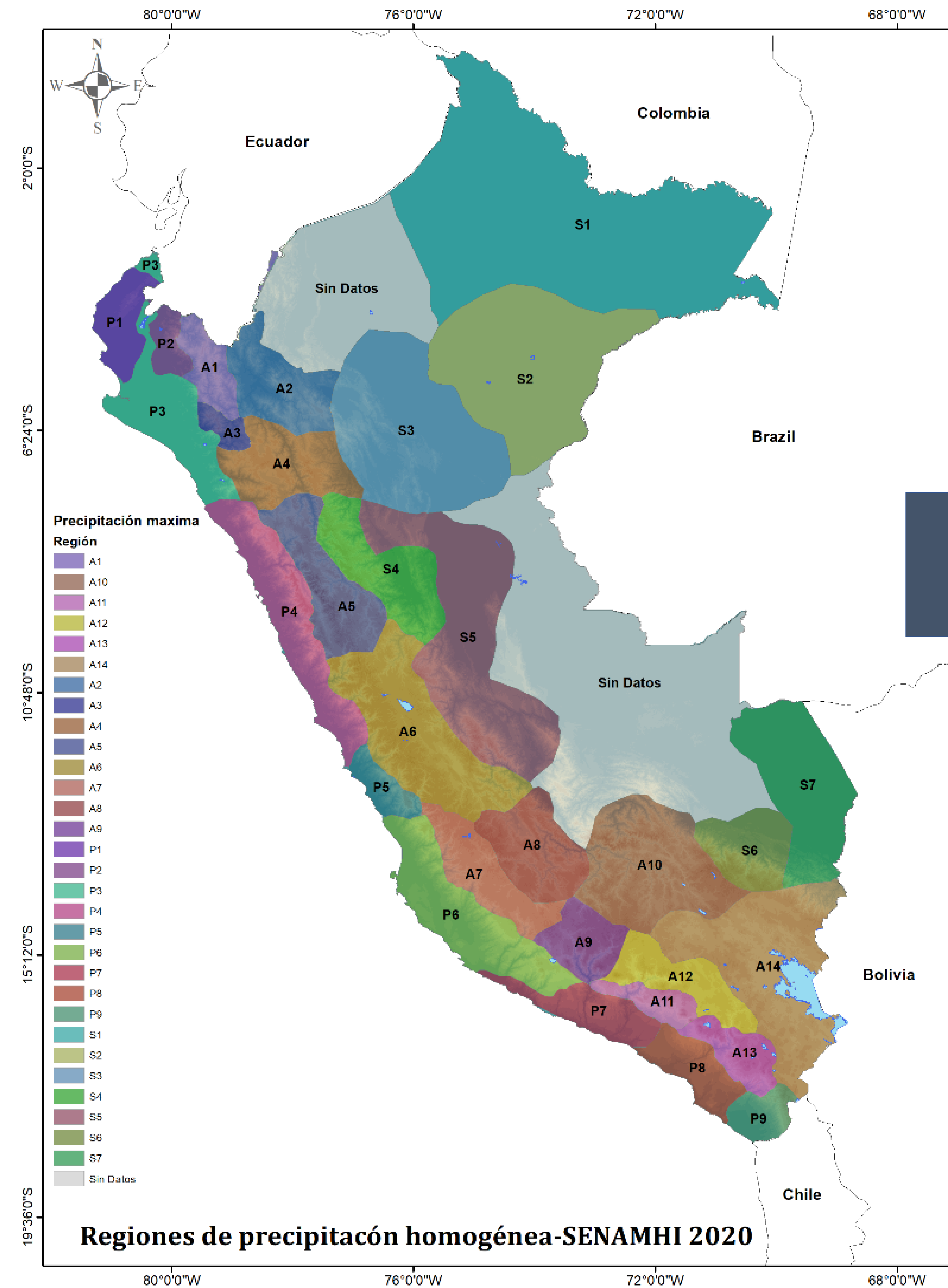
- la primera es que no se consideran las áreas clasificadas con Muy baja susceptibilidad a MM (INGEMMET, 2010).
- las cuencas con una pendiente inferior a 4.1° no se están consideradas.



Integración de variables climáticas y fisiográficas

Definir las regiones de precipitación máxima

- Se determinaron **11 regiones** asociadas a los movimientos en masa a partir de las regiones de precipitaciones máximas del Perú (Montesinos et al., 2021).
- Desarrollado a partir de 442 estaciones automáticas.
- Reagrupado en base al método de cluster de Ward y refinado mediante K-means.



Datos: Precipitación

Peruvian Interpolated data of SENAMHI's Climatological and Hydrological Observations (**PISCO**) que cuenta con un producto operativo diario **PISCO de Precipitación Diaria Operativo (PISCOpd_Op)**

Método de interpolación: genREN (van Osnabrugge et al. 2017)

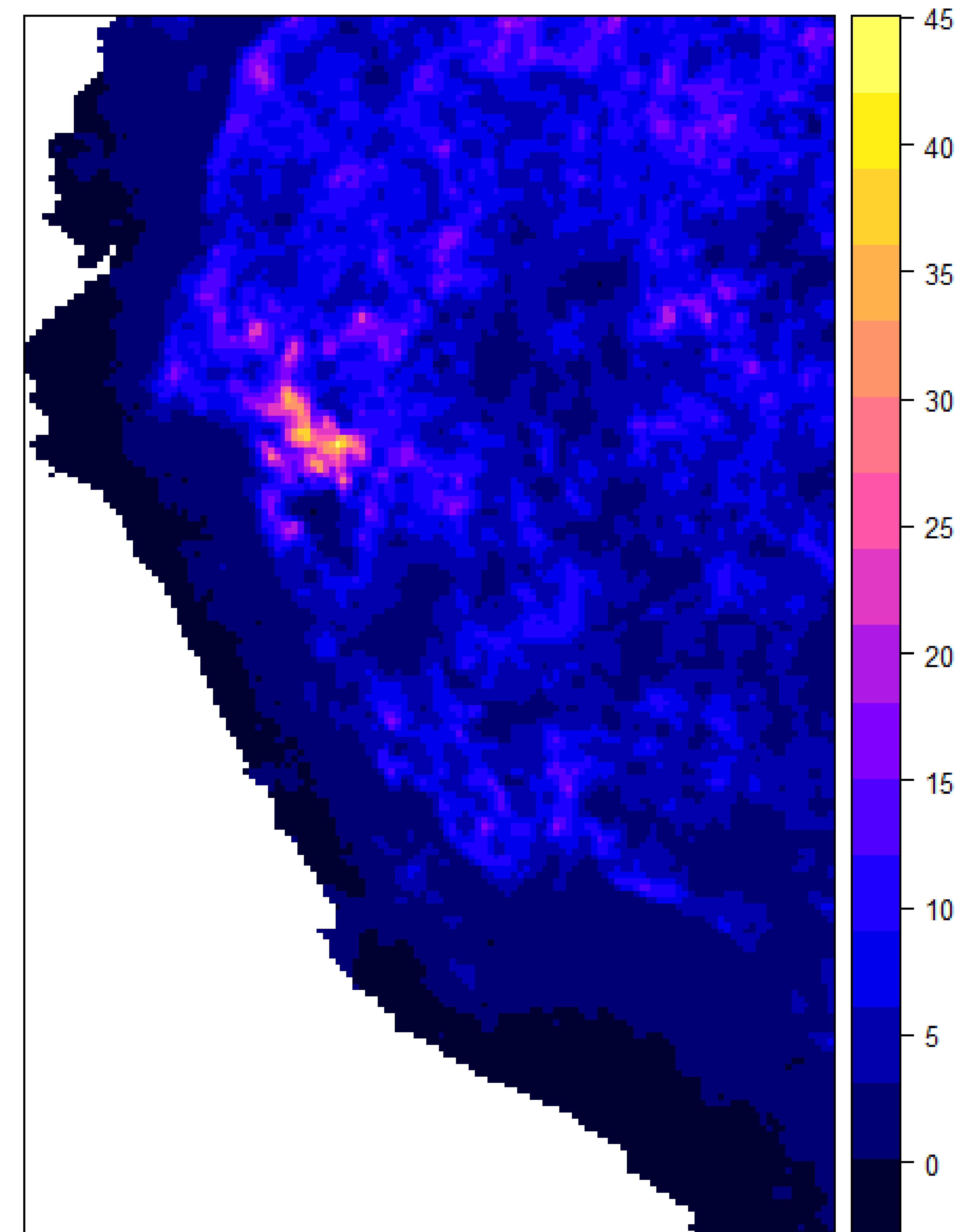
Formato: **Raster**

Resolución grilla: **10 km x 10 km (0.1°)**

Resolución Temporal: **Diaria**

Tabla 1. Comparación de atributos de PISCO y PISCO_op.

	PISCO _{op}	PISCO _{op} v2.1
Paso de tiempo	Diario	Diario
Resolución espacial	10 km	10 km
Periodo	1981-actualidad	1981-2016
Dominio	Perú	Perú
Actualización	Diaria	Esporádica
Referencia	-	Aybar et al. (2020) [11]



PISCO_Op 14-09-2019 (mm)

Datos: Catálogos de eventos de movimientos en masa

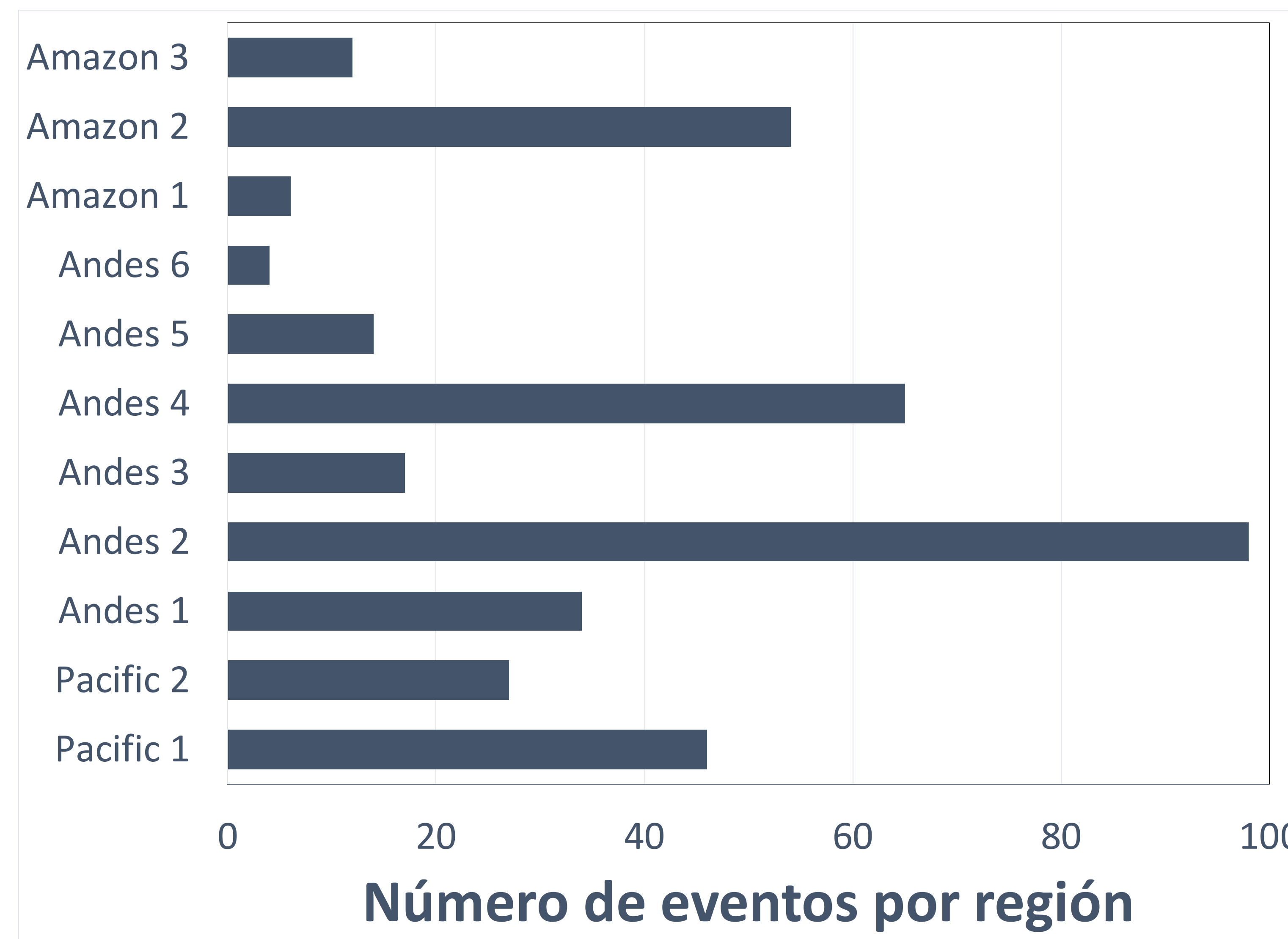
Base de datos:

- Inventario de Movimientos en Masa del SENAMHI: 314 eventos registrados (2017-2020). Fuente: Subdirección de Estudios e Investigaciones Hidrológicas del SENAMHI
- Global Landslides Catalog: 53 eventos registrados (2007-2014). Fuente: Centro de Vuelo Espacial Goddard de la NASA



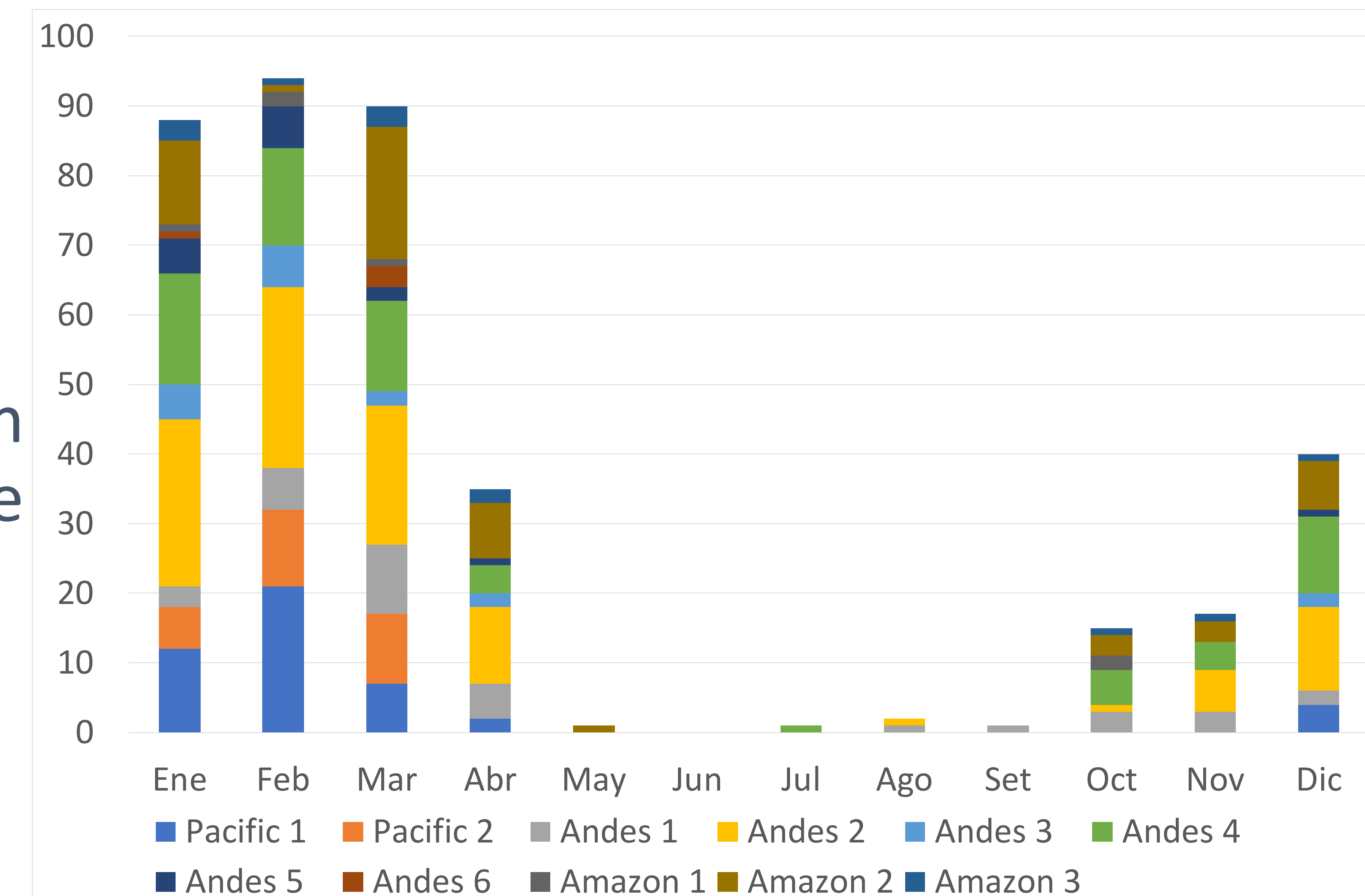
Distribución espacial de MM

- Los 5 departamentos con mayor ocurrencia de movimientos en masa son: **Lima, Cusco, Ancash, Huánuco y Apurímac**

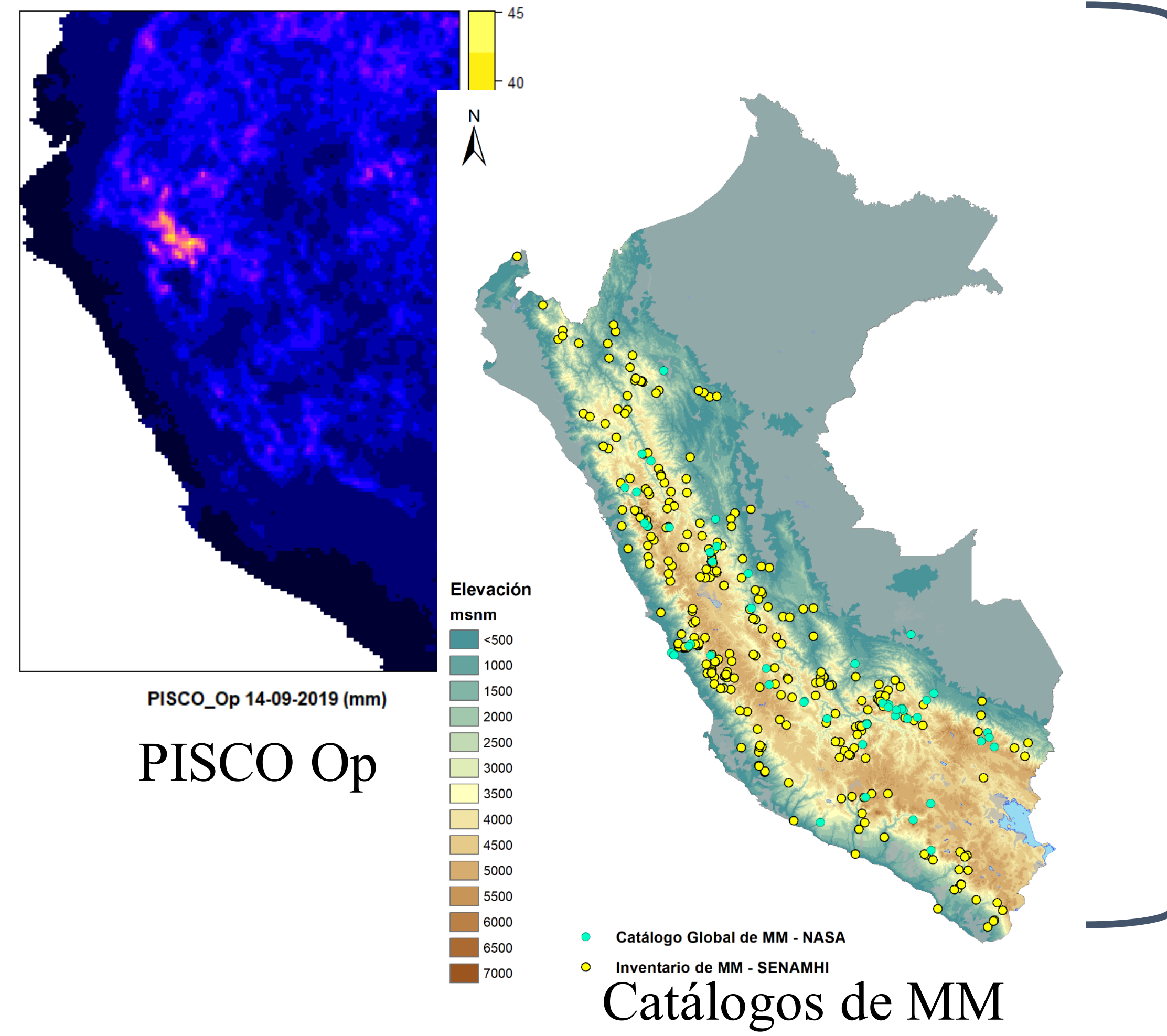


- Las 5 regiones de MM con mayor ocurrencia son: Andes 2, Andes 4, Amazon 2, Pacific 1 y Andes 1.

- La frecuencia de los MM reportan un carácter estacional principalmente distribuido desde octubre a abril



Esquema metodológico



Paso 1: Preparar datos meteorológicos y de movimientos en masa

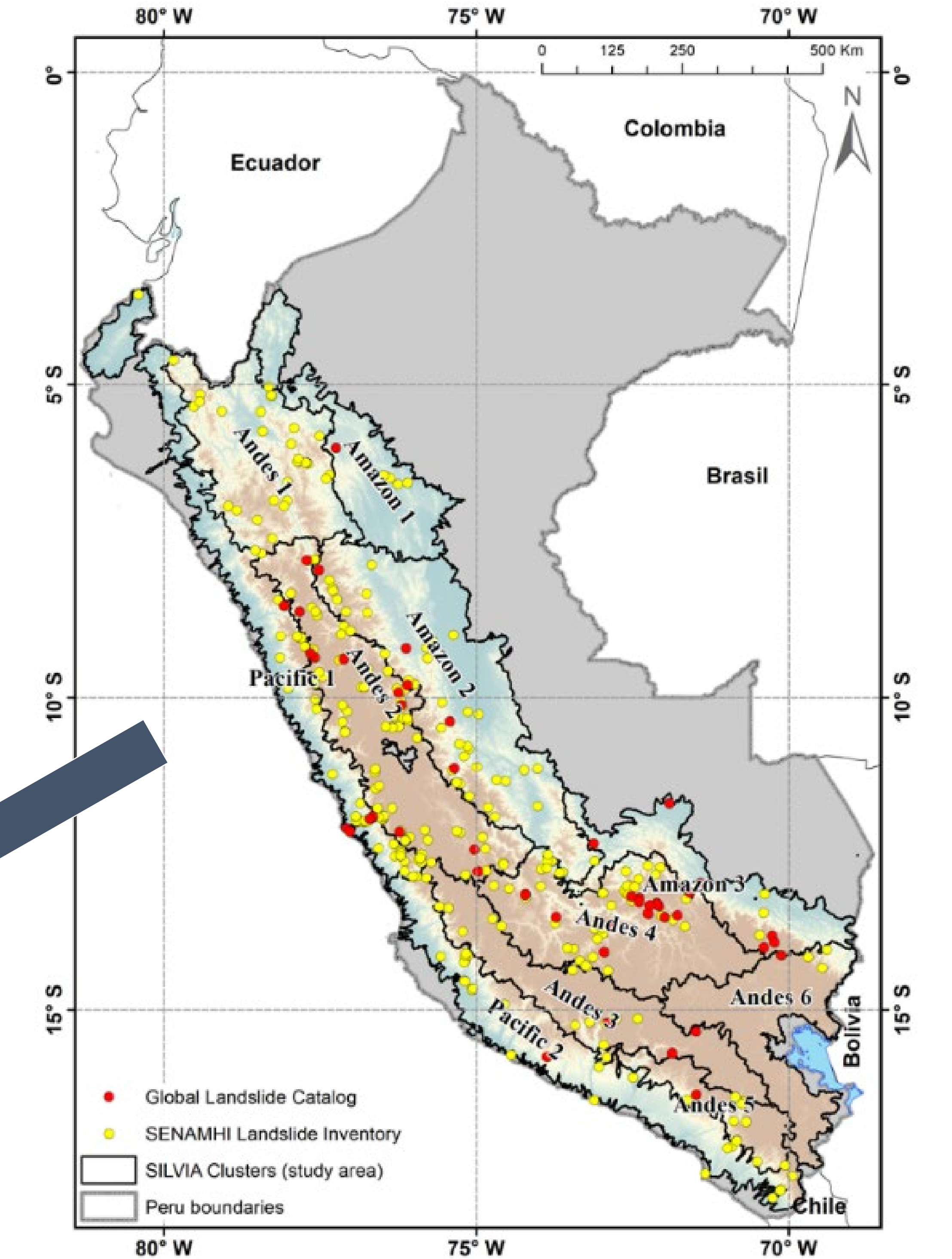
Extraer la precipitación de PISCO_Op y definir los eventos de lluvia que desencadenan y no desencadenan movimientos en masa

Paso 2: Definir variables asociadas a movimientos en masa

Generar un conjunto de datos de variables de precipitación (Imax, Imean, E, D) para cada evento de lluvia (incluye eventos desencadenantes y no desencadenantes)

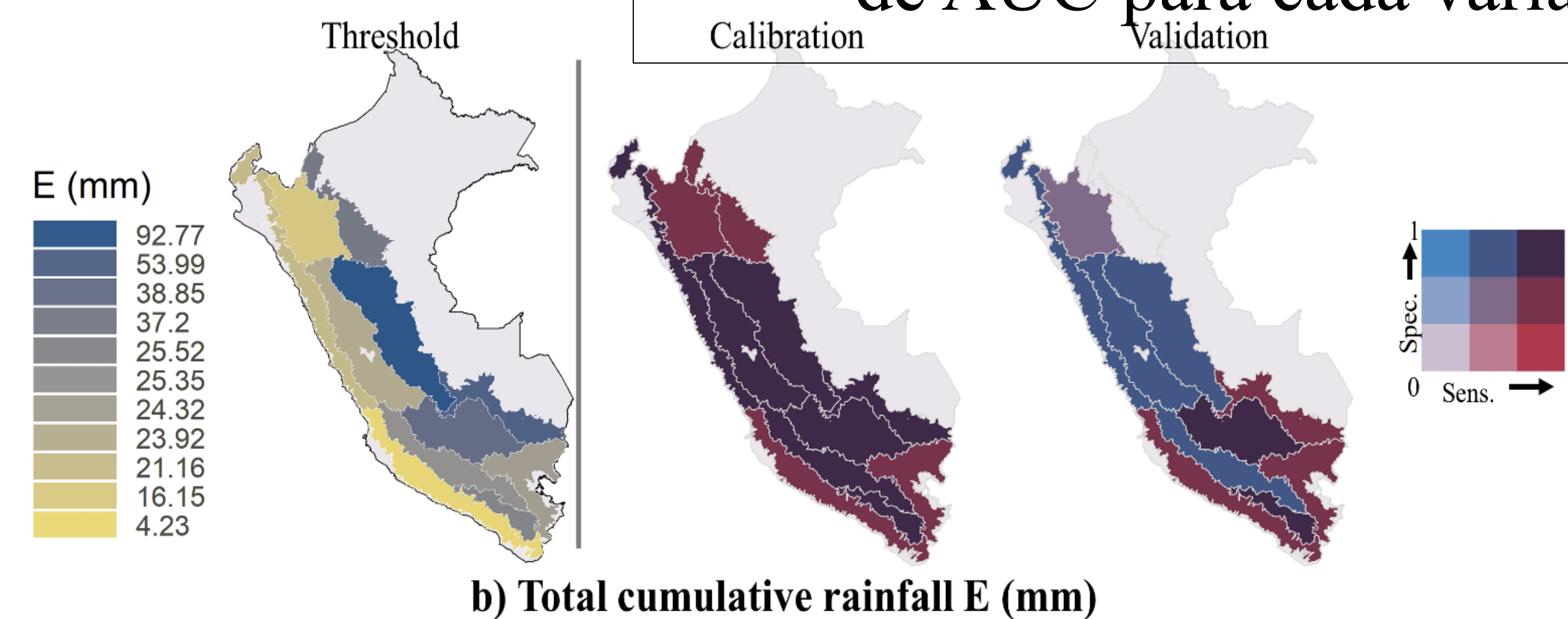
Paso 3: Definir las regiones de precipitación máxima

Reagrupación de Regiones Homogéneas de Precipitación Máxima mediante técnicas de cluster utilizando parámetros meteorológicos y fisiográficos



Paso 4: Estimar umbrales para variables individuales de eventos de lluvia

Hacer un análisis ROC y seleccionar los umbrales con la mejor puntuación de AUC para cada variable (Imax, Imean, E, D) en cada región

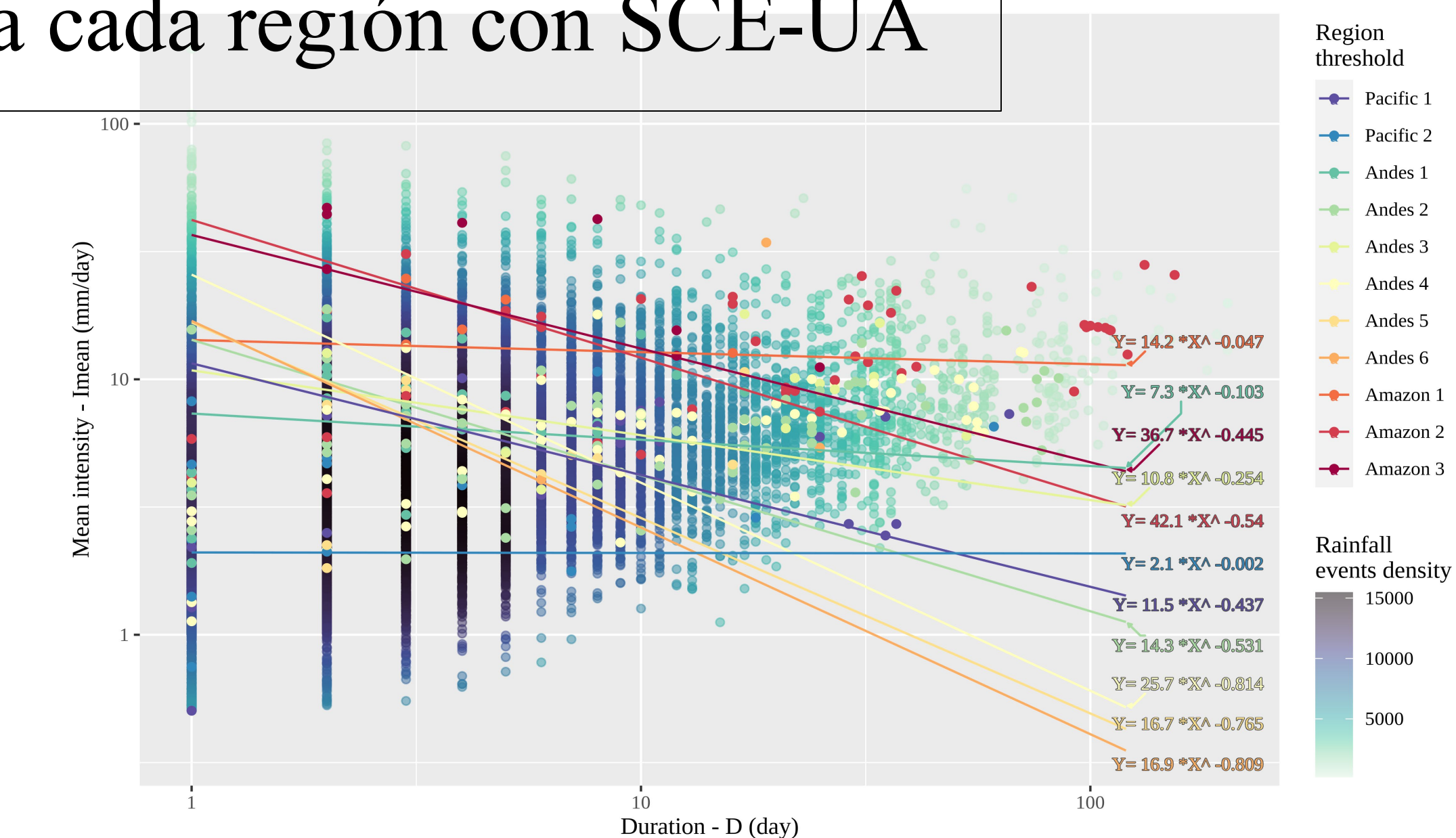


Paso 5: Estimar curvas de umbrales para dos variables de evento de lluvia

Ejecute el modelo potencial (Imax-D, Imean-D, E-D) y optimice los coeficientes de la curva potencial maximizando la puntuación TSS para cada región con SCE-UA

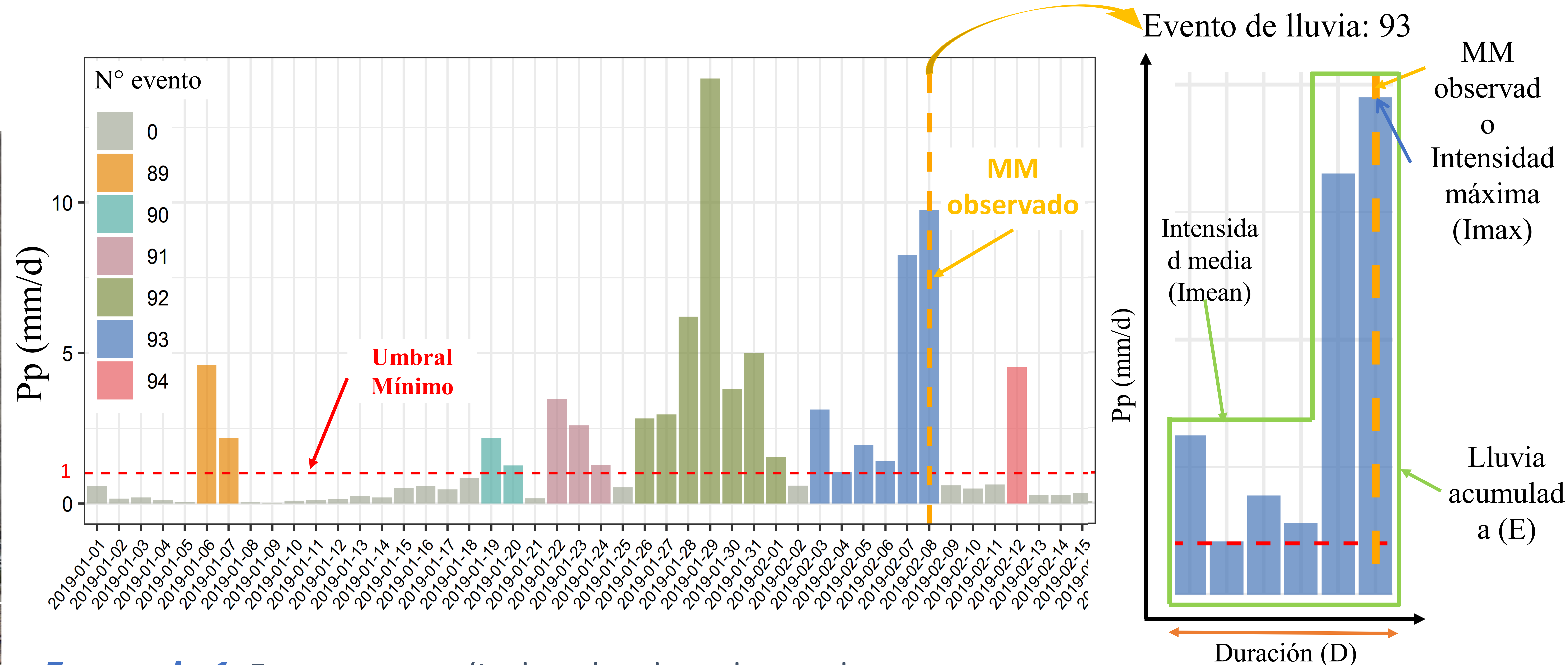
Paso 6: Ejecutar los modelos de umbrales

Ejecutar los modelos regionales con los umbrales en los períodos de calibración y validación (2020) y obtener las métricas de desempeño TSS



Paso 1 y 2: Preparación de datos meteorológicos y de movimientos en masa: Escenarios y parámetros

Centro Poblado de Mirave, Tacna
08 de febrero de 2019



Escenario 1: Evento entero (Incluye los datos hasta el día de ocurrencia del MM)

Escenario 2: Evento antecedente (Incluye los datos hasta un día antes del día de ocurrencia del MM)

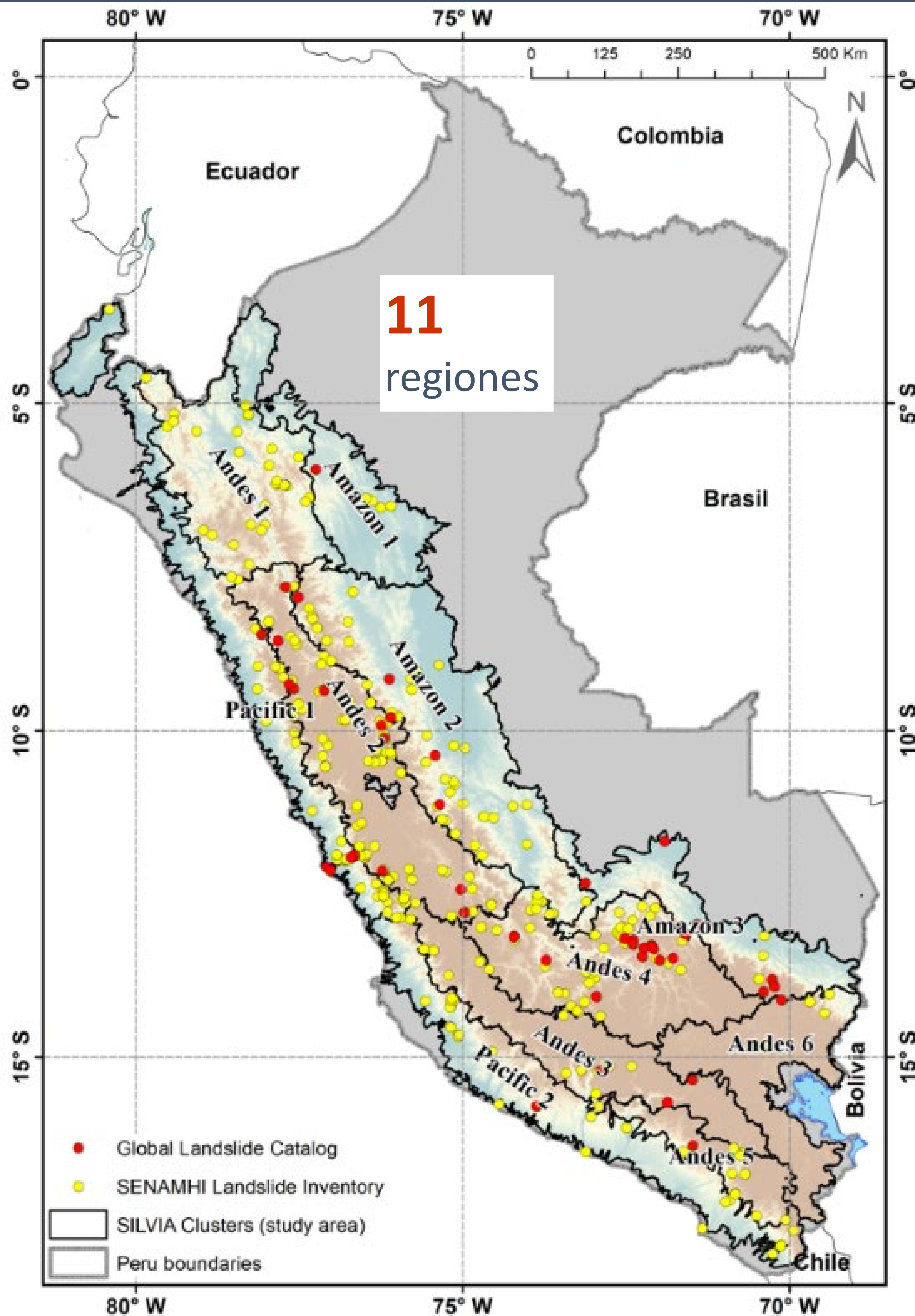
Eventos de lluvia definidos: **77168**

Eventos de MM recopilados: **373**

Variables de los **eventos de lluvia:**

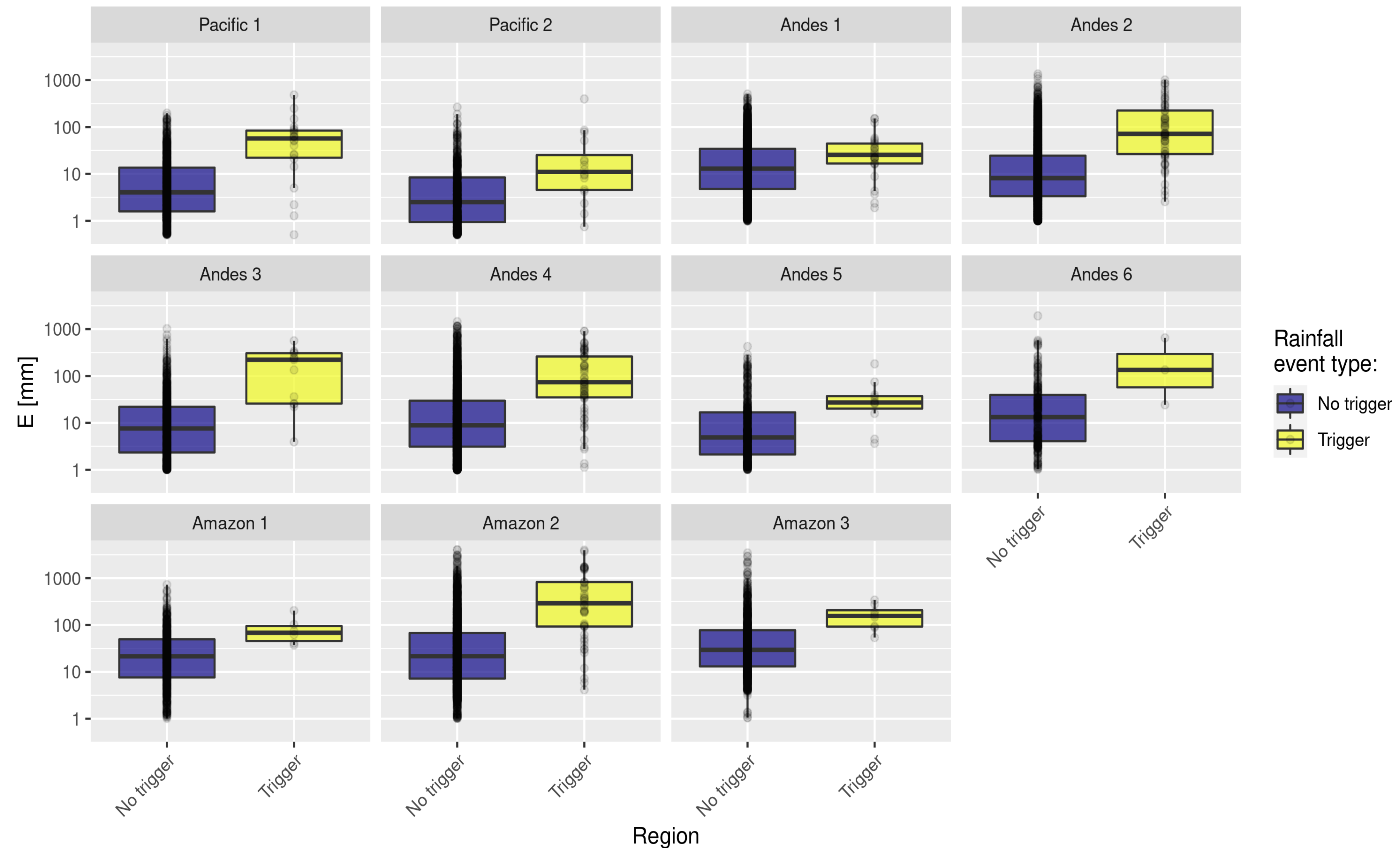
1. Lluvia acumulada **E** (mm)
2. Intensidad máxima diaria **I_{max}** (mm/d)
3. Duración **D** (días)
4. Intensidad media **I_{mean}** (mm/d)

Paso 3: Regiones de precipitación máxima

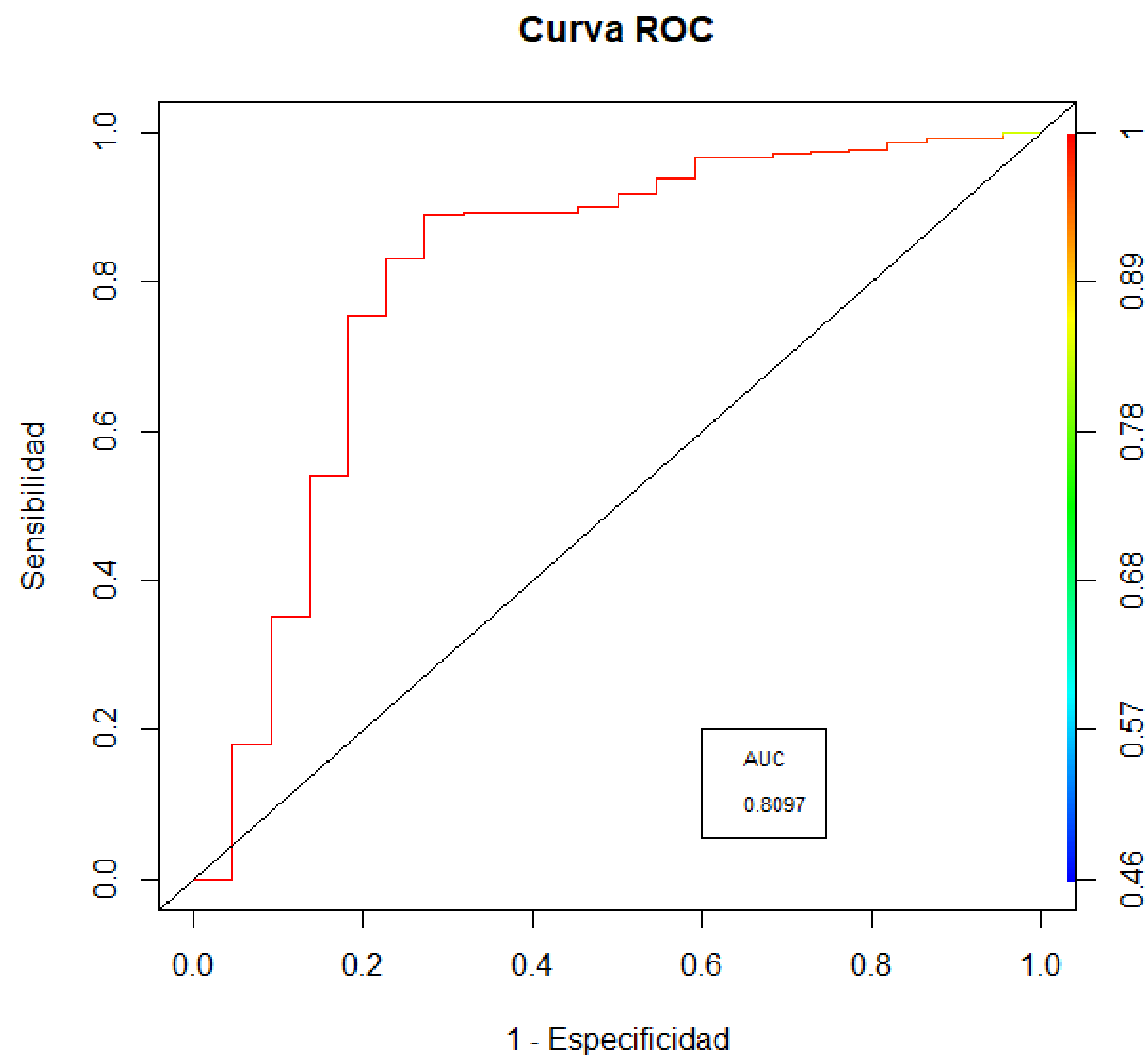


Potencial predictor de las variables de los eventos de lluvia

Boxplot - Entire event scenario

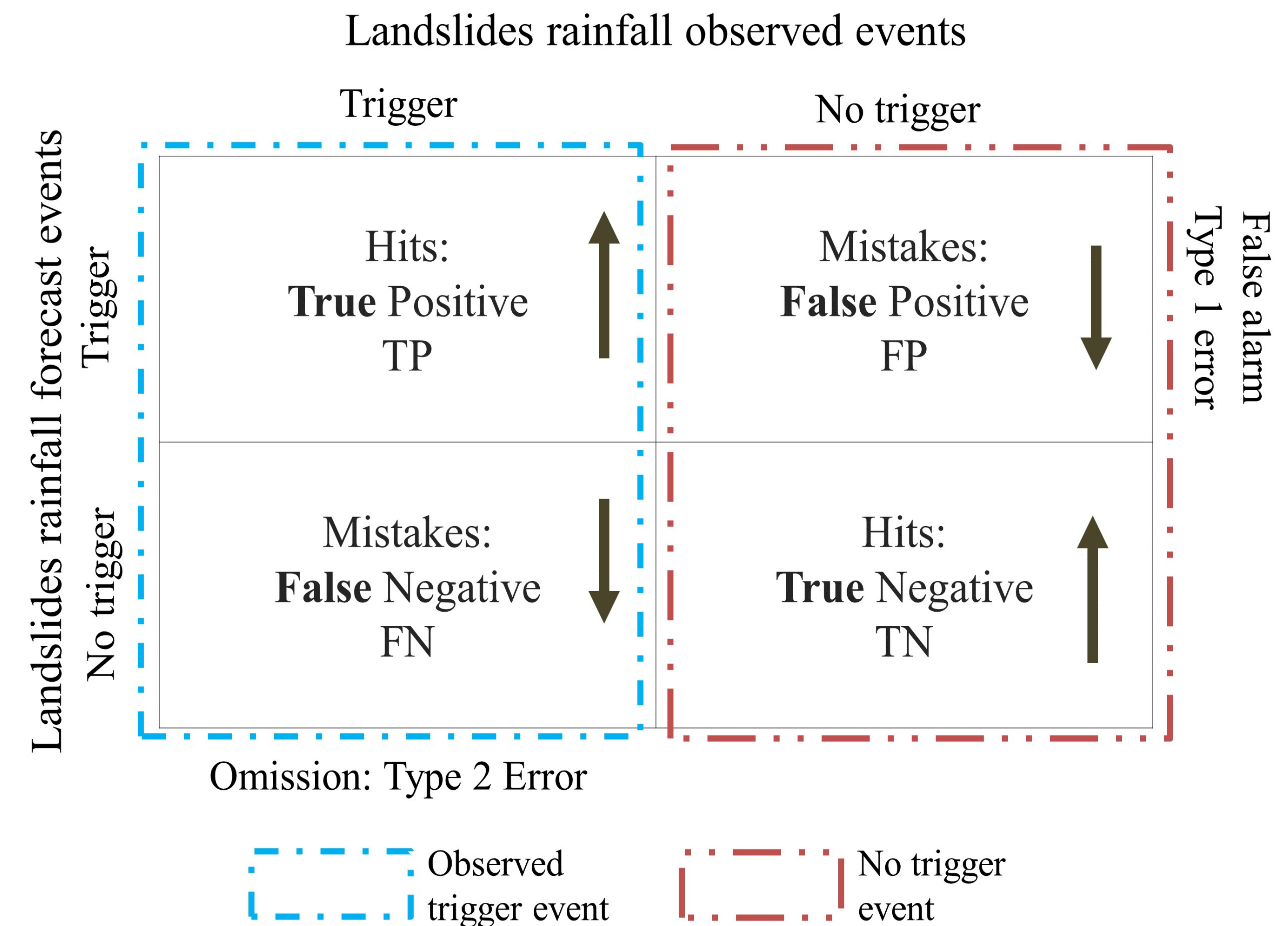


Receiver Operating Characteristic (ROC)



*Area under the curve (AUC
o AUROC)*

Matriz de confusión



$$sens = \frac{TP}{TP + FN}$$

$$espec = \frac{TN}{TN + FP}$$

$$TSS = sens + espec - 1$$

Donde:

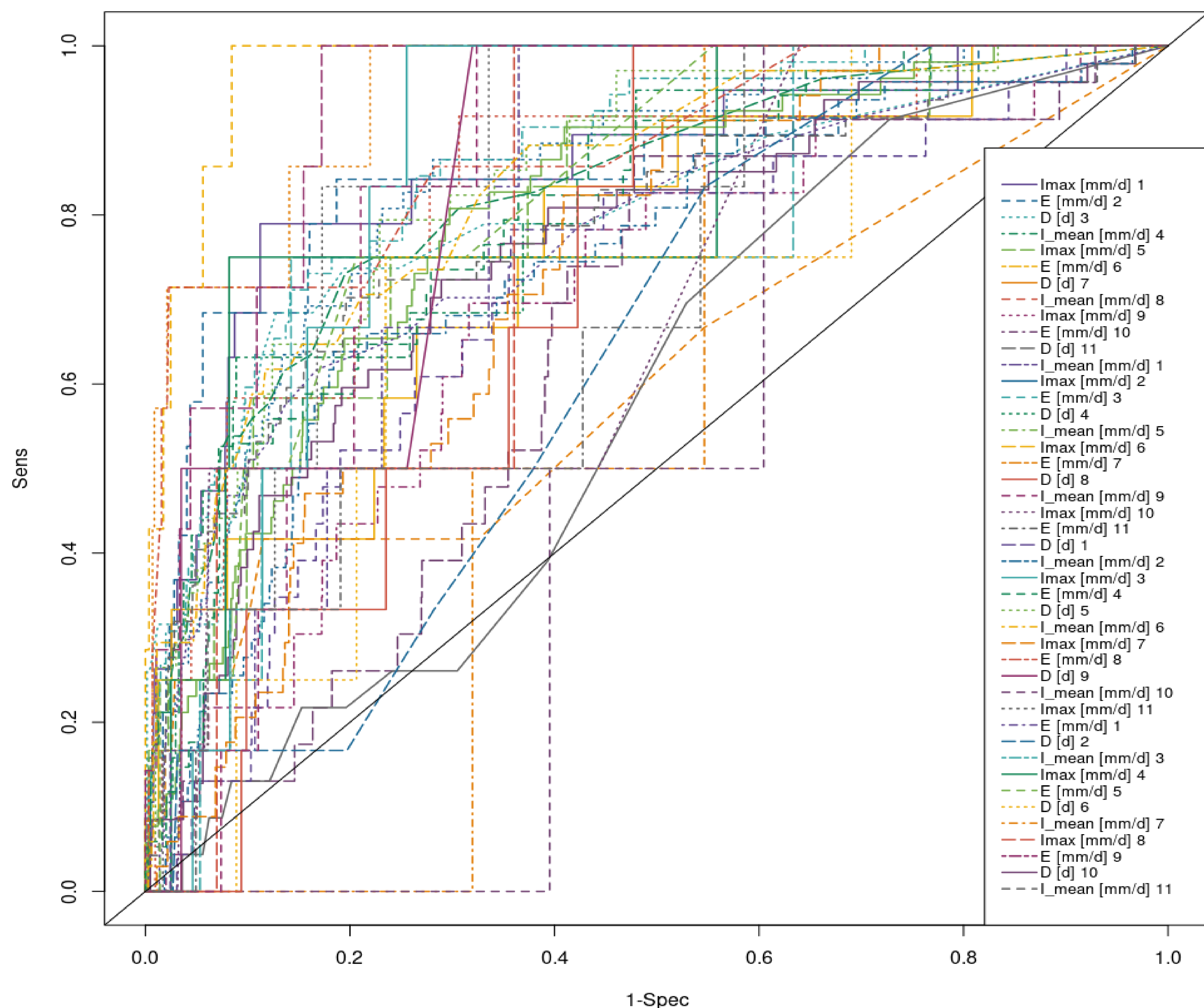
TSS = True Skill Statistics

sens = sensibilidad

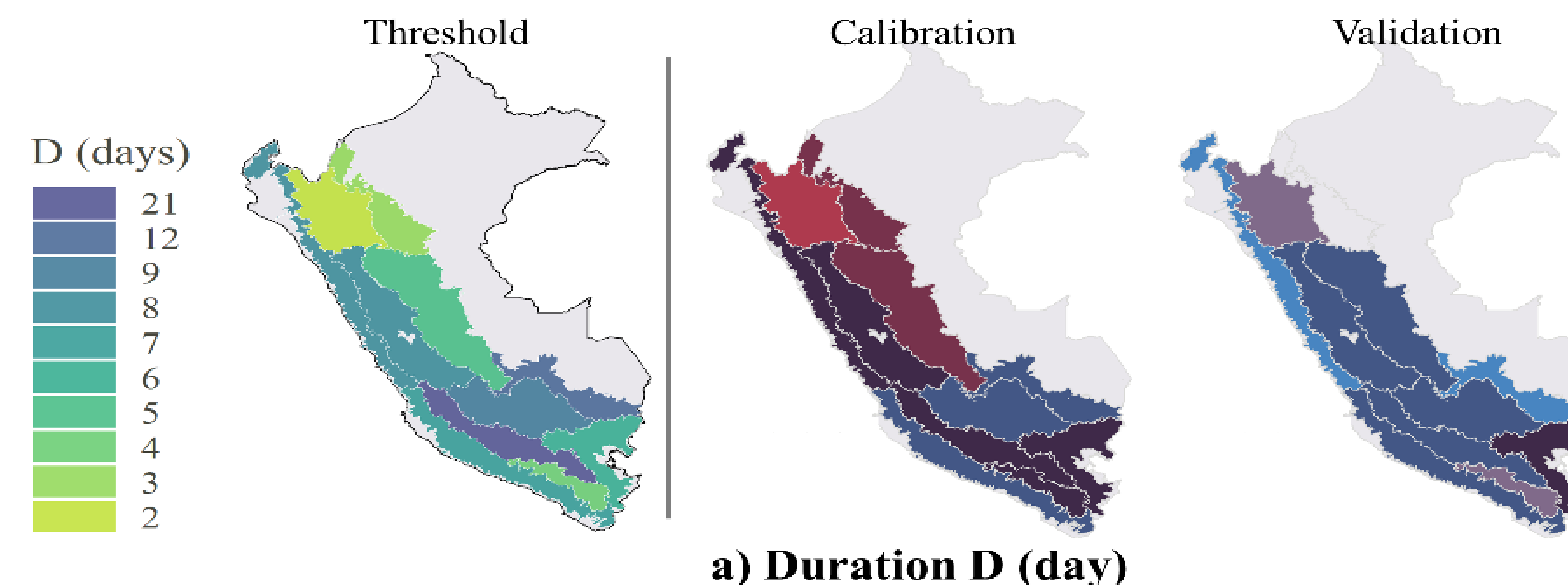
espec = especificidad

Paso 4: Umbrales de una sola variable

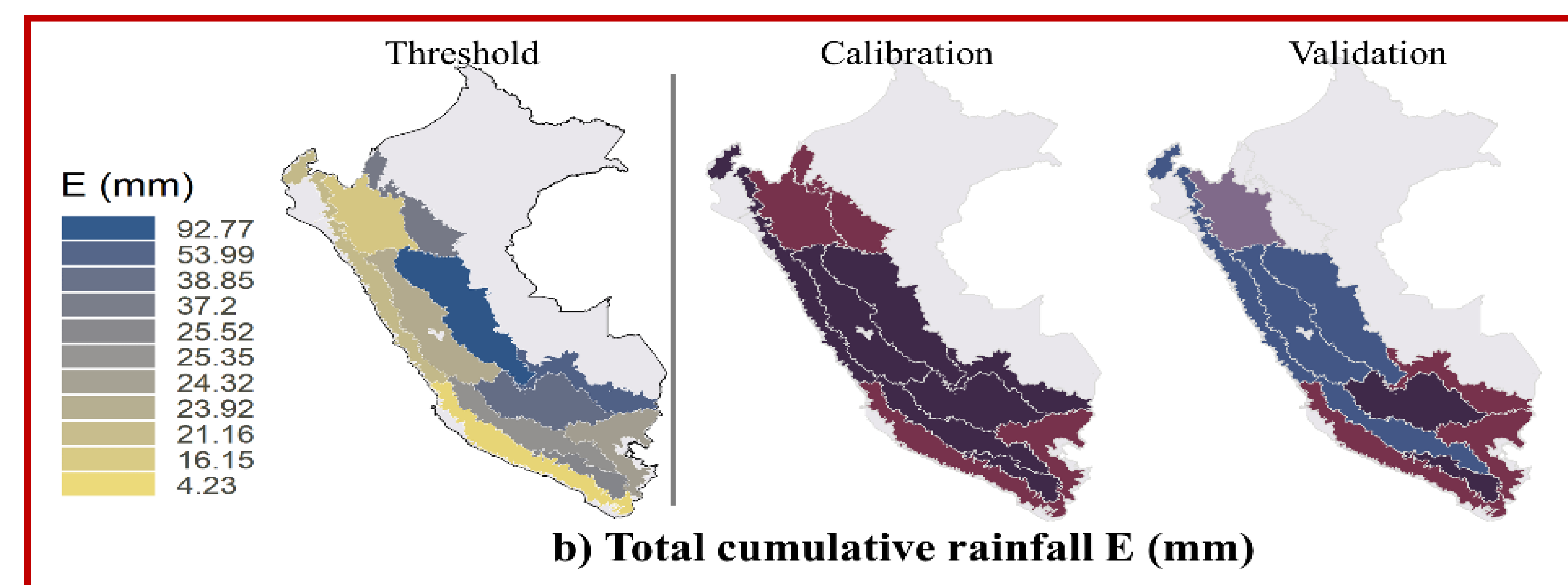
- Variables: **D** (d), **E** (mm), **I_{mean}** (mm/d) e **I_{max}** (mm/d).
- Definición del umbral:
Optimización del índice “Área Bajo la Curva ROC” (AUC)
- Enfoque de calibración:
Automática maximizando el AUC
- Rendimiento y validación: TSS



Umbrales | Gráficos bivariados de rendimientos

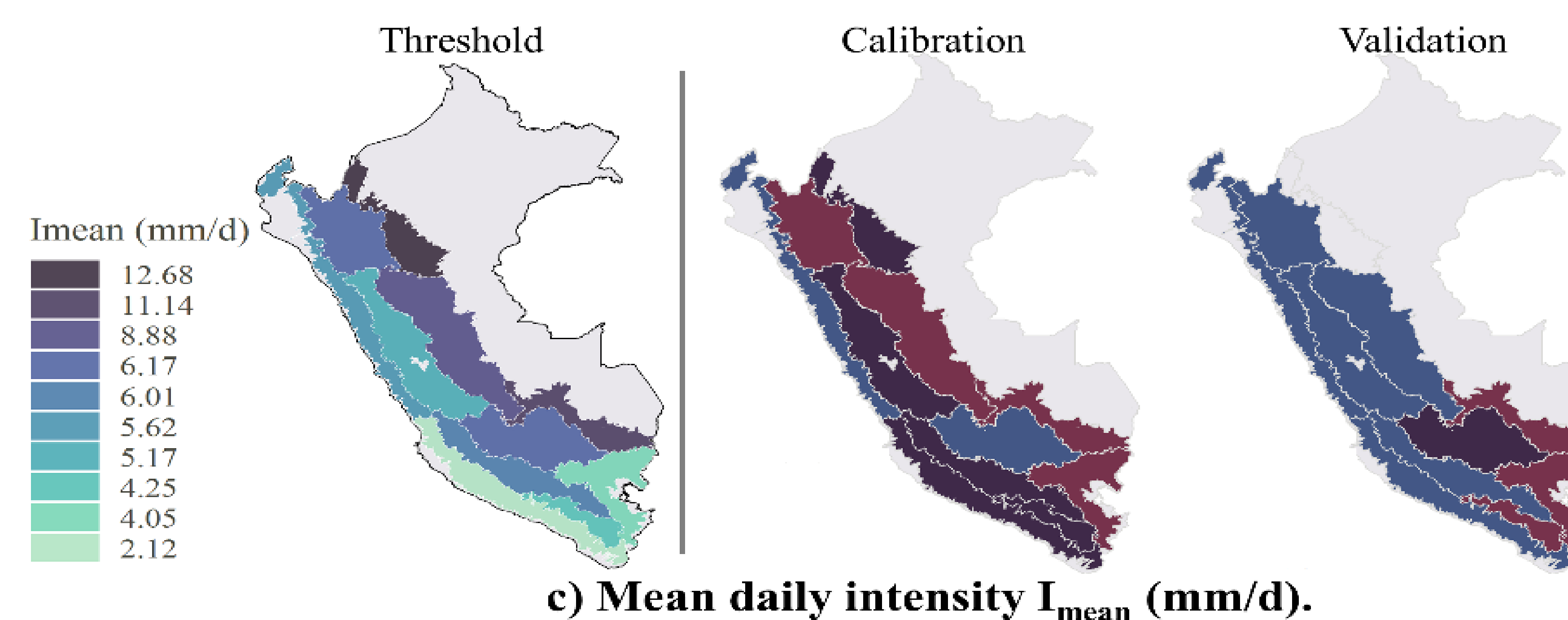


a) Duration **D** (day)

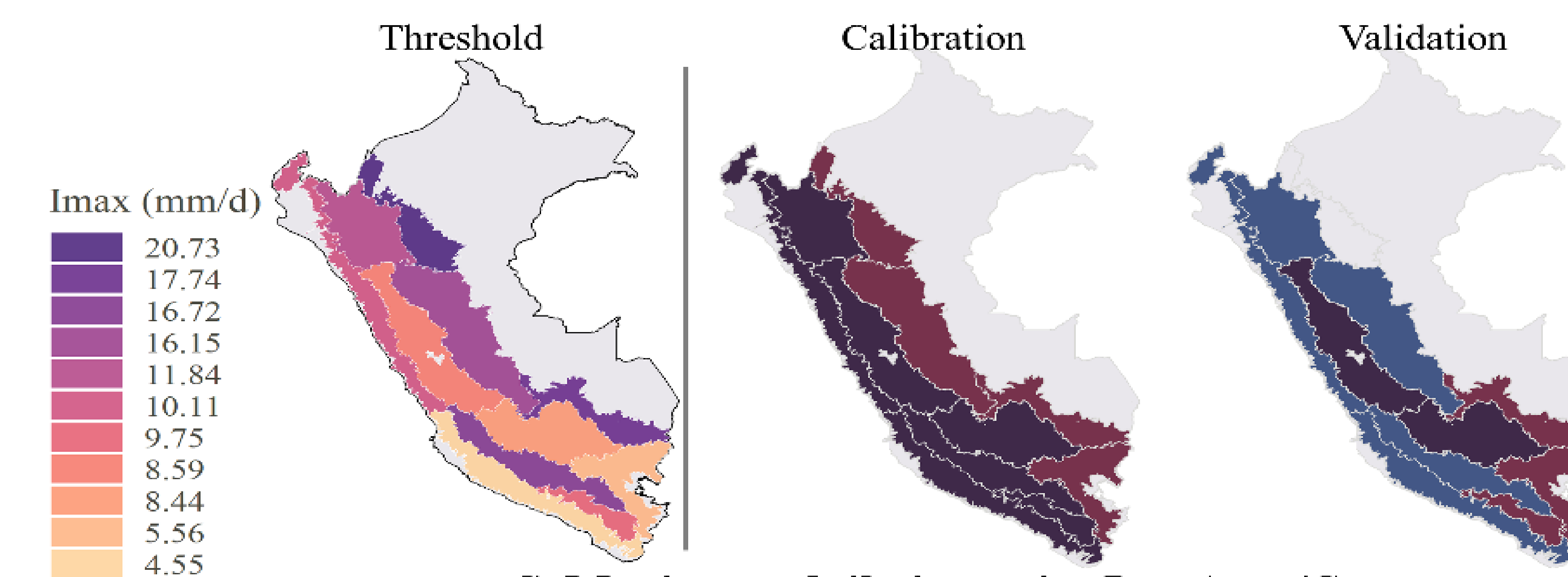


b) Total cumulative rainfall **E** (mm)

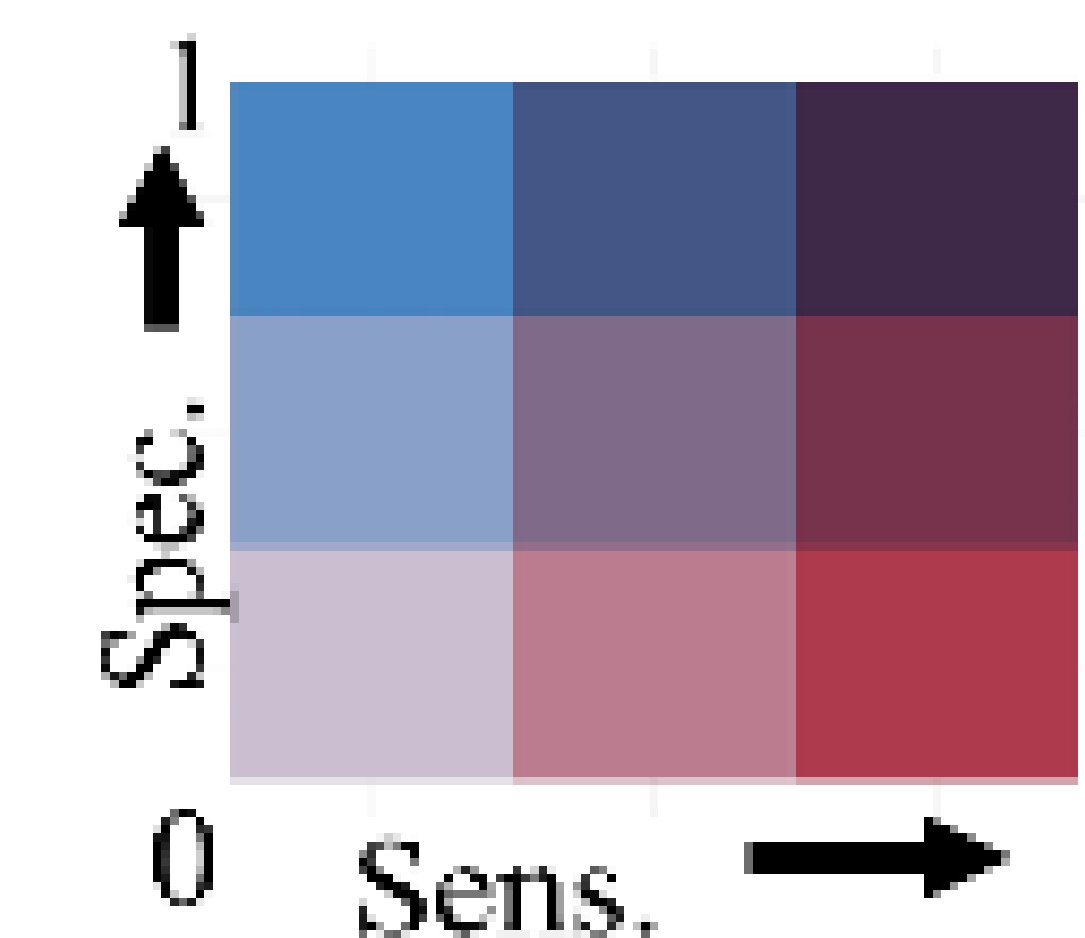
← Better overall performance



c) Mean daily intensity **I_{mean}** (mm/d).



d) Maximum daily intensity **I_{max}** (mm/d)



Paso 5: Umbrales tipo curva de dos variables

- Umbrales bivariados para $E-D$, $I_{\text{mean}}-D$ y $I_{\text{max}}-D$.
- Basados en curvas potenciales (Caine, 1980)

$$Y = A X^B$$

- Enfoque de calibración: Automática - Algoritmo SCE-UA (Evolutionary Shuffled Complex Algorithm de Duan, Gupta, and Sorooshian 1993)
- Función objetivo: TSS
- Rendimiento y validación:

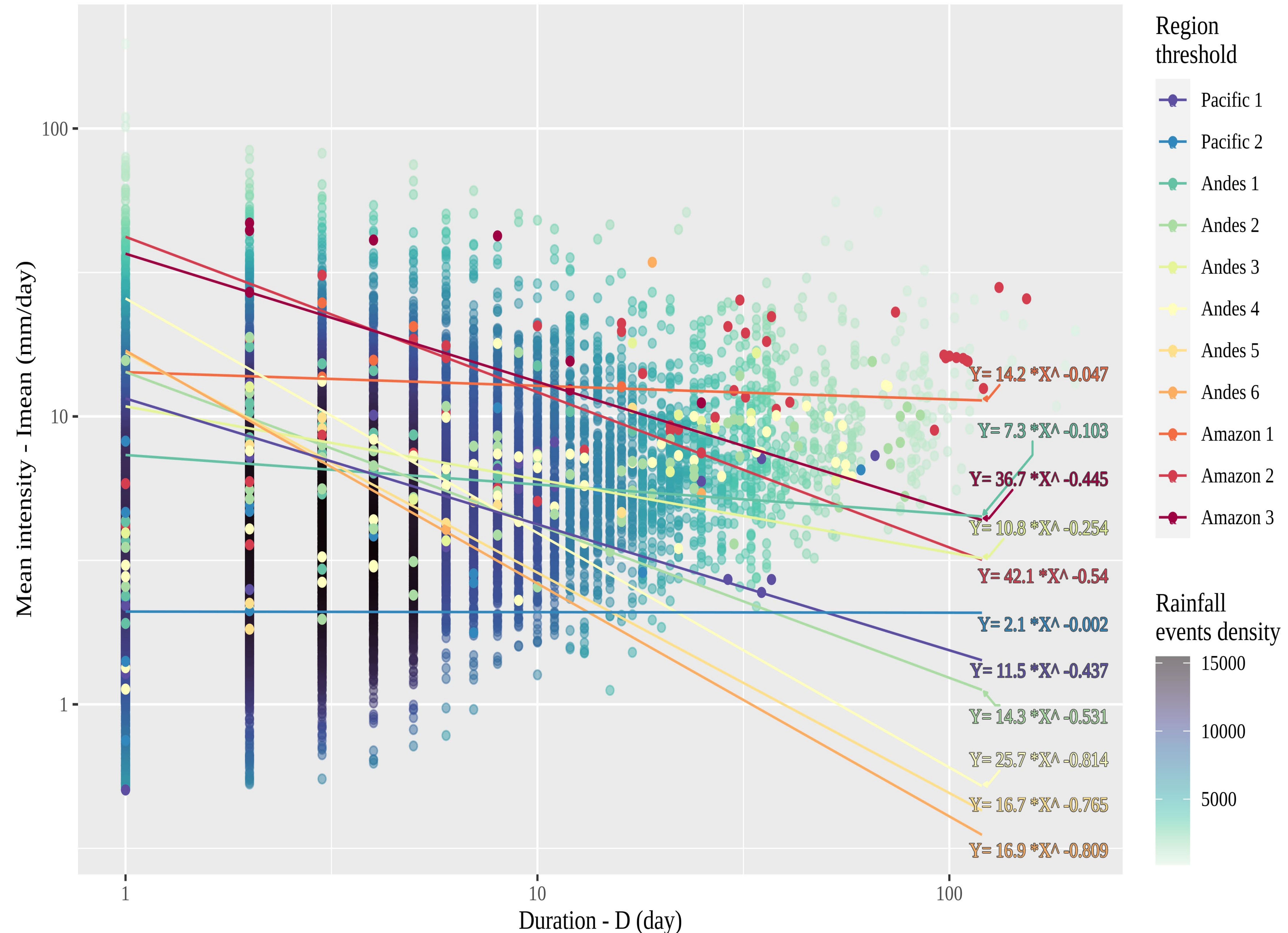
$$TSS = \text{sens} + \text{espec} - 1$$

Donde:

TSS = True Skill Statistics

sens = sensibilidad

espec = especificidad

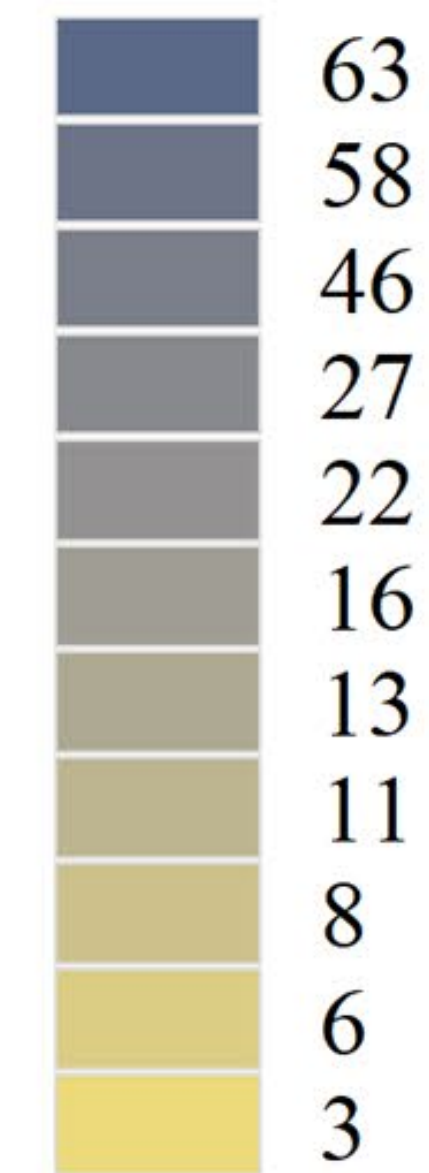


Probabilidad de ocurrencia de MM a nivel regional

Landslides events

373
eventos

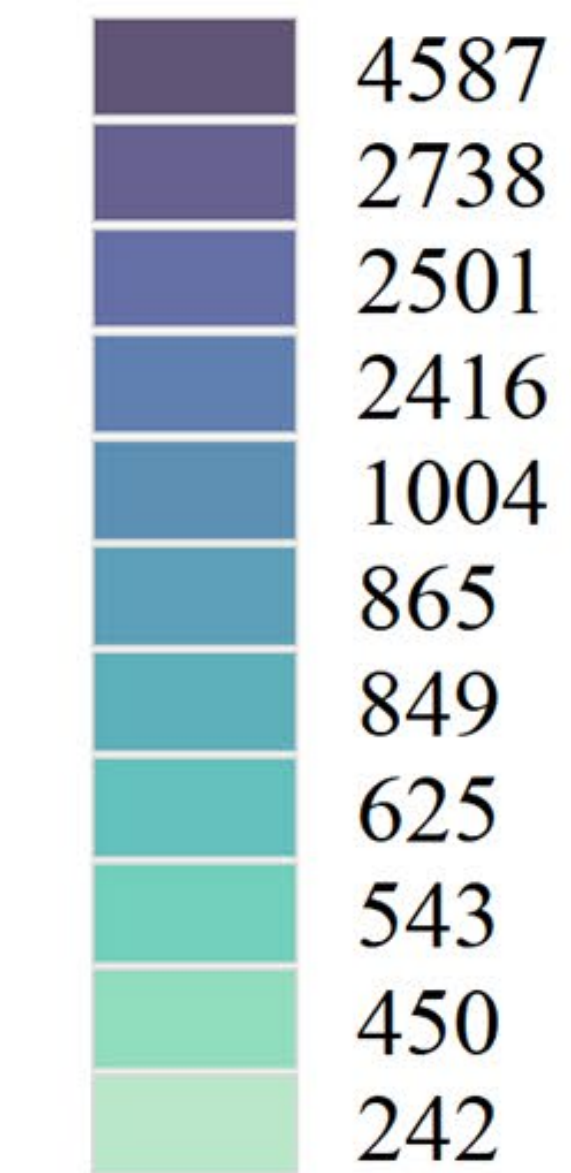
MM events



Rainfall events

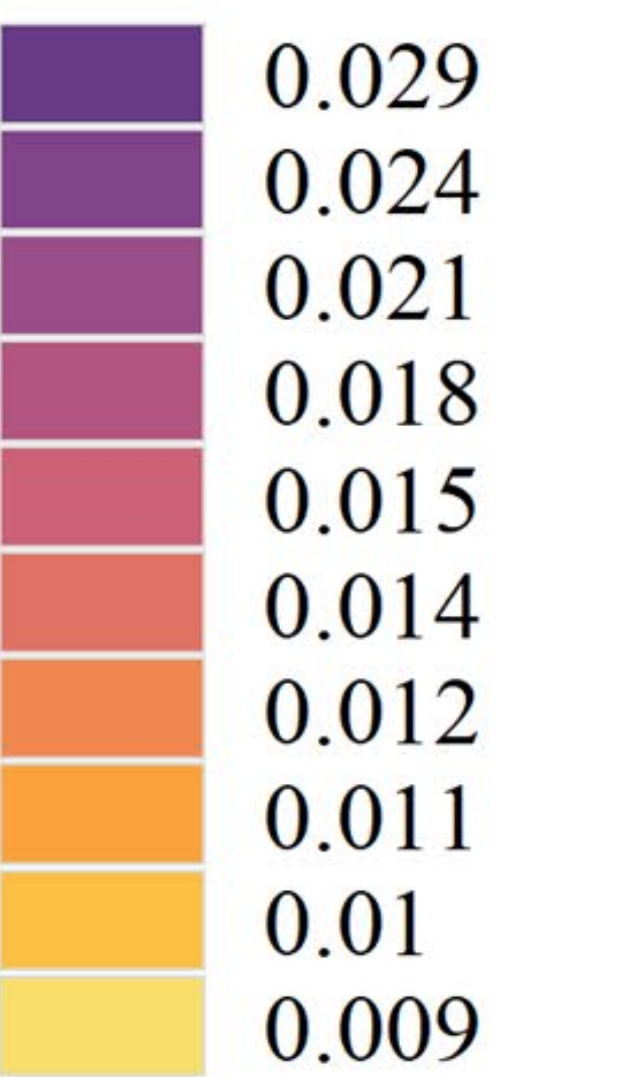
77,168
eventos

Pp events



Debris flow events /
Rainfall events

Prob



Conclusiones

- Se definieron 77 umbrales (7 umbrales para cada región) de lluvia bajo un enfoque empírico estadístico, a partir de eventos de movimientos en masa observados y el conjunto de datos de lluvias diarias PISCO Operativo.
- Con respecto a los umbrales de una sola variable, los que demostraron mayor poder predictivo fueron la lluvia acumulada E (con desempeños entre **0.39** y **0.78**) y la lluvia máxima I_{max} (con desempeños entre 0.38 y 0.92) para el periodo de calibración.
- Las regiones con mejor desempeño para los umbrales de una sola variable fueron las regiones Andes 3 (TSS=0.84), Amazon 1 (TSS=0.68) y Pacific 1 (TSS=0.63).
- Con respecto a los umbrales de dos variables, la combinación de la Intensidad media con la duración $I_{mean}-D$, fue el que mejor desempeño obtuvo (con desempeños entre **0.44** y **0.89** para el periodo de entrenamiento y de **0.05** a **0.76** en el periodo de validación).
- Se observa que el rendimiento disminuye en la etapa de validación, para los eventos ocurridos durante el año 2020. Este bajo rendimiento se debe a la alta sensibilidad del puntaje del rendimiento por la poca cantidad de eventos registrados para este periodo ya que los eventos de MM no tuvieron tanta significancia como en otros años.
- La región con mayor probabilidad de ocurrencia de MM es la región **Pacific2** ($P=0.032$), seguido por las regiones **Pacific 1** ($P=0.024$), **Andes 4** y **Andes 5** (ambos con $P=0.022$) basados en la cantidad de eventos de lluvia desencadenantes como no desencadenantes.
- Se logró realizar una primera aproximación de umbrales de lluvia regionales desencadenantes de movimientos en masa superficiales desencadenados por lluvias para el Perú.

Perspectivas

- Desarrollar un portal que muestre la información de forma intuitiva.
- Aun existe fuentes de incertidumbre asociada a las bases de datos que se usaron en la investigación, por lo que se proyecta mejorar los productos operativos de lluvias a nivel espacio-temporal reduciendo sus escalas y continuar recopilando y registrando eventos de movimientos en masa.
- Desarrollar estudios con mayor precisión en las regiones con mayor potencial de desarrollar eventos de movimientos en masa.
- Profundizar en la aplicabilidad de otras técnicas de definición de umbrales basados en Inteligencia artificial
- Asimilar nuevas variables (datos de radares, sensores de humedad de suelo)
- Implementar los umbrales obtenidos para el monitoreo de movimientos en masa para todo el Perú.

Publicación en revista de alto impacto



EN PROCESO

**Natural Hazards and
Earth System Sciences**

An interactive open-access journal of the European Geosciences Union

Rainfall thresholds estimation for shallow landslides in Peru from gridded daily data

Carlos E. Millán-Arancibia ¹, Waldo Lavado-Casimiro ¹

¹ National Service of Meteorology and Hydrology of Peru (SENAMHI), Lima, 15072, Peru

Correspondence to: Carlos E. Millán-Arancibia (cmillan@senamhi.gob.pe)

Abstract. The objective of this work was to generate and evaluate regional rainfall thresholds obtained from a combination of high-resolution gridded precipitation data (PISCOpd_Op) developed by the National Service of Meteorology and Hydrology and information from observed events of shallow landslides. The data of landslides were associated with triggering and non-triggering rainfall events with rainfall properties from which rainfall thresholds were determined. Validation of the performance of the thresholds was carried out with events that occurred during the year 2020 and focused on evaluating the operability of these thresholds in landslides warning systems in Peru. The obtention of thresholds was determined for 11 maximum rainfall regions. The method of determining the thresholds was based on an empirical-statistical approach, and the predictive performance of the thresholds was evaluated from the "True Skill Statistic" (TSS) and the Area Under the ROC Curve (AUC). The best predictive performance was obtained by the Imean-D medium intensity-duration threshold curve followed by accumulated rainfall *E*. This work was the first approach to estimate regional thresholds at the country scale to understand the landslides and the results obtained showed the potential of using thresholds for shallow landslides monitoring and forecasting caused by intense rains to support the actions of Disaster Risk Management.

GRACIAS!
SULPAY!
THANKS!

«Lo que no se define no se puede medir. Lo que no se mide, no se puede mejorar. Lo que no se mejora, se degrada siempre»
William Thomson Kelvin (Lord Kelvin)

Consultas y sugerencias son bienvenidas!
cmillan@senamhi.gob.pe



PERÚ

Ministerio
del Ambiente



DIRECCIÓN DE HIDROLOGÍA (DHI)
SUBDIRECCIÓN DE ESTUDIOS E
INVESTIGACIONES HIDROLÓGICAS (SEH)



Siempre
con el **pueblo**