

Umbrales de lluvia para la ocurrencia de deslizamientos en El Salvador

Reyes, M. ORCID: 0009-0007-5889-1124

Gerencia de Geología. Dirección General del Observatorio de Amenazas y Recursos Naturales del Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales, San Salvador, El Salvador.

mreyes@ambiente.gob.sv

Resumen – En este trabajo se generaron umbrales de lluvia para la ocurrencia de deslizamientos superficiales en El Salvador usando el algoritmo implementado en la herramienta CTRL-T (Melillo et al, 2018). Se hace uso de datos de lluvia horaria de 116 estaciones pluviométricas automáticas del Observatorio de Amenazas y Recursos Naturales y de una base de datos de 366 deslizamientos con fechas entre 2004 y 2019 con día de ocurrencia conocido. El resultado son umbrales horarios de lluvia acumulada de evento – duración (ED), para probabilidades de excedencia del 1% y 5%. Estos umbrales pueden representar de mejor manera la ocurrencia de deslizamientos superficiales, en los que es más importante la cantidad de lluvia acumulada durante una tormenta específica y no la lluvia acumulada antes de la tormenta.

Palabras clave: – deslizamientos, umbrales de lluvia, alerta temprana

Abstract – In this work, rainfall thresholds were generated for the occurrence of shallow landslides in El Salvador using the algorithm implemented in the CTRL-T tool (Melillo et al, 2018). Hourly rainfall data is used for 116 automatic rainfall stations from the Natural Hazards and Resources Observatory and a database of 366 landslides with dates between 2004 and 2019 with a known day of occurrence. The result is hourly thresholds of accumulated rainfall event duration (ED), for exceedance probabilities of 1% and 5%. These thresholds may better represent the occurrence of shallow landslides, in which the amount of rainfall accumulated during a specific storm is more important and not the rainfall accumulated before the storm.

Keywords: – landslides, rain thresholds, early warning.

I. INTRODUCCIÓN

Los umbrales para deslizamientos inducidos por lluvia, pueden ser definidos como las condiciones de lluvia, humedad del suelo o condiciones hidrológicas que, cuando se alcanzan o se exceden, es probable que ocasionen deslizamientos (Guzzetti et al, 2007).

Los umbrales son representados por medio de curvas en un plano cartesiano que muestran las condiciones hidrológicas asociadas a la ocurrencia de deslizamientos. Este enfoque puede ser mejorado usando además las condiciones que no están asociadas a la ocurrencia de deslizamientos, de tal forma que el umbral se defina como el mejor separador entre las condiciones que han causado o no deslizamientos, o usar dos umbrales: uno inferior, bajo el cual no ocurren deslizamientos, y otro superior, sobre el cual los deslizamientos siempre ocurren (Segoni et al, 2018).

Las variables que se han usado para definir umbrales para la ocurrencia de deslizamientos son muy variadas. Entre éstas se pueden mencionar la intensidad media de una tormenta, la duración, la

precipitación antecedente, la humedad del suelo, entre otras. Generalmente, la mayoría de variables usadas son derivadas de la precipitación, dada su disponibilidad por medio de estaciones automáticas que permiten tener datos en al menos una resolución temporal horaria.

Los umbrales de lluvia para deslizamientos inducidos por lluvia pueden definirse usando modelos físicos (basados en procesos) o modelos empíricos. Los modelos físicos tratan de extender los modelos de estabilidad de taludes tradicionalmente usados en la ingeniería geotécnica, de tal forma que se pueda predecir la cantidad de precipitación necesaria para la ocurrencia de deslizamientos.

Los modelos físicos tienen limitaciones en cuanto a la extensión de las áreas sobre las cuales pueden aplicarse, dado que necesitan información detallada de las características hidrológicas, geomorfológicas, litológicas, geotécnicas, entre otras, que en la mayoría de los casos se tiene sólo para áreas muy pequeñas. Por este motivo, para escalas regionales y en algunos casos locales, los umbrales empíricos de lluvia son una de las herramientas más usadas para la predicción de deslizamientos.

II. MARCO CONCEPTUAL

A. Clasificación de umbrales empíricos de precipitación

Existe un consenso en la literatura sobre el hecho que los deslizamientos superficiales y los flujos de escombros son ocasionados principalmente por lluvias cortas e intensas (Aleotti, 2004; Guzzetti et al, 2007) o menos frecuentemente, durante eventos de intensidad relativamente moderada pero prolongada (Crosta, 1998), los cuales pueden estar controlados por la lluvia antecedente. Para el caso de deslizamientos profundos, usualmente están relacionados a eventos de lluvia prolongados y menos intensos, para los cuales la lluvia antecedente es más importante (Martelloni et al, 2012).

Basándose en las mediciones de precipitación consideradas, Guzzetti et al (2007) clasifican los umbrales empíricos de precipitación en tres categorías: (a) umbrales que combinan mediciones de precipitación obtenidos para un evento de lluvia específico, (b) umbrales que consideran las condiciones antecedentes y c) otros umbrales.

Otros autores, (Cepeda, 2009; Cepeda et al, 2012; Rosi et al, 2020) han usado además umbrales que consideran la combinación de mediciones de lluvia para un evento específico con la lluvia antecedente.

A continuación, se describe cada categoría.

1) *Umbrales que combinan mediciones de precipitación para un evento de lluvia específico:* pueden dividirse a su vez en cuatro subcategorías (Guzzetti et al, 2007): a) umbrales intensidad-duración (ID), b) umbrales basados en la lluvia total del evento (E), c) umbrales lluvia acumulada del evento-duración (ED), y d) Umbrales lluvia del evento-intensidad (EI).

La descripción que se hará de esta categoría de umbrales se basará solamente en los umbrales ID y ED, dado que son los más usados.

Los parámetros empleados más frecuentemente para la definición de umbrales son la intensidad y la duración (ID). En una revisión de bibliográfica realizada por Guzzetti et al (2007), de 124 umbrales analizados, 52 (41.9%) pertenecen a esta categoría. En otra revisión realizada por Segoni et al (2018) de 115 umbrales publicados en artículos entre los años 2008 y 2016, el 48.6% de los estudios revisados pertenecen también a esta categoría.

La forma general de estos umbrales es la siguiente (Guzzetti et al, 2007):

$$I = c + \alpha D^{\beta}$$

Donde:

I: intensidad media de la lluvia (expresada comúnmente en mm/h),

D: duración de la lluvia (expresada comúnmente en horas) y

α y β y c , son parámetros, donde $c \geq 0$.

Es importante mencionar que existen diferentes enfoques para definir la intensidad. Por ejemplo, Cannon et al. (2008) usan la intensidad pico, pero la mayoría de autores usan la intensidad media, definida como la lluvia acumulada durante una tormenta dividida entre la duración de la tormenta.

Estos umbrales generalmente se representan como líneas rectas en gráficos con escala logarítmica. En la figura 1 se muestran 52 umbrales ID recopilados por Guzzetti et al (2007). Las líneas negras representan umbrales globales o creados para el área del espacio Centro Europeo Adriático Danubio Sureste (CADSES), localizadas al centro y sur de Europa. Las líneas grises representan umbrales de otras partes del mundo que no pertenecen a esa región.

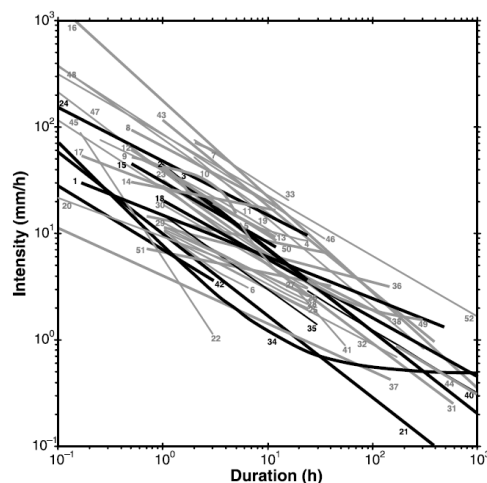


Fig. 1. Recopilación de umbrales ID y ED hecha por Guzzetti et al (2007).

Los umbrales ED son el segundo tipo más común encontrados en la literatura (Guzzetti et al, 2007). Tienen la misma estructura que los umbrales ID y los dos enfoques son analíticamente equivalentes, dado que $I = E/D$. Sin embargo, de acuerdo con Gariano et al (2020), es preferible definir umbrales ED, dado que las dos variables son independientes; por el contrario,

en los umbrales ID la intensidad depende de la duración de la tormenta.

2) *Umbrales lluvia antecedente*: Los umbrales basados en la lluvia antecedente se basan en el supuesto que ésta variable influencia los niveles de agua subterránea y la humedad del suelo, por lo que puede ser usada para estimar la ocurrencia de deslizamientos. Generalmente se construyen eligiendo un período de lluvia antecedente específico (p. ej. 4, 7 o 15 días) y estableciendo una relación entre la ocurrencia de deslizamientos con la cantidad de lluvia antecedente para ese período. En algunas ocasiones se combinan la lluvia antecedente con alguna variable relacionada a la lluvia del evento. Por ejemplo, Heyerdahl et al (2003), trabajando en El Salvador y Nicaragua, creó un umbral para la ocurrencia de lahares basado en la lluvia crítica horaria en la falla y la lluvia antecedente para un período de 4 días.

Existe una gran dispersión en la literatura para los períodos considerados para la lluvia antecedente. Guzzetti et al (2007) reportan que se han considerado períodos desde 1 día hasta 120 días. Anderson (2013), trabajando en El Salvador, consideró hasta 180 días para la precipitación antecedente.

3) *Otros umbrales*: otros autores han propuesto umbrales que no corresponden a ninguna de las categorías anteriores. De acuerdo a Guzzetti et al (2007), algunas de las variables usadas han sido el número de días con lluvia que exceden 5 mm dividido por una medida de evapotranspiración, la lluvia de 24 horas esperada para un período de retorno de 5 años, datos de volumen de inundaciones, descarga máxima media diaria, entre otros.

Umbrales que combinan lluvia antecedente con lluvia para eventos específicos: otros investigadores han propuesto umbrales que combinan la lluvia para un evento específico con la lluvia antecedente. Cepeda et al (2009) propuso una generalización del modelo propuesto por Caine (1980):

$$I = [\alpha_1 A_n^{\alpha_2}] D^\beta$$

Donde:

I, D y β tienen el mismo significado que se definió anteriormente

α_1, α_2 : constantes del umbral

A_n : precipitación antecedente al día n

Con este modelo, se parte de un umbral ID y se prueban con diferentes duraciones de lluvia antecedente, de tal forma que se logre el mejor ajuste a los datos existentes. Este ajuste se hace usando un

análisis de Receiver Operating Characteristics (ROC). Con esta metodología, un punto en el espacio ROC puede estar asociado a varios umbrales que representan el mismo par de puntos, por lo que se generan dos umbrales. Se considera que es posible la ocurrencia de deslizamientos si cualquiera de los umbrales es superado. En la figura 2 se muestran los resultados de Cepeda (2009) para el Cerro El Picacho, San Salvador.

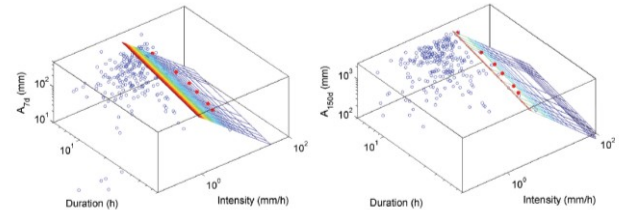


Fig. 2. Umbrales I-A-D para flujos de escombros mayores a 200,000 m³ para el Cerro El Picacho, San Salvador. Tomado de Cepeda (2009).

Rosi et al (2020) usa un enfoque parecido, al incorporar la lluvia media areal (MeAR), que se define como la precipitación media acumulada registrada por todas las estaciones en ciertas "zonas de alerta" en un período de tiempo dado. Las zonas de alerta son definidas como zonas homogéneas delimitadas con base en criterios morfológicos, la principal amenaza natural que las afecta y los límites administrativos. En la figura 3 se muestra un ejemplo de un umbral creado para una zona de alerta en la región de Emilia Romagna, Italia. Los puntos rojos representan verdaderos positivos y los amarillos falsos positivos.

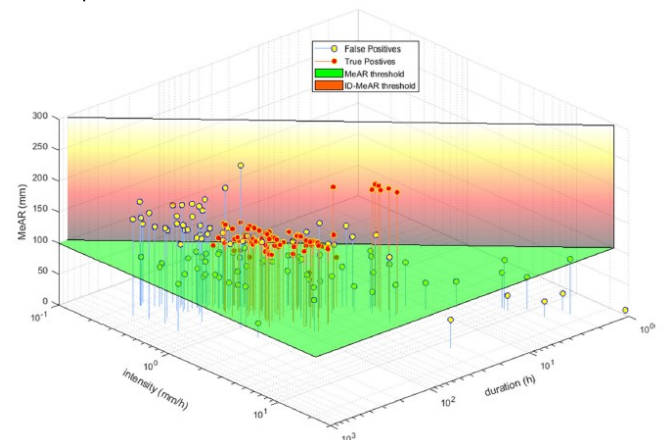


Fig. 3. Umbral ID-MeAR para una zona de alerta de la región de Emilia Romagna, Italia. Tomado de Rosi et al (2020)

De acuerdo a Cepeda (2009) y a Segoni et al (2018), este tipo de umbrales reducen el número de falsas alarmas.

B. Enfoques para definir umbrales de lluvia para deslizamientos

De acuerdo a Cannon et al (2008), hay tres diferentes enfoques para definir umbrales de lluvia para la ocurrencia de deslizamientos: a) como un límite inferior a las condiciones de ocurrencia de deslizamientos; b) como una curva limitando las condiciones que causan y no causan deslizamientos; y c) como un límite superior a las condiciones que no causan deslizamientos.

El primer enfoque tiende a generar umbrales más conservadores, mientras que los dos últimos, al considerar además las condiciones de lluvia que no causan deslizamientos, reducen el número de falsas alarmas. En la figura 4 se muestra un esquema para cada una de las condiciones, modificado del presentado por Cepeda et al (2012). Un elemento meteorológico se define en esta figura como un valor o estadística obtenido de lecturas en una estación meteorológica, pronóstico del tiempo, radares, satélites, etc. Algunos ejemplos son la duración de un evento de lluvia, la intensidad de la lluvia, la lluvia acumulada para un evento, la lluvia acumulada en 24 horas, entre otros.

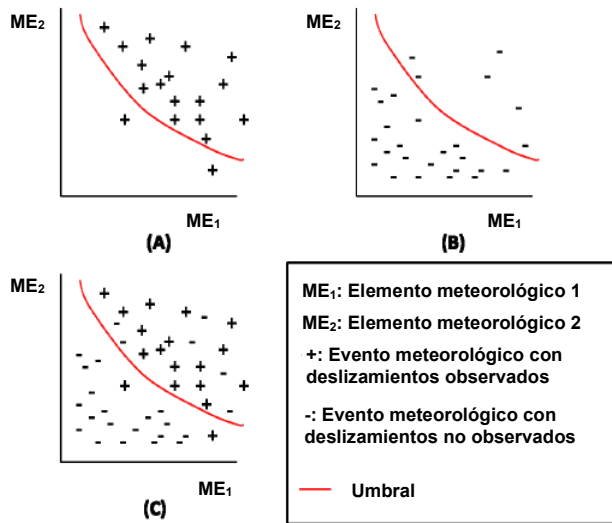


Fig. 4. Enfoques para definir umbrales de lluvia para deslizamientos. a) sólo ocurrencia de eventos de deslizamientos disponibles; b) sólo ocurrencia de eventos que no causaron deslizamientos disponibles; c) ambos tipos de eventos disponibles. La proporción de eventos de deslizamientos a la de no deslizamientos es usualmente muy pequeña y no corresponde a la proporción que se muestra en c), la cual se presenta para propósitos de ilustración. Modificado de Cepeda et al (2012).

III. METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN

Para definir las tormentas, asignar las condiciones de lluvia que causaron los deslizamientos y generar umbrales, se utilizó el algoritmo implementado en la herramienta CTRL-T (Calculation of Thresholds for Rainfall-induced Landslides Tool) creada por Melillo et al (2018). Esta herramienta, escrita en el lenguaje de programación R, reconstruye de forma automática y objetiva eventos de lluvia y condiciones responsables de la falla, calculando umbrales para diferentes probabilidades de excedencia. El código emplea solamente los datos de deslizamientos para la generación de los umbrales, como se ilustró en la sección "Enfoques para definir umbrales de lluvia para deslizamientos". En la figura 5 se muestra un diagrama de flujo del algoritmo.

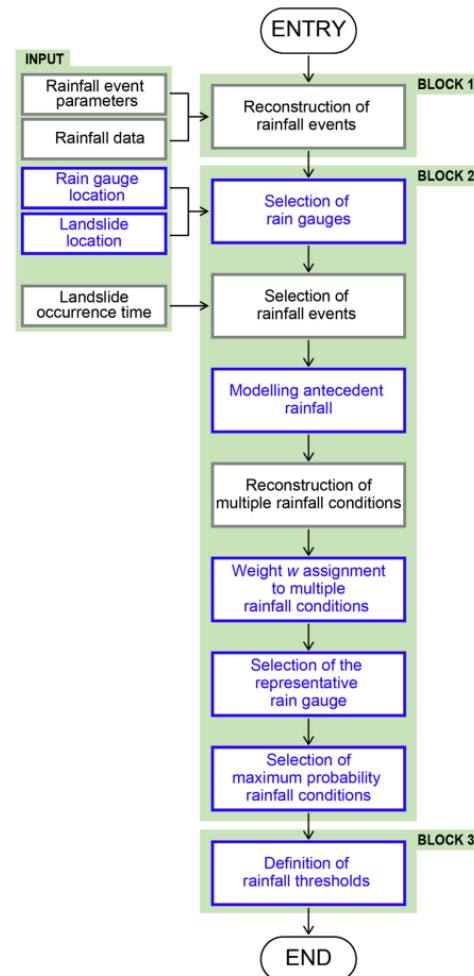


Fig. 5. Diagrama de flujo del algoritmo usado por CTRL-T. Adaptado de Melillo et al (2018)

El algoritmo se divide en tres bloques. El "BLOQUE 1" ejecuta la reconstrucción de los eventos de lluvia (RE) usando parámetros y series de lluvia obtenidas de pluviómetros localizados en el área de estudio. Un evento de lluvia es un período de lluvia continua,

separada de los eventos precedentes y sucesivos por períodos secos (no lluvia). Los parámetros se seleccionan de acuerdo a las condiciones climáticas del área.

Usando la información de los pluviómetros y deslizamientos, el "BLOQUE 2", escoge las estaciones más cercanas a cada deslizamiento. Para cada pluviómetro, el algoritmo identifica el evento de lluvia asociado con el deslizamiento. Luego, el algoritmo reconstruye las condiciones de lluvia individuales o múltiples (Multiple Rainfall Conditions, MRC) asociadas para cada falla, que consisten en pares de valores de lluvia acumulada y duración (DL, EL) o un set de más pares. Con una relación empírica que incluye la distancia entre el pluviómetro y el deslizamiento, se le asigna un peso a cada par del set de datos MRC. Para cada deslizamiento, el MRC que corresponde al peso máximo para la estación seleccionada tiene la mayor probabilidad de ser el responsable por la ocurrencia del deslizamiento. A este par de set de datos se le llama Maximum Probability Rainfall Conditions (MPRC) o condiciones de lluvia con máxima probabilidad.

Para calcular los umbrales de lluvia, en el "BLOQUE 3", se usa el set de MRC asociado a todos los deslizamientos disponibles.

En las siguientes secciones se explican con más detalles algunas de las acciones que realiza el algoritmo, junto con algunas consideraciones tomadas para este trabajo.

A. Reconstrucción de eventos de lluvia

El algoritmo reconstruye los eventos de lluvia haciendo uso de algunos parámetros, como el período sin lluvia entre tormentas a considerar para diferentes períodos del año. Por el momento, estos parámetros han sido tomados como los que trae predeterminados la herramienta, pero lo más adecuado es usar la metodología propuesta por Melillo et al (2018) para estimarlos, a partir de un balance hídrico climático. En la figura 6 se muestra un ejemplo de la reconstrucción de un evento de lluvia asociado a un deslizamiento, en la que se muestran diferentes subeventos.

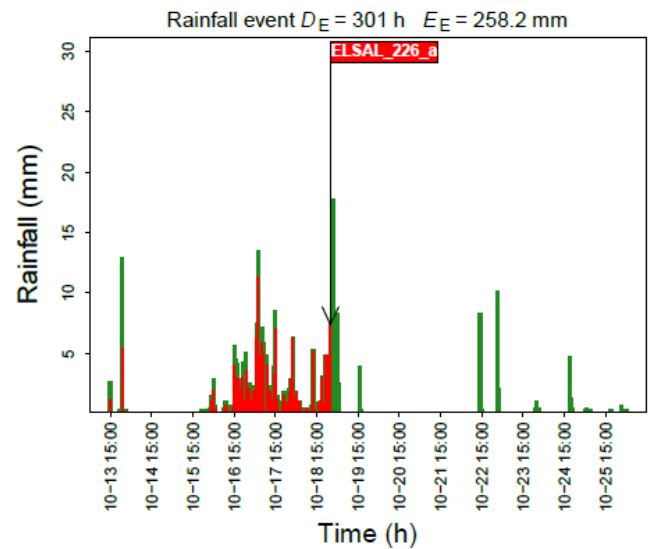


Fig. 6. Evento de lluvia asociado al deslizamiento del 18 de octubre de 2008 en El Picacho. El algoritmo determina que, para una duración de tormenta de 301 horas, la lluvia acumulada que desencadenó el deslizamiento fue de 258 mm

B. Selección de estaciones

Para cada uno de los deslizamientos, el algoritmo selecciona las estaciones pluviométricas cercanas basadas en un área circular centrada en la localización del deslizamiento, usando un radio R_b . Este valor depende de la geomorfología de la zona de estudio y de la densidad de estaciones pluviométricas. Melillo et al (2018) cita como ejemplos que para una zona montañosa donde la altitud cambia de forma abrupta, el radio no debería ser mayor a 5 km, mientras que en zonas planas con una densidad baja de estaciones, el radio se puede incrementar a 15 km. La estación representativa usada para reconstruir la lluvia responsable por la falla se identifica después de un análisis de las múltiples condiciones de lluvia reconstruidas.

Para este caso, considerando el número de deslizamientos, se ha decidido usar un radio de 15 km, uno menor disminuiría el número de deslizamiento usado para la generación de los umbrales. La variación en el número de deslizamientos al disminuir el radio, relacionado con la incertidumbre de los umbrales será un tema que podría explorarse posteriormente en una actualización de esta investigación. En la figura 7, se muestra un ejemplo de un deslizamiento y las estaciones seleccionadas dentro del radio especificado.

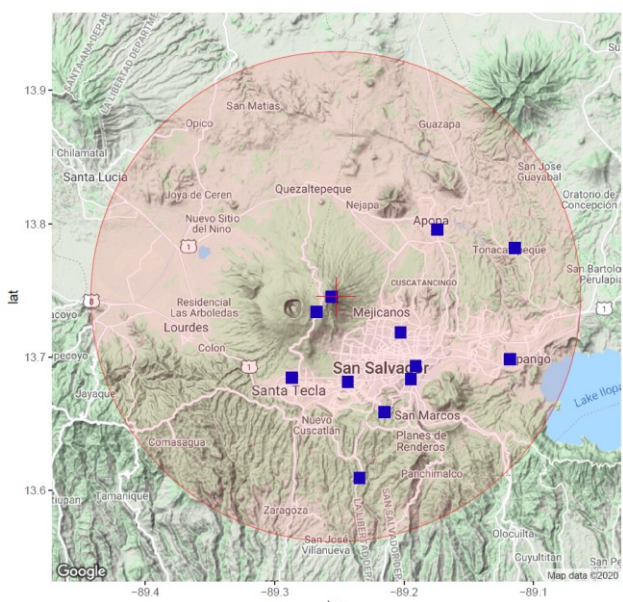


Fig. 7. Ejemplo de análisis de estaciones cercanas a deslizamiento de 18 de octubre de 2008 en El Picacho.

C. Modelación de lluvia antecedente

El algoritmo examina los efectos de la saturación suelo-agua, no considerando toda la contribución de la lluvia a la ocurrencia de un deslizamiento, sino que únicamente la contribución de la lluvia dependiendo del período de tiempo transcurrido desde su inicio. Para esto se aplica a la modelación de la lluvia, un factor arbitrario de decaimiento constante (p.ej. $k=0.84$) a la lluvia acumulada del evento E_L , como fue propuesto por Crozier (1999):

$$E_L = E_L(0) + kE_L(1) + k^2E_L(2) + \dots + k^N E_L(N)$$

$$= \sum_{i=0}^N k^i [E_L(i)]$$

Donde $E_L(0)$ es la lluvia acumulada en las 24 horas antes de la hora de ocurrencia del deslizamiento (t_L), $E_L(i)$ es la lluvia acumulada en las 24 horas antes de t_L , y N es la duración del evento de lluvia en días (pasos de 24 horas). Como ejemplo, la contribución de la lluvia en el quinto día antes de la ocurrencia del deslizamiento se reduce a alrededor de la mitad (49.8%) de la lluvia medida. El factor de decaimiento k puede ser cambiado de acuerdo al drenaje de la humedad del suelo del área local de estudio.

D. Reconstrucción de condiciones de lluvia múltiples y asignación de pesos

Para cada deslizamiento, el algoritmo identifica un número variable n de condiciones de lluvia

individuales ($n = 1$) o múltiples probablemente responsables de la falla. A cada par de condiciones de lluvia se le asigna un peso w , el cual es proporcional al cuadrado de la distancia inversa entre la estación y el deslizamiento, a la lluvia acumulada (E_L) y a la intensidad de lluvia media ($ELDL-1$):

$$w = f(d, E_L, D_L) = d^{-2} E_L^2 D_L^{-1}$$

El peso es atribuido a cada par (DL, EL) del set de datos MRC. Para pares múltiples (DL, EL) (p.ej. condiciones de lluvia con duración y lluvia acumulada incrementada), cuando la diferencia entre la lluvia acumulada, E_L , entre un par y el subsecuente es menor al 10%, el peso atribuido a cada par es nulo ($w=0$) y esta condición es removida del set de datos MRC. De forma similar, w es nulo para condiciones de lluvia que tengan un retardo entre la hora de finalización de la lluvia y la ocurrencia del deslizamiento más grande que un período asignado establecido de 48 h. Este último requerimiento previene el uso de información incorrecta (p.ej. deslizamientos fechados incorrectamente) en la definición del umbral. Se espera que los deslizamientos considerados sean mayormente superficiales y por lo tanto ocurran dentro de un período corto de tiempo después de la lluvia disparadora.

E. Selección de estación más representativa y de las condiciones de lluvia de máxima probabilidad

Para cada deslizamiento, w es usado para identificar la estación más representativa, considerando características geográficas y de lluvia, y para determinar la probabilidad de las condiciones únicas o múltiples a ser usadas en el cálculo de umbrales de lluvia. Para un grupo de estaciones dentro del radio R_b , la estación representativa es la que tiene el par (DL, EL) con el peso más alto. En el caso de pares múltiples, cada w es normalizado a la suma de los pesos individuales, pero es igual a uno, en el caso de una condición única. CTRL-T calcula umbrales de lluvia para el set de datos MRC y MPRC (maximum probability rainfall conditions), donde MPRC es una selección de los pares (DL, EL) con los pesos más altos.

F. Definición de umbrales de lluvia

CTRL-T adopta una técnica estadística llamada "bootstrapping" de acuerdo a lo propuesto por Perucacci et al. (2012) y un método frecuentista (Brunetti et al., 2010), muestreando las condiciones

ponderadas que han ocasionado deslizamientos. Las curvas tienen una forma de ley potencial:

$$E = (\alpha \pm \Delta\alpha) \times D^{(\gamma \pm \Delta\gamma)}$$

Donde E es la lluvia acumulada del evento de lluvia (en mm), D es la duración del evento de lluvia (en horas), α es una constante de escala, γ es el parámetro de forma (define la pendiente de la curva potencial), y $\Delta\alpha$ y $\Delta\gamma$ representan las incertidumbres de α y γ .

En la ecuación anterior α y γ representan los valores medios de los parámetros que resultan del cálculo de umbrales de 5,000 series sintéticas generadas por el algoritmo. $\Delta\alpha$ y $\Delta\gamma$ son las desviaciones estándar de α y γ . Cada serie sintética contiene el mismo número de deslizamientos que el set de datos original pero seleccionados de forma aleatoria con reemplazo (técnica "bootstrapping"). Para el cálculo de los umbrales, un par individual (DL, EL) es asociado a cada deslizamiento. Para cada deslizamiento en la serie sintética individual, el algoritmo muestrea de forma aleatoria con una probabilidad w una condición única del set de datos MRC. Los pares extraídos (DL, EL) de los n deslizamientos son usados para definir los umbrales. El algoritmo también usa las condiciones de lluvia con el valor máximo de w con el fin de establecer los umbrales para el set de datos MPRC.

La salida de la técnica "bootstrapping" consiste en 5000 series sintéticas de m pares (DL, EL). El análisis de estas series sintéticas permite calcular la media y las incertidumbres asociadas que se mencionaron anteriormente.

III. MATERIALES Y MÉTODOS

Los deslizamientos usados provienen de la base de datos del Observatorio de Amenazas y Recursos Naturales (DOA). Se recopilieron 366 deslizamientos de los que se tiene información de al menos el día de ocurrencia. Las fechas están comprendidas entre 2004 y 2019. Se incluyeron dentro de estos datos 48 eventos usados por Posner y Georgakakos (2015) para el modelo de predicción de deslizamientos del Sistema Central America Flash Flood Guidance (CAFFGS), así como una base de datos de 212 deslizamientos proporcionada por el Fondo de Conservación Vial (FOVIAL), que afectaron carreteras entre el 12 de octubre y 4 de noviembre de 2019. Se han revisado algunos casos con los informes de las inspecciones correspondientes y se ha agregado la hora de ocurrencia. Para el caso de la base de deslizamientos de FOVIAL, se corrigieron algunas

fechas y se agregó una hora aproximada en algunos casos, usando los reportes de afectaciones que elabora la Dirección General de Protección Civil.

En la figura 8 se muestra la ubicación de las estaciones automáticas usadas.

A. Datos de lluvia

Los registros de lluvia usados corresponden a datos horarios de 116 estaciones de la red telemétrica del Observatorio de Amenazas y Recursos Naturales, para el período comprendido entre los años 2003 a 2019. Los datos no son continuos para todas las estaciones en todo el período usado, y fueron proporcionados sin correcciones. Se hizo una corrección automática de éstos eliminando registros con lluvia horaria mayor a 100 mm. Se eliminaron también registros con datos mayores a 30 mm/h para los meses de enero, febrero y marzo. A pesar de estas correcciones, de la inspección visual de los datos se observa que existen algunas estaciones y períodos de tiempo que requieren una revisión más detallada. Ésta es una limitante de la investigación.

En la figura 8 se muestra la localización de los deslizamientos usados.

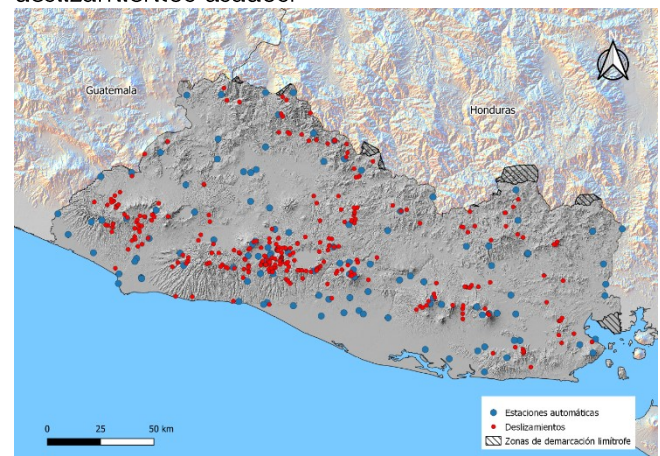


Fig. 8. Localización de los deslizamientos y las estaciones automáticas usadas.

IV. RESULTADOS

El algoritmo reconstruyó las condiciones de lluvia para 216 deslizamientos y descartó 150. La razón para que se hayan descartado 150 deslizamientos pudo deberse a que: (i) la distancia del deslizamiento al pluviómetro más cercano fue más grande que el radio especificado, (ii) el desfase entre la finalización de la tormenta y la fecha de ocurrencia fue mayor a 48 horas o, (iii) los deslizamientos estuvieran mal fechados, entre otras. El total de puntos para MRC y

MPRC se muestran en las figuras 9 y 10, respectivamente. Para las condiciones MRC se tienen 429 puntos, mientras que para las MPRC se tienen 216.

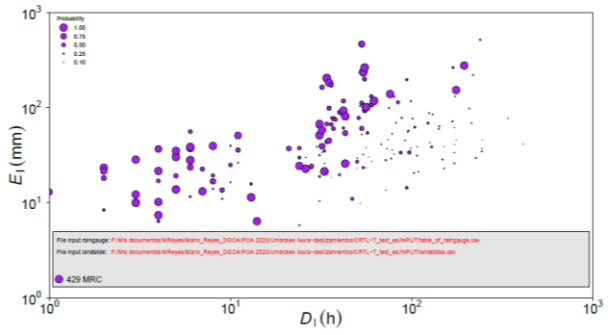


Fig. 9. Datos seleccionados de condiciones MRC.

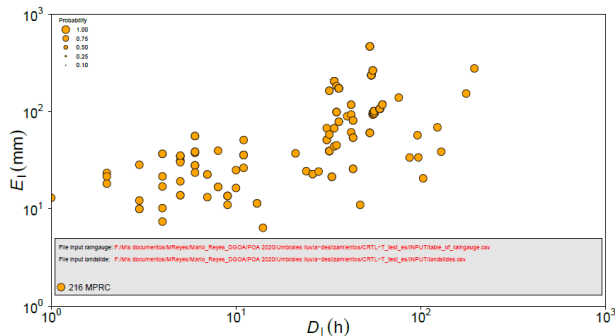


Fig. 10. Datos seleccionados de condiciones MPRC.

Los umbrales para probabilidades de excedencia del 1% y 5% se presentan en las figuras 11 y 12, en escala logarítmica. Las áreas sombreadas representan las incertidumbres, derivadas de la desviación estándar de 5000 series de datos sintéticos creadas a partir de los datos originales. Puede observarse que la incertidumbre para los umbrales generados con las condiciones MPRC es menor que para los generados con las condiciones MRC.

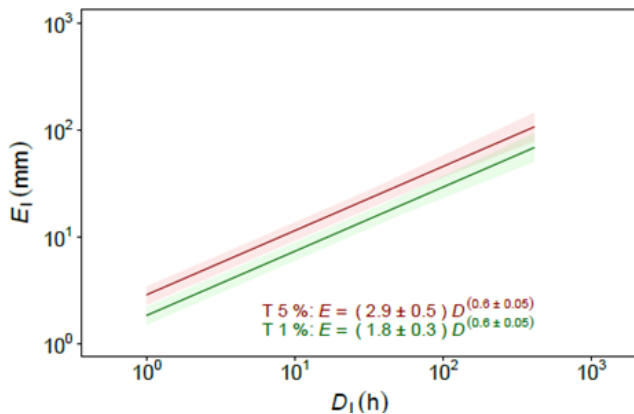


Fig. 11. Umbrales generados para condiciones MRC.

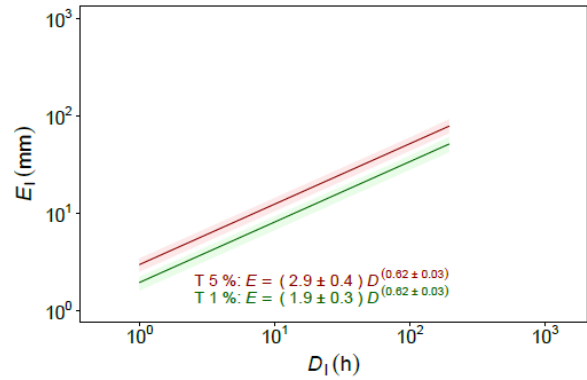


Fig. 12. Umbrales generados para condiciones MPRC.

Las ecuaciones resultantes son las siguientes:

Para MRC

$$T\ 5\%: E = (2.8 \pm 0.4) D^{0.6 \pm 0.04}$$

$$T\ 1\%: E = (1.8 \pm 0.3) D^{0.6 \pm 0.04}$$

Con $1 \leq D \leq 412$, con D en horas.

Para MPRC

$$T\ 5\%: E = (2.9 \pm 0.4) D^{0.62 \pm 0.04}$$

$$T\ 1\%: E = (1.9 \pm 0.3) D^{0.62 \pm 0.04}$$

Con $1 \leq D \leq 195$, con D en horas.

La probabilidad de excedencia está relacionada a qué tan conservador es el umbral resultante. Por ejemplo, un umbral del 5% de probabilidad de excedencia, indica que el 5% de los deslizamientos usados para calibrarlo están debajo de la línea.

En los gráficos y ecuaciones resultantes, puede observarse que los umbrales MPRC tienen un menor rango de aplicabilidad, pero tienen una dispersión menor.

IV. CONCLUSIONES

Los umbrales para la ocurrencia por deslizamientos son uno de los componentes técnicos principales de un sistema de alerta temprana por deslizamientos. De entre todos los enfoques existentes, se decidió usar uno basado en la delimitación de los eventos de lluvia, dado que es uno de los más usados en la literatura y se ajusta a los deslizamientos superficiales, que son los más comunes en El Salvador y para los cuales la lluvia antecedente es menos representativa.

Los umbrales generados son del tipo lluvia acumulada del evento – duración, usando una base de datos de deslizamientos en la que se tiene

precisión de fecha de ocurrencia de al menos el día del evento y lluvia horaria. Este tipo de umbrales pueden dar una mejor estimación de la hora de ocurrencia de deslizamientos superficiales.

Los umbrales con las condiciones de lluvia de máxima probabilidad (MPRC) tienen una menor incertidumbre, pero un menor rango de validez. Para los umbrales creados con las condiciones de lluvia múltiples (MRC) es lo contrario, una mayor incertidumbre y un mayor rango de validez.

RECONOCIMIENTOS

Se agradece al Fondo de Conservación Vial (FOVIAL) por haber proporcionado los datos de deslizamientos usados en esta investigación.

REFERENCIAS

- Aleotti, P. (2004). A warning system for rainfall-induced shallow failures. *Engineering Geology*. 73. 247-265. [10.1016/j.enggeo.2004.01.007](https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2004.01.007).
- Baum, R.L., Fischer, S.J., and Vigil, J.C., (2018), THRESH—Software for tracking rainfall thresholds for landslide and debris-flow occurrence, user manual: U.S. Geological Survey Techniques and Methods, book 14, chap. A2, 33 p., <https://doi.org/10.3133/tm14A2>.
- Cepeda, J. (2009) Characterization and risk management of rainfall-induced landslides. PhD dissertation, University of Oslo.
- Cepeda, J, Colonnelli S, Meyer NK, Kronholm K (2012) SafeLand Deliverable D1.5: statistical and empirical models for prediction of precipitation-induced landslides.
- Crosta, G (1998). Regionalization of rainfall thresholds: an aid to landslide hazard evaluation. *Environmental Geology* 35, 131–145. <https://doi.org/10.1007/s002540050300>
- Gariano, S.L., Melillo, M., Peruccacci, S. et al (2020). How much does the rainfall temporal resolution affect rainfall thresholds for landslide triggering? *Nat Hazards* 100, 655–670. <https://doi.org/10.1007/s11069-019-03830-x>
- Guzzetti, F., Peruccacci, S., Rossi, M. et al (2007). Rainfall thresholds for the initiation of landslides in central and southern Europe. *Meteorol. Atmos. Phys.* 98, 239–267. <https://doi.org/10.1007/s00703-007-0262-7>
- Martelloni, G., Segoni, S., Fanti, R. et al (2012). Rainfall thresholds for the forecasting of landslide occurrence at regional scale. *Landslides* 9, 485–495. <https://doi.org/10.1007/s10346-011-0308-2>
- Melillo, M., Brunetti M.T., Peruccacci S., Gariano S.L., Roccati A., Guzzetti F. (2018) CTRL-T: a tool for the automatic calculation of rainfall thresholds for landslide occurrence. *Environmental Modelling & Software* 105 230–243, <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2018.03.024>
- Rosi, A., Segoni, S., Canavesi, V. et al (2020). Definition of 3D rainfall thresholds to increase operative landslide early warning system performances. *Landslides*. <https://doi.org/10.1007/s10346-020-01523-2>
- Segoni, Samuele & Piciullo, Luca & Gariano, Stefano Luigi (2018). A review of the recent literature on rainfall thresholds for landslide occurrence. *Landslides*. 15. 1483-1501. [10.1007/s10346-018-0966-4](https://doi.org/10.1007/s10346-018-0966-4).