



DOI: <https://doi.org/10.29298/rmcf.v9i50.251>

Artículo

## **Análisis del riesgo de erosión para la prevención de desastres en la caldera del Mt. Bawakaraeng, Indonesia**

### **Erosion risk analysis for disaster prevention in Mt. Bawakaraeng Caldera, Indonesia**

Hasnawir<sup>1,2</sup>, Laura Sánchez Castillo<sup>3\*</sup> y Israel Cantú Silva<sup>3</sup>

#### **Abstract**

Soil erosion is a serious environmental problem, but its impact on gullies as a threat to human life has been little studied in Indonesia. The objective of this research was to analyze the erosion risk in gullies for disaster mitigation and to know the loss of soil in the Bawakaraeng Mt. Inventories of debris flow disasters related to gullies in the caldera from 2007 to 2017 were carried out, field work and soil analysis were carried out. The Universal Soil Loss Equation (USLE) was used for the loss of soil. It was determined that there are 22 events of debris flows, related to gully erosion in the sediment deposits. Results showed that the particles and the permeability of the soil in the lower part of the deposits could promote erosion, in comparison with the site of the upper part of the caldera. The analysis of risk of erosion revealed that 3.53 % of the studied area has a very low type of erosion; 12.87 % a low level; 64.06 % a moderate level; 0.06 % a high level and 19.49 % a very high level. The construction of *sabo dam* to control erosion and sedimentation and the development of a disaster warning system must be done continuously in the place.

**Key words:** Debris flow, inventory, Indonesia, revegetation, *sabo dam*, alarm system.

#### **Resumen:**

La erosión del suelo es un grave problema ambiental, pero su impacto en cárcavas como amenaza a la vida humana, ha sido poco estudiado en Indonesia. Los objetivos de esta investigación fueron analizar el riesgo de erosión en cárcavas para la mitigación de desastres y conocer la pérdida de suelo en la caldera del Monte Bawakaraeng. Se realizaron inventarios de desastres de flujos de escombros relacionados con cárcavas en la caldera de 2007 a 2017, se llevó a cabo trabajo de campo y análisis de suelo. Para la pérdida de suelo se utilizó la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (USLE). Se determinó que existen 22 eventos de flujos de escombros relacionados a la erosión en cárcavas en los depósitos de sedimento. Los resultados mostraron que las partículas y la permeabilidad del suelo en la parte inferior de los depósitos podrían promover la erosión, en comparación con el sitio de la parte alta de la caldera. El análisis de riesgo de erosión reveló que 3.53 % del área estudiada tiene un tipo de erosión muy bajo; 12.87 % un nivel bajo; 64.06 % un nivel moderado; 0.06 % un nivel alto y 19.49 % un nivel muy alto. La construcción de *sabo dam* para controlar la erosión y sedimentación y el desarrollo de un sistema de alerta contra desastres debe hacerse de forma continua en el lugar.

**Palabras clave:** Flujo de escombros, inventario, Indonesia, revegetación, *sabo dam*, sistema de alerta.

Fecha de recepción/Reception date: 13 de marzo de 2018

Fecha de aceptación/Acceptance date: 24 de septiembre de 2018

<sup>1</sup>Environment and Forestry Research and Development Institute of Makassar. Indonesia.

<sup>2</sup>Faculty of Forestry, Hasanuddin University. Indonesia.

<sup>3</sup>Facultad de Ciencias Forestales. Universidad Autónoma de Nuevo León. México. Correo-e: [laura@kyudai.jp](mailto:laura@kyudai.jp)

## Introducción

La erosión es uno de los principales problemas en países tropicales como Indonesia; y es quizás el más serio mecanismo hacia la degradación de este recurso natural. Sin embargo, en cárcavas, que es un tipo de erosión impresionante y notorio, ha sido declarado como uno de los problemas ambientales más graves en el planeta (Abdulfatai *et al.*, 2014). Ionita *et al.* (2015) reveló que las cárcavas son uno de los procesos naturales que modelan la superficie de la tierra y que representan una manifestación de inestabilidad dentro de las cuencas. Cuando la erosión en cárcavas es una amenaza para la vida de los habitantes, se reconoce como un riesgo.

En las regiones *Loess* de Europa, América y Asia, la erosión en cárcavas puede ser el menos importante peligro natural geomórfico; sin embargo, sus impactos son constantes en el mundo y pueden incluir la pérdida de suelos de cultivo, la amenaza a la vegetación, el efecto en las propiedades físicas del suelo, el peligro para los seres vivos, el aislamiento de pueblos y aldeas, y la formación de suelos degradados (Abdulfatai *et al.*, 2014).

Las investigaciones sobre la erosión en cárcavas han abordado diferentes aspectos en el mundo; tal es el caso de Rumania (Ionita, 2006); Europa central (Dotterweich, 2008); sureste de España (Lesschen *et al.*, 2007); este de Polonia (Zgłobicki *et al.*, 2014); suroeste de China (Su *et al.*, 2015); suroeste de Irán (Zakerinejad y Maerker, 2015); Sudáfrica (Mararakanye y Sumner, 2017); e Irán del norte (Zabihi *et al.*, 2018).

El impacto del riesgo de la erosión en cárcavas como amenaza para el ser humano no ha sido estudiado ampliamente en Indonesia, a pesar de que ha desencadenado la pérdida de vidas humanas en algunas áreas, tal y como lo han reportado noticieros locales.

Un inmenso deslave ocurrido en marzo de 2004 en la caldera del *Mount (Mt.) Bawakaraeng* produjo, aproximadamente, 232 millones de m<sup>3</sup> de sedimentos, lo que causó daños ambientales significativos, además de la muerte de 32 personas y la destrucción de propiedades (Hasnawir y Kubota, 2011). Subsecuentemente, la lluvia favoreció la erosión en cárcavas de alrededor de 25 a 100 m de profundidad, lo

cual se convirtió en una amenaza real. Ante este problema, el objetivo de la investigación que se describe a continuación, consistió en analizar el riesgo de erosión en cárcavas para la prevención de desastres en la caldera del *Mt. Bawakaraeng*, Indonesia.

## **Materiales y Métodos**

### **Área de Estudio**

La caldera del *Mt. Bawakaraeng* está localizada en la provincia de *Sulawesi* del Sur, Indonesia (Figura 1), a 2 830 msnm. Respecto a su morfología, se caracteriza por un relieve alto, pendientes extremas, alto grado de desgaste, así como eventos relacionados con la erosión, como el movimiento del suelo y los deslaves (Hasnawir y Kubota, 2010). La vegetación de las áreas montañosas está compuesta de bosque natural y plantaciones forestales de *Pinus merkusii* Jungh. & de Vriese. El basamento alrededor del área del *Mt. Bawakaraeng* consiste en formación *Tonasa*, formación *Camba*, rocas volcánicas *Baturape-Cindako*, rocas extrusivas e intrusivas y formaciones volcánicas *Lompobattang*, cuyo origen data del Paleógeno al periodo Cuaternario.





**Figura 1.** Área de estudio en la caldera del *Mt. Bawakareang*, Indonesia.

Los suelos en el área de estudio son andosoles y están formados con materiales volcánicos; muchos tienen un drenaje interno excelente, debido a su alta porosidad y por su ocurrencia en posiciones de áreas elevadas. La gravedad específica del suelo es  $2.70 \text{ g cm}^{-3}$ , la porosidad se estima entre 66.7 % – 88.7 %, mientras que la densidad aparente es baja, no solo en la superficie del terreno; es típicamente  $> 900 \text{ kg m}^{-3}$ , pero puede alcanzar  $300 \text{ kg m}^{-3}$ , valores que se han obtenidos en andosoles muy hidratados (Hasnawir y Kubota, 2011).



## Métodos

El análisis de riesgo de erosión demanda un enfoque interdisciplinario en el que intervienen la hidrología, la geomorfología y la pedología (Ghosh y Bhattacharya, 2012). En este caso, se utilizaron los inventarios de cárcavas relacionadas con desastres de flujos de escombros en la caldera del *Mt. Bawakaraeng*, desde 2007 hasta 2017. El inventario se basó en la información de la oficina local del gobierno de *Sulawesi* del Sur, en investigaciones de campo y pruebas de suelo.

Se realizó un análisis de laboratorio estándar, de acuerdo con los métodos de la Sociedad Americana de Material y Pruebas (ASTM) para medir la distribución del tamaño de las partículas. Se tomaron tres muestras por sitio (sitio natural, depósito de sedimentos en la parte alta y depósito de sedimentos en la porción baja). La diferencia entre las partículas ( $<75 \mu\text{m}$ ) se determinó con un tamiz Núm. 200. El método estándar ASTM D 422 se aplicó para establecer la textura del suelo relacionada con la erosión. La permeabilidad del suelo ( $k \text{ cm sec}^{-1}$ ) se calculó mediante la ecuación 1 y la ecuación simplificada 2, que establecen la capacidad de permeabilidad de una muestra sin disturbio. Conforme se incrementan los valores de permeabilidad existe un mayor riesgo de erosión.

Este método es ampliamente usado para calcular el coeficiente de permeabilidad de una muestra sin disturbio, debido a su practicidad en campo (Paudel *et al.*, 2008; Aditian y Kubota, 2014; Sánchez-Castillo *et al.* 2017a). Consiste en ajustar dos cilindros con las mismas dimensiones (Figura 2). Uno contiene la muestra de suelo, previamente saturada, y el otro se llena con agua. La permeabilidad se define como la diferencia en tiempo para drenar toda el agua de la lata superior (Das, 1997):

$$k = 2.3 \frac{aL}{A(t_2 - t_1)} \log_{10} \left( \frac{h_1}{h_2} \right) \quad (1)$$

Donde:

$$\frac{h_1}{h_2} = 2$$

$$a = A$$

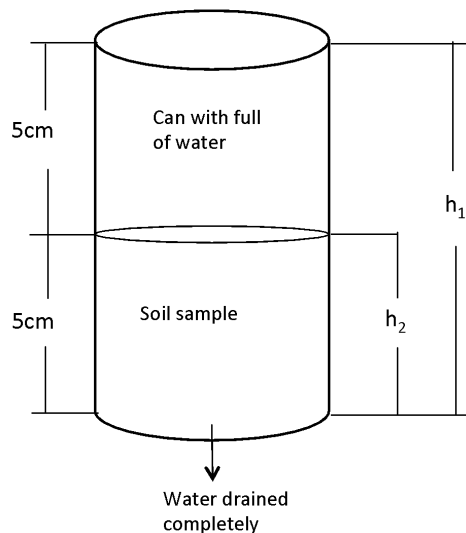
$$L = 5 \text{ cm}$$

$$t_2 - t_1 = \Delta t$$

$a$  y  $A$  = Área transversal

La ecuación fue modificada sustituyendo los valores en la ecuación 1, la permeabilidad puede ser estimada como:

$$k = \frac{3.46}{\Delta t} \quad (2)$$



*Can with full of water* = Lata llena de agua; *Soil sample* = Muestra de suelo; *Water drained completely* = Agua drenada completamente

**Figura 2.** Método aplicado para medir la permeabilidad del suelo.

La Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (*Universal Soil Loss Equation*, USLE por sus siglas en inglés) es un método empírico para determinar parámetros relevantes

entre las muchas variables físicas como clima, perfiles de suelo, relieve, vegetación, uso de suelo y prácticas de manejo del área; respectivamente indicados por los factores R, K, LS, C y P. En esta investigación, la ecuación USLE se usó para describir el nivel de erosión del suelo que ocurre en la caldera del *Mt. Bawakaraeng*.

Es pertinente especificar que dicha ecuación no puede emplearse para establecer el riesgo de erosión en cárcavas, como lo indica Wischmeier (1976) en su discusión de los usos y mal usos de la USLE, cuando indica que se utiliza para estimar la pérdida de suelo promedio en un segmento particular, de una pendiente representada por un factor topográfico selectivo. Los parámetros en el marco de referencia de GIS comprenden factores de erosión como la lluvia, la erodabilidad, la topografía y la cobertura (Duru, 2016). La ecuación se expresa de la siguiente manera:

$$A = R \times K \times LS \times C \times P \quad (3)$$

Donde:

$A$  = Pronóstico de la pérdida de suelo promedio por unidad de área [ $\text{ton ha}^{-1} \text{año}^{-1}$ ]

$R$  = Factor de erosión lluvia-esorrentía (lluvia) en [ $\text{MJ mm ha}^{-1} \text{hr}^{-1} \text{año}^{-1}$ ]

$K$  = Factor de erodabilidad del suelo [ $\text{ton ha hr ha}^{-1} \cdot \text{MJ}^{-1} \cdot \text{mm}^{-1}$ ]

$LS$  = Factor de longitud e inclinación de la pendiente (sin dimensiones),

$C$  = Factor de cobertura-manejo (radio de la pérdida de suelo desde un área específica)

$P$  = Factor de soporte en la conservación (sin dimensiones)

## Resultados y Discusión

### Análisis de suelo

El método de análisis de tamiz cubre la determinación cuantitativa de la distribución del tamaño de las partículas del suelo (Cuadro 1).

**Cuadro 1.** Distribución del tamaño de las partículas en la caldera del *Mt. Bawakaraeng* (2017).

Núm.	Sitio	Textura (%)		
		Arena	Limo	Arcilla
1	Sitio natural	40	41	19
2	Depósito de sedimentos (parte alta)	66	27	7
3	Depósito de sedimentos (parte baja)	83	11	6

Los depósitos de sedimentos tienen un porcentaje más alto de arena que los de sitios naturales. El mayor contenido de arenas describe un suelo más propenso a erosionarse, comparado con los que registran valores más bajos. Incluso indica la posibilidad de que ocurra erosión en cárcavas, cuando hay eventos mayores de lluvia en la zona de depósitos de sedimento.

El suelo en los sitios erosionados podría haberse formado por la interacción de muchos factores tales como el material parental, el clima, el tiempo, la topografía o el relieve y la actividad microbiana. La influencia relativa de cada factor depende de las condiciones geográficas y la ubicación, pero la combinación de todos ellos, por lo general, determina el tipo de suelo y su espesor en cualquier lugar (Huggett, 1997).

Los resultados de permeabilidad del suelo alcanzaron intervalos desde  $0.0098 \text{ cm sec}^{-1}$  hasta  $0.0362 \text{ cm sec}^{-1}$  (Cuadro 2).



**Cuadro 2.** Permeabilidad del suelo de los tres sitios estudiados en la caldera del *Mt. Bawakaraeng* (2017).

Núm.	Sitio	Permeabilidad
		(cm sec <sup>-1</sup> )
1	Sitio natural	0.0098
2	Depósito de sedimentos (parte alta)	0.0185
3	Depósito de sedimentos (parte baja)	0.0362

Conforme el valor de la permeabilidad es más alto, es más factible que ocurra la erosión. Los depósitos de sedimentos en la parte baja de la caldera mostraron valores más altos de permeabilidad (Cuadro 2).

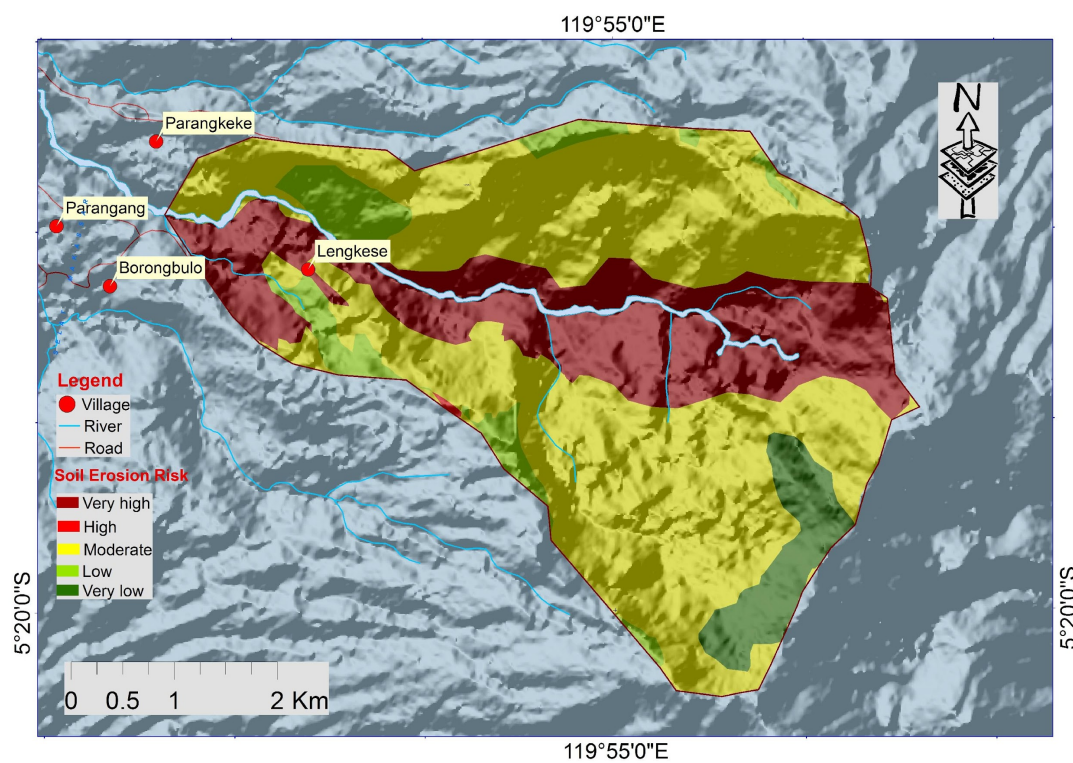
### Riesgo de Erosión del Suelo

Los diversos mapas de factores del modelo USLE (R, K, LS, C y P) generados en un entorno GIS mediante Arc GIS 10.1 y ERDAS *Imagine* 2017 y los paquetes GIS asociados, fueron integrados con el modelo USLE para determinar la tasa de erosión y su severidad, de lo que resultó el mapa de riesgos de erosión del suelo de la caldera del *Mt. Bawakaraeng*. Dicha erosión fue clasificada como: muy bajo ( $\leq 15 \text{ t ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ ), bajo ( $16 - 60 \text{ t ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ ), moderado ( $61 - 180 \text{ t ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ ), alto ( $181 - 480 \text{ ton ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ ) y muy alto ( $> 480 \text{ ton ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ ). La distribución espacial de la clase de riesgo de erosión reveló que 3.53 % de la caldera es bajo, 12.87 % muy bajo, 64.06 % moderado, 0.06 % alto y 19.49 % del área está bajo un gran riesgo de erosión (Cuadro 3, Figura 3).

**Cuadro 3.** Riesgo de erosión del suelo en la caldera del *Mt. Bawakaraeng* (2017).

<b>Riesgo de erosión</b>	<b>Pérdida de suelo</b> (ton ha <sup>-1</sup> año <sup>-1</sup> )	<b>Área</b> (ha)	<b>Porcentaje</b> (%)
Muy bajo	≤ 15	122.32	3.53
Bajo	16 – 60	446.38	12.87
Moderado	61 – 180	2 222.57	64.06
Alto	181 – 480	1.99	0.06
Muy alto	> 480	676.02	19.49
Total		3 469.28	100.00

Los valores más altos de riesgo de erosión del suelo se observan, principalmente, en pendientes abruptas colindantes con las líneas de drenaje y con los ríos.

**Figura 3.** Mapa de riesgo de erosión en la caldera del *Mt. Bawakaraeng*, Indonesia.

De acuerdo a los resultados de la recolección de información de eventos de flujo de escombros de la oficina gubernamental de la provincia de *Sulawesi* del sur (*Hazama-Brantas JO* y Región del río Central *Pompengan-Jeneberang*) hay 22 desastres relacionados con la erosión en cárcavas, en los depósitos de sedimentos en el *Mt. Bawakaraeng* de 2007 a 2017. La categoría de desastre de flujo de escombros se analizó con base en el volumen de los sedimentos y el impacto del flujo de escombros, el cual incluye daño a caminos, destrucción de tierra agrícola y carga de sedimento hacia la presa de captación presente en el área (Cuadro 4). Hasta ahora, no ha habido algún evento casual. A partir de la información aportada por las comunidades que viven en los alrededores de la caldera del *Mt. Bawakaraeng* no se han presentado afectaciones. Sin embargo, la incidencia de flujo de escombros promovidos por la erosión en cárcavas, es una amenaza para la gente que realiza actividades en el lugar o en sus alrededores, que reúne 3 172 habitantes en las cercanías.

Desde el punto de vista de la prevención de desastres, la construcción de una serie de *sabo dams* (represas en las partes altas de las montañas que evitan el escurrimiento de sedimentos) controlaría la erosión y sedimentación; sin embargo, el procedimiento es costoso y tardado, por lo que es necesario contar con un sistema de alerta temprana en el área, especialmente, en la época de lluvias cuando por lo general se presentan eventos de gran intensidad (noviembre-abril).

Hasnawir y Kubota (2010) consignaron que en la caldera del *Mt. Bawakaraeng* se presentan precipitaciones promedio por encima de los 3 000 mm anuales. Los umbrales de lluvia como una aplicación de sistema de alerta temprana para la prevención de desastres relacionados con sedimentos, de acuerdo a la metodología propuesta por Sánchez-Castillo *et al.* (2017b) podría desarrollarse en caso de escasez de datos históricos puntuales en tiempo (minutos) en el lugar. La Figura 4 muestra la erosión en cárcavas en los depósitos de sedimentos

**Cuadro 4.** Desastres relacionados con el flujo de escombros por erosión en cárcavas en la caldera del *Mt. Bawakaraeng*.

Núm.	Fecha	Estimación de sedimento (m <sup>3</sup> )	Impacto
1	08-02-2007	240 000	Carga de sedimentos hacia la presa
2	16-02-2007	7 800 000	Daño a caminos y una excavadora hidráulica, destrucción de tierras agrícolas, carga de sedimentos hacia la presa
3	27-12-2007	7 000 000	Daño a caminos, destrucción de tierras agrícolas, carga de sedimentos hacia la presa
4	20-01-2008	1 200 000	Destrucción de tierra agrícola, carga de sedimentos hacia la presa.
5	03-02-2008	370 000	Carga de sedimentos hacia la presa.
6	08-02-2008	2 800 000	Destrucción de tierra agrícola, carga de sedimento hacia la presa.
7	22-12-2009	4 600 000	Destrucción de tierra agrícola, carga de sedimento hacia la presa.
8	13-03-2010	3 000 000	Destrucción de tierra agrícola, carga de sedimento hacia la presa.
9	24-12-2010	1 400 000	Destrucción de tierra agrícola, carga de sedimento hacia la presa.
10	09-02-2011	500 000	Carga de sedimento hacia la presa
11	26-02-2012	450 000	Carga de sedimento hacia la presa
12	08-11-2012	280 000	Carga de sedimento hacia la presa
13	24-12-2012	630 000	Carga de sedimento hacia la presa
14	08-03-2013	1 100 000	Destrucción de tierra agrícola, carga de sedimentos hacia la presa
15	13-12-2013	5 200 000	Daño a caminos, destrucción de tierra agrícola, carga de sedimentos hacia la presa
16	04-02-2014	420 000	Carga de sedimentos hacia la presa
17	03-01-2015	320 000	Carga de sedimentos hacia la presa
18	15-03-2015	1 200 000	Destrucción de tierra agrícola, carga de sedimentos hacia la presa
19	04-04-2015	2 600 000	Daño a caminos, destrucción de tierra agrícola, carga de sedimentos hacia la presa
20	16-01-2016	480 000	Carga de sedimentos hacia la presa
21	21-02-2017	320 000	Carga de sedimentos hacia la presa
22	18-03-2017	280 000	Carga de sedimentos hacia la presa

Fuentes: Hazama-Brantas JO (2007-2010) y Región del Río Central Pompengan-Jeneberang (2011-2017).



**Figura 4.** Erosión en cárcavas en sedimentos depositados en la caldera de *Mt. Bawakareang*.

## Conclusiones

Este estudio muestra que las propiedades físicas del suelo, que incluyen el tamaño de partículas (con alta textura arenosa) y la permeabilidad en los depósitos de sedimento en las partes bajas de la caldera de *Mt. Bawakaraen* causan erosión fácilmente comparado con el sitio natural y las partes altas de la zona de interés.

Con el uso de la fórmula de USLE (R, K, LS, C and P) y la aplicación de Sistemas de Información Geográfica, el riesgo de erosión puede ser analizado en el lugar. Los



resultados revelaron que 3.53 % de la caldera tiene erosión muy baja, 12.87 % tiene baja, 64.06 % moderada, 0.06 % alta y 19.49 % del área presenta un muy alto riesgo de erosión. De 2007 a 2017 ocurrieron 22 desastres relacionados con el flujo de escombros causados por la erosión en cárcavas en los depósitos de sedimento. El impacto de los desastres incluye daño en los caminos, destrucción de la tierra agrícola y cargas de sedimento hacia la presa.

El alto riesgo de erosión en cárcavas presente en los depósitos de sedimento sugiere la necesidad de un sistema de prevención de desastres en la caldera del *Mt. Bawakaraeng*.

### **Conflicto de intereses**

Los autores declaran no tener conflicto de intereses.

### **Contribución por autor**

Hasnawir: concepción, diseño y realización de los experimentos, redacción del manuscrito; Laura Sánchez Castillo e Israel Cantú Silva: concepción y diseño de los experimentos, contribución en la redacción del manuscrito.

### **Referencias**

- Abdulfatai, I. A., I. A. Okunlola, Q. G. Akande, L. O. Mohoh and K. O. Ibrahim. 2014. Review of gully erosion in Nigeria: causes, impacts and possible solutions. *Journal of Geomatics and Geosciences* 2:125-129. doi: 10.12691/jgg-2-3-8.
- Aditian, A. and T. Kubota. 2014. Influence of long-term increasing trend of maximum hourly rainfall on slope stability in forested area of Aso, Japan. *Interpraevent*. Nara, Japan. 477 p.
- Das, B. M. 1997. *Soil mechanics laboratory manual*. Engineering Press. Austin, TX USA. pp. 5-23.

- Dotterweich, M. 2008. The history of soil erosion and fluvial deposits in small catchments of central Europe: Deciphering the long-term interaction between humans and the environment. A review. *Geomorphology* 101:192-208. doi: 10.1016/j.geomorph.2008.05.023.
- Duru, U. 2016. Integrated Approach of GIS and USLE for Erosion Risk Analysis in the Sapanca Lake Watershed. *International Journal Engineering Science* 5(8):37-47.
- Ghosh, S. and K. Bhattacharya. 2012. Multivariate erosion risk assessment of lateritic badlands of Birbhum (West Bengal, India): A case study. *Journal of Earth System Science* 121:1441-1454. doi: 10.1007/s12040-012-0243-1.
- Hasnawir, H. M. and T. Kubota. 2010. Estimation of landslide velocity and warning of sediment disaster due to intense rainfall. *International Journal of Ecology and Development* 15:1-13.
- Hasnawir, H. M. and T. Kubota. 2011. Landslide susceptibility evaluation by 3-D slope stability analysis. *International Journal of Ecology and Development* 19(1): 1-14.
- Huggett, R. J. 1997. *Environmental change: the evolving ecosphere*. John Wiley & Sons. Routledge, London, UK. 387 p.
- Ionita, I. 2006. Gully development in the Moldavian Plateau of Romania. *Catena* 68:133-140. doi: 10.1016/j.catena.2006.04.008.
- Ionita, I., M. A. Fullen, W. Zgłobicki and J. Poesen. 2015. Gully erosion as a natural and human-induced hazard. *Natural Hazards* 79:S1 – S5. doi: 10.1007/s11069-015-1935-z.
- Lesschen, J. P., K. Kok, P. H. Verburg and L. H. Cammeraat. 2007. Identification of vulnerable areas for gully erosion under different scenarios of land abandonment in Southeast Spain. *Catena* 71:110-121. doi: 10.1016/j.catena.2006.05.014.
- Mararakanye, N. and P. D Sumner. 2017. Gully erosion: A comparison of contributing factors in two catchments in South Africa. *Geomorphology* 288:99-110. doi: 10.1016/j.geomorph.2017.03.029

- Paudel, P. P, H. Omura, T. Kubota and B. Devkota. 2008. Characterization of Terrain Surface and Mechanisms of Shallow Landsliding in Upper Kurokawa Watershed, Mt Aso, Western Japan. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment* 67(1):87-95.
- Sánchez-Castillo, L., T. Kubota, I. Cantú S., T. Moriyama and H. M. Hasnawir. 2017a. A probability method of rainfall warning for sediment-related disaster in developing countries: a case study in Sierra Madre Oriental, Mexico. *Natural Hazards* 85(3):1893–1906. doi: 10.1007/s11069-016-2669-2.
- Sánchez-Castillo, L., T. Kubota, I. Cantú-Silva and H. M. Hasnawir. 2017b. Influence of root reinforcement of forest species on the slope stability of Sierra Madre Oriental, Mexico. *Journal of the Faculty of Agriculture* 62(1): 177-181.
- Su, Z., D. Xiong, Y. Dong, D. Yang, S. Zhang, B. Zhang, X. Zheng, J. Zhang and L. Shi. 2015. Influence of bare soil and cultivated land use types upstream of a bank gully on soil erosion rates and energy consumption for different gully erosion zones in the dry-hot valley region, Southwest China. *Natural Hazards* 79:183–202. doi: 10.1007/s11069-015-1722-x.
- Wischmeier, W. H. 1976. Use and misuse of the universal soil loss equation. *Journal of Soil and Water Conservation* 31(1): 5-9.
- Zabihi, M., F. Mircholi, A. Motevalli, A. Khaledi-Darvishan, H. R. Pourghasemi and M. A. Zakeri, F. Sadighi. 2018. Spatial modelling of gully erosion in Mazandaran Province, northern Iran. *Catena* 161:1–13. doi: 10.1016/j.catena.2017.10.010.
- Zakerinejad, R. and M. Maerker. 2015. An integrated assessment of soil erosion dynamics with special emphasis on gully erosion in the Mazayjan basin, southwestern Iran. *Natural Hazards* 79:25–50. doi: 10.1007/s11069-015-1700-3.
- Zgłobicki, W., R. Kołodyńska-Gawrysiak, L. Gawrysiak. 2014. Gully erosion as a natural hazard: the educational role of geotourism. *Natural Hazards* 79:159–181. doi: 10.1007/s11069-014-1505-9.