



Experimentación reducida-controlada in situ del deslizamiento de suelo por efecto de flujo subsuperficial de agua

Reduced in situ experimentation of the soil slip by effect of subsurface water flow

Teófilo-Salvador Eduardo

Universidad Autónoma del Estado de México
Instituto Interamericano de Tecnología y Ciencias del Agua
Laboratorio de Modelo Hidráulicos
Correo: mca.ts.eduardo2015@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0001-8794-2938>

Morales-Reyes Guillermo Pedro

Universidad Autónoma del Estado de México
Instituto Interamericano de Tecnología y Ciencias del Agua
Laboratorio de Modelo Hidráulicos
Correo: gpmoralesr@uaemex.mx
<https://orcid.org/0000-0001-6022-6747>

Muciño-Castañeda René

Universidad Autónoma del Estado de México
Facultad de Ingeniería
Laboratorio de Materiales
Correo: renemucino@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0001-8060-9622>

Esteller-Alberich María Vicenta

Universidad Autónoma del Estado de México
Instituto Interamericano de Tecnología y Ciencias del Agua
Hidrología Ambiental
Correo: mvestellera@uaemex.mx
<http://orcid.org/0000-0002-5832-8741>

Resumen

Los desastres naturales, tal como los deslizamientos de suelo generan altos costos por daños a infraestructura civil, pérdidas humanas y alteración del entorno. El objetivo de esta investigación fue experimentar en campo el deslizamiento de una masa de suelo afectado por la presencia de flujo subsuperficial de agua. En Mayorazgo de León (Almoloya de Juárez), se muestreó suelo de la zona radicular y del límite superior de la zona no saturada (LSZNS) para su caracterización. Se diseñaron 16 escenarios combinando cobertura vegetal, enraizamiento, macroporos, densidad del suelo y grado de inclinación, en ellos se reprodujeron intensidades de precipitación aplicando el infiltrómetro de cilindros concéntricos rediseñado multifuncional. Con lo anterior, se obtuvo que la zona radicular fue más permeable que la capa subyacente, por lo que el LSZNS se definió como un plano de falla, sobre el cual se movilizó el flujo subsuperficial de agua. De un estado sobresaturado se presentó un proceso de escurrimiento-infiltración, con ello erosión hídrica, y la subsecuente aparición de grietas, ausencia de escurrimiento y el deslizamiento de suelo con la progresiva liberación del agua. Superada la capacidad máxima de infiltración de agua en el suelo, fue importante la interacción de la frecuencia de la duración de cierta intensidad de precipitación con su distribución en el suelo (vertical, lateral y superficial), además, la densidad del material permitió avanzar y mantener el flujo de agua a cierta profundidad.

Descriptores: Desastres naturales, infiltrómetro, sobresaturación, zona radicular, precipitación, densidad.

Abstract

Natural disasters, such as the landslides generate high costs by damages to civil infrastructure, human losses and alteration of the environment. The objective of this investigation was to experiment in the field the sliding of a land mass affected by the presence of subsurface water flow. In Mayorazgo of Leon (Almoloya of Juarez), soil of the root zone and of the upper limit of the unsaturated zone (LSZNS) were sampled for characterization. 16 scenarios were designed combining plant cover, rooting, macropores, soil density and degree of inclination, in them precipitation intensities were reproduced applying the multifunctional redesigned concentric cylinder infiltrometer. With the above, it was obtained that, the root zone was more permeable than the underlying layer, so the LSZNS was defined as a fault plane, on which the subsurface water flow was mobilized. From an oversaturated condition a runoff-infiltration process was presented, with water erosion, and the subsequent appearance of cracks, absence of runoff and soil slip with the progressive release of water. Exceeded the maximum capacity of infiltration of water into the soil, it was important the interaction of the frequency of duration of a certain precipitation intensity with its distribution on the ground (vertical, lateral and superficial), also, the density of the material allowed to advance and/or maintain the flow of water to a certain depth.

Keywords: Natural disasters, infiltrometer, oversaturation, root zone, rainfall, density.

INTRODUCCIÓN

Los deslizamientos de suelo han generado cambios ambientales, desplazados, damnificados, muertos y daños a infraestructura civil, con pérdidas económicas incalculables (González *et al.*, 2002; Velázquez *et al.*, 2002). Uno de los deslizamientos más frecuentes es el superficial, el cual puede ocurrir debido a la degradación ambiental, la deforestación o expansión de las actividades agropecuarias (Rosete *et al.*, 2009), es decir, en áreas con escasa o nula vegetación convirtiéndolas en zonas más vulnerables a deslizarse (Alcántara *et al.*, 2006). Estos tipos de deslizamientos se presentan en taludes naturales de 18° a 45° y con espesores de 0.6 m (Crosta, 1998), aunque pueden alcanzar profundidades cercanas a 1 m (Dietrich *et al.*, 2007), además se desarrollan en suelos coluviales, de regolito o poco consolidados, arenas lodosas, limo-arenosas, areno-limosos, areniscas, lutitas y rellenos artificiales, si están en contacto excesivo con agua tienden a deslizarse (Jiang *et al.*, 2016; López *et al.*, 2010a; López *et al.*, 2010b; Jaime *et al.*, 2010; Garnica *et al.*, 2010; Panlagua y Elvira, 2010), es decir, las lluvias intensas o torrenciales tienen gran influencia (Jiang *et al.*, 2016; Ramos *et al.*, 2015; Pardeshi *et al.*, 2013; Chen y Tang, 2010; Jaime *et al.*, 2010; Moreno *et al.*, 2006; Montgomery *et al.*, 1998).

Con lo anterior, el proceso flujo de agua en la masa de suelo es un problema complejo, ya que involucra fuerzas y trayectorias de filtración, con resistencia al cortante en el suelo de régimen no saturado a saturado (Collins y Znidarcic, 2004). Además, la topografía genera cierta influencia, lo que conlleva una inferencia espacial transitoria antes y durante el mecanismo (Montrasio *et al.*, 2011). De acuerdo con lo anterior, Jackisch *et al.* (2016) generaron trayectorias de flujo subsuperficial de agua con intensidades irrigadas de 50 mmh⁻¹ y 30 mmh⁻¹. Garel *et al.* (2012) experimentaron en una superficie de 7 m por 14 m de material regolito, con inclinación de 50%, para lo cual utilizaron seis aspersores artificiales, simulando una intensidad de precipitación de 10 mmh⁻¹ durante 66.4 horas con una pausa de 8.4 horas, y encontraron un estado pseudoestacionario después de 25 a 35 horas. En una superficie aproximada de 0.9 m x 0.9 m con 0.6 m de profundidad, Kobayashi y Shimizu (2007) incluyeron un simulador de lluvia con una tasa de 20 mmh⁻¹ hasta alcanzar un contenido de humedad moderado, posteriormente excavaron para identificar el patrón de flujo en el suelo. Sassa *et al.* (2005) simuló deslizamientos de suelo en laboratorio en una superficie de 23 m de largo por 7.8 m de alto y 3 m de ancho con 1.6 m de espesor de arena fina de río, utilizaron un simulador de lluvia con intensidad de 100 mmh⁻¹, pos-

teriormente en campo reprodujeron el experimento con arena granular y limo, con 30 m de longitud, 35° de inclinación y profundidad de 1 m a 3 m, para lo cual delimitaron el área de prueba con láminas de acero a 1 m de profundidad, finalmente simuló una lluvia de 78 mmh⁻¹ por 4.5 horas, y una segunda aplicación de igual intensidad al tercer día, en la cual la falla se presentó a las 4.83 horas. En laboratorio, Towhata *et al.* (2005) aplicó una lluvia artificial en un talud de arena manteniéndolo saturado y evitando el escurrimiento superficial en un tiempo de 1.1 horas, encontrando un desplazamiento de abajo hacia arriba.

Sin embargo, en los casos anteriores el principal problema de simulación es la escala de aplicación, pero Sassa *et al.* (2005) indican que las pruebas con modelos a gran escala o pruebas de campo en taludes naturales es lo más deseable y realista para la reproducción del fenómeno de deslizamientos de suelo, ya que consideran condiciones del lugar (físicas y biológicas entre otras).

Considerando lo anterior, el objetivo de la investigación fue experimentar el proceso del deslizamiento superficial de suelo, provocando la presencia de flujo subsuperficial de agua en una masa de suelo en diferentes escenarios de campo a escala reducida-controlada. De esta forma, fue posible identificar los factores que tienen mayor influencia en el deslizamiento de suelo, y cómo estos pueden retardar o reducir los puntuales y eventuales movimientos de material por presencia de flujo de agua.

MATERIALES Y MÉTODOS

SITIO DE ESTUDIO

Se realizó una revisión bibliográfica de deslizamientos en México y en el mundo, para determinar las condiciones necesarias que han generado inestabilidades de suelos. De esta forma, en Almoloya de Juárez (Estado de México) de una zona con seis posibles áreas de trabajo, se eligió una superficie de 4000 m² para la experimentación, cuyas coordenadas son 19° 28' 07.5" N y 99° 44' 22.2" O (Figura 1), en esta se identificaron la mayoría de las características necesarias para reproducir deslizamientos de suelo, tales como presencia de cortes estratigráficos, cambios topográficos, dinámica evolutiva de la cobertura vegetal y microfauna, heterogeneidad de suelos superficiales y subsuperficiales, inestabilidades (derrumbes, deslizamientos y erosiones).

MUESTREO Y CARACTERIZACIÓN DE SUELO

El número y espaciado de muestras de suelo se fijó de tal manera que fueran representativas para la zona radicular y el LSZNS, para lo cual se siguió el criterio de muestreo aleatorio estratificado (Walpole *et al.*, 2012), en el cual se dividió el área total (considerada heterogénea) en subáreas, considerando que fueran lo más homogéneas posibles, según las características observadas en campo. Para la extracción de las muestras de suelo se utilizó un barrenador telescópico AMS-78333 de diámetro 0.082 m, y en cada perforación se midió la profundidad y vertió una cantidad de agua para cuantificar el volumen, con esto se determinó el peso volumétrico (Coras, 1989). En laboratorio se pesaron las muestras (Figura 2a), unas se secaron en horno eléctrico a 110 °C

(Figura 2b), y otras a la intemperie para evitar desintegrar la materia orgánica. De lo anterior, se obtuvo el contenido de humedad, densidad, porosidad y lámina de agua equivalente. Se fraccionaron de 600 a 1000 gr para tamizar (Figura 2c), se pesaron los porcentajes de los tamaños de grano (Figura 2d) y se determinó la clase textural (USDA, 2004).

DISEÑO DE ESCENARIOS

Los escenarios se acondicionaron de 2 a 5 días previos a la reproducción de la precipitación. En campo se identificaron cortes transversales del perfil del suelo para reconocimiento del flujo a través del medio poroso. Se delimitaron superficies de 1.0 m², con profundidad variable desde cero hasta un cambio de estrato con una



Figura 1. Ubicación del sitio de aplicación experimental, Puente San Bernabé en Almoloya de Juárez, Estado de México



Figura 2. Actividades de laboratorio: a) pesado, b) secado, c) tamizado y d) separación de tamaños

mayor resistencia a la penetración, la cual se midió con el penetrómetro universal. Se buscó que la superficie del suelo y del LSZNS, fuera desde sensiblemente plano hasta 60 ° de inclinación, y que estas dos capas fueran paralelas. Inicialmente se hincaron láminas galvanizadas para delimitar el flujo circundante o para asumir que la zona externa al área de prueba también se encontraba saturada.

INTERVALOS DE PRECIPITACIÓN

Se buscaron valores de precipitación asociados a deslizamientos, como los reportados con lluvias de 2 a 4 días (Trancoso *et al.*, 2013; Jaime *et al.*, 2010; Corominas *et al.*, 2002; Crosta, 1998), con acumulación de 300 mm a 844 mm (Alcántara *et al.*, 2006) o de 5 días para 1073 mm (Garnica *et al.*, 2010) u horarias de 384 mm en 4 horas (Ho, 2013). O bien, la presencia de lluvias de 70 mmh⁻¹ para 2 h, 50 mmh⁻¹ para 4 h, 40 mmh⁻¹ para 6 h y 25 mmh⁻¹ para 12 h (Wieczorek y Guzzetti, 1999). También intensidades entre 11 y 47 mmh⁻¹ con un máximo cercano a 170 mm en 7 h, o de 28 a 40 mmh⁻¹ y de 30 a 65 mmh⁻¹, además precipitaciones previas de 50 mm antes de una de 130 mm y 28 mm antes de 195 mm (Crosta, 1998). Intensidades medias de 50 mmh⁻¹ (Faris y Fawu, 2014) y altas hasta de 70 mmh⁻¹ en combinación con otro factor involucrado. Así como intensidades extremas de 213 mmh⁻¹ (González *et al.*, 2002) o de 300 mmh⁻¹ para provocar deslizamientos locales en forma natural (López *et al.*, 2010a). Considerando que la acumulación, intensidad y duración de la lluvia son parámetros utilizados para estudios de deslizamientos de suelo (Par-

deshi *et al.*, 2013), se tomó en cuenta una combinación de estos más el efecto de la distribución del agua en el medio poroso.

EXPERIMENTACIÓN DEL PROCESO

Para reproducir el proceso de precipitación se utilizó el infiltrómetro de cilindros concéntricos rediseñado multifuncional (ICCRM), el cual permite reproducir una precipitación en función de la intensidad, duración, frecuencias y distribución del agua en el suelo y con ello es posible determinar:

- i) La tasa de infiltración vertical con el cilindro interior.
- ii) La tasa de infiltración lateral entre el cilindro exterior e interior.
- iii) La tasa del flujo superficial fuera del cilindro exterior (Figura 3).

Lo que muestra una gran ventaja sobre el diseño y metodología tradicional (Teófilo y Morales, 2018). Por lo anterior, la intensidad de la lluvia se reprodujo mediante la aplicación de un gasto en una superficie (Lm⁻² equivalente a m³m⁻² = m), para obtener una lámina de precipitación (h_p), la cual en el tiempo de prueba fue igual a la intensidad de la lluvia (mmh⁻¹). Se revisó que la suma vertiente de agua vertical, lateral y superficial fuera igual a la lámina de precipitación deseada para el área total de prueba.

Para evaluar el proceso e identificar las componentes del flujo antes, durante y después del deslizamiento de suelo se consideró utilizar trazadores, como bromu-

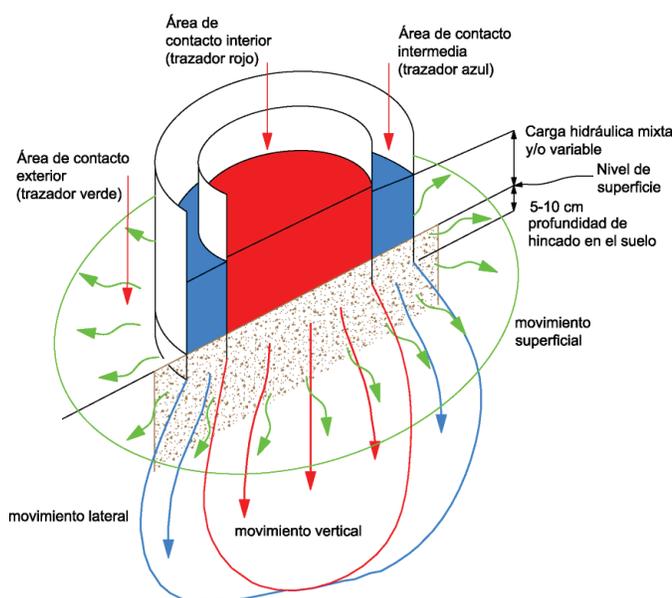


Figura 3. Diagrama del infiltrómetro de cilindros concéntricos rediseñado multifuncional (elaboración propia)

ro de potasio y cloruro de potasio (Garel *et al.*, 2012), tinta azul y sal de bromuro (Jackisch *et al.*, 2016), o azul brillante (Kobayashi y Shimizu, 2007). Se optó por utilizar trazadores alimenticios, azul o negro para el área intermedia, rojo para la interior y verde para la exterior (Figura 3) a razón de 3 gL⁻¹ para un volumen de 200L.

Las experimentaciones se realizaron combinando los principales factores asociados (Tabla 1): grado de inclinación, con y sin presencia de raíz de la vegetación y macroporos, ya que eventualmente estos factores minimizan el riesgo de los deslizamientos superficiales (Switala y Wu, 2015). Dentro del sitio se ubicaron puntos con baja resistencia a la penetración como un indicativo del nivel de compactación del suelo (CIMMYT, 2013), la cual se asoció a una reducida densidad natural que representaría el caso más favorable para producir un deslizamiento de suelo.

Adicionalmente, se construyó una retícula con ejes de 5 cm por 5 cm, para visualizar en detalle los cambios de movimiento del suelo a partir de una referencia física. También se construyó una sección semicircular de tubo de PVC de 10 cm de diámetro con un flujómetro para encauzar el escurrimiento.

MEDICIÓN DE LA INFILTRACIÓN IN SITU

Debido a que las tasas de infiltración vertical y lateral siguen un patrón de comportamiento diferente para diferentes tipos de suelo (Teófilo, 2015; 2010), se revisaron las intensidades de precipitación reproducidas y los descensos del agua dentro de los cilindros. Cuando los

valores se mantuvieron constantes o cercanos a cero, se realizó una distribución en el tiempo de la forma:

$$h_{i+1} = h_i + \left(\frac{h_j - h_i}{t_j - t_i} \right) * \Delta t_{i+1} \tag{1}$$

Así, se determinó la lámina infiltrada (h_i) para cada lapso de tiempo (Δt), h_{i+1} lámina de agua en el tiempo t_{i+1} , h_j lámina de agua registrada en el tiempo t_j y Δt_{i+1} el incremento de tiempo. Posteriormente, se aplicó el ajuste del modelo de Kostiaikov, ya que se ajusta muy bien a datos experimentales de campo (Becerril, 2010), para estimar la tasa de infiltración f mediante:

$$f = \alpha t^\beta \tag{2}$$

Para $t \neq 0$, $\alpha > 0$ y $-1 < \beta < 0$. La infiltración acumulada F se obtuvo con

$$F = \frac{\alpha}{(\beta + 1)} t^{\beta+1} \tag{3}$$

Aplicando logaritmos para linealizarla, y determinar los parámetros α y β , quedó reducida en la ecuación de la recta

$$y = a + mx \tag{4}$$

Donde m es la pendiente, obtenida con:

Tabla 1. Características de los escenarios diseñados para el proceso de deslizamiento de suelo

| Escenario | Fecha | Grado de inclinación (°) | Vegetación | Enraizamiento | Macroporos | Resistencia a la penetración |
|-----------|------------|--------------------------|------------|---------------|------------|------------------------------|
| 1 | 27-04-2016 | 2 | | | | media |
| 2 | 16-05-2016 | 2 | | | | media |
| 3 | 21-06-2016 | 2 | | | | media |
| 4 | 7-07-2016 | 35 | | | | media |
| 5 | 14-07-2016 | 35 | | | | media |
| 6 | 14-09-2016 | 35 | | | | media |
| 7 | 6-12-2016 | 35 | | | | media |
| 8 | 16-12-2016 | 35 | | | | media |
| 9 | 18-01-2017 | 30 | — | | | baja |
| 10 | 19-01-2017 | 30 | — | | | baja |
| 11 | 20-01-2017 | 30 | — | | | baja |
| 12 | 24-01-2017 | 60 | — | | | baja |
| 13 | 15-02-2017 | 45 | — | — | | muy baja |
| 14 | 22-02-2017 | 30 | — | — | | muy baja |
| 15 | 10-03-2017 | 60 | — | — | | muy baja |
| 16 | 17-03-2017 | 60 | — | — | | muy baja |

$$m = \frac{\sum xy - \frac{(\sum x)(\sum y)}{n}}{\sum x^2 - \frac{(\sum x)^2}{n}} \quad (5)$$

Así, y es la ordenada, x la abscisa y a es la intercepción con el eje y, obtenida con

$$a = \left[\frac{\sum y}{n} - \left(m * \frac{\sum x}{n} \right) \right] \quad (6)$$

Donde n es número de eventos. Este procedimiento se aplicó para: a) el área del cilindro interior (0.0764 m²), b) área intermedia entre los dos cilindros (0.0867 m²) y c) el área de influencia para el flujo superficial fuera de los cilindros (0.1662 m² a 0.6361 m²).

RESULTADOS

MUESTREOS DE SUELO Y DISEÑO DE ESCENARIOS

El diseño de los escenarios se modificó conforme se avanzó en la investigación, inicialmente la vegetación fue escasa (abril del 2016), pero aumentó en la época de lluvias. Los primeros 0.15 m de profundidad presentaron una compleja y densa distribución radicular en todas las direcciones, con diámetros máximos de 6 mm. A mayor profundidad se apreciaron macroporos con desarrollo de microfauna, lo cual dio lugar a pequeñas tubificaciones.

Respecto a la caracterización de las muestras de suelo de la zona radicular (Tabla 2), la mayor densidad se obtuvo en el muestreo 2 con 1.40 gcm⁻³ para una superficie sensiblemente plana, y el valor más bajo para el muestreo 9 con 0.77 gcm⁻³ para 30° de inclinación. El contenido de humedad mínimo fue de 7.43% y el máximo de 20.68%. La porosidad mínima de 7.46% con una lámina de agua equivalente de 33.57 mm y la máxima lámina de agua equivalente fue de 102.19 mm y correspondió a las experimentaciones 4, 5 y 6 realizadas en época de lluvias.

Para el LSZNS (Tabla 3), la densidad fue 80% mayor comparada con la de la zona radicular (Tabla 2), reflejando menor permeabilidad y en consecuencia un plano de falla. El muestreo 4 registró el contenido de humedad máximo de 53.75% y de 34.96 mm de lámina de agua equivalente, (septiembre 2016). La clasificación textural, fue arenoso franco y franco arcillo arenoso para la zona radicular, y arena en el LSZNS, lo cual se reflejó en una alta porosidad comparada con la de la zona radicular, sin embargo, a pesar de una buena porosidad, no todos los poros están conectados unos con otros, lo que dificulta el tránsito de agua a capas más profundas, que es concordante con Pogosyan *et al.* (2016) quien ha analizado suelos con el uso de tomografía de rayos X.

Es importante mencionar que no se empleó el método de coeficiente de fricción mecánica asociado al factor de seguridad, ya que este genera un valor cuantitativo y el enfoque de la investigación requirió de parámetros cualitativos para la revisión del proceso del deslizamiento del suelo por flujo de agua.

Tabla 2. Parámetros edafológicos de las muestras de la zona radicular

| Muestreo | Experimento relacionado al muestreo | Grado de inclinación (°) | Densidad natural gcm ⁻³ | Contenido de humedad (%) | Porosidad (%) | Lámina de agua equivalente (mm) |
|----------|-------------------------------------|--------------------------|------------------------------------|--------------------------|---------------|---------------------------------|
| 1 | 1 | 2 | 1.37 | 7.83 | 9.96 | 37.85 |
| 2 | 2 | 2 | 1.40 | 7.43 | 9.70 | 33.96 |
| 3 | 3 | 2 | 1.31 | 17.30 | 19.30 | 73.32 |
| 4 | 4,5,6 | 35 | 0.96 | 18.79 | 15.25 | 102.19 |
| 5 | 7,8 | 35 | 0.92 | 18.22 | 14.24 | 78.34 |
| 6 | 9,10,11 | 30 | 0.92 | 11.78 | 9.69 | 48.44 |
| 7 | 12 | 60 | 0.99 | 20.68 | 17.03 | 61.31 |
| 8 | 13 | 45 | 0.83 | 9.92 | 7.46 | 33.57 |
| 9 | 14 | 30 | 0.77 | 18.00 | 11.69 | 49.09 |
| 10 | 15,16 | 60 | 0.88 | 11.00 | 9.00 | 46.80 |

Tabla 3. Caracterización de las muestras del límite superior de la zona no saturada

| Muestreo | Experimento relacionado al muestreo | Densidad natural gcm^{-3} | Contenido de humedad (%) | Porosidad (%) | Lámina de agua equivalente del muestreo LSZNS (mm) |
|----------|-------------------------------------|------------------------------------|--------------------------|---------------|--|
| 1 | 1 | 2.03 | 24.70 | 19.81 | 19.81 |
| 2 | 2 | 2.28 | 20.60 | 17.08 | 25.63 |
| 3 | 4,5,6 | 2.21 | 24.60 | 19.74 | 23.69 |
| 4 | 7,8 | 1.96 | 53.75 | 34.96 | 34.96 |
| 5 | 9,10,11 | 1.91 | 27.06 | 40.71 | 32.6 |
| 6 | 12,13,14 | 2.07 | 23.13 | 38.95 | 27.3 |
| 7 | 15,16 | 1.96 | 18.14 | 30.08 | 30.10 |

INTERVALOS DE PRECIPITACIÓN

En México existe poca información respecto al proceso lluvia-deslizamiento, por tal motivo no se encontró información que mostrara la relación entre las fluctuaciones de la precipitación en intensidad, frecuencia, duración y distribución en el proceso de deslizamiento de suelo. De esta manera, con los datos recabados se construyó la Figura 4, la cual muestra cómo fluctúan los rangos de lluvia. Con esta figura se fundamentaron los valores para reproducir el deslizamiento superficial de suelo, es decir, con base en el tiempo se agruparon intensidades extremas horarias, intensidades medias constantes e intensidades para diferentes lapsos de tiempo (2 h, 4 h, 6 h, 12 h, 24 h, 36 h, 48 h, 72 h, 96 h, 120 h), así como el acumulado de lluvia (1 h, 2 h, 4 h, 6 h, 7 h, 12 h, 24 h, 36 h, 48 h, 72 h, 96 h, 120 h), y precipitaciones de acumulación previa con una consecutiva acumulación superior de lluvia. Por lo que el nomograma de la Figura 4 muestra como altas intensidades de lluvia

son de corta duración y el acumulado es función del tiempo.

EXPERIMENTACIÓN IN SITU DEL DESLIZAMIENTO SUPERFICIAL DE SUELO

En la Tabla 4 se muestra la duración, intensidad de precipitación, con el espesor radicular de prueba, y los estados resultantes:

- i) Estado estacionario, masa de suelo estable con presencia de flujo de agua.
- ii) Transitorio, reacomodo de la masa de suelo en el eje vertical con presencia de flujo de agua.
- iii) Dinámico, deslizamiento de la masa de suelo de un punto a otro.

La duración mínima de experimentación fue de 0.86 h con una intensidad de 195 mmh^{-1} , la máxima fue de 4.41 h con una intensidad de 80 mmh^{-1} , ambos casos con

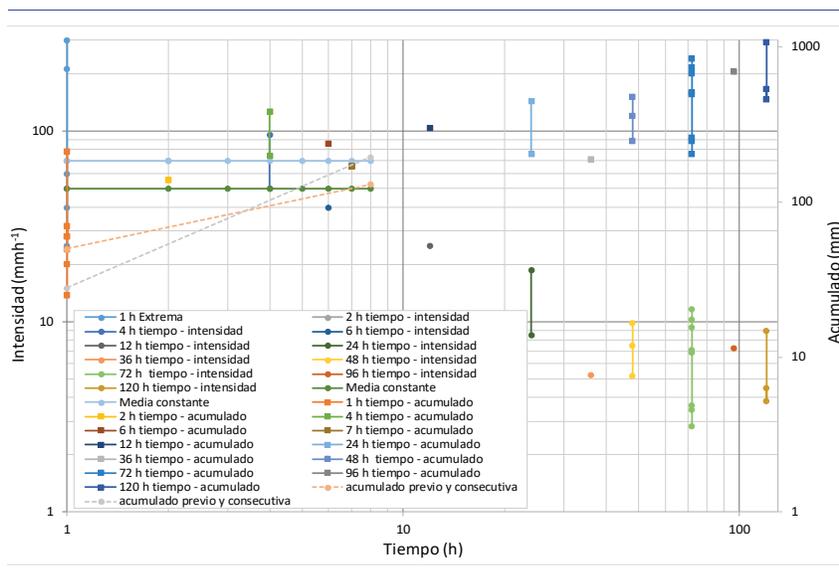


Figura 4. Fluctuaciones: intensidad-duración, intervalos de intensidad, precipitaciones acumuladas previas y consecutivas para generar inestabilidad del suelo (elaboración propia a partir de datos de Crosta, 1998; Wiczorek y Guzzetti, 1999; González et al., 2002; Alcántara et al., 2006; Garnica et al., 2010; López et al., 2010a; Ho, 2013 Faris y Fawu, 2014)

Tabla 4. Reproducción de intensidades de precipitación para el proceso de deslizamiento de suelo

| Experimento | Duración (h) | Intensidad promedio de lluvia (mmh-1) | Espesor radicular (m) | Estado resultante |
|-------------|--------------|---------------------------------------|-----------------------|-------------------|
| 1 | 3.2 | 22 | 0.38 | estacionario |
| 2 | 2.06 | 50 | 0.38 | estacionario |
| 3 | 1.9 | 63 | 0.38 | estacionario |
| 4 | 0.86 | 195 | 0.55 | estacionario |
| 5 | 4.41 | 80 | 0.55 | estacionario |
| 6 | 1.45 | 294 | 0.55 | estacionario |
| 7 | 1.86 | 160 | 0.55 | estacionario |
| 8 | 2.5 | 318 | 0.55 | estacionario |
| 9 | 3.78 | 91 | 0.50 | transitorio |
| 10 | 3.36 | 95 | 0.50 | transitorio |
| 11 | 2.1 | 95 | 0.50 | transitorio |
| 12 | 3.13 | 101 | 0.36 | transitorio |
| 13 | 1.06 | 384 | 0.45 | dinámico |
| 14 | 2.11 | 65 | 0.42 | dinámico |
| 15 | 2.5 | 151 | 0.52 | transitorio |
| 16 | 1.26 | 157 | 0.52 | dinámico |

35° de inclinación. La intensidad máxima fue de 384 mmh⁻¹ para una duración de 1.06 h con 45 ° de inclinación. En todos los experimentos el espesor radicular osciló de 0.36 m a 0.55 m, valores que se encontraron dentro del rango para generar un flujo de agua en los primeros 0.70 m de profundidad (Hardie *et al.*, 2013).

La cobertura vegetal minimizó el escurrimiento, por tal, se presentó mayor infiltración en el área exterior. El enraizamiento y la microfauna, favorecieron el desarrollo de macroporos, lo cual ocasionó la presencia de tubificaciones por donde eventualmente se liberó la presión del agua en el suelo. Estos factores principalmente fueron los que controlaron el deslizamiento superficial (experimentos 1 al 8).

En los experimentos sin cobertura vegetal, resistencia a la penetración de media a baja y 30 ° de inclinación (Tabla 1 y 4), se observó que los flujos vertical y lateral fueron mayores al superficial con intensidad de precipitación de 91 mmh⁻¹ para el experimento 9 y de 95 mmh⁻¹ para la 10 y 11, así, debido al proceso escurrimiento-infiltración el flujo subsuperficial lateral apareció primero en el corte del perfil del suelo antes de que predominara el escurrimiento superficial. Para el experimento 12 con 60 ° de inclinación y densidad de 0.99 gcm⁻³, el escurrimiento fue de 20% con intensidad de precipitación de 101 mmh⁻¹, lo cual generó arrastre de material fino sobre la superficie del talud (erosión hídrica), con ello la aparición de trayectorias de flujo superficial.

En los experimentos 13, 14 y 16 con la densidad más baja, sin enraizamiento, con macroporos y con 30 °, 45 ° y 60 ° de inclinación (Tabla 1 y 4), se identificó un escurrimiento-infiltración superficial (Figura 5a), paralela-

mente se presentó erosión hídrica (Figura 5b), y al aumentar el peso del suelo por la presencia de agua se generaron grietas transversales en la parte superficial (Figura 5c). Conforme aumentó el tiempo, se manifestaron grietas radiales de hasta 2 cm de abertura aguas debajo de la fuente de suministro (Figura 5d). Consecutivamente el escurrimiento superficial desapareció, lo que generó la movilización de la masa de suelo sobre el LSZNS (Figuras 5e y f).

La Tabla 5 muestra los rangos de lámina de agua equivalente que la masa de suelo retuvo antes de deslizarse. Los datos indican que a mayor duración de la prueba menor intensidad promedio de precipitación, y altas intensidades en periodos de corta duración, lo que genera mayor inestabilidad del suelo (Chen y Tang, 2010; Corominas *et al.*, 2002).

Con los datos de las Tablas 4 y 5, con 30 ° de inclinación y lámina de agua equivalente retenida de 90.39 mm comprueba que influyó más el efecto de la baja densidad del suelo. Al aumentar la densidad 14% más e inclinación de 60 ° la retención aumentó a 111.38 mm, reflejando mayor influencia del ángulo de inclinación.

COMPORTAMIENTO DE LA INFILTRACIÓN

El agua fuera de los cilindros (superficial) se infiltró sin restricción alguna, por lo que la intensidad de vertida sobre el suelo fue igual a la tasa de infiltración superficial, es decir, la infiltración superficial fue igual a lo que drenó la capa evaporante (los primeros 15 cm de suelo).

En la Figura 6 se agrupan 4 gráficos para poder comparar las variaciones de los valores de la tasa de infiltración, donde: con cobertura vegetal, enraizamiento,

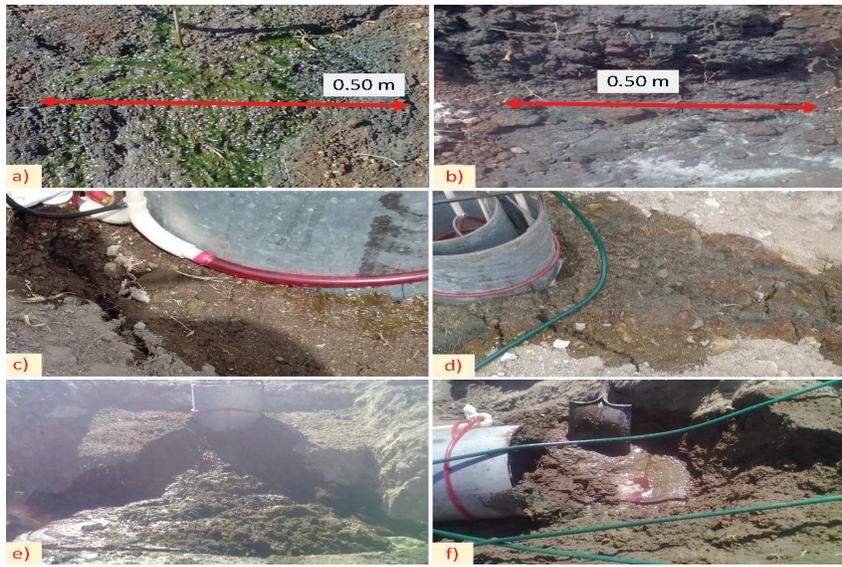


Figura 5. Proceso de deslizamiento superficial de suelo; a) escurrimiento-infiltración, b) erosión hídrica, c) grietas transversales por aumento de peso, d) grietas radiales y ausencia de escurrimiento, e) deslizamiento superficial y f) liberación del flujo sobre el LSZNS

Tabla 5. Láminas de agua equivalente que influyeron en la presencia de un deslizamiento superficial de suelo

| Experimento | Inclinación (°) | Lámina de agua equivalente de la zona radicular (mm) | | |
|-------------|-----------------|--|-----------|----------|
| | | Previa | Posterior | Retenida |
| 14 | 30 | 49.09 | 139.48 | 90.39 |
| 13 | 45 | 33.57 | 176.26 | 142.69 |
| 16 | 60 | 46.80 | 158.18 | 111.38 |

macroporos y densidad de 1.3 a 1.4 gm^{-3} , inclinación superficial de 2° e intensidades de precipitación de 22 a 63 mmh^{-1} , la tasa de infiltración máxima fue de 696 mmh^{-1} y la mínima de 87 mmh^{-1} (Figura 6a), así, la intensidad de precipitación no superó la tasa mínima de infiltración, por lo que no existió presión de agua suficiente en la masa de suelo para generar el deslizamiento. Con vegetación, raíces, macroporos, 35° grados de inclinación y densidad de 0.92 a 0.96 gcm^{-3} e intensidades de precipitación de 80 mmh^{-1} a 318 mmh^{-1} la tasa de infiltración máxima fue de 4220 mmh^{-1} y la mínima de 35 mmh^{-1} (Figura 6b), tal que macroporos y tubificaciones permitieron drenar constantemente el agua vertida desde la superficie, lo cual ocasionó flujos preferenciales.

En escenarios sin cobertura vegetal, con macroporos, densidad de 0.92 gcm^{-3} a 0.99 gcm^{-3} con 30° y 60° de inclinación e intensidades de precipitación de 91 mmh^{-1} a 101 mmh^{-1} , la tasa de infiltración máxima fue de 5300 mmh^{-1} y la mínima fue de 0.07 mmh^{-1} (Figura 6c), por lo que inicialmente el agua fluyó a través de la masa de suelo, pero conforme aumentó la duración de la prueba se superó la capacidad mínima de infiltración, así el flujo vertical fue inmovilizado por el lateral. Posteriormente, el flujo superficial predominó, lo que generó arras-

tre de material fino sobre la superficie expuesta (Figura 5b).

Para escenarios con densidad de 0.77 gcm^{-3} a 0.88 gcm^{-3} , sin vegetación, pero con macroporos y de inclinación 30°, 45° y 60° e intensidades de precipitación de 65 mmh^{-1} a 384 mmh^{-1} , la tasa máxima fue de 7280 mmh^{-1} y se redujo hasta 6.9 mmh^{-1} (Figura 6d), por lo que se inmovilizó el flujo vertical y predominó el flujo lateral. Por lo tanto, cuando las intensidades de precipitación fueron mayores a la tasa de infiltración mínima se generó inestabilidad de la masa de suelo (Figura 5), de esta forma el conjunto de gráficos de la Figura 6 permite comparar fácilmente los parámetros involucrados en el proceso de experimentación del deslizamiento del suelo por flujo de agua.

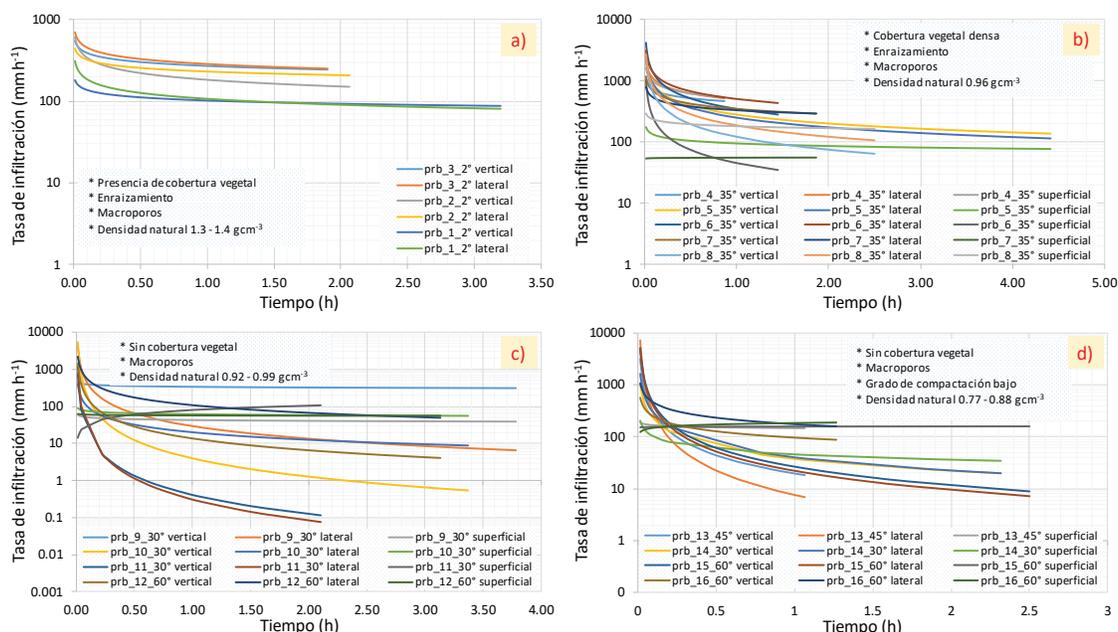


Figura 6. Tasa de infiltración de los experimentos (prb = experimento 1, 2, 3, ...) según diseño de escenarios del periodo abril 2016 - febrero 2017

CONCLUSIONES

La alternancia de frecuencia, duración e intensidad de lluvias influyen en el aumento o disminución del tránsito de agua hacia el límite superior de la zona no saturada, pero la distribución del flujo en el medio poroso con cierto grado de inclinación genera la presencia de flujo subsuperficial cuando la capa subyacente es más impermeable.

La aplicación del infiltómetro de cilindros concéntricos rediseñado multifuncional fue adecuada para reproducir intensidades de precipitación para experimentar el proceso de deslizamiento superficial de suelo a escala reducida-controlada.

Suelos de textura arenoso-franco y franco-arcillo-arenoso, sin cobertura vegetal, con aumento en el grado de inclinación y disminución de la densidad del suelo, además la presencia de agua provoca la inestabilidad del suelo al alcanzar un estado sobresaturado, generando escurrimiento-infiltración, erosión hídrica, asentamiento, grietas y deslizamientos.

Cuando predomina el flujo superficial se genera arrastre de material y distribución superficial del agua lo que ocasiona erosión hídrica. Conforme avanza el flujo vertical se asienta la masa de suelo en la posición vertical de referencia debido al aumento de peso. Al disminuir la tasa de infiltración vertical predomina el flujo lateral, lo que da origen a la aparición de grietas radiales aguas debajo de la fuente de suministro. De tal

forma que, el empuje del flujo lateral más la influencia del flujo superficial ocasionan el deslizamiento de la masa de suelo.

La cobertura vegetal aumenta el reforzamiento mecánico, el enraizamiento y macroporos sirven de guías para la liberación de la presión del agua que fluye dentro de la masa de suelo, así, estos controlan el proceso de deslizamiento superficial de suelo, pero la textura es determinante para la aparición de grietas, por la propiedad de fluencia-relajación del suelo y la incidencia de agua aumenta el grado de saturación y profundidad de avance, lo que incrementa el volumen de masa de suelo susceptible de deslizarse.

REFERENCIAS

Alcántara-Ayala, I., Esteban-Chávez, O., Parrot, J.F. (2006). Landsliding related to land-cover change: a diachronic analysis of hillslope instability distribution in the Sierra Norte, Puebla, México. *Catena*, 65(2), 152-165.

Becerril, S.F. (2010). *Ajuste de los modelos de velocidad de infiltración a pruebas de campo con cilindros concéntricos*. Tesis (licenciatura). Universidad Autónoma del Estado de México, Toluca, México, 150.

Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo (CIMMYT). (2013). *Resistencia a la penetración*. México, 12.

Chen, Q., y Tang, M. (2010). *Probabilistic analysis of slope stability of earth dams during rainfall infiltration*. *Advances in Analysis, Modeling & Design*. E.U.: ASCE, 10.

- Collins, B.D. y Znidarcic, D. (2004). Stability analyses of rainfall induced landslides. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 130(4), 362-372.
- Coras, M.P.M. (1989). *Propiedades físicas del suelo relacionadas con el riego*. Departamento de Fitotecnia. México: Universidad Autónoma de Chapingo.
- Corominas, J., Moya, J., Hürlimann, M. (2002). Landslide rainfall triggers in the Spanish Eastern Pyrenees. En Proceedings of the 4th EGS Plinius Conference held at Mallorca, España, Mediterranean Storms, 1-4.
- Crosta, G. (1998). Regionalization of rainfall thresholds: an aid to landslide hazard evaluation. *Environmental Geology*, 35(2-3), 131-145.
- Dietrich, W.E., McKean, J., Bellugi, D., Perron, T. (2007). The prediction of shallow landslide location and size using a multidimensional landslide analysis in a digital terrain model. En Chen C.L. y Major J.J. (Eds), Proceedings of the Fourth International Conference on Debris-Flow Hazards Mitigation, China, 1-12.
- Faris, F. y Fawu, W. (2014). Investigation of the initiation mechanism of an earthquake-induced landslide during rainfall: a case study of the Tandikat landslide, west Sumatra, Indonesia. *Geoenvironmental Disasters*, 1-18.
- Garel, E., Marc, V., Ruy, S., Cognard-Plancq, A.L., Klotz, S., Emblanch, C., Simler, R. (2012). Large scale rainfall simulation to investigate infiltration processes in a small landslide under dry initial conditions: the draix hillslope experiment. *Hydrological Processes*, 26(14), 2171-2186. <https://doi.org/10.1002/hyp.9273>
- Garnica, P., Rojas, E., Mora, R. (2010). Deslizamiento en San Juan del Grijalva, Chiapas. XVI Reunión Nacional de Profesores de Mecánica de Suelos e Ingeniería Geotécnica, 75-79. Guerrero, México.
- González, V.L.I., Ferrer, M., Ortuño, L., Oteo, C. (2002). *Ingeniería geológica*. Madrid, España: Person Prentice Hall.
- Hardie, M., Lisson, S., Doyle, R., Cotching, W. (2013). Determining the frequency, depth and velocity of preferential flow by high frequency soil moisture monitoring. *Journal of Contaminant Hydrology*, 144(1), 66-77. <https://doi.org/10.1016/j.jconhyd.2012.10.008>
- Ho, K.K.S. (2013). Managing the uncertainties of natural terrain landslides and extreme rainfall in Hong Kong. En Margottini C.C., Canuti P. y Sassa K. (Eds), *Landslide Science and Practice*, Roma, Italia, 285-302.
- Jackisch, C., Angermann, L., Allroggen, N., Sprenger, M., Blume, T., Weiler, M., Tronicke, J., Zehe, E. (2016). In situ investigation of rapid subsurface flow: identification of relevant spatial structures beyond heterogeneity. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 1-31. <https://doi.org/10.5194/hess-2016-190>
- Jaime, P.A., Coliente, T.A., Medrano-Rivera, V.H. (2010). Estabilidad de laderas y taludes. En XXV Reunión Nacional de Mecánica de Suelos e Ingeniería Geotécnica, 3, 911-920.
- Jiang, Y., Liao, M., Zhou, Z., Shi, X., Zhang, Lu y Balz, T. (2016). Landslide deformation analysis by coupling deformation time series from SAR data with hydrological factors through data assimilation. *Remote Sensing*, 8, 179, 1-22. <https://doi.org/10.3390/rs8030179>
- Kobayashi, M. y Shimizu, T. (2007). Soil water repellency in a Japanese cypress plantation restricts increases in soil water storage during rainfall events. *Hydrol. Process*, 21, 2356-2364. <https://doi.org/10.1002/hyp.6754>
- López, V.O., Cosme, C.J., Santoyo, V.E. (2010a). Rehabilitación y reforzamiento de un corte en la autopista Cuernavaca-Acapulco. En XXV Reunión Nacional de Mecánica de Suelos e Ingeniería Geotécnica, 1269-1273.
- López, V.O., Sosa, C.F., Santoyo, V.E. (2010b). Aplicación del Flicómetro en el análisis de la estabilidad de taludes. En XXV Reunión Nacional de Mecánica de Suelos e Ingeniería Geotécnica. Guerrero, 1261-1268.
- Montgomery, D.R., Sullivan, K., Greenberg, H.M. (1998). Regional test of model for shallow landsliding. *Hydrological Processes*, 12, 943-955.
- Montrasio, L., Valentino, R., Losi, G.L. (2011). Towards a real-time susceptibility assessment of rainfall-induced shallow landslides on a regional scale. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 11, 1927-1947. <https://doi.org/10.5194/nhess-11-1927-2011>
- Moreno, H.A., Vélez, M.V., Montoya, J.D., Rhenals, R.L. (2006). La lluvia y los deslizamientos de tierra en Antioquia: análisis de su ocurrencia en las escalas interanual, intraanual y diaria. *Revista EIA*, 5, 59-69. ISSN 1794-1237
- Panlagua, W. y Elvira, A. (2010). Deslizamiento de un talud en el poniente de la ciudad de México. En XVI Reunión Nacional de Profesores de Mecánica de Suelos e Ingeniería Geotécnica, 85-91.
- Pardeshi, S., Autade, S.E., Pardeshi, S.S. (2013). Landslide hazard assessment: recent trends and techniques. *Springer Plus*, 2(1), 1-11. <https://doi.org/10.1186/2193-1801-2-523>
- Pogosyan, L., Diaz, J., Gastelum, A., Prado, B., Ambrosimov, K., Romanenko, K. (2016). *Morphological characterization and quantification of the pore space in a sequence of tepetates in Tlaxcala*. (Tesis). México. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.22388.96648>
- Ramos-Bernal, R.N., Vázquez-Jiménez, R., Romero-Calcerrada, R., Novillo, C.J., Arrogante-Funes, P., Sánchez, T.S. (2015). Identificación de deslizamientos de laderas aplicando técnicas de detección de cambios a imágenes Landsat en la zona costera del Estado de Guerrero, México. En De la Riva J., Ibarra P., Montorio R. y Rodríguez M. (Eds), *Análisis espacial y representación geográfica: innovación y aplicación*, 827-834. ISBN: 978-84-92522-95-8
- Rosete, V.F.A., Pérez, D.J.L., Bocco, G. (2009). Contribución al análisis del cambio de uso del suelo y vegetación (1978-2000) en la península de Baja California, México. *Investigación Ambiental*, 1(1), 70-82.
- Sassa, K., Fukuoka, H., Ochiai, H., Wang, F., Wang, G. (2005). Aerial prediction of earthquake and rain induced rapid and

- long-traveling flow phenomena (APERITIF) (M101). En Sassa K., Fukuoka H., Wang F. y Gonghui G. (Eds), *Landslides Risk Analysis and Sustainable Disaster Management*, Berlin, Alemania, 99-108. ISBN-10 3-540-28664-0, ISBN-13 978-3-540-28664-6
- Switala, B.M. y Wu, W. (2015). Numerical simulations of the mechanical contribution of the plant roots to slope stability. *Recent Advances in Modeling Landslides and Debris Flows*, 265-274. https://doi.org/10.1007/978-3-319-11053-0_22
- Teófilo, S.E. (2015). *Propuesta metodológica para la estimación de la infiltración eficaz con uso del infiltrómetro de cilindros concéntricos rediseñado*. Tesis (maestría en ciencias). Universidad Autónoma del Estado de México, Toluca, México, 142.
- Teófilo, S.E. (2010). *Aplicación del infiltrómetro de cilindros concéntricos en la determinación aproximada de la velocidad de infiltración lateral*. Tesis (licenciatura). Universidad Autónoma del Estado de México, Toluca, México, 121.
- Teófilo, S.E. y Morales, R.G.P. (2018). Propuesta del modelo físico del infiltrómetro de cilindros concéntricos rediseñado multifuncional (ICCRM). *Tecnología y Ciencias del Agua*, 9(5), 103-131. <https://doi.org/10.24850/j-tyca-2018-06-05>
- Towhata, I., Uchimura, T., Gallage, C. (2005). On early detection and warning against rainfall-induced landslides (M129). En Sassa K., Fukuoka H., Wang F. y Gonghui G. (Eds), *Landslides Risk Analysis and Sustainable Disaster Management*, Berlin, Alemania, 132-139, Springer.
- Trancoso-G., R.A., Fontes, G.R., De Carvalho, J.O.A., Ferreira, F.N., Do-Amaral, J.E.V. (2013). Combining spatial models for shallow landslides and debris-flow prediction. *Remote Sensing*, 5, 2219-2237. <https://doi.org/10.3390/rs5052219>
- United States Department of Agriculture (USDA). (2004). Soil survey laboratory methods manual. Soil Survey Laboratory Investigations. Report, 42. United States of America, 735.
- Velázquez, A., Mas, J.F., Mayorga, S.R., Díaz, J.R., Alcántara, C., Castro, R., Fernández, T., Palacio, J.L., Bocco, G., Gómez, R.G., Luna, G.L., Trejo, I., López, G.J., Palma, M., Peralta, A., Prado M.J. y González M.F. (2002). Estado actual y dinámica de los recursos forestales de México. *Biodiversitas*, 41, 8-15.
- Walpole, R.E., Myers, R.H., Myers, S.L., Ye, K. (2012). *Probabilidad y estadística para ingeniería y ciencias*. México, 9th edición, 816.
- Wieczorek, G.F. y Guzzetti, F.A. (1999). Review of rainfall thresholds for triggering landslides. En: Proceedings of the EGS Plinius Conference held at Maratea, Italia, 1-9.