

# Estado del arte sobre el impacto de deslizamientos de suelo y roca en puentes

## *State of the art about of the impact of landslide on bridges*

Mario Alberto Canales Alvarado  
Universidad Autónoma de Chapingo  
Facultad de Estudios Superiores Aragón

José Antonio Salazar Garrido  
Facultad de Estudios Superiores Aragón

### Resumen

En esta investigación se revisan las principales causas y mecanismos de colapso de puentes ante deslizamientos, principalmente de rocas y suelos. En el primer apartado, se contextualizan los deslizamientos en México; en el segundo, se describen los deslizamientos sobre estructuras tipo barreras flexibles y rígidas; en el tercero, se revisan y discuten los modos de colapso de algunos puentes estudiados. Por último, se propone una metodología para estudiar el impacto de deslizamientos de tierra y suelo sobre la superestructura de un puente. La finalidad de este trabajo es proporcionar información para comprender el fenómeno de impacto del deslizamiento de desecho de rocas y suelo sobre los puentes, así como facilitar el hallazgo de soluciones en el diseño de puentes, en investigaciones futuras, y la proyección de medidas de protección para puentes ya construidos, cercanos a laderas de cerros.

### Abstract

*In this research the main causes and mechanisms of collapse of bridges due to landslides, mainly of rocks and soils, are reviewed. In the first section, the landslides in Mexico are contextualized; in the second, the landslides on flexible and rigid barrier structures are described; in the third, the collapse modes of some bridges studied are reviewed and discussed. Finally, a methodology is proposed to study the impact of landslides and soil on the superstructure of a bridge. The purpose of this work is to provide information to understand the impact phenomenon of rock and soil scrap over the bridges, as well as facilitate the finding of solutions in the design of bridges, in future research, and the projection of protective measures for bridges already built, near hillsides.*

### Palabras clave:

Estado del arte, puentes, deslizamiento de laderas, impacto en superestructuras.

### Keywords:

*State of art, bridges, landslide, impact on superstructures.*

Recibido: 10 de octubre 2019

Aceptado: 10 de enero 2020

<https://doi.org/10.22201/fesa.rdp.2020.1.02>

## Introducción

Actividades antrópicas a lo largo de caminos y autopistas impactan y modifican la topografía, temperatura, geomorfología y el relieve de los lugares donde se ubican, provocando alto riesgo de derrumbes y deslizamientos que, en combinación con lluvias y sismos, pueden generar cargas dinámicas extraordinarias sobre componentes estructurales de los puentes. Por ello, es indispensable estudiar datos geológicos, cartográficos y estadísticos, primero, para evaluar las áreas con riesgo, y segundo, para determinar el impacto que generarían los deslizamientos sobre las estructuras.

El deterioro de las características originales de las masas de tierra rara vez se toma en cuenta en los proyectos de puentes y en la prevención del movimiento de suelo por deslizamiento. Sin embargo, la estabilidad de las laderas depende de que no ocurran cambios intrínsecos y extrínsecos que modifiquen su forma natural. Un proceso de falla parte de un movimiento natural de suelos y rocas que se deslizan, hasta que éste se detiene por completo y se registran sus daños; el tipo de movimiento indica el riesgo que puede generar sobre carreteras y puentes. De modo que los movimientos de suelo y rocas con altas velocidades y altos volúmenes de desprendimiento incrementarán el riesgo de impacto sobre una estructura que se encuentre en una carretera.

Por lo anterior, es necesario estudiar la susceptibilidad de que ocurran eventos de deslizamientos en estructuras como puentes, que son indispensables para la comunicación y desarrollo del país. El objetivo de este trabajo es realizar un estado del arte de la susceptibilidad de deslizamientos de suelo y roca en el país y proponer metodologías para evaluar su impacto sobre los puentes.

## Metodología

Para la revisión bibliográfica del impacto de deslizamientos en puentes, se emplearon textos sobre el contexto geomorfológico de México, entre ellos la vulnerabilidad de fenómenos naturales, identificando las estructuras principales que pueden ser el foco de catástrofes, además de establecer la regionalización de eventos. Asimismo, en los textos científicos propuestos se buscará analizar matemáticamente el impacto de deslizamientos sobre estruc-

turas, con el fin de ofrecer al final algunas pautas de aplicación a puentes.

## 1. Contexto de deslizamientos en México

En México hay estructuras geomorfológicas que están en función de sistemas de fallas y fracturas en la incidencia de catástrofes. La distribución geográfica de dichas estructuras se encuentra bien estudiada por los focos tectónicos o sísmicos, así como por la condición hidrogeológica y climatológica. En la Figura 1, se ejemplifica la condición de las estructuras que se modifican con la construcción de puentes y coexisten como factores determinantes de su estabilidad.



**Figura 1.** Puente Morelos, ubicado en Santo Domingo Tonalá, Oaxaca. Fuente: Fotografía de J. A. Salazar G.

En este apartado, se presentará una revisión de los trabajos realizados sobre la geomorfología y los riesgos naturales por deslizamientos de rocas y suelo en México. Los estudios de deslizamientos incluyen el entendimiento del proceso, la evaluación del riesgo, la predicción de este tipo de fenómeno en el futuro, para gestionar y reducir los daños catastróficos y planificar la conservación y la estabilización de laderas.

- Parrilla (1996) estudió los procesos de ladera en la alta montaña y en áreas volcánicas y encontró que éstos inciden de manera especial en la estabilidad y evolución geomorfológica de las laderas. El lento crecimiento de la vegetación, prácticamente nulo, produce inestabilidad y efectos morfológicos de gran magnitud (movimientos en masa) en dichas áreas.
- Fraustro (1999) reconoció y caracterizó procesos geomorfológicos superficiales, como derrumbes, deslizamientos y expansión lateral del suelo, relacionados directamente con la sismicidad en la Ciudad de México.
- Flores (2002) identificó las principales unidades morfogénicas (composición de los materiales y su relación con el ángulo de reposo), que permitieron distinguir las zonas de mayor ocurrencia de procesos de remoción en la Sierra Norte de Puebla. Encontró que en los valles erosivos más importantes se concentra la mayor parte de los procesos de remoción en masa y concluyó que en las laderas hay una mayor inestabilidad, como consecuencia de una mayor erosión lateral. Además, sus resultados mostraron que los sitios de construcción de carreteras son factores desestabilizadores de los materiales que conforman las laderas.
- Herrera (2002) mostró la regionalización de deslizamientos en el país, siendo las regiones costeras de Jalisco, Guerrero, Oaxaca, Chiapas, y las montañosas de Hidalgo y Puebla, las que tienen potencial muy alto de deslizamientos.
- Suárez (2006) desarrolló un mapa de susceptibilidad a deslizamientos, a partir de una caracterización de niveles de susceptibilidad generados por datos geomorfológicos, estabilidad de taludes, lluvias y sismos en las laderas de la Sierra Madre Oriental.
- Cuanalo (2006) describió las características geomorfológicas del estado de Puebla, donde coexisten factores geomorfológicos y meteorológicos que provocan deslizamientos de laderas, otro agente es la actividad sísmica que prevalece en el lugar.
- Aceves (2014) identificó áreas susceptibles de deslizamientos y flujos de escombros y elaboró un inventario preliminar de éstos cerca del volcán Citlaltépetl (más conocido como Pico de Orizaba), en Veracruz. El estudio permitió determinar los riesgos geomorfológicos de tipo cualitativo, donde se indica el tipo de proceso que puede generar un peligro en específico, como es el caso de los procesos gravitacionales.
- Galindo y Alcántara (2015) analizaron la susceptibilidad a procesos de remoción de masa en las principales carreteras de la región de la Sierra Nororiental de Puebla. En su revisión, encontraron que las áreas de muy alta susceptibilidad corresponden a zonas con un relieve muy accidentado, debido a su naturaleza geológico-geomorfológica, pero no cuentan con registros o evidencias concretas, por lo que sugieren elaborar evaluaciones de campo para validar resultados.
- García (2017) desarrolló un procedimiento de evaluación de riesgos basado en mapas de susceptibilidad, para mejorar la calificación de las predicciones de amenazas por deslizamientos, en la porción media de la cuenca hidrográfica del río Necaxa, donde se localiza el Sistema Hidroeléctrico Necaxa, Puebla, México.
- Paz (2018) realizó un mapa de riesgos por procesos de remoción en masa de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, en el que empleó variables como geología, desnivel, densidad de drenaje, suelo y vegetación. Esta región está constituida por roca caliza-arenisca alterada, por lo que su ladera es inestable de origen con desprendimientos, lo que, aunado a lluvias y sismicidad, la convierte en una zona vulnerable a desastres naturales.

## 2. Vulnerabilidad de estructuras por deslizamientos

Dentro de la clasificación de movimiento de masas, establecido en Varnes (1978), se encuentran los deslizamientos de flujos de roca, tierra y residuos, y el riesgo depende de su velocidad, magnitud y trayectoria. Para definir tal riesgo, se debe modelar la interacción del deslizamiento en la estructura. La fase sólida y fluida del material influye en el movimiento y en la fuerza de impacto de un flujo de suelo (Cui y Zeng, 2015). En este análisis es fundamental la comprensión de la carga dinámica del flujo que impactará la estructura, por lo que es necesario el monitoreo de los flujos, no obstante, en dicho proceso hay factores

incontrolables que impiden comprender cómo ocurre el fenómeno (Cui, Choi y Liu, 2018).

Iverson (1997) presentó un estudio de la física de los flujos de suelos, e identificó algunos modelos y mediciones para entender las bases teóricas y el comportamiento de los modos de transporte en mezclas de material en fase sólida y líquida. Para analizar el impacto dinámico del flujo de suelos, se debe incluir la distribución y el tamaño de partículas, así como las características del movimiento (He, Liu y Li, 2016).

En otros estudios que intentan cuantificar los efectos del deslizamiento de tierra, el flujo de lodo-residuos y la caída de rocas, tales efectos se expresan como presiones de impacto sobre barreras; sin embargo, todos esos trabajos se centran en las barreras hechas y controladas en pruebas de laboratorio, que tratan de reproducir y simular el efecto real sobre las construcciones, u otras barreras, para detener el movimiento de las tierras.

Algunos de esos estudios se realizaron de forma experimental usando barreras rígidas, como lo refieren los siguientes trabajos: Teufelsbauer, Wang, Pudasaini, Borja y Wu (2011); Vagnon y Segalini (2016); Moriguchi, Borja, Yashima y Sawada (2009); Pudasaini, Hutter, Hsiau, Tai, Wang y Katzenbach (2007); Cui, Chow, Liu y Ng (2018); Ahmadipur, Qui (2017); Ahmadipur, Qiu, Sheikh (2019); también se han llevado a cabo estudios sobre barreras flexibles, aunque son menos: Wendeler, Volkwein, McArdell y Bartelt (2018); Tan, D. Y., Yin, J. H., Feng, W. Q., Zhu, Z. H., Qin, J. Q., & Chen, W. B. (2019); Ng, Song, Koo y Kwan (2016); Song, Zhou, Choi y Zheng (2019).

Hay muchos estudios sobre el impacto de la tierra en diferentes tipos de barreras, en la práctica, las rígidas y las flexibles, pero no todos se centran en su tipo, sino que también consideran otras características, como el movimiento o flujo de tierra. En general, la fuerza de impacto depende de la velocidad desarrollada por las partículas que forman el deslizamiento e impactan los obstáculos. En este contexto, la formulación acerca de la fuerza de impacto sobre las barreras es diferente, rígidas en general pero también flexibles, aun cuando hay coincidencia en las acciones de las energías potencial y cinética desarrolladas por el deslizamiento. El impacto se evalúa considerando dos partes: una estática y otra dinámica. La presión de la parte estática es dinámica al inicio, aunque en forma transitoria, ya que al final queda estática, sin embargo, la parte dinámica se vuelve estática cuando el movimiento de la tierra entra en reposo.

Las expresiones para barreras flexibles son menos, pero significativas. Es necesario considerar las diferencias entre el flujo viscoso y el friccional (Ng, Song, Choi *et al.* 2016; Song, Zhou, Choi y Zheng, 2019), asociadas a las características geotécnicas del flujo, donde se manifiesta el proceso de apilamiento en flujos de fricción que no presentan cohesión, sino características de fricción, y el mecanismo de deslizamiento en flujo viscoso, que exhibe cohesión sin ángulo de fricción. En la práctica, ambas condiciones están involucradas.

En los últimos estudios sobre barreras flexibles, se evidencia que la rigidez del cable es el parámetro principal que determina la magnitud de la fuerza de impacto. En este sentido, es claro que a medida que aumenta la rigidez del obstáculo, se incrementa la fuerza de impacto. Por esta razón, las barreras rígidas son más susceptibles al impacto del flujo de tierras. La formulación más común empleada para describir la fuerza de impacto sobre las barreras se basa en el enfoque hidrodinámico:

$$F = \alpha \rho v^2 h \quad (1)$$

donde

$\alpha$ : coeficiente de fricción dinámica

$\rho$ : densidad de flujo de residuos, kg/m<sup>3</sup>

$v$ : velocidad del flujo, m/s

$h$ : espesor del flujo, m

Como se ha notado, la fuerza de impacto depende del tipo de flujo; si se trata de un flujo viscoso o de fricción, o, en algún caso, se ha observado movimiento de rocas sobre barreras flexibles (Song, Zhou, Choi y Zheng, 2019), provocando una mayor fuerza de impacto, pero rara vez ocurre; en la práctica, el flujo viscoso es más peligroso.

En el mismo sentido, en el diseño de barreras de protección contra avalanchas (Johannesson, T., Gauer, P., Issler, P., Leid, K., 2009), las expresiones empleadas para obtener la presión de impacto se consideran en dos partes: flujo denso,  $p_{dn}$ , y capa fluidizada / transición, junto con una capa de polvo (Gruber y otros, 1999),  $p_{pn}$ , que se expresan, perpendiculares a la pared, como:

$$p_{dn} = \rho u^2 \sin^2 \phi \quad (2)$$

y

$$p_{pn} = f \rho u^2 \sin^2 \phi \quad (3)$$

donde

$u$ : velocidad del flujo, m/s

$\rho$ : densidad de la avalancha, kg/m<sup>3</sup>

$\phi$ : ángulo entre el flujo y el obstáculo, grados

$f$ : factor adimensional

En este caso la presión tangencial se estima con la expresión:

$$P_{dt} = \mu P_{dn} \quad (4)$$

donde  $\mu$  es el coeficiente de fricción entre la pared y el material, nieve en este caso. El valor de  $f$  está entre 0.5 y 1.

### 3. Impacto de deslizamientos en puentes

En párrafos anteriores, se han establecido las diferentes expresiones que pueden emplearse para determinar la fuerza de impacto sobre las barreras, pero ¿cuán susceptibles son los puentes a este fenómeno? Hay pocos casos documentados sobre tierra deslizante que haya impactado las superestructuras de puentes, básicamente porque el diseño apropiado debe incluir la distancia adecuada entre la superestructura del puente y los cortes de tierra, o la ladera abrupta inestable caracterizada por grandes pendientes.

No sólo los puentes son susceptibles al deslizamiento de tierra, las estructuras en general también lo son, incluidas las habitadas por personas; por ejemplo, el daño inducido por esos deslizamientos y generados por el terremoto de Wenchuan (provincia de Sichuan, China), con magnitud de 8.0, en 2008; modelado mediante herramientas matemáticas, empleando hidrodinámica de partículas suavizadas (Huang, Zhang, Xu, Xie y Hao, 2012). Este fenómeno provocó tres grandes deslizamientos con resultados catastróficos en víctimas humanas y daños estructurales, en particular el ocurrido en Wangjiayan, que destruyó cientos de casas.

En Arabia Saudita, se han empleado con éxito datos de detección remota e investigación de campo, identificando varias zonas de deslizamiento y con potencial de erosión, en diez de los cuales saldrían afec-

tados los puentes del valle superior de Tayyah, a lo largo de la carretera escarpada Shear, en la región de Asir, por deslizamientos de tierra (Youssef1, Al-Kathery y Pradhan, 2015); por fortuna, el daño sólo es potencial y se refiere únicamente a la posibilidad de daños.

En Turquía, los puentes Idemli (Ozkaya, Cetin y Tulumtas, 2009) son susceptibles a deslizamientos de tierra, aunque el movimiento es lento y la inclinación del terreno circundante es muy pequeña, por lo que sin la implementación del grupo de pilotes debajo de cada columna del puente, el daño a la estructura será evidente. Este grupo de pilotes conecta el puente a un estrato de tierra más estable, que detiene su deslizamiento inducido por capas superiores. El caso es poco crítico, porque el deslizamiento de tierra no es repentino y, en consecuencia, no se libera gran cantidad de energía cinemática; el material en movimiento tampoco toca la superestructura; de hecho, el deslizamiento de tierra sólo influye en el grupo de pilas. Esto se propone en el diseño de puentes, como una solución para los suelos móviles, en este tipo de deslizamiento de tierra.

Wang, Chen, He, Liu y Tang (2018) miden y estiman la presión de impacto de los flujos de escombros en las pilas de los puentes, con base en experimentos de laboratorio a gran escala; se trata de un flujo muy común y presente en los ríos que producen daños en las pilas de puentes. En este caso, la superestructura no se ve afectada por el impacto horizontal del flujo de escombros, de consistencia viscosa, y conformado en general por flujo de lodo, mas no por flujo de escombros granular, como se espera en los cortes de carreteras.

Respecto de lo anterior, hay algunos estudios centrados en el flujo de escombros, en forma de desechos rocosos, como lo exponen de manera marginal He (b), Yan, Deng y Liu (2019), donde el terremoto de Wenchuan desencadenó una avalancha de rocas que impactó varias pilas de puentes, entre éstos el de Chediguang, del cual colapsaron más de 100 m (Figura 2), que es más de la mitad de su longitud; básicamente, el impacto fue horizontal y produjo daños considerables en la subestructura; el objetivo de este último estudio es proteger las pilas del puente Chediguang de la posterior caída de rocas; sin embargo,



**Figura 2.** Destrucción parcial del puente Chediguan, en la provincia de Sichuan, China, por el cual circulaban 10 000 vehículos en promedio todos los días. Fuente: Xinhua, en china.org.cn (25 de julio de 2009).

éste no es el único caso donde el deslizamiento de tierra causó estragos en puentes; sobre el mismo evento sísmico, en China, Yong y Brabhaharan (2010) informan de más puentes dañados.

Otros países de Asia, como Filipinas, han registrado daños graves en los puentes durante los tifones que provocan inundaciones y deslizamientos de tierra, que impactan de manera lateral los puentes, pero no vertical, en la superestructura, aquí hay menos registros de deslizamientos de tierra inclinados directos. En 2016, un sismo de magnitud 7 ocurrido en Japón provocó el deslizamiento de una montaña en la prefectura de Kumamoto y el posterior colapso del puente Aso-Ohashi (Figura 3).

Al igual que Filipinas, Taiwán es otro país donde los tifones dañan los puentes (Wang y Wang, 2012), también por fuerzas laterales inducidas por el flujo de escombros sumergidos en agua y deslizamientos de tierra, aunque hay menos casos registrados sobre puentes afectados por deslizamientos de tierra. En Japón, el caso del puente Aso Ohashi, donde ocurrió uno de los fenómenos de deslizamientos de tierra más dramáticos, considerando

el volumen extremadamente grande de tierra detonado por el terremoto de Kumamoto, en 2016 (Dang, Sassa, Fukuoka, Sakay *et al.*, 2016; Mukunoki, Kasama, Murakami, Ikemi *et al.*, 2016; Hung (a), Liu, Lin, Leshchinsky, 2018; Hung (b), Lin, Syu, Chen y Yen, 2018), en este caso el puente fue prácticamente pulverizado.

En general, la mayor afectación de puentes inducida por la tierra, o las rocas, se ha registrado por fuerzas de impacto lateral, debido al flujo de escombros que incluyen un gran contenido de agua, flujo de lodo, categorizado como flujo viscoso. Hay pocos casos registrados de daños por deslizamiento inclinado de la tierra, que hayan impactado directamente la superestructura de puentes.

Los estudios sobre deslizamientos de tierra son amplios, pero se centran en determinar las características óptimas de las barreras. En esos estudios, se han tomado en cuenta muchas variables, que se incluyen en las expresiones propuestas.

Para establecer las diferencias entre los estudios experimentales sobre barreras de impacto de deslizamientos de



**Figura 3.** a) Deslizamiento de tierra sobre el puente Aso Ohashi, en Japón. el círculo indica el área del colapso; b) desplome del puente Aso Ohashi. Fuentes: a) *elnuevodiario.com* (17 de abril de 2016); b) *El Diario de Coahuila* (17 de abril de 2016).

tierra y el impacto de deslizamientos de tierra en superficies horizontales, como las correspondientes a las superficies de carreteras, la primera es que los experimentos se desarrollan con paredes laterales confinadas, que permiten orientar las condiciones de deslizamiento, como corresponde al flujo de escombros evaluado.

Aunque la superestructura de los puentes es horizontal y no hay condiciones limitadas lateralmente, como en los experimentos controlados, la validez de las expresiones propuestas y ajustadas en estudios experimentales aplica en las superestructuras de puentes que, al final, pueden representar una barrera, no vertical, aunque sí una de tipo inclinado (Shen, Zhao, Zhao, Dai y Zhou, 2018) y, en los experimentos, la pared lateral reduce la velocidad y la energía del flujo, pero permite que la masa se mueva junta.

En condiciones naturales con deslizamiento masivo de tierra, no hay paredes que frenen la energía cinética debido al movimiento masivo del flujo, sin embargo, ese movimiento tiende a dispersarse de forma lateral al deslizarse. En otras palabras, hay una compensación en los efectos entre el experimento de laboratorio controlado y las condiciones naturales de la tierra.

Por otro lado, si las expresiones consideran el tipo de obstáculo en la trayectoria del flujo de escombros, es decir, barreras rígidas o flexibles, es necesario definir el tipo de barrera representado por la superestructura de los puentes; esta condición depende de la forma en que se diseña la superestructura, lo que define su rigidez y, en consecuencia, las condiciones de respuesta.

De acuerdo con el tipo de barreras examinadas en los estudios de referencia, y estimando las propiedades dinámicas de la superestructura de puentes, por ejemplo, su rigidez, en casos generales y sin errores apreciables, las superestructuras de puentes se pueden considerar como paredes rígidas en posición horizontal. Esta afirmación es más justificada cuando se parte de que, en las investigaciones, las barreras flexibles son en general redes de cables, barreras de filtro flexibles, de hecho, muy flexibles comparadas con la superestructura de puentes.

Por las razones expuestas, y sin información experimental profunda sobre el impacto del deslizamiento de tierra en este tipo de superficie, como la representada por las superestructuras de puentes, se considera que las expresiones utilizadas para impactar en barreras rígidas son adecuadas para ese tipo de puentes.

En este contexto, como se ha citado en este trabajo, hay dos métodos simples ampliamente aceptados: el hidrodinámico y el hidrostático (Tan, Yin, Feng, Zhu, Qin y Chen, 2019) y se consideran válidos para estimar el impacto en las superestructuras de puentes.

En conclusión, como se refiere en el estudio anterior, la expresión que puede emplearse, de acuerdo con las condiciones descritas para la cubierta de la superestructura de puentes, es la que se presentó en la ecuación 1; pero la ecuación hidrostática general también es válida, es decir:

$$F = 0.5 k \rho g h^2 w \quad (5)$$

donde:

k: coeficiente de empuje de tierra, adimensional

g: aceleración de la gravedad, m/s<sup>2</sup>

w: ancho de la superficie de impacto, m

En ambos casos, las consideraciones hidrodinámicas e hidrostáticas, los coeficientes de presión dinámica,  $\alpha$ , y el de presión de la tierra,  $k$ , son los parámetros por definir en primera instancia.

Canelli (2012) propuso 1.5 – 5.5 para el coeficiente de presión dinámico en barreras rígidas, en forma similar a la superestructura del puente. Sin experimentos detallados, aquí se establece 3.5 como el valor promedio para la superestructura de puentes. El coeficiente de presión o empuje de la tierra en las cubiertas de superestructura de puentes es de 9, estimado en función de los valores presentados en el mismo documento (Tan *et al.*, 2019), y se hace referencia a Lichtenhan (1973) y Armanini (1997), tomando el valor promedio sugerido por Lichtenhan, de 7 – 11, y coincidente con el valor considerado por Armanini, de 9.

En las dos expresiones expuestas para determinar el impacto se requiere definir el área de impacto; para evitar esta necesidad, se considera la presión, sin tomar en cuenta la profundidad del flujo de escombros, dada por  $h$  en la expresión 5 así como el ancho  $w$ , debido a que, en una condición de deslizamiento natural, es difícil definir con precisión la sección transversal del movimiento de masas, que en general es caótico.

La tarea en ambos casos es calcular la densidad del material, la velocidad en la expresión 1, y el grosor de los escombros

en la expresión 5; los datos se pueden determinar por la pendiente, las características del material y el espesor estimado de la probable masa deslizante del flujo de escombros.

Es evidente que, a mayor inclinación de la masa en movimiento, la velocidad de ésta aumenta, y en material rocoso la densidad es mayor, por lo que predecir el espesor del flujo puede ser más complicado.

La presión normal en la superestructura de puentes depende de la pendiente del terreno,  $\phi$ , como se indica en las expresiones 2 y 3, de lo que resulta:

$$P_{nhd} = 3.5 \rho v^2 \sin^2 \phi \quad (6)$$

y

$$P_{nhs} = 4.5 \rho g h \sin^2 \phi \quad (7)$$

donde:

$P_{nhd}$ : presión hidrodinámica normal

$P_{nhs}$ : presión hidrostática normal

La presión tangencial en la cara superior de la plataforma de la superestructura del puente se determina considerando el coeficiente de fricción entre el flujo de material y el material de la superficie, dados por  $\mu$ , en expresiones resultantes similares a la expresión 4:

$$P_{thd} = \mu P_{nhd} \quad (8)$$

y

$$P_{ths} = \mu P_{nhs} \quad (9)$$

Respectivamente.

Las últimas expresiones propuestas para estimar la fuerza del impacto o la presión sobre las barreras incluyen el número de Froude,  $Fr$ , porque Hübl *et al.* (2009) observaron que el método hidrodinámico no pronostica de forma adecuada los flujos de escombros con bajas velocidades y altas profundidades, ya que el método hidrostático no puede proporcionar un resultado satisfactorio en la predicción de flujos con altas velocidades y bajas profundidades de flujo, como se menciona en el trabajo de Tan *et al.* (2019). En este contexto, el número de Froude se define con la expresión:

$$Fr = v / (g h) \quad (10)$$



Cui (2015) propuso la siguiente expresión para estimar la presión de impacto, considerando las observaciones hechas por Hübl (2009).

$$P_{\text{impact}} = 5.3 Fr - 1.5 \rho v^2 \quad (11)$$

Esta expresión se puede emplear con independencia de las condiciones hidrostáticas o hidrodinámicas que se han considerado, aunque su forma se parece más a la propuesta del método hidrodinámico.

En última instancia, el número de Froude incorpora ambos factores, incluidos en condiciones hidrostáticas e hidrodinámicas, es decir, la velocidad del flujo de tierra y su espesor. De la misma forma que las ecuaciones 6 y 7, el componente de presión normal,  $P_{\text{npimpact}}$ , se ve afectado por la pendiente del deslizamiento del terreno,  $\phi$ .

$$P_{\text{npimpact}} = 5.3 Fr - 1.5 \rho v^2 \sin^2 \phi \quad (12)$$

La componente tangencial sobre la superficie superior de la superestructura resulta de multiplicar la expresión 12 por el coeficiente de fricción,  $\mu$ .

Las ecuaciones propuestas se encuentran entre muchas otras derivadas de estas tres formas generales de expresiones, para estimar la presión o la fuerza del impacto. La estimación del impacto en las cubiertas de las superestructuras de puentes depende de las variables expuestas, pero se comentó que en la determinación de las variables no es tan fácil reproducir el impacto. Para calcular la velocidad en este tipo de flujo, es complicado considerar todas las variables que definen dicho parámetro; para ello, se sugiere consultar algunas publicaciones (Songbai Guo, 2015; Santi y Cannon, 2008), pero su estudio e implementación requieren de más tiempo de investigación, lo que no se contempla en este caso.

Sin entrar en mayores detalles, en este trabajo se ejemplifica la aplicación de las expresiones, con el fin de comparar los valores obtenidos con cada una de ellas. Sin tomar en cuenta la pendiente del flujo de escombros, se consideran 3 m de espesor de dicho flujo, 5 m/s de este mismo, con un peso específico de 2 000 kg/m<sup>3</sup>, que interviene en las tres expresiones, suponiendo una masa compacta de tierra.

Después de sustituir este valor en las expresiones correspondientes, los resultados indican que la expresión hidrostática arrojó 264.87 kPa, mientras que la ecuación

hidrodinámica, 175 kPa; y al determinar la presión superficial, considerando el número de Froude, se obtuvo 299.49 kPa. Estos resultados, en apariencia diferentes, conservan la tendencia observada en otros estudios (Tan *et al.*, 2019; He, Liu y Li, 2016).

En esas condiciones, la diferencia entre los resultados no es tan grande, teniendo en cuenta la naturaleza de las variables y, en algunos casos prácticos, el valor mayor se puede considerar aceptable, de manera conservadora. Este resultado refuerza la idea de incluir el número de Froude en el cálculo de la fuerza, o presión de impacto, y responde también a la situación observada por Hübl (2009), en la cual no es confiable ni aplicable el método hidrodinámico para un espesor mayor de flujo de escombros con velocidad baja, que da el valor más bajo, pero el modelo hidrostático se aproxima de manera aceptable a la expresión que propone incluir el número de Froude.


## Conclusiones

Para analizar la vulnerabilidad de las superestructuras de puentes ante deslizamientos de laderas, es necesario buscar en todas las áreas multidisciplinarias elementos que soporten las futuras investigaciones y aporten a la comprensión del comportamiento de este fenómeno. Se ha expuesto la posibilidad de cuantificar la fuerza de impacto o la presión inducida por el impacto del deslizamiento de tierra en las cubiertas de las superestructuras de puentes.

Tres expresiones son válidas con sus correspondientes condiciones o limitaciones. En apariencia, resulta más adecuado para el fenómeno la expresión que incluye el número de Froude, que de alguna forma está asociada al modelo hidrodinámico también presentado.

En el mundo se registran pocos casos sobre el flujo de escombros que impacta la superestructura de los puentes, pero, al parecer, no consideran en su diseño el efecto debido al flujo de tierras, con sus variadas formas y componentes.

La diferencia entre los estudios de referencia orientados básicamente a las barreras rígidas, aunque también a las barreras flexibles en menor grado, es la información experimental que abunda sobre ellas, pero los estudios orientados al impacto sobre puentes por deslizamientos de tierra prácticamente no existen.

Éste es un intento por describir el fenómeno, aprovechando los estudios centrados en las barreras de protección, pero se requiere práctica experimental para comprender mejor la fuerza de impacto en esta condición, por ejemplo, en la superestructura del puente. 

## Referencias \*

- Aceves, J. Q. (2014). *Aplicación SIG y cartografía geomorfológica para el inventario de deslizamientos en la cuenca del río el estado, el Volcán Pico de Orizaba, México*. (Memorias). IX Reunión Nacional de Geomorfología, p. 70.
- Aguilar, D. J. J. (2017). *Modelo de evaluación del impacto de la precipitación sobre la inestabilidad de laderas en el área metropolitana de Monterrey, NL México*. (Trabajo de grado inédito, Universidad Autónoma de Nuevo León). Recuperado de <http://eprints.uanl.mx/16529/1/1080289808.pdf>
- Ahmadipur, A., & Qiu, T. (2017). Experimental investigation of effect of soil density and inclination angle on impact force from a granular sliding mass on a rigid obstruction. *Proceedings of Geotechnical Frontiers Conference*, March 12-15, 294–303.
- \_\_\_\_\_, Qiu, T., & Sheikh, B. (2019). Investigation of basal friction effects on impact force from a granular sliding mass to a rigid obstruction. *Landslides* 16, 1089-1105. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10346-019-01156-0>
- Armanini, A. (1997). On the dynamic impact of debris flows. In: Armanini, A., Michiue, M. (Eds.) Recent Developments on Debris Flows. *Lecture Notes in Earth Sciences*, 64. Heidelberg: Springer. DOI: <https://doi.org/10.1007/BFb0117770>
- Canelli, L., Ferrero, A. M., Migliazza, M., & Segalini, A. (2012) Debris flow risk mitigation by the means of rigid and flexible barriers – experimental tests and impact analysis. *Natural Hazards Earth System Sciences*, 12, 1693-1699. DOI: <http://doi.org/10.5194/nhess-12-1693-2012>
- Cuanalo, O. (2006). Sismos y lluvias, factores detonantes de deslizamientos de laderas en las regiones montañosas de Puebla, México. *e-Gnosis*, (4), 1-14. Recuperado de <https://www.redalyc.org/pdf/730/73000413.pdf>
- Cui, P., Zeng, C., & Lei, Y. (2015). Experimental analysis on the impact force of viscous debris flow. *Earth Surface Processes and Landforms*, 40(12), 1644-1655. DOI: <https://doi.org/10.1002/esp.3744>
- \_\_\_\_\_, Choi, C. E., Liu, L. H., & Ng, C. W. (2018). Effects of particle size of mono-disperse granular flows impacting a rigid barrier. *Natural Hazards*, 91(3), 1179-1201. Recuperado de <https://link.springer.com/article/10.1007/s11069-018-3185-3>
- Dang, K., Sassa, K., Fukuoka, H., Sakai, N., Sato, Y., Takara, K., & Ha, N. D. (2016). Mechanism of two rapid and long-runout landslides in the 16 April 2016 Kumamoto earthquake using a ring-shear apparatus and computer simulation (LS-RAPID). *Landslides*, 13 (6), 1525-1534. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10346-016-0748-9>
- Flores, P. (2002). Cartografía morfogenética e identificación de procesos de ladera en Teziutlán, Puebla. *Investigaciones geográficas*, (49), 7-26. Recuperado de <http://www.scielo.org.mx/pdf/igeo/n49/n49a2.pdf>
- Fraustro, O. (1999). Derrumbes, deslizamientos y expansión lateral del suelo provocados por la sismicidad en el graben de Cuauhtepc: región sur de la Sierra de Guadalupe, en la Ciudad de México. *Investigaciones geográficas* (38), 15-29. Recuperado de <http://www.scielo.org.mx/pdf/igeo/n38/n38a3.pdf>
- Galindo, J. A. y Alcántara, I. (2015). Inestabilidad de laderas e infraestructura vial: análisis de susceptibilidad en la Sierra Nororiental de Puebla, México. *Investigaciones geográficas*, (88), 122-145. DOI: <http://dx.doi.org/10.14350/rig.43790>
- García, G. y Hernández, J. R. (2017). Predictibilidad de riesgos geomorfológicos en el sistema hidroeléctrico Ne-caxa, Sierra Norte de Puebla, México. *Serie Correlación*

\* Para una consulta óptima, se sugiere al lector que copie y pegue el vínculo en el motor de búsqueda de su preferencia.

*Geológica*, 33(1-2), 111-120. Recuperado de <http://www.insugeo.org.ar/publicaciones/docs/scg-33-0-10.pdf>

García, O. S. (2006). *Susceptibilidad a deslizamientos de laderas en la Sierra Madre Oriental*. (Trabajo de grado inédito, Universidad Nacional Autónoma de México). Recuperado de <http://132.248.9.195/pd2006/0603906/0603906.pdf>

Gruber, U., Bartelt, P., & Margreth, S. (1999). Neue Berechnungsmethoden in den Lawinengefahrenkartierung. In *Technical Report Part III. Flüelastr. 11, CH-7260 Davos-Dorf: Inst. Schnee-und Lawinenforsch.*

Guo, S., Xu, P., Zheng, Z., & Gao, Y. (2015). Estimation of flow velocity for a debris flow via the two-phase fluid model. *Nonlinear Processes in Geophysics*, 22(1), 109-116. DOI: <https://doi.org/10.5194/npg-22-109-2015>

He, S., Liu, W., & Li, X. (2016). Prediction of impact force of debris flows based on distribution and size of particles. *Environmental Earth Sciences*, 75(4), 298. Recuperado de <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/s12665-015-5180-2.pdf>

\_\_\_\_\_, Yan, S., Deng, Y., & Liu, W. (2019). Impact protection of bridge piers against rockfall. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 78(4), 2671-2680. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10064-018-1250-5>

Herrera, S. (2002). *Regionalización de los deslizamientos en México*. México: Academia de Ingeniería, pp. 57-71.

Huang, Y., Zhang, W., Xu, Q., Xie, P., & Hao, L. (2012). Run-out analysis of flow-like landslides triggered by the Ms 8.0 2008 Wenchuan earthquake using smoothed particle hydrodynamics. *Landslides*, 9(2), 275-283. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10346-011-0285-5>

Hübl, J., Suda, J., Proske, D., Kaitna, R., & Scheidl, C. (2009). Debris flow impact estimation. In *Proceedings of the 11th international symposium on water management and hydraulic engineering, Ohrid, Macedonia*. (Report), pp. 1-5.

Hung, C. (a), Liu, C., Lin, G., & Leshchinsky, B.A. (2018). The Aso-Bridge coseismic landslide: a numerical investigation of failure and runout behavior using finite and discrete element methods. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 78, 2459-2472. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10064-018-1309-3>

\_\_\_\_\_, (b), Lin, G. W., Syu, H. S., Chen, C., & Yen, H. Y. (2018). Analysis of the Aso-Bridge landslide during the 2016 Kumamoto earthquakes in Japan. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*. DOI: <http://doi.org/10.1007/s10064-017-1103-7>

Iverson, R. (1997). The physics of debris flows. *Reviews of geophysics*, 35(3), 245-296. Recuperado de <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1029/97RG00426>

Jiang, Y. J., Wang, Z. Z., Song, Y., & Xiao, S. Y. (2018). Cushion Layer Effect on the Impact of a Dry Granular Flow Against a Curved Rock Shed. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 51(7): 2191-2205. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00603-018-1478-1>

Johannesson, T., Gauer, P., Issler, P., and Lied, K. (2009). The design of avalanche protection dams. *Recent Practical and Theoretical Developments, European Commission*, 95-107. Recuperado de [https://rafhladan.is/bitstream/handle/10802/9460/10851\\_avalanche-protection.pdf?sequence=1](https://rafhladan.is/bitstream/handle/10802/9460/10851_avalanche-protection.pdf?sequence=1)

Lichtenhahn, C. (1973). Die Berechnung von Sperren in Beton und Eisenbeton. Colloquium on Torrent Dams. In *Kolloquium Über Wildbachsperren* (ODC 384.3). Wien: Forstlichen Bundes-Versuchsanstalt, 91-127. Recuperado de [https://www.zobodat.at/pdf/Mitteilungen-forstlichen-Bundes-Versuchsanstalt\\_102\\_1973\\_0001-0419.pdf](https://www.zobodat.at/pdf/Mitteilungen-forstlichen-Bundes-Versuchsanstalt_102_1973_0001-0419.pdf)

Moriguchi, S., Borja, R. I., Yashima, A., & Sawada, K. (2009). Estimating the impact force generated by granular flow on a rigid obstruction. *Acta Geotechnica*, 4(1): 57-71. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11440-009-0084-5>

Mukunoki, T., Kasama, K., Murakami, S., Ikemi, H., Ishikura, R., Fujikawa, T., & Kitazono, Y. (2016). Reconnaissance report on geotechnical damage caused by an earthquake with JMA seismic intensity 7 twice in 28 h, Kumamoto, Japan. *Soils and foundations*, 56(6), 947-964. Recuperado de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038080616301184>

Ozkaya, C., Cetin, G. & Tulumtas, F. (2009). *Design of Idem-li Bridges in landslide areas*. Yuksel Proje Uluslararası Co., Ankara, Turkey. Recuperado de <https://www.yukselproje.com.tr/wp-content/uploads/2013/11/design-of-idemli-bridges-in-landslide-areas-2.pdf>

Parrilla, G. y Zamorano, J. J. (1996). Análisis de un flujo de depósitos (debris flow) en la ladera norte del Pico de

- Orizaba (México). *Memorias de la IV Reunión de Geomorfología*, pp. 337-347. Recuperado de <https://ruc.udc.es/dspace/bitstream/handle/2183/6236/CA-21-26.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Pastor, J. L., Tomás, R., Lettieri, L., Riquelme, A., Cano, M., Infante, D., & Di Martire, D. (2019). Multi-Source Data Integration to Investigate a Deep-Seated Landslide Affecting a Bridge. *Remote Sensing*, 11(16), 1878. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs11161878>
- Paz, J. A. (2018). Las investigaciones sobre movimientos de laderas en Costa Rica, Honduras, México y Nicaragua. *Revista Geográfica de América Central*, 17-59. DOI: <https://doi.org/10.15359/rgac.60-1.1>
- Prochaska, A. B., Santi, P.M., Higgins, J.D. et al. (2008). A study of methods to estimate debris flow velocity. *Landslides* 5, 431. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10346-008-0137-0>
- Pudasaini, S. P., Hutter, K., Hsiau, S. S., Tai, S. C., Wang, Y., & Katzenbach, R. (2007). Rapid flow of dry granular materials down inclined chutes impinging on rigid walls. *Physics of Fluids*, 19(5), 053302. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.2726885>
- Shen, W., Zhao, T., Zhao, J., Dai, F., & Zhou, G. G. (2018). Quantifying the impact of dry debris flow against a rigid barrier by DEM analyses. *Engineering Geology*, 241, 86-96. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eng-geo.2018.05.011>
- Song, D. R., Zhou, G. G., Choi, C. E., & Zheng, Y. (2019). Debris flow impact on flexible barrier: effects of debris-barrier stiffness and flow aspect ratio. *Journal of Mountain Science*, 16(7), 1629-1645. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11629-018-5314-6>
- Suárez, O. (2006). Susceptibilidad a deslizamientos de laderas en la Sierra Madre Oriental. (Trabajo de grado inédito, Universidad Nacional Autónoma de México). Recuperado de <http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/1633/suarez-garcia.pdf?sequence=1>
- Tan, D. Y., Yin, J. H., Feng, W. Q., Zhu, Z. H., Qin, J. Q., & Chen, W. B. (2019). New Simple Method for Calculating Impact Force on Flexible Barrier Considering Partial Muddy Debris Flow Passing Through. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 145(9). DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0002133](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0002133)
- Teufelsbauer, H., Wang, Y., Pudasaini, S. P., Borja, R. I., & Wu, W. (2011). DEM simulation of impact force exerted by granular flow on rigid structures. *Acta Geotechnica*, 6(3), 119. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11440-011-0140-9>
- Vagnon, F., & Segalini, A. (2016). Debris flow impact estimation on a rigid barrier. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 16(7), 1691-1697. DOI: <https://doi.org/10.5194/nhess-16-1691-2016>
- Varnes, D. (1978). Slope movement types and processes. *Landslides: Analysis and Control. Special report*, 176, 11-33. Washington, DC: Transportation Research Board-National Academic of Sciences. Recuperado de <https://trid.trb.org/view/86168> y <http://onlinepubs.trb.org/Onlinepubs/sr/sr176/176.pdf>
- Wang, C. Y., & Wang, H. (2012). Performance of bridges in Taiwan under extreme typhoon-induced multiple hazards. In *Proc., 2012 Taiwan-Japan Bridge Workshop*, 47-67. Recuperado de [https://www.researchgate.net/profile/Helsin\\_Wang2/publication/280239642\\_Performance\\_of\\_Bridges\\_in\\_Taiwan\\_under\\_Extreme\\_Typhoon-Induced\\_Multiple\\_Hazards/links/55aeff4508aed614b09a7e89.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Helsin_Wang2/publication/280239642_Performance_of_Bridges_in_Taiwan_under_Extreme_Typhoon-Induced_Multiple_Hazards/links/55aeff4508aed614b09a7e89.pdf)
- Wang, D., Chen, Z., He, S., et al. (2018) Measuring and estimating the impact pressure of debris flows on bridge piers based on large-scale laboratory experiments. *Landslides* 15, 1331-1345. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10346-018-0944-x>
- Wendeler, C., Volkwein, A., McArdell, B. W., & Bartelt, P. (2018). Load model for designing flexible steel barriers for debris flow mitigation. *Canadian Geotechnical Journal*, 56(6), 893-910. Recuperado de [https://www.researchgate.net/profile/Axel\\_Volkwein/publication/327143970\\_Load\\_model\\_for\\_designing\\_flexible\\_steel\\_barriers\\_for\\_debris\\_flow\\_mitigation/links/5c7ff303299bf1268d403de4/Load-model-for-designing-flexible-steel-barriers-for-debris-flow-mitigation.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Axel_Volkwein/publication/327143970_Load_model_for_designing_flexible_steel_barriers_for_debris_flow_mitigation/links/5c7ff303299bf1268d403de4/Load-model-for-designing-flexible-steel-barriers-for-debris-flow-mitigation.pdf)

Youssef, A. M., Al-Kathery, M., & Pradhan, B. (2015). Assessment of impact of mass movements on the upper Tayyah valley's bridge along Shear escarpment highway, Asir region (Saudi Arabia) using remote sensing data and field investigation. *Natural Hazards Earth System Science Discuss*, 3, 497-533. DOI: <https://doi.org/10.5194/nhessd-3-497-2015>

Yu, J., Yong, P., Read, S., Brabhaharan, P., & Foon, M. (2010). The Ms 8.0 Wenchuan Earthquake of 12 May 2008 Reconnaissance Report. *Bulletin of the New Zealand Society for Earthquake Engineering*, 43(1), 41. DOI: <http://doi.org/10.5459/bnzsee.43.1.41-83>

### Fotografías

**Figura 1.** Salazar, J. A. Puente Morelos ubicado en Santo Domingo Tonalá, Oaxaca, México.

**Figura 2.** Xinhua. (July 25, 2009). Landslide leaves 6 dead in Wuenchuan. *china.org.cn*. Recuperado de [http://www.china.org.cn/china/news/2009-07/25/content\\_18201761.htm](http://www.china.org.cn/china/news/2009-07/25/content_18201761.htm)

**Figura 3. (a)** Destrucción y muerte por ola sísmica en Japón. (17 de abril de 2016). *El nuevo diario*. Recuperado de <https://www.elnuevodiario.com.ni/nacionales/390301-destruccion-muerte-ola-sismica-japon/>

**Figura 3. (b)** Apoya EU a Japón en rescate tras el sismo. (17 de abril de 2016). *El diario de Coahuila*. Recuperado de <http://www.eldiariodecoahuila.com.mx/internacional/2016/4/18/apoya-eu-japon-en-rescate-tras-el-sismo-573066.html>

### Notas de los autores:

Mario Alberto Canales Alvarado

Catedrático de Tiempo Completo en el Departamento de Irrigación, Área de construcciones agrícolas de la Universidad Autónoma de Chapingo, y Profesor de Asignatura en el Programa de Especialización en Puentes en la Facultad de Estudios Superiores Aragón, UNAM.  
albermardur@hotmail.com

José Antonio Salazar Garrido

Maestro en Ciencias por Corporación Mexicana de Investigación en Materiales, S.A. de C.V. (COMIMSA). Profesor de Asignatura en el Programa de Especialización en Puentes, en la Facultad de Estudios Superiores Aragón, UNAM.  
antonosalgarr@hotmail.com