

## Construyendo un sistema de monitoreo de lahares en la cuenca Jamapa en el volcán Pico de Orizaba, México

*Building a lahar-monitoring system in the Jamapa watershed on the  
Pico de Orizaba volcano, Mexico*

Katrin Sieron<sup>a</sup> | Francisco Córdoba Montiel<sup>b</sup> | José Daniel Hernández  
Ventura<sup>c</sup> | Marco Aurelio Morales Martínez<sup>d</sup> | Juan Carlos Salinas Santillán<sup>e</sup> |  
Luis Enrique Córdoba Soriano<sup>f</sup> | Marian Victoria Hernández Ramírez<sup>g</sup> |  
Osvaldo Gutiérrez López<sup>h</sup> | Blake Weissling<sup>i</sup> |  
Edwin Ulices Monfil León<sup>j</sup>

**Recibido:** 26 de enero de 2022.

**Aceptado:** 20 de abril de 2022.

<sup>a</sup> Universidad Veracruzana, Observatorio Sismológico y Vulcanológico (OSV), Centro de Ciencias de la Tierra, Xalapa, México. Contacto: [ksieron@uv.mx](mailto:ksieron@uv.mx) | ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4036-9107>

<sup>b</sup> Universidad Veracruzana, Observatorio Sismológico y Vulcanológico (OSV), Centro de Ciencias de la Tierra, Xalapa, México. Contacto: [fcordoba@uv.mx](mailto:fcordoba@uv.mx)  
\*Autor para correspondencia.

<sup>c</sup> Instituto Tecnológico Superior de Xalapa (ITSX), Observatorio Sismológico y Vulcanológico (OSV), Xalapa, México. Contacto: [daniel.ventura@itsx.edu.mx](mailto:daniel.ventura@itsx.edu.mx)

<sup>d</sup> Universidad Veracruzana, Observatorio Sismológico y Vulcanológico (OSV), Centro de Ciencias de la Tierra, Xalapa, México. Contacto: [marcmorales@uv.mx](mailto:marcmorales@uv.mx)

<sup>e</sup> Instituto Tecnológico Superior de Xalapa (ITSX), Observatorio Sismológico y Vulcanológico (OSV), Xalapa, México. Contacto: [147o01839@itsx.edu.mx](mailto:147o01839@itsx.edu.mx)

<sup>f</sup> Universidad Veracruzana, Observatorio Sismológico y Vulcanológico (OSV), Facultad de Instrumentación Electrónica, Xalapa, México. Contacto: [zS16011570@estudiantes.uv.mx](mailto:zS16011570@estudiantes.uv.mx)

<sup>g</sup> Universidad Veracruzana, Observatorio Sismológico y Vulcanológico (OSV), Facultad de Instrumentación Electrónica, Xalapa, México. Contacto: [zS17023710@estudiantes.uv.mx](mailto:zS17023710@estudiantes.uv.mx)

<sup>h</sup> Universidad Veracruzana, Observatorio Sismológico y Vulcanológico (OSV), Facultad de Instrumentación Electrónica, Xalapa, México. Contacto: [zS17012814@estudiantes.uv.mx](mailto:zS17012814@estudiantes.uv.mx)

<sup>i</sup> University of Texas at San Antonio (UTSA), Department of Geological Sciences, EUA. Contacto: [Blake.Weissling@utsa.edu](mailto:Blake.Weissling@utsa.edu)

<sup>j</sup> Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas (UNICACH), Instituto de Investigación en Gestión de Riesgos y Cambio Climático. Contacto: [edwin.monfill@e.unicach.mx](mailto:edwin.monfill@e.unicach.mx)

**Resumen:** A través del apoyo financiero de un proyecto reciente por una fundación internacional, se han iniciado los trabajos de monitoreo de lahares en la cuenca “Jamapa” alta, localizada en el flanco norte del volcán Pico de Orizaba, al interior del Parque Nacional Pico de Orizaba, donde histórica y recientemente ha tenido lugar la ocurrencia de este tipo de fenómenos. La puesta en marcha de este sistema enfocado al monitoreo, estudio y, posteriormente, también el alertamiento de lahares, implica la adquisición de datos multiparamétricos entre los que se incluyen principalmente los de tipo hidrometeorológico, sísmico y visual. Por tratarse de un sistema que cumplirá con la función de alertamiento es imprescindible que los datos estén disponibles a tiempo inmediato en el centro de monitoreo del Observatorio Sismológico y Vulcanológico de Veracruz (Xalapa) para su almacenamiento, procesamiento y evaluación oportuna. Para tal fin, se ha implementado una red de telemetría local que, en primera instancia, obtiene los datos de los instrumentos en los sitios de interés y, posteriormente, procede a la concentración de todos ellos en un punto que aloja a la estación permanente de monitoreo sísmico (POHV) del volcán “Pico de Orizaba”, siendo este último un sitio adecuado para transmitir toda la información que genera esta red a la ciudad de Xalapa.

**Palabras clave:** Pico de Orizaba; monitoreo; lahares secundarios; cuenca Jamapa alta; estaciones sísmicas; vigilancia visual; estaciones meteorológicas.

**Abstract:** *Through the financial support of a recent project by an international foundation, lahar monitoring was initiated in the upper Jamapa watershed, located on the northern flank of the Pico de Orizaba volcano, inside the Pico de Orizaba National Park, where historically and also recently the occurrence of this type of phenomenon took place. The implementation of this system, focused on the monitoring, study, and later also the warning of lahars, implies the acquisition of multiparametric data, among which hydrometeorological, seismic and visual data are included. As it is a system that will fulfill the warning function, the data must be available in real-time at the monitoring center of the Seismological and Volcanological Observatory of Veracruz (Xalapa) for its storage, processing, and timely evaluation. To this end, a local telemetry network has been implemented that, in the first instance, obtains the data from the instruments at the sites of interest and subsequently proceeds to concentrate all of them at a point that houses the POHV permanent seismic monitoring station of Pico de Orizaba volcano, which represents a suitable site to transmit all the information generated by this network to the city of Xalapa.*

**Keywords:** *Pico de Orizaba; Monitoring; Secondary Lahars; Upper Jamapa watershed; Seismic Stations; Visual Surveillance, Meteorological Stations.*

## Introducción

Por medio del proyecto: “Peligros hidrometeorológicos y geológicos en el volcán ‘Pico de Orizaba’, México”, financiado por la Sociedad de Geofísicos de Exploración (SEG, por sus siglas en inglés) en el marco del proyecto permanente “Geo-científicos Sin Fronteras” (GWB por sus siglas en inglés), se instaló un sistema para iniciar el monitoreo de lahares, considerando algunos de los parámetros que influyen en su formación en la cuenca Jamapa, ubicada en el flanco norte de

este importante volcán, considerando que ha sido el escenario de este tipo de eventos en el pasado, y que además drena el último glaciar de México, el glaciar Jamapa (Lorenzo, 1964) (**Figura 1**).

El término “lahar” describe de forma general cualquier mezcla de detritos de roca y agua (diferente al flujo de río), en los flancos de un volcán (Smith y Fritz, 1989; Smith y Lowe, 1991; Rodolfo, 1989). Los lahares pueden ocurrir durante una erupción volcánica (lahares syn-eruptivos o primarios), años después de una erupción (post-eruptivos) siendo originados principalmente por lluvias fuertes, o como consecuencia de causas no relacionados a una erupción (lahares secundarios) (Lavigne y Thouret, 2000; Thouret y Lavigne, 2000). Los lahares representan uno de los fenómenos más destructivos que pueden ocurrir en un volcán compuesto como se ha visto, por ejemplo, en los volcanes Nevado de Ruíz (Colombia) (Naranjo et al., 1986) y Pinatubo (Indonesia) (p. ej. Newhall y Punongbayan, 1997).

Para que se origine un lahar en los flancos de un volcán, se necesita una fuente de agua, tal como la derivada de una precipitación pluvial, de un lago o del glaciar en la cima; y abundante material volcánico o volcanoclástico no consolidado; además de pendientes pronunciadas, y finalmente un evento que lo detone o dispare (trigger), tal como una precipitación intensa o un sismo (p. ej. Vallance e Iverson, 2015).

A pesar de que el volcán Pico de Orizaba no ha tenido una erupción reciente, debido a su altura y al abundante material no consolidado que existe por encima de la línea de árboles (4,000 msnm, Lauer y Klaus, 1975), depositado sobre sus flancos superiores con pendientes pronunciadas, existe una susceptibilidad considerable para producir lahares secundarios. Este hecho está evidenciado además por la ocurrencia de lahares en años recientes, como en los 90 (Palacios, Parrilla y Zamorano, et al., 1999), en el 2003 (Rodríguez et al., 2006) y en el 2012 (Morales-Martínez, et al., 2016; Sieron et al., 2021) (**Figura 1**).

La zona de formación de lahares en la cuenca alta del Río Jamapa ha sido afectada por el retroceso constante (y ahora acelerado) del glaciar Jamapa desde la Pequeña Edad de Hielo (Marta et al., 2021), y por las consecuencias que este proceso conlleva en el contexto de cambios morfológicos y procesos geomorfológicos relacionados (Palacios et al., 1999; Palacios y Vázquez-Selem, 1996). El impacto de huracanes u otros eventos hidrometeorológicos extremos sobre los flancos de volcanes en México ha sido ya reconocido (p. ej. Capra et al., 2018), lo que, en conjunto con un aumento en la frecuencia de estos fenómenos (Chiarle et al., 2007; Emanuel, 2021) y el material disponible, fomenta condiciones ideales para la formación de lahares (y otros fenómenos de remoción en masa).

En este trabajo se presentan algunos aspectos de la instrumentación instalada recientemente en el Pico de Orizaba, así como su integración con la infraestructura previamente existente, aunada a un esquema de sustentabilidad a mediano plazo mediante la integración al Observatorio Sismológico y Vulcanológico de Veracruz (OSV) en la Universidad Veracruzana (UV).

**Figura 1**

*Flanco norte del Pico de Orizaba visto desde el Calvario (3,800 msnm) (foto tomada por Katrin Sieron, junio 2020)*



Nota: Se aprecia el glaciar Jamapa, así como la zona afectada por la formación de lahares en el pasado (círculo negro).

Fuente: Elaboración propia.

## 1. Instrumentación y protección del equipo de monitoreo

El monitoreo meteorológico comenzó durante la ejecución de un proyecto previo (ECOPICS) en colaboración con el Instituto de Ecología A.C. de México (INECOL), en el que se instalaron tres estaciones meteorológicas DAVIS entre los 3,000 y los 4,500 msnm. Estas estaciones se mantuvieron instaladas, incluso una de ellas continúa actualmente en el Pico de Orizaba, antes de evaluar la posibilidad de reemplazarla con un equipo nuevo. A estas tres estaciones se sumó un pluviómetro *Campbell Scientific* instalado por Blake Weissling, con apoyo del personal técnico del Centro de Ciencias de la Tierra de la UV, desde hace casi una década; y una estación meteorológica completa también de la marca Campbell instalada alrededor de los 4,000 msnm (estación Campbell en la **Figura 2, Tabla 1**). Los dos sismógrafos *Raspberry Shake* se instalaron en el Pico de Orizaba en el periodo 2018-2019 y sus datos han sido descargados irregularmente. Ambos sensores sísmicos se incluyen en el sistema de monitoreo: uno está situado (*Raspberry Shake 3D*) en la zona que morfológicamente ha sido más inestable y variable durante los últimos años (décadas) e incluso, ha sido escenario para varios lahares en el pasado reciente. El segundo sismógrafo (*Raspberry Shake 1D*) se instaló en el sitio de confirmación visual de un eventual lahar cerca del río Jamapa, aguas abajo de la zona de formación de lahares.

Durante los años 2019 y 2020 se construyeron dos casetas pequeñas para alojar y proteger el equipo meteorológico y sísmico con el apoyo de la comunidad de Vaquería, Miguel Hidalgo, y el

Parque Nacional Pico de Orizaba (PNPO). El detalle final de la distribución de los instrumentos en cada uno de los sitios de monitoreo se desglosa en la **Tabla 1** y en la **Figura 3** la ubicación de cada una de las estaciones. En lo que respecta al suministro de energía, las cinco estaciones que forman parte de este sistema de monitoreo operan bajo un esquema de flotación compuesto por un banco de baterías que son recargadas por medio de paneles solares a través de controladores de carga que aseguran el funcionamiento adecuado y la protección de los equipos. Las tres estaciones que disponen de sensores se describen brevemente a continuación.

La estación Cruce Jamapa se sitúa en la parte más baja de la cuenca Jamapa de tal manera que, por un lado, mediante el monitoreo visual que se realiza por medio de una cámara de video *Mobotix*, se puedan observar cambios originados por los aportes de agua y el material que a causa de ello es arrastrado desde la parte superior de la cañada, lo que da evidencia de la ocurrencia de lahares en el pasado. Se eligió esta cámara considerando que está dotada de un algoritmo implementado a través de inteligencia artificial capaz de detectar cambios en el paisaje observado, eventualmente podrían ser resultado de la avenida de un lahar, generando, en consecuencia, algún tipo de disparo. De manera complementaria, en la misma caseta se aloja un sismógrafo con sensor de movimiento vertical (**Tabla 1**) que permite detectar las vibraciones originadas por el avance de material descendiendo. Esta cámara permite la transmisión de video en tiempo real a tasas definidas por el usuario y está construida para su uso en exteriores.

En la parte más alta, la estación Caja de Agua se ha configurado para concentrar los datos de una estación meteorológica DAVIS para el monitoreo de los parámetros hidrometeorológicos que potencialmente puedan originar un lahar; además de disponer de un sismómetro de 3 componentes (**Tabla 1**), que contribuye a determinar si el detonante de un lahar ha sido un sismo local o en su caso, regional de magnitud importante. La tercera estación con instrumentos de medición se ha denominado Campbell en referencia a la estación meteorológica ahí instalada y tiene la misma función de observar las condiciones que puedan propiciar la ocurrencia de un lahar. Es importante señalar que las tasas de muestreo de las estaciones meteorológicas son de lecturas de los sensores cada 30 minutos, en tanto que los sensores sísmicos adquieren bajo demanda series de tiempo con una tasa de 100 muestras/s.

**Figura 2**

*Secuencia temporal del proceso de la construcción de la estación Campbell y su respectiva protección (de izquierda a derecha) como ejemplo*



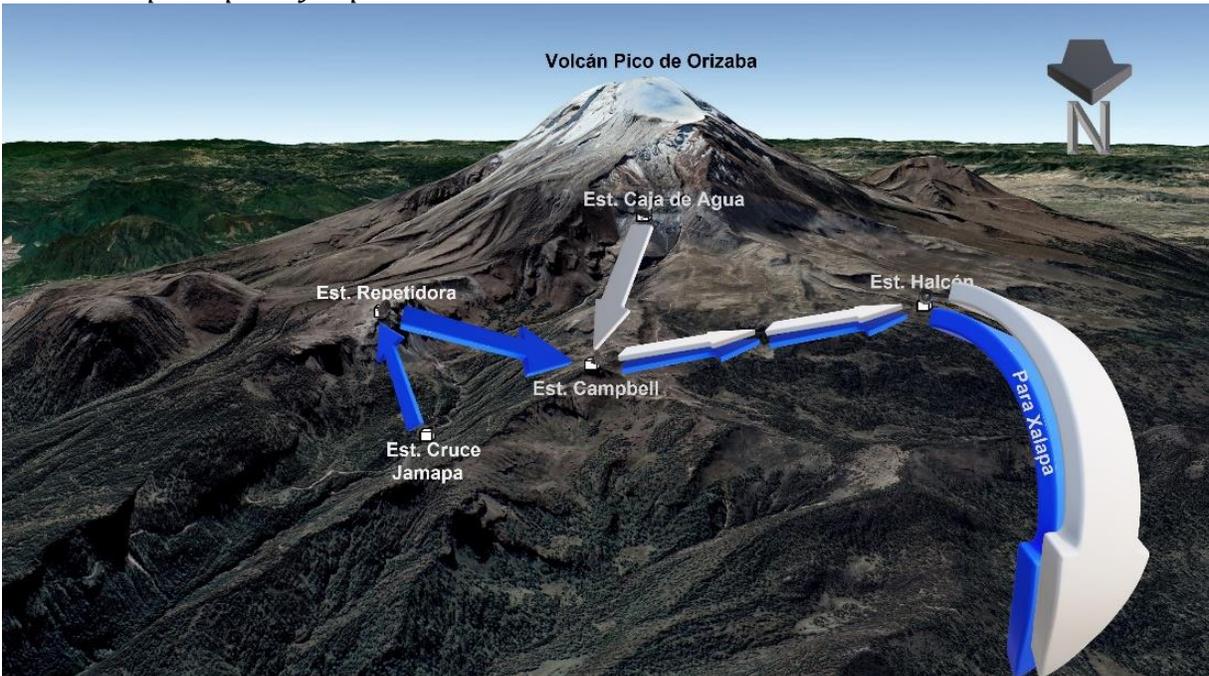
Fuente: Elaboración propia.

## 2. Telemetría del equipo instalado en el flanco norte del volcán

Durante los años 2020 y 2021 se realizaron pruebas con el sistema de telemetría adquirido basado en radios digitales *Ubiquiti*. Una vez comprobada su funcionalidad y operatividad, se instalaron los radioenlaces en campo gradualmente de acuerdo a lo especificado en la **Tabla 1**. En la **Figura 3** se puede apreciar la distribución geográfica de la red de estaciones que conforman el sistema de monitoreo de lahares en el flanco norte del Pico de Orizaba, para la transmisión remota de datos multiparamétricos desde el volcán, hasta el centro de monitoreo en Xalapa.

El flujo de datos de la red local se realiza básicamente de la siguiente forma: el equipo de telemetría *LiteBeam* instalado en la estación Cruce Jamapa (**Tabla 1**) opera en modo estación y enlaza con el radio *Ubiquiti* instalado la estación repetidora (funcionando en modo *Access Point* - Repetidor), dado que los datos de Cruce Jamapa no pueden enviarse directamente al punto de concentración intermedio (sin línea de vista). Desde el repetidor, los datos de video y sísmicos de Cruce Jamapa se transmiten a la estación Campbell. Los datos de los instrumentos de Caja de Agua (meteorológicos y sísmicos, ver **Tabla 1**) pueden transmitirse por medio del radio local configurado en modo estación al punto de acceso de Campbell. En esta última estación se agregan los datos de la estación meteorológica ahí instalada y, una vez concentrados todos ellos, se retransmiten al punto de acceso que se tiene en la estación de monitoreo sísmico *Halcón* (POHV, que opera desde 1998), donde a través de un enlace punto a punto de largo alcance (*airFiber 5XHD*, ver **Tabla 1**), podrán recibirse en un sitio del que puedan ser canalizados al centro de monitoreo en Xalapa.

**Figura 3**  
*Estaciones principales y repetidor*



Nota: Estaciones principales y repetidor que conforman el sistema de monitoreo de lahares y flujo de datos (concentración en la estación Campbell), para que ser reenviados a la estación Halcón y de ahí, retransmitidos a las instalaciones del CCT, en Xalapa, Veracruz.

Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 1**  
*Descripción de la instrumentación y equipo de telemetría que forman parte del sistema de monitoreo de lahares*

Nombre de la estación	Instrumentación	Telemetría
Cruce Jamapa	- Sismógrafo <i>Raspberry Shake</i> ® 1D con sismómetro vertical (geófono) - Cámara de video <i>Mobotix M16</i>	Radio <i>Ubiquiti 5 Ghz 10 Mbps LiteBeam</i> ®M <sup>5</sup> modelo LBE-MS-23 (enlace Cruce Jamapa-Repetidora)
Repetidora	No aplica	Radio <i>Ubiquiti 5 Ghz NanoStation</i> ®loco M <sup>5</sup> modelo <i>LOCOM5</i> (enlace Repetidora-Campbell)
Caja de Agua	- Estación Meteorológica <i>DAVIS Instruments Vantage Pro2</i> ™ Plus que incluye pluviómetro, anemómetro, termohigrómetro, sensor de radiación UV y de radiación de solar. - Sismógrafo <i>Raspberry Shake</i> ® 3D con geófonos ortogonales en las direcciones este, norte y vertical	Radio <i>Ubiquiti 5 Ghz NanoStation</i> ®loco M <sup>5</sup> modelo <i>LOCOM5</i> (enlace Caja de Agua-Campbell)
Campbell	Estación meteorológica <i>Campbell Scientific ClimaVUE</i> ™50, que contiene datalogger CR300-RF407 con los siguientes sensores: piranómetro, anemómetro ultrasónico, sensor de temperatura,	Radio <i>Ubiquiti 5 Ghz 10 Mbps LiteBeam</i> ®M <sup>5</sup> modelo LBE-MS-23 (enlace Campbell-Caja de Agua)

	sensor de humedad relativa, pluviómetro e inclinómetro.	Radio <i>Ubiquiti</i> 5 Ghz 10 Mbps <i>LiteBeam</i> ® <i>M5</i> modelo LBE-MS-23 (enlace Campbell-Halcón)
Halcón	No aplica	Radio <i>Ubiquiti</i> 5 Ghz <i>NanoStation</i> ® <i>loco M5</i> modelo <i>LOCOM5</i> (enlace Campbell-Halcón) Radio <i>Ubiquiti airFiber</i> ® 5XHD modelo AF-5XHD (enlace Halcón-Xalapa)

Fuente: Elaboración propia.

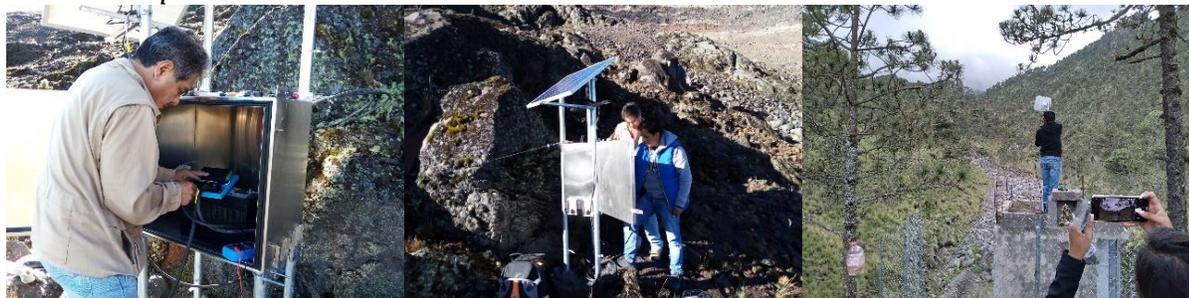
### 3. Sustentabilidad del sistema de monitoreo

El problema de la sustentabilidad posterior a la adquisición inicial de equipos en el marco de proyectos financiados durante un tiempo corto, limitado por lo general a un par de años, es un problema recurrente. Sin financiamiento, no se pueden garantizar las salidas para trabajo de campo necesarias para la descarga datos, ni dar el mantenimiento requerido al equipo. Por ello, muchos investigadores prefieren desinstalar los instrumentos, una vez terminada la vigencia del proyecto. Aunado a lo anterior, existe el problema de la seguridad y de los costos para el investigador en el caso de robo o extravío o daño. En este caso, sin embargo, se debe tratar de garantizar la sustentabilidad del sistema, ya que su destino a mediano plazo es proteger a las comunidades expuestas cuenca abajo de estos flujos de detritos (lahares) futuros. Por ello, se optó por implementar la transmisión automatizada (a través de telemetría) y la integración permanente de la infraestructura reciente al OSV. Además, al compartirse estos datos con instituciones como el Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED), se fomenta el interés por mantener un sistema como tal de forma más amplia (no restringida al ámbito local).

A este sistema de monitoreo, eventualmente, se le debe anexar un sistema de alerta para la población expuesta, lo que se puede alcanzar luego de entender y aprender sobre los factores que detonan estos fenómenos, lo que a su vez se logrará durante el monitoreo de los siguientes meses y años. Se tiene la intención, en un futuro, de ampliar el monitoreo a otras cuencas, si se obtienen los recursos necesarios.

**Figura 4**

*Instalación parcial del sistema de telemetría*



Fuente: Fotos tomadas por Marco Morales Martínez y Katrin Sieron.

## 4. Comentarios finales

Realizar el monitoreo en alta montaña representa un reto importante, dado que las condiciones de trabajo (construcción, instrumentación, mantenimiento, etc.) son complicadas, por lo que se requiere de un buen equipo y del apoyo local, además de una decidida voluntad. Esperamos que este trabajo sea de utilidad para agregar otra componente de vigilancia: el alertamiento por lahares, aunado al monitoreo sísmico del volcán que se efectúa desde hace más de 20 años.

## Agradecimientos

Este proyecto fue financiado por: **Geoscientists Without Borders® (GWB) Program of the Society of Exploration Geophysicists (SEG)**, a través del proyecto “*Hydrometeorologic and geologic hazards at Pico de Orizaba volcano, Mexico*”. Un agradecimiento muy especial a los administradores de este proyecto por parte de la UV: Mtro. Asunción Castillo Rojas y Lic. Blanca Estela Córdova Tejeda, ya que sin su extraordinario apoyo, la ejecución del proyecto financiado no hubiera sido posible en tiempo y forma; a los habitantes de Vaquería (Calcahualco) y Miguel Hidalgo por el apoyo durante la construcción de las casetas, el hospedaje y logística; y de igual manera, al personal y la coordinación del Parque Nacional Pico de Orizaba por la apertura y el apoyo; al INECOL por la colaboración aún después del término de un proyecto previo en conjunto (ECOPICS) y, finalmente, también a Villas Pico por el apoyo con la logística durante varias salidas al campo y por la disposición general de apoyar con recursos a los estudiantes.

## Referencias

- Capra, L., Coviello, V., Borselli, L., Márquez-Ramírez, V.H., Arámbula-Mendoza, R. (2018)** Hydrological control of large hurricane-induced lahars: evidences from rainfall, seismic and video monitoring: *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 18, 781–794, <https://doi.org/10.5194/nhess-2017-354>
- Chiarle M, Iannotto S, Martara G, Deline, P. (2007)** Recent debris flow occurrences associated with glaciers in the Alps. *Global and Planetary Change*, 56, 123-136.
- Emanuel, K. (2021)** Response of Global Tropical Cyclone Activity to Increasing CO2: Results from downscaling CMIP6 Models. *Am Meteor Soc.* DOI: 10.1175/JCLI-D-20-0367.1
- Lauer, W. y Klaus, D. (1975).** Geocological investigations on the timberline of Pico de Orizaba Mexico. *Arctic and Alpine Research*, 315-330.
- Lavigne, F., Thouret, J.C. (2000).** Les lahars: depots, origins et dynamique. *Bull Soc geol France*, 171 545-557.
- Lorenzo, J.L. (1964)** *Los Glaciares de México*, UNAM, Instituto de Geofísica, 114.
- Marta, S.; Azzoni, R.S.; Fugazza, D.; Tielidze, L.; Chand, P.; Sieron, K.; Almond, P.; Ambrosini, R.; Anthelme, F.; Alviz Gazitúa, P.; Bhambri, R.; Bonin, A.; Caccianiga, M.; Cauvy-Fraunié, S.; Ceballos Lievano, J.L.; Clague, J.; Cochachín Rapre, J.A.; Dangles, O.; Deline, P.; Eger, A.; Cruz Encarnación, R.; Erokhin, S.; Franzetti, A.; Gielly, L.; Gili, F.; Gobbi, M.; Guerrieri, A.; Hågvær, S.; Khedim, N.; Kinyanjui, R.; Messenger, E.; Morales-Martínez, M.A.; Peyre, G.; Pittino, F.; Poulénard, J.; Seppi, R.; Chand Sharma, M.; Urseitova, N.; Weissling, B.; Yang, Y.; Zaginaev, V.; Zimmer, A.; Diolaiuti, G.A.; Rabatel, A.; Fietola, G.F.** The Retreat of Mountain Glaciers since the

Little Ice Age: A Spatially Explicit Database. *Data* 2021, 6, 107.  
<https://doi.org/10.3390/data6100107>

- Morales-Martínez, M.A., Welsh Rodríguez, C.M., Ruelas Monjardín, L.C., Weissling, B., Sieron, K, Ochoa Martínez, C.A, (2016).** *Afectaciones por posible asociación de eventos hidrometeorológicos y geológicos en los municipios de Calchualco y Coscomatepec, Veracruz. Teoría y Praxis*, octubre, 31-49, Universidad de Quintana Roo Cozumel, México.
- Naranjo, J.L., Sigurdsson, H., Carey, S.N., Fritz, W. (1986).** Eruption of the Nevado del Ruiz volcano, Colombia, on 13 November 1985: tephra fall and lahars. *Science*, 233(4767), 961-963.
- Newhall, C.G. y Punongbayan, R.S. (eds) (1997).** Fire and Mud: eruptions and Lahars of Mount Pinatubo, Philippines. Univ Washington Pr, 1126.
- Palacios, D., y Vázquez-Selem, L. (1996).** Geomorphic Effects of the Retreat of Jamapa Glacier, Pico de Orizaba Volcano (Mexico). *Geografiska Annaler. Series A, Physical Geography*, 78(1), 19-34.
- Palacios, D., Parrilla, G., y Zamorano, J.J. (1999).** Paraglacial and postglacial debris flows on a Little Ice Age terminal moraine: Jamapa Glacier, Pico de Orizaba (Mexico). *Geomorphology*, 28(1-2), 95-118.
- Rodolfo, K. S. (1989).** Origin and early evolution of lahar channel at Mabinit, Mayon Volcano, Philippines. *Geological Society of America Bulletin*, 101(3), 414-426.
- Rodríguez, E.S., Mora-González I, Murrieta-Hernández JL (2006)** Flujos de baja concentración asociados con lluvias de intensidad extraordinaria en el flanco sur del volcán Pico de Orizaba (Citlaltépetl), México. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, LVIII(2), 223-236. Sociedad Geológica Mexicana, A.C.
- Smith, G.A., Lowe, D.R. (1991).** Lahars: volcano-hydrologic events and deposition in the debris flow-hyperconcentrated flow continuum. *Sedimentation in Volcanic Settings Soc Sed Geol Spec Pub (SEPM)* 45, DOI: 10.2110/pec.91.45.0059
- Smith, G.A., Fritz, W.J. (1989).** Volcanic influences on terrestrial sedimentation. *Geology*, 17(4), 375-376.
- Sieron, K., Weissling, B., Morales-Martínez, M.A., Terán S. (2021).** Reconstruction of the upper slope conditions of an extraordinary hydro-meteorological event along the Jamapa glacier drainage system, Citlaltépetl (Pico de Orizaba) volcano, Mexico. *Frontiers in Earth Sciences*, doi: 10.3389/feart.2021.668266
- Thouret, J.C. y Lavigne, F. (2000).** Lahars: occurrence, deposits and behaviour of volcano-hydrologic flows. Volcaniclastic rocks from magma to sediments. *Gordon and Breach Science Publishers*, 151-174.
- Vallance, J. W., & Iverson, R. M. (2015).** Lahars and their deposits. In *The encyclopedia of volcanoes* (pp. 649-664). Academic Press.