



PERÚ

Ministerio  
del Ambiente



# MORFOLOGÍA DEL CRÁTER DEL VOLCÁN UBINAS Y PELIGRO INMINENTE DE COLAPSO EN SU FLANCO SUR

Informe Técnico N°001-2022/IGP CIENCIAS DE LA TIERRA SÓLIDA



Lima – Perú  
Enero, 2022

**Instituto Geofísico del Perú**

Presidente Ejecutivo: Hernando Tavera

Director Científico: Edmundo Norabuena

**Informe Técnico**

Morfología del cráter del volcán Ubinas y peligro inminente de colapso en su flanco sur  
-Región Moquegua-

**Autores:**

Katherine Vargas

John Cruz

Juan Carlos Villegas

Marco Rivera

Hernando Tavera

Este informe ha sido producido por el Instituto Geofísico del Perú  
Calle Badajoz 169 Mayorazgo  
Teléfono: 51-1-3172300

**MORFOLOGÍA DEL CRÁTER DEL VOLCÁN UBINAS Y PELIGRO  
INMINENTE DE COLAPSO EN SU FLANCO SUR**

**-Región Moquegua-**

Lima – Perú  
Enero, 2022

## **RESUMEN**

A partir de 883 imágenes obtenidas en un levantamiento aerofotogramétrico, se ha elaborado un Modelo de Elevación Digital (DEM) para el cráter y flanco sur del volcán Ubinas con una resolución de 60 cm. Analizando esta información, se ha identificado en el fondo del cráter del volcán una capa de relleno más de 100 m de espesor compuesta de cenizas, lapilli y fragmentos de lava, constituyendo un volumen de 2´640,000 m<sup>3</sup>. Con ayuda del DEM y en base al modelamiento numérico se han elaborado tres escenarios de peligro por descenso de lahares (flujos de lodo). En el escenario más frecuente, serían afectadas las vías de acceso a Ubinas, Tonohaya, Huarina, Matalaque. En otros escenarios, se suman áreas de cultivo, canales de agua, puentes peatonales, y obras de infraestructura de Tonohaya, San Miguel y Huatagua, así como la generación de derrumbes en ambas márgenes del río Ubinas, ocasionando eventualmente el represamiento del río Tambo en inmediaciones de la localidad de Huarina.

La información del DEM ha permitido identificar una zona de potencial colapso en la parte superior del flanco sur del volcán Ubinas abarcando un área de 292,000 m<sup>2</sup> y un volumen aproximado de 3.7x10<sup>7</sup> m<sup>3</sup>. De producirse un detonante, se generaría una avalancha de escombros que se emplazaría en el valle de Ubinas a lo largo de 8 km afectando a las localidades de Querapi (con población reasentada), Ubinas, Tonohaya y San Miguel.

## **CONTENIDO**

### **RESUMEN**

#### **1.- INTRODUCCIÓN**

##### **1.1.- CENVUL y desarrollo tecnológico**

#### **2.- METODOLOGÍA Y DATOS**

##### **2.1.- Vehículo aéreo no tripulado**

###### **2.1.1.- Sobrevuelos del 29 agosto, 2019**

###### **2.1.2.- Sobrevuelos del 30 agosto, 2019**

##### **2.2.- Puntos de control geodésico**

##### **2.3.- Procesamiento de datos aerofotogramétricos**

#### **3.- MODELAMIENTO DE LAHARES**

##### **3.1.- Escenario 1**

##### **3.2.- Escenario 2**

##### **3.3.- Escenario 3**

#### **4.- MORFOLOGÍA DEL VOLCÁN UBINAS**

##### **4.1.- Morfología antes del 2019**

##### **4.2.- Morfología post erupción 2019**

#### **5.- COLAPSO DEL FLANCO SUR**

##### **5.1.- Zona de potencial colapso**

##### **5.2.- Escenarios post colapso**

### **CONCLUSIONES**

### **BIBLIOGRAFÍA**

## **1.- INTRODUCCIÓN**

El volcán Ubinas se encuentra ubicado en la región de Moquegua, en el sur del Perú, y es considerado el volcán más activo del país (Thouret et al., 2005). En los últimos 500 años, ha presentado al menos 26 procesos eruptivos (Rivera et al., 2011), siendo el más reciente el iniciado el 24 de junio de 2019, con los importantes episodios explosivos del 19 de julio que generaron columnas de gases y cenizas de más de 5 km de altura sobre la cima del volcán. En este proceso, el Ubinas expulsó fragmentos de roca de hasta 6 cm de diámetro que cayeron sobre las localidades de Querapi y Ubinas, ubicadas a 4 km y 6 km del cráter del volcán, respectivamente.

Luego de un periodo de relativa calma tras el proceso eruptivo 2013–2017, el 24 de junio de 2019 el Ubinas inició un nuevo proceso eruptivo caracterizado por un notable incremento de su actividad sísmica y la emisión de gases y cenizas. Días después, a partir del 19 de julio, el Ubinas registró la ocurrencia de hasta 10 explosiones (Figura 1), seguidas de la emisión de cenizas. El 19 de julio, día de importante actividad explosiva, las cenizas emitidas fueron dispersadas por los vientos hacia los sectores sureste y este del Ubinas, afectando principalmente a poblados cercanos ubicados en el valle de Ubinas, así como zonas más distantes. Durante este proceso, se observaron la caída de fragmentos de roca de más de 2 cm de diámetro en la localidad de Ubinas; mientras que, las cenizas se dispersaron hacia zonas distantes del volcán, lo que generó afectación en varias localidades de las

regiones de Moquegua, Tacna, Puno y algunas ciudades de Bolivia como La Paz.

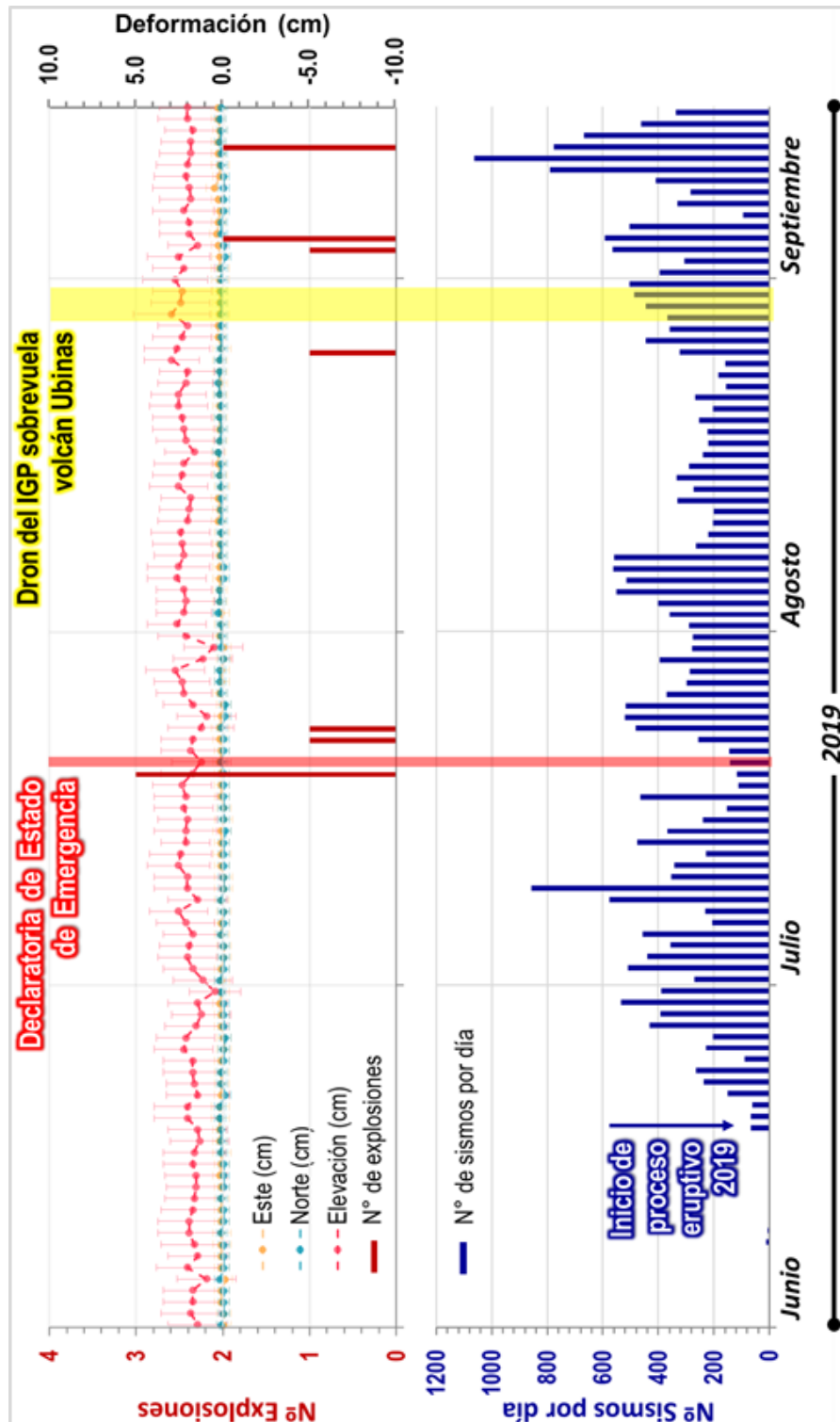


Figura 1.- Cronología del último proceso eruptivo del volcán Ubinas. El diagrama en la parte inferior muestra el histograma con el número de sismos por día. En la parte superior se muestra el número de explosiones por día, y las serie de tiempo GNSS en las componentes N-S, E-O y vertical.

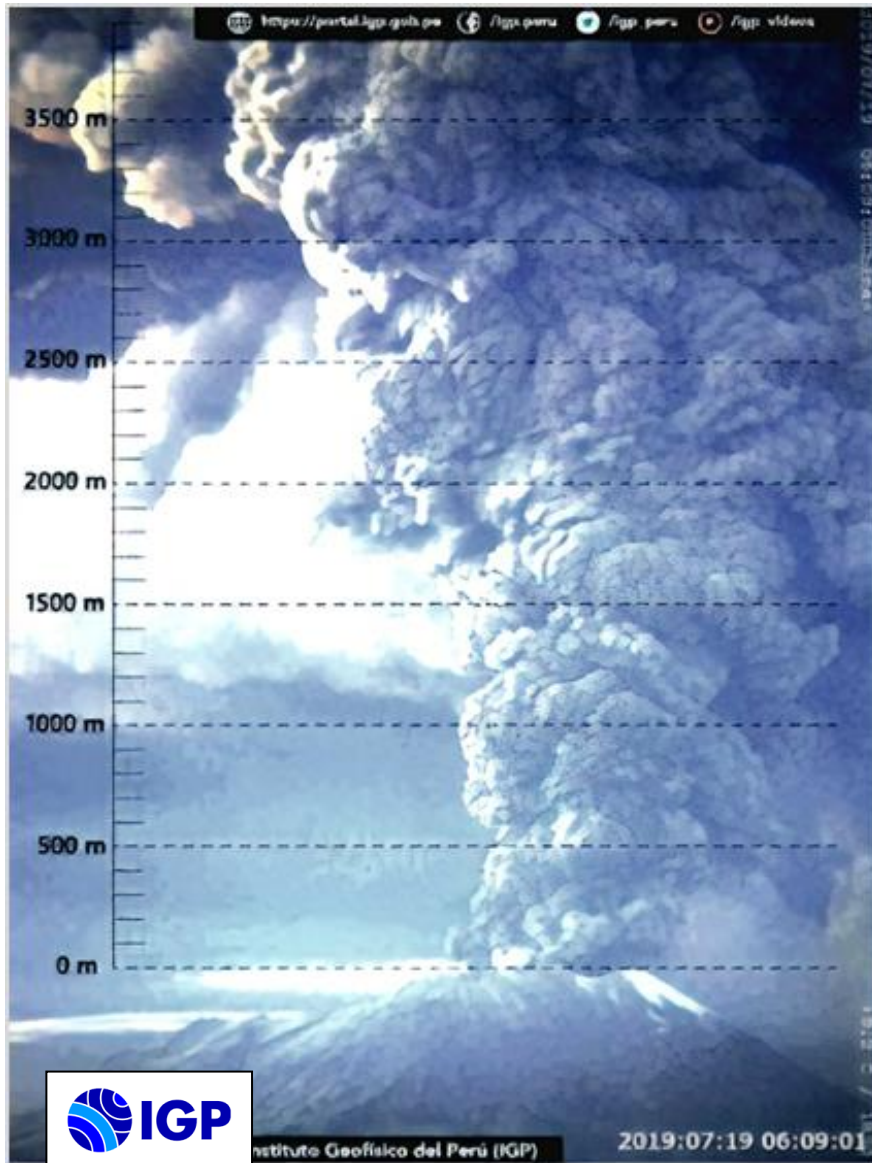


Figura 2.- Explosión del 19 de julio de 2019 del volcán Ubinas registrada por la cámara de monitoreo del IGP. La columna eruptiva alcanzó una altura superior a los 5000 m sobre la cima del volcán.

En este informe técnico-científico se presenta los resultados del análisis y cuantificación de los cambios morfológicos detectados en la superficie del cráter y caldera del volcán Ubinas, después de su erupción ocurrida en el mes de julio de 2019. Para este objetivo se hizo uso de un vehículo aéreo no tripulado (VANT), diseñado y desarrollado por el IGP, a fin de recolectar imágenes aéreas para elaborar un Modelo de Elevación Digital



(DEM) con alta resolución. Utilizando el DEM como base, se ha realizado el modelamiento numérico para generar escenarios de descenso de lahares (flujos de lodo volcánico) en el valle de Ubinas; así como la simulación del colapso de un sector del flanco sur del volcán Ubinas, el cual podría generar avalanchas de escombros y afectar poblados localizados en el valle. Los resultados obtenidos constituyen información técnico-científica que servirá para que las autoridades realicen acciones oportunas en el marco de la Gestión de Riesgo de Desastres.

### **1.1.- CENVUL y desarrollo tecnológico**

El Instituto Geofísico del Perú (IGP), ente oficial del Estado peruano para el monitoreo volcánico a través del Centro Vulcanológico Nacional (CENVUL), con sede en la ciudad de Arequipa, viene monitoreando de manera permanente, desde el año 2006, el comportamiento dinámico del volcán Ubinas. Numerosos datos registrados por diversos instrumentos instalados estratégicamente en los alrededores del macizo son transmitidos en tiempo real hacia el CENVUL. Estos datos son procesados, analizados y difundidos mediante alertas, boletines e informes vulcanológicos al Centro de Operaciones de Emergencia Nacional (COEN), a los gobiernos regionales y locales, además del público en general.

El IGP, realiza a través del CENVUL el monitoreo de 12 volcanes activos y potencialmente activos mediante la evaluación de datos sismo-

volcánicos, datos geodésicos registrados por instrumentos GNSS y de sensores remotos, que incluyen el análisis de imágenes captadas con dron y anomalías térmicas captadas por satélites.

Asimismo, como parte del importante desarrollo tecnológico que se realiza en el IGP, se ha diseñado y construido Vehículos Aéreos No Tripulados (VANT) o drones (ala fija y multirotor) con la capacidad de sobrevolar alturas por encima de los 6000 m s. n. m. y estar equipados con cámaras y sensores digitales de registro térmico y gases. Estos drones han realizado sobrevuelos en el volcán Ubinas en 2016, en el Sabancaya en 2018 y en el Misti en 2019 y registrado imágenes que han permitido realizar DEM de alta resolución que han servido para evaluar el estado situacional de los volcanes.

A diferencia de los anteriores procesos eruptivos que se manifestaban de forma gradual en el tiempo, la erupción del volcán Ubinas en 2019 se caracterizó por el incremento rápido de la actividad sísmica y la subsecuente ocurrencia de grandes explosiones, con la eyección de fragmentos de roca de tamaño lapilli que cayeron a distancias superiores a los 6 km y cenizas que fueron dispersados a más de 250 km del volcán. Debido a estas manifestaciones, el IGP consideró importante programar una campaña de adquisición de información aerofotogramétrica del volcán Ubinas, con la finalidad de evaluar el estado actual del volcán, así como caracterizar los peligros asociados a su actual actividad.

## **2.- METODOLOGÍA Y DATOS**

Los Modelos de Elevación Digital de terreno con alta resolución son contruidos también a través de técnicas de fotogrametría. El principio básico de la fotogrametría consiste en obtener 2 fotografías aéreas verticales sucesivas que enfocan un punto común del terreno; a partir de la restitución de los haces de proyección y con base en un eje de referencia relativo, se puede determinar las coordenadas del punto. La aplicación de esta técnica en el monitoreo de volcanes ha demostrado ser muy eficiente, ya que ha permitido obtener resultados con alto nivel de detalle y precisión que han servido para detectar cambios morfológicos en macizos volcánicos (Diefenbach et al., 2012).

A continuación, se detalla el proceso de adquisición de fotografías e imágenes con ayuda del dron desarrollado por el IGP, así como el procedimiento seguido para la corrección de las imágenes utilizadas para la obtención del Modelo de Elevación Digital (DEM), para la simulación del descenso de lahares y el descenso de una avalancha de escombros por el flanco sur del volcán Ubinas.

### **2.1.- Vehículo aéreo no tripulado**

El vehículo aéreo no tripulado desarrollado por el IGP consiste en un dron tipo “Skywalker X8” que lleva incorporado 2 cámaras GoPro modelo

HERO4 (Silver y Black) (Figura 3). La realización del plan de vuelo se efectuó en gabinete haciendo uso del software libre Mission Planner, permitiendo establecer y configurar parámetros como la ruta de desplazamiento del dron, su altura, velocidad, potencia del motor, tasa de muestreo de adquisición de imágenes, porcentaje de traslape y los puntos de despegue y aterrizaje del dron, entre otros. Asimismo, para el despegue y aterrizaje se tuvo en cuenta la orientación y velocidad promedio del viento, el tiempo de duración estimado de las baterías y un modelo digital con información de la topografía regional del área del volcán Ubinas.



*Figura 3.- Vehículo aéreo no tripulado "Skywalker X8" desarrollado e implementado por el IGP.*

Considerando las áreas de investigación y los parámetros antes mencionados, se establecieron 6 planes de vuelo, realizados los días 29 y 30 de agosto de 2019. La adquisición de fotografías, para el primer y segundo día, se realizó en intervalos de entre 1 y 5 segundos. En la Figura 4 se muestran los puntos de despegue y aterrizaje del dron, así como las

trayectorias de los sobrevuelos realizados en el sector del cráter y el flanco sur del volcán Ubinas.

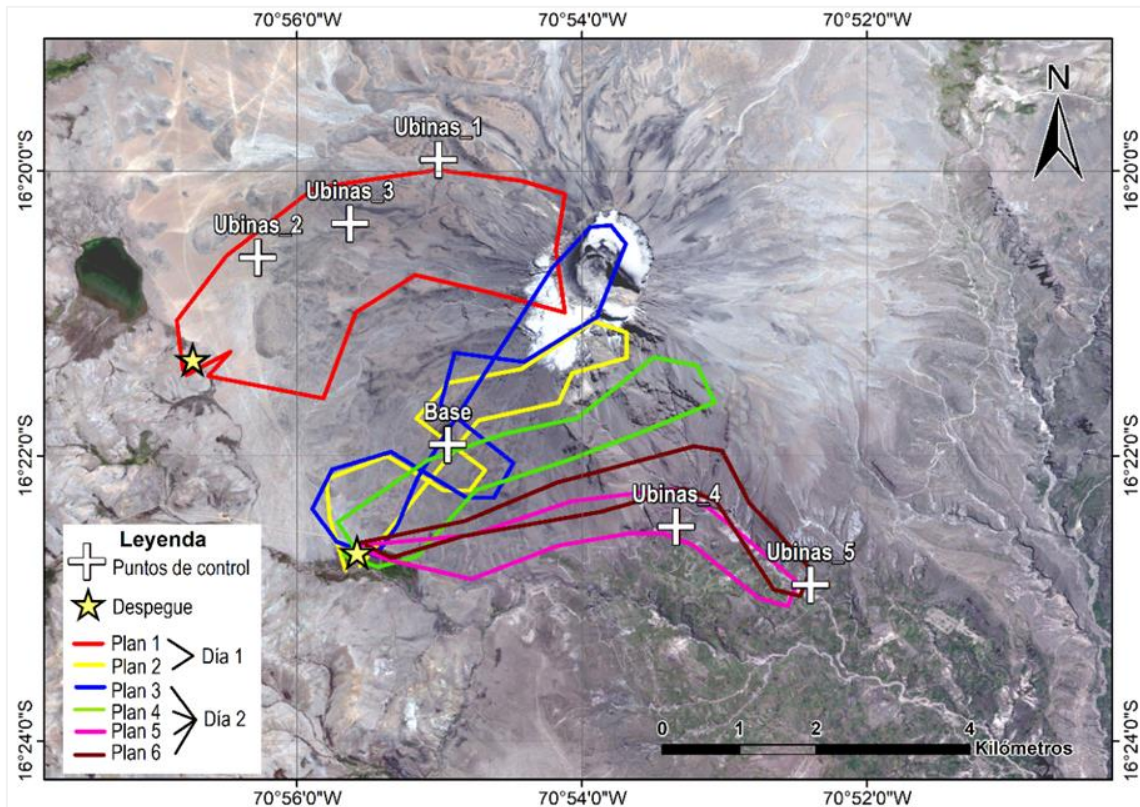


Figura 4.- Mapa que muestra las trayectorias de los 06 planes de vuelo (polígonos ejecutados) y ubicación de los 05 puntos de control (cruces). Los sobrevuelos cubren principalmente la zona del cráter y los flancos sur y oeste (zona de despegue).

### 2.1.1.- Sobrevuelos del 29 de agosto, 2019

Se programaron y realizaron 2 sobrevuelos con las siguientes características:

- Plan de vuelo 1: En este plan de vuelo se tomaron imágenes del área donde se instalaron los puntos de control GPS (puntos Ubinas 1, 2 y 3), todos ubicados en el sector noroeste del volcán.

- Plan de vuelo 2: Incluye el flanco sur del volcán Ubinas y la parte superior de la quebrada Volcanmayo. Además, se logró registrar el punto de control base instalada en el flanco suroeste del volcán (Figura 4).

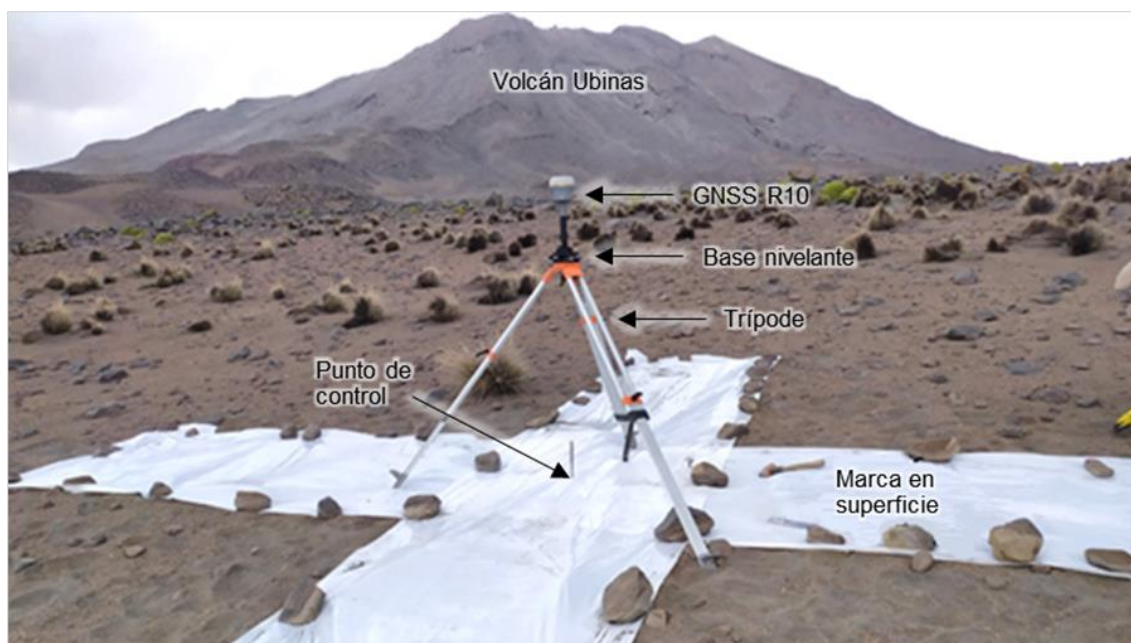
### **2.1.2. - Sobrevuelos del 30 de agosto, 2019**

Se programaron y realizaron 4 sobrevuelos con las siguientes características:

- Plan de vuelo 3: En este plan de vuelo se realizó la toma de imágenes del cráter y el punto de control instalado en el flanco suroeste del volcán (Figura 4).
- Plan de vuelo 4: Se tomó imágenes del curso medio y superior de la quebrada Volcanmayo (Figura 4).
- Plan de vuelo 5: En este plan se realizó sobrevuelos en la parte inferior de la quebrada Volcanmayo para registrar los puntos de control Ubinas 4 y 5 (Figura 4).
- Plan de vuelo 6: El sobrevuelo se realizó en la parte inferior de la quebrada Volcanmayo, específicamente sobre el flanco este del volcán con el objetivo de registrar el punto de control Ubinas 5 (Figura 4).

## 2.2.- Puntos de control geodésico

Previo al sobrevuelo de drones se realizó la instalación y medición de 1 base y 5 de puntos de control geodésico, en el entorno del volcán Ubinas (Figuras 4 y 5); usando instrumentos GNSS en modo RTK (Cinemático en Tiempo Real). Esta técnica permite contar con puntos de referencia precisos y cuyas coordenadas permitirán corregir las fotografías aéreas y obtener un modelo georreferenciado de alta precisión. Cada punto de control fue debidamente señalado sobre el terreno (Figura 5), de modo que dichos puntos fueran lo suficientemente visibles en las fotografías aéreas.



*Figura 5.- Punto de control geodésico Ubinas-1 ubicado al oeste del volcán Ubinas. Se muestra el instrumento GNSS móvil con el cual se realizó la medición de las coordenadas del eje central o punto de control.*

En total, se consideraron 5 puntos de control sobre 2 zonas: la primera en el sector oeste del volcán, ya que desde allí se realizaron los

despegues; y la segunda en la parte baja de la quebrada Volcanmayo, en el flanco sur (Tabla 1).

Tabla 1. Coordenadas geográficas WGS84 de puntos de control instalados en los alrededores del volcán Ubinas.

Código	Coord. Geográficas		Elevación
	Latitud	Longitud	
Base	-16.3654	-70.9157	4669.3
Ubinas_1	-16.3320	-70.9168	4873.4
Ubinas_2	-16.3435	-70.9380	4594.8
Ubinas_3	-16.3395	-70.9271	4790.9
Ubinas_4	-16.3750	-70.8890	4055.6
Ubinas_5	-16.3817	-70.8733	3566.4

### 2.3.- Procesamiento de datos aerofotogramétricos

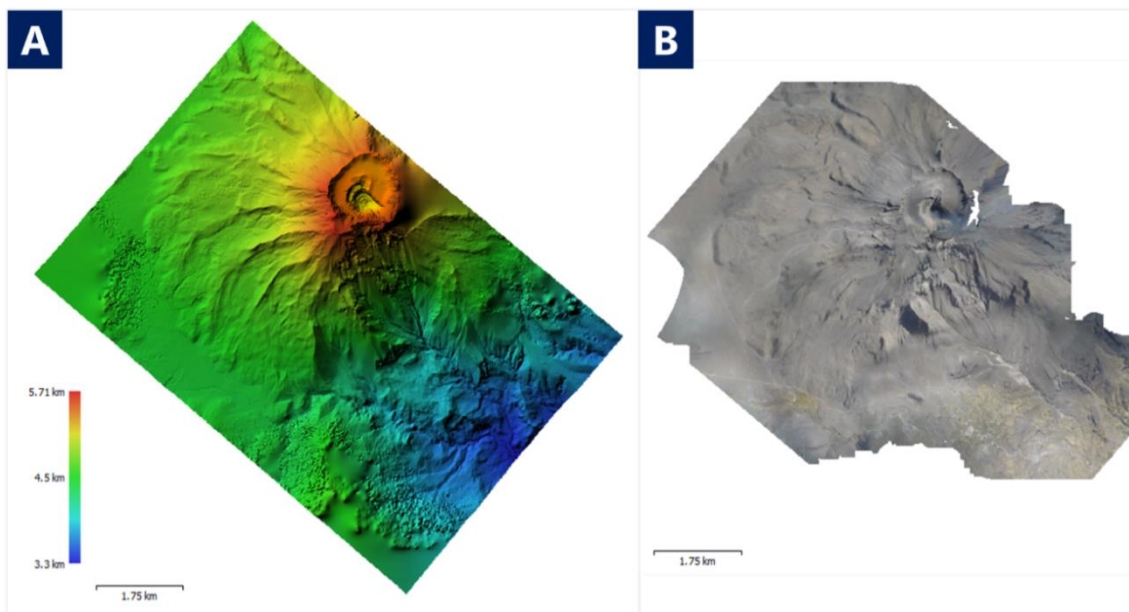
Para la generación del Modelo Digital de Elevación (DEM) de alta resolución se utilizó el software Agisoft Metashape, el cual permite crear un contenido de alta calidad con base en el alineamiento de imágenes utilizando la tecnología multivisor de reconstrucción 3D. Los datos de entrada fueron las 883 imágenes recolectadas durante el levantamiento aerofotogramétrico y para la reducción de errores y proyección precisa de la nube de puntos, se llevó a cabo la corrección y ajuste de imágenes utilizando las coordenadas de los seis puntos de control GPS establecidos en el terreno (Figura 5, Tabla 1). Como resultado, se generó una nube de puntos georreferenciados a partir de la cual se texturiza la superficie del terreno digitalizado de alta resolución, constituyendo de este modo, información



precisa para el análisis e interpretación de la morfología de la superficie del volcán Ubinas.

Finalmente, en base en las aerofotografías tomadas en campo, se ha construido un Modelo Digital de Elevación de 60 cm de resolución para el área del cráter y flanco sur del volcán Ubinas, siendo sus características las siguientes:

- *El DEM comprende cotas máximas de 5000 a 5710 m s. n. m.*
- *El tamaño obtenido fue de 19 555 x 19 121 pixel, proyectados en el sistema de coordenadas WGS 84/UTM, zona 19S (EPSG: 32719).*



*Figura 6.- A) Modelo Digital de Elevación (DEM) con 60 cm de resolución. B) Imagen ortomosaico con 16 cm de resolución (derecha).*

Con el DEM obtenido, se realizaron los cálculos de medida de distancias, curvas de nivel y volúmenes, tal como se muestra en la Figura 6A. Asimismo, se construyó una imagen ortomosaico con una resolución de 16 cm y un tamaño de 39 967 x 38 927 m. Esta imagen permitirá realizar estudios posteriores para la identificación de estructuras como fallas, fracturas y diversos tipos de depósitos volcánicos generados por erupciones, etc. (Figura 6B).

### **3.- MODELAMIENTO DE LAHARES**

En temporada de lluvias (diciembre-marzo), es frecuente el desarrollo de lahares en cada una de las quebradas que rodean al volcán Ubinas. En los últimos años, han sido importantes los lahares encausados en la quebrada Volcanmayo y el valle de Ubinas (Del Carpio et al., 2016b). Por ejemplo en febrero de los años 2015 y 2016, los lahares afectaron áreas de cultivo, vías de acceso y canales de irrigación.

Para conocer las características de los posibles lahares a discurrir por el valle de Ubinas, se procedió a realizar el modelamiento numérico de lahares utilizando el software LAHARZ (Schilling, 1998). Dadas las condiciones de contorno, este algoritmo permite generar el área que puede ser afectada por lahares, calcular las zonas de mayor y menor peligro, y estimar posibles zonas de inundación a diferentes distancias según el volumen de agua de descarga. Los datos de entrada a considerarse son: un DEM de alta resolución, el volumen del líquido, los puntos de inicio calculados a partir de la zona proximal, las zonas de drenaje, etc. Esta información es determinada a partir del cartografiado geológico, morfológico y de los volúmenes de precipitación registrados por las estaciones meteorológicas e información histórica de eventos pasados.

Para el modelamiento numérico de lahares en el entorno del volcán Ubinas se tomó en cuenta la metodología basada en el volumen de las

precipitaciones según los datos de 5 años de la estación meteorológica Ubinas (SENAMHI), el estudio del lahar ocurrido en el 2016 en el valle de Ubinas (Mariño et al., 2017) y los estudios geológicos disponibles para la zona (Rivera et al., 2011; Thouret et al., 2005). Asimismo, se utilizó el DEM de alta resolución generado por el IGP (resolución 0.6 m) y un DEM ALOS PALSAR de 12.5 m de resolución.

En este estudio el modelamiento numérico de lahares fue realizado para 03 escenarios diferentes, los dos primeros consideran los volúmenes de precipitación que generaron lahares en los años 2007, 2015 y 2017; y el tercero, considera un volumen excepcional de precipitación que podría presentarse en situación extrema (Thouret et al., 2005). Considerando la información histórica y el DEM obtenido en este estudio, se ha realizado simulaciones numéricas de ocurrencia de lahares en el valle de Ubinas considerando tres escenarios:

- Escenario 1: el más recurrente, considera flujos de lahares con un volumen de 111,000 m<sup>3</sup>
- Escenario 2: poco frecuente, considera flujos de lahares un volumen de 600,000 m<sup>3</sup>
- Escenario 3: evento extremo, muy poco frecuente, considera flujos de lahares un volumen de 1'200,000 m<sup>3</sup>.

### **3.1.- Escenario 1**

El volumen del flujo considerado en este escenario (111,000 m<sup>3</sup>), está asociado a una precipitación moderada, pero continua, que puede ocurrir en la parte alta de la quebrada Volcanmayo principalmente entre los meses de diciembre a marzo. Ese volumen de flujo es consistente con el valor promedio calculado a partir del cartografiado del lahar ocurrido en el año 2016 (Mariño et al., 2017).

De producirse este lahar, los daños se presentarían en las vías de acceso al poblado de Ubinas-Huarina-Matalaque, principalmente en el tramo que corresponde a la quebrada Volcanmayo, próxima al poblado de Tonohaya. Este escenario es considerado el más probable y recurrente a ocurrir (Figura 7, áreas de color rojo).

### **3.2.- Escenario 2**

El volumen del flujo de lahar considerado en este escenario (600,000 m<sup>3</sup>) corresponde a una precipitación máxima a registrarse en la zona del volcán Ubinas. Este lahar tendría mayor distancia de recorrido y además de afectar las vías de acceso antes mencionadas, abarcaría áreas de cultivo, canales de agua, etc. Asimismo, puede generar derrumbes y erosión de laderas en ambas márgenes del río Ubinas. Un lahar de estas características tiene gran posibilidad de ocurrencia, debido a que considera precipitaciones

máximas que darían lugar al emplazamiento de mayores volúmenes de agua (Figura 7, áreas de color naranja).

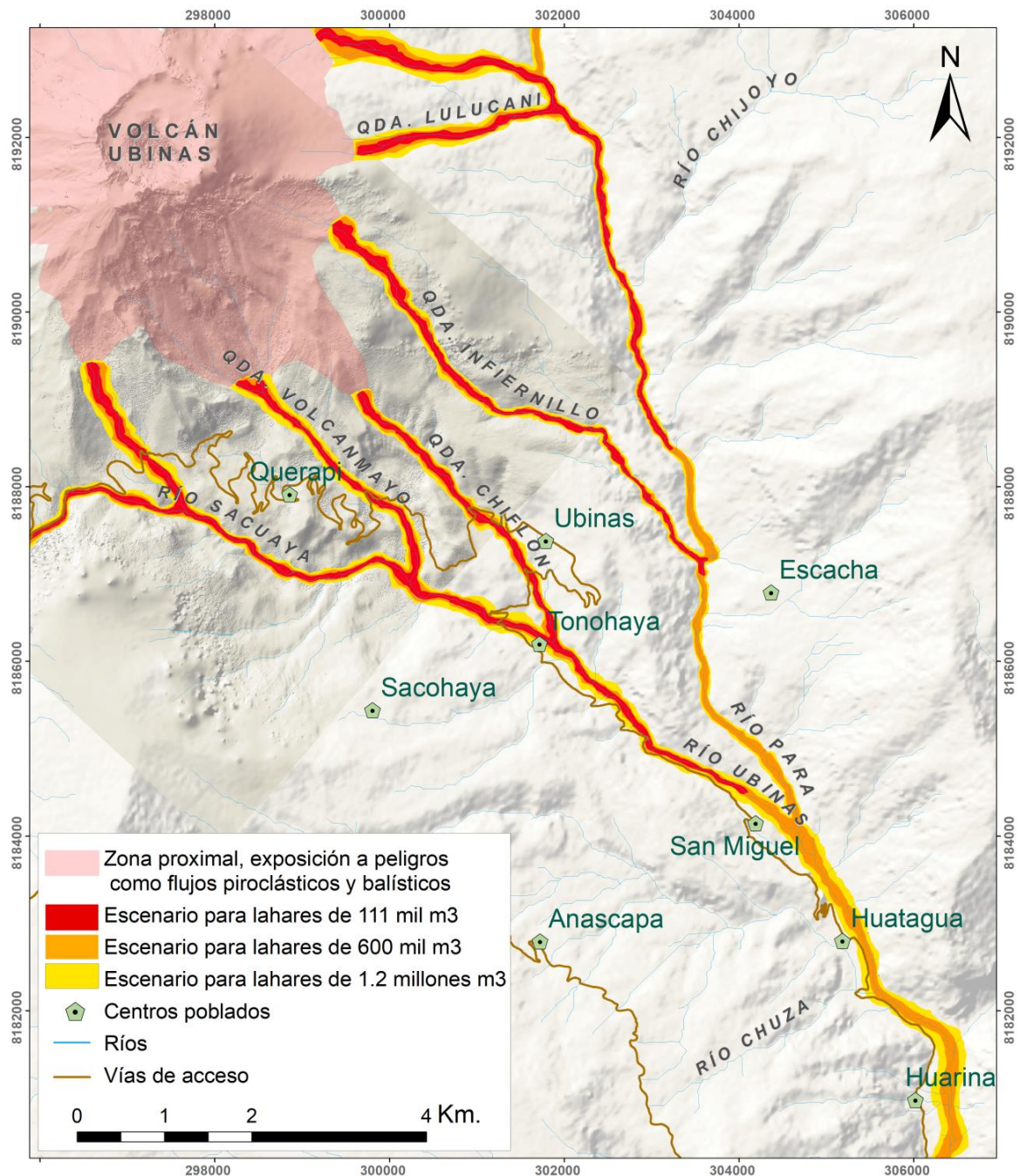


Figura 7.- Mapa de escenarios por descenso de lahares del volcán Ubinas, basados en eventos anteriores, estudios geológicos y registros de precipitación en los últimos años.

### **3.3.- Escenario 3**

El volumen del flujo considerado en este escenario ( $1 \cdot 200,000 \text{ m}^3$ ), puede ser generado por una precipitación máxima o extrema, tal como sugiere Thouret et al. (2005) o a la ocurrencia de una importante erupción explosiva, de tipo vulcaniana, subpliniana o pliniana del volcán Ubinas. En este caso, las áreas afectadas serían mayores, ya que involucraría al río Tambo (a más de 50 km de distancia) que podría ser represado en inmediaciones de la localidad de Huarina. Este escenario es poco probable y tiene un bajo grado de recurrencia (Figura 7, áreas de color amarillo).

## **4.- MORFOLOGÍA DEL VOLCÁN UBINAS**

El análisis detallado de los DEM del volcán Ubinas ha permitido observar cambios significativos en su morfología post erupción de julio de 2019 y sus características más importantes se describen a continuación.

### **4.1.- Morfología antes del 2019**

En la cima del volcán Ubinas se distingue la caldera, la cual contiene en su interior el cráter activo y un cono extenso de cenizas que se ubican en los sectores sureste y norte del volcán, respectivamente (Figura 8). Según Thouret et al. (2005), esta caldera es producto de al menos 2 grandes erupciones explosivas de tipo pliniana ocurridas entre los 14,000 y 1,000 años antes del presente, ligadas posiblemente a un colapso semivertical de tipo embudo. El cráter es de forma semicilíndrica y tiene una profundidad aproximada de 200 m. Hacia el fondo del cráter se encuentra el ventu u orificio activo por donde actualmente el volcán emana gases y productos volcánicos. Los bordes del cráter son subverticales y están constituidos por lavas hidrotermalizadas (Figura 8) que, a la vez, se hallan cubiertas por depósitos de cenizas y lapilli de colores ocre y gris estratificadas en capas con espesores de hasta 22 m (Rivera et al., 2011). Hacia el pie de los bordes de la caldera yacen taludes de escombros conformados por bloques de roca y ceniza retrabajada producto de la erosión y desprendimiento de los depósitos.



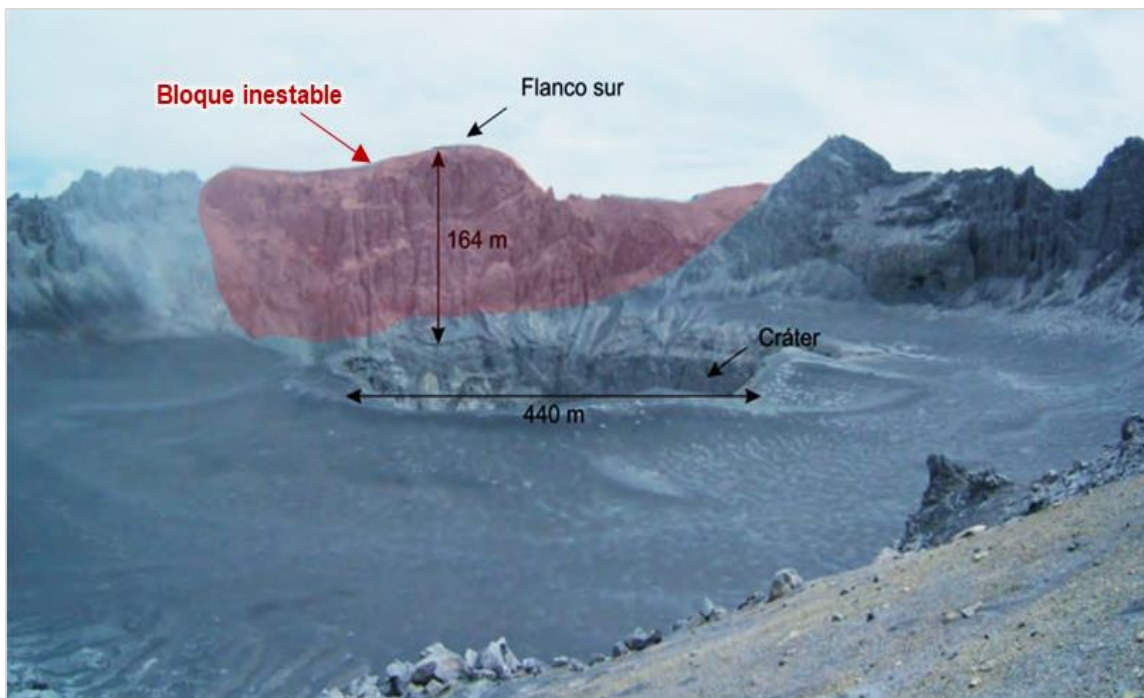


Figura 8.- Vista de la caldera del volcán Ubinas desde el sector noreste. El cráter está localizado al extremo sureste. Se resalta en rojo el bloque de gran tamaño propenso a derrumbarse. Foto tomada en junio de 2008 (Rivera et al., 2011).

En las imágenes satelitales Planet de los años 2016 al 2019 (Figura 9), se logra distinguir variaciones en la morfología del cráter del volcán Ubinas:

- En el año 2016 (Figura 9A), se observa que en el interior del cráter existen lavas hidrotermalizadas cubiertas con material de relleno (ceniza, lapilli, bloques, etc.), con las mismas características hasta el año 2017 (Figura 9B).
- La imagen del año 2018 muestra que el espesor de este relleno es menor (Figura 9C), pero que aumenta considerablemente de volumen en el año 2019 (Figura 9D), lo que llevó a pensar que se trataría del emplazamiento de un domo de lava, razón por la cual se optó en realizar un sobrevuelo de drones para descartar dicha hipótesis.

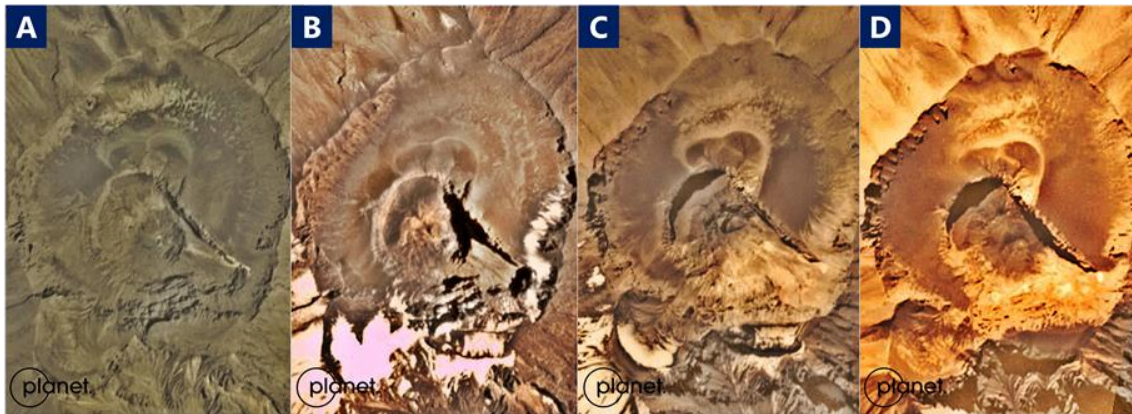


Figura 9.- Secuencia de imágenes satelitales PlanetView del cráter del volcán Ubinas para los años A) 2016, B) 2017, C) 2018 y D) 2019.

#### 4.2.- Morfología post erupción 2019

Para analizar los cambios morfológicos ocurridos en la superficie del cráter del Ubinas después de la última actividad eruptiva del año 2019, se realizó la comparación entre el DEM obtenido en el año 2016 que tiene una resolución de 0.8 m (Figura 10A) y el DEM obtenido en este estudio con una resolución de 0.6 m (Figura 10B). Es importante señalar, que en el proceso eruptivo de los años 2016 al 2017, el volcán Ubinas presentó hasta 6 explosiones. Posteriormente, durante el proceso eruptivo del año 2019, ocurrieron 6 explosiones previas al sobrevuelo efectuado en agosto de ese año.

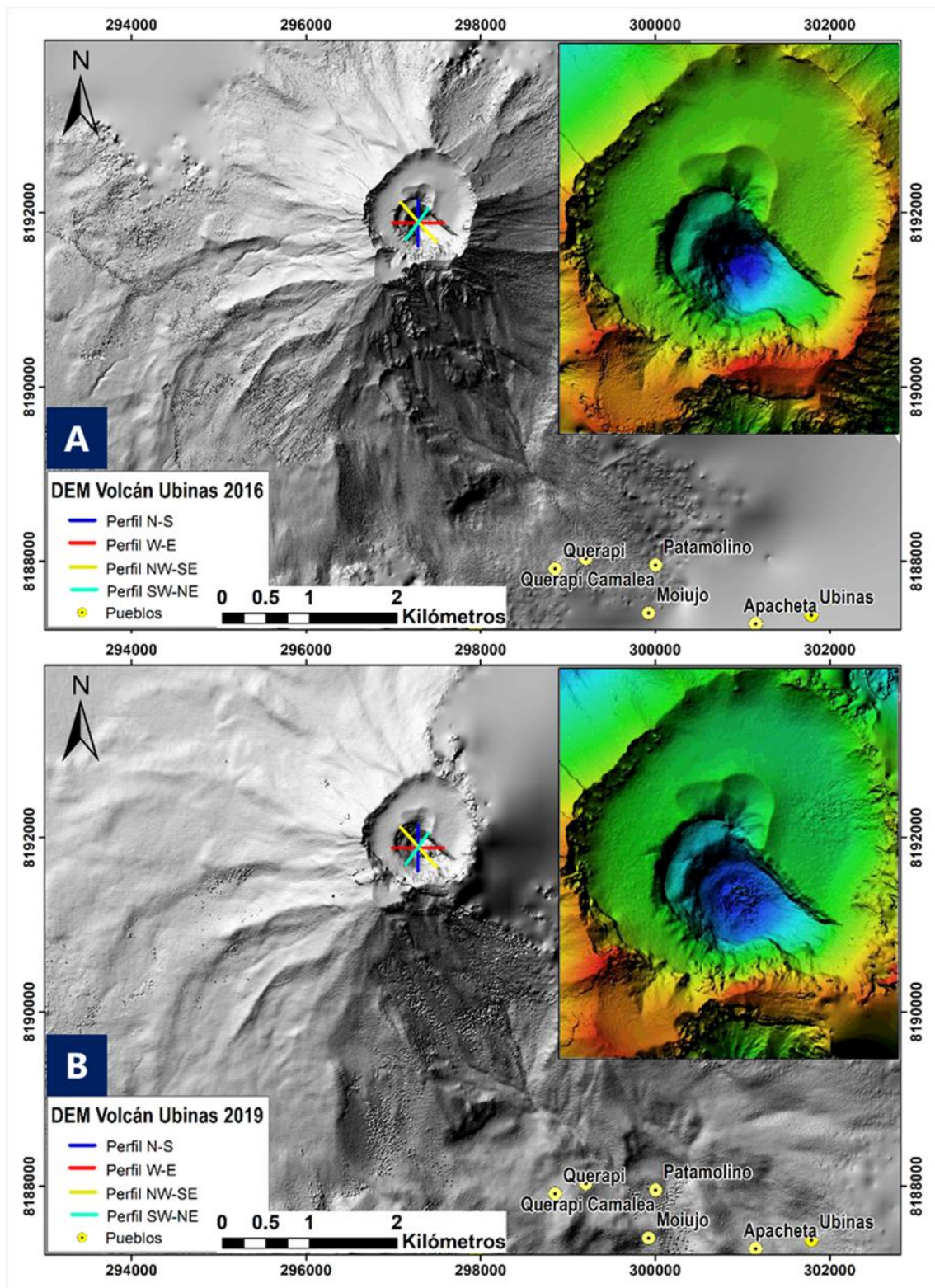


Figura 10.- a) Modelos de Elevación Digital (DEM) del volcán Ubinas obtenidos con técnicas de aerofotogrametría: a) DEM obtenido a partir del sobrevuelo de dron en 2016 con resolución de 0.8 m; y b) DEM obtenido en 2019 con resolución de 0.6 m.

En el extremo superior derecho de las Figuras 10A y 10B se presentan los DEM obtenidos para el volcán Ubinas en los años 2016 y 2019, respectivamente. En el DEM de 2019 (Figura 10A), se observa que en el fondo del cráter existe un considerable volumen de material de relleno respecto al DEM de 2016. Asimismo, en el DEM del 2016 se observa que el cráter presenta una forma cóncava. Para analizar a detalle las variaciones en la morfología del cráter del volcán Ubinas entre los años 2016 y 2019, se elaboraron perfiles en dirección norte-sur, oeste-este, noroeste-sureste y suroeste-noreste del volcán, tal como se muestra en la Figura 11, siendo sus características las siguientes:

- El perfil N-S para el año 2016 (Figura 11A), en el eje de distancia entre los 250 m y 550 m, el cráter del volcán presenta una superficie cóncava profunda (línea discontinua); mientras que, para el año 2019 es de forma semiplana (línea continua). Esta notoria diferencia estaría asociada a un posible relleno del fondo del cráter con ceniza, lapilli y fragmentos de lava formando una capa de hasta 100 m de espesor.
  
- En el perfil W-E (Figura 11B), también se observa el mismo patrón: una zona cóncava de mayor profundidad en el año 2016 (línea discontinua) y luego con una capa de relleno de aproximadamente 110 m de espesor para el año 2019 (línea continua).

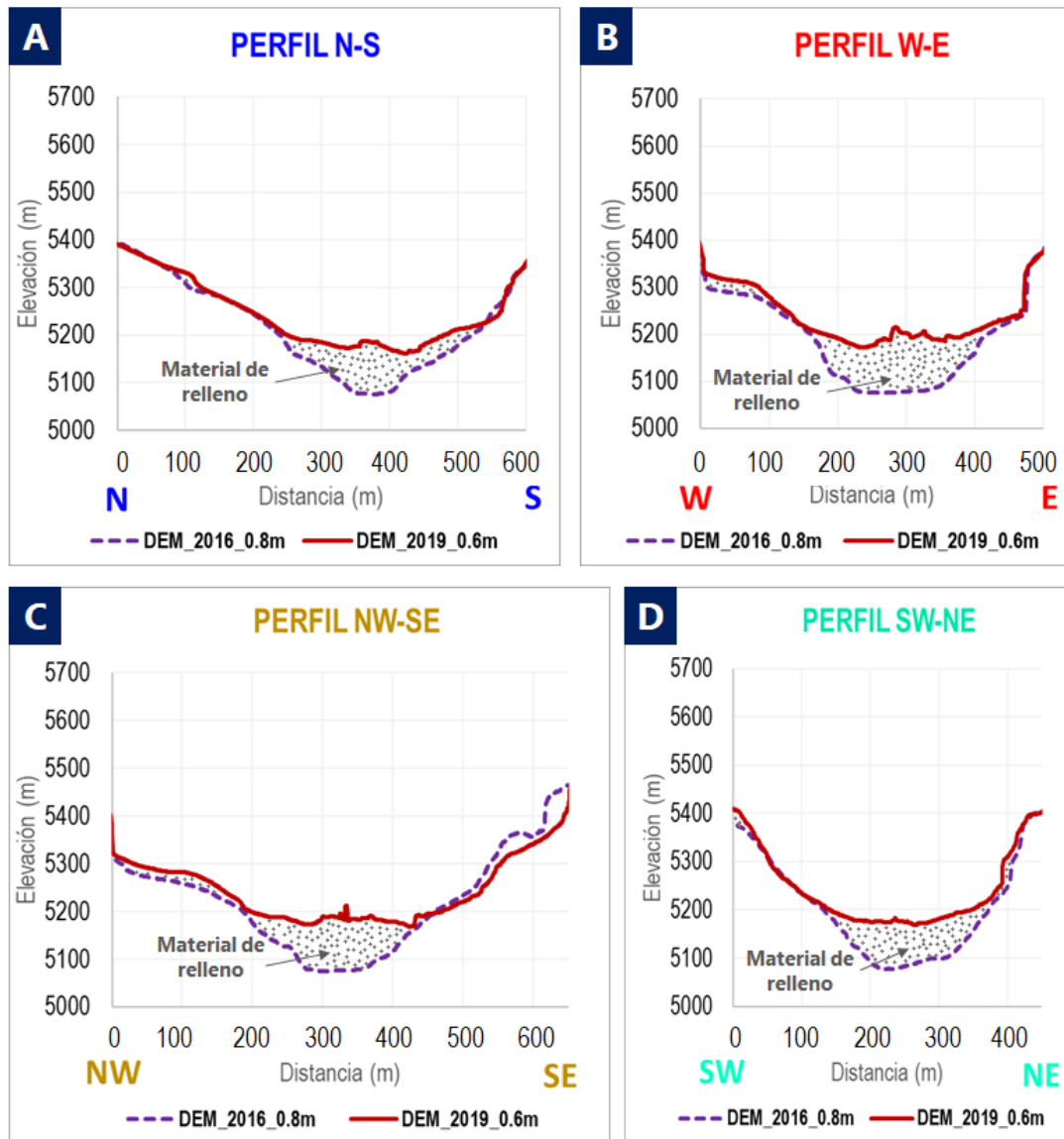


Figura 11.- Comparación entre los perfiles de los años 2016 y 2019 trazados en el cráter del volcán Ubinas: A) norte-sur, B) oeste-este, C) noroeste-sureste y D) suroeste-noreste.

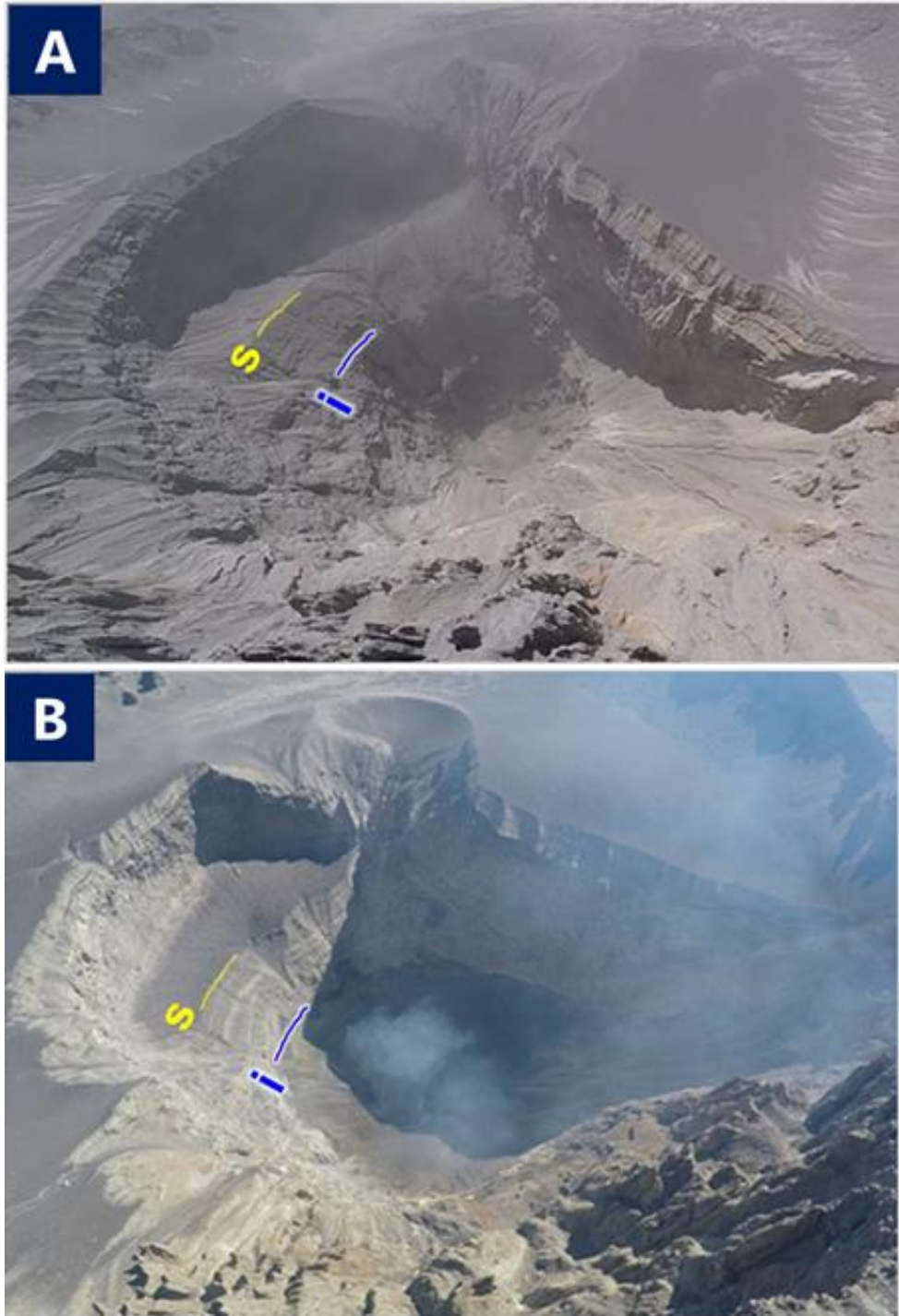
- En el perfil NW-SE (Figura 11C), se observa las mismas características descritas para los anteriores perfiles, pero en este caso la capa de relleno tendría un espesor de 100 m.
- En el perfil SW-NE (Figura 11D), se observa las mismas características descritas para los anteriores perfiles, pero en este caso la capa de relleno tendría un espesor de 90 m.

De acuerdo a este análisis, se estima que dentro del cráter del volcán Ubinas post erupción del año 2019, se ha acumulado un volumen aproximado de 2´640,000 m<sup>3</sup> de material de relleno con un espesor promedio de 100 m.

Asimismo, en la Figura 12 se realiza la comparación de la morfología del cráter del volcán Ubinas utilizando 02 fotografías tomadas con drones en los años 2016 (Figura 12A) y 2019 (Figura 12B). En esta figura y en ambas fotografías se ha resaltado con una línea amarilla el límite superior “s” de la pared NO del cráter, así como el límite inferior “i” con una línea de color azul. Por debajo del límite inferior, en la Figura 12A, se observa la zona cóncava identificada en los perfiles; mientras que, en la Figura 12B se observa el material de relleno. Además, en la Figura 12B se aprecia que la pared sur del cráter se encuentra alterada e hidrotermalizada y cuyo desgaste o erosión puede inducir el desprendimiento de esta zona.

A pesar de que el volcán Ubinas ha tenido una erupción explosiva importante en el año 2019, la morfología del cráter no ha presentado variaciones importantes. Sin embargo, el Ubinas en el futuro puede presentar una erupción más violenta (por ejemplo, con Índice de Explosividad Volcánica 3 o 4) que puede generar el emplazamiento de un mayor volumen de material volcánico que puede depositarse en el cráter o generar el colapso de las paredes internas del cráter o caldera cuyos

materiales impedirían la salida libre de los productos expulsados durante dicha erupción volcánica.



*Figura 12.- Comparación entre dos fotografías del cráter del volcán Ubinas adquiridas con drones: A) 2016 y B) 2019.*

## **5.- COLAPSO DEL FLANCO SUR**

El volcán Ubinas presenta en su flanco sur una morfología característica de colapsos (caldera de avalancha en forma de herradura), debido a que este flanco ha colapsado al menos dos veces durante la historia evolutiva. Este tipo de fenómeno ha podido tener diferentes detonantes, por ejemplo, la ocurrencia de ascenso de gran cantidad de magma, crecimiento de un domo de lava, un sismo de gran magnitud, etc. En general, el colapso del edificio volcánico o de la pared sur puede estar acompañado y/o seguido por actividad magmática, es decir, por una erupción explosiva, así como por lahares que pueden descender por las quebradas o valles que drenan de un volcán.

De acuerdo a Thouret et al., (2005), la avalancha de escombros más reciente en el volcán Ubinas habría ocurrido hace 3600 años antes del presente y arrastró material a la base del volcán con alturas de hasta 1000 m. Estudios efectuados por Rivera et al. (2011) describen que estas avalanchas se encuentran depositadas al pie del flanco sur del edificio volcánico, a 4.5 km al sureste del cráter, sobre las cuales se asienta el poblado de Querapi, cuyos pobladores en parte han sido reasentados en Pampas de Jaguay (Moquegua). Estas avalanchas poseen un volumen aproximado de 0,8 km<sup>3</sup>.



En la actualidad, el flanco sureste del volcán Ubinas está inestable por tres razones: (1) presenta fuertes pendientes ( $>70^\circ$ ) y mide entre 1,2 a 1,4 km de altura, (2) se encuentra alterado e hidrotermalizado y (3) muestra una red de fracturas verticales y dos fallas de rumbos  $30^\circ$  y  $35^\circ$  NO (Rivera et al., 2011).

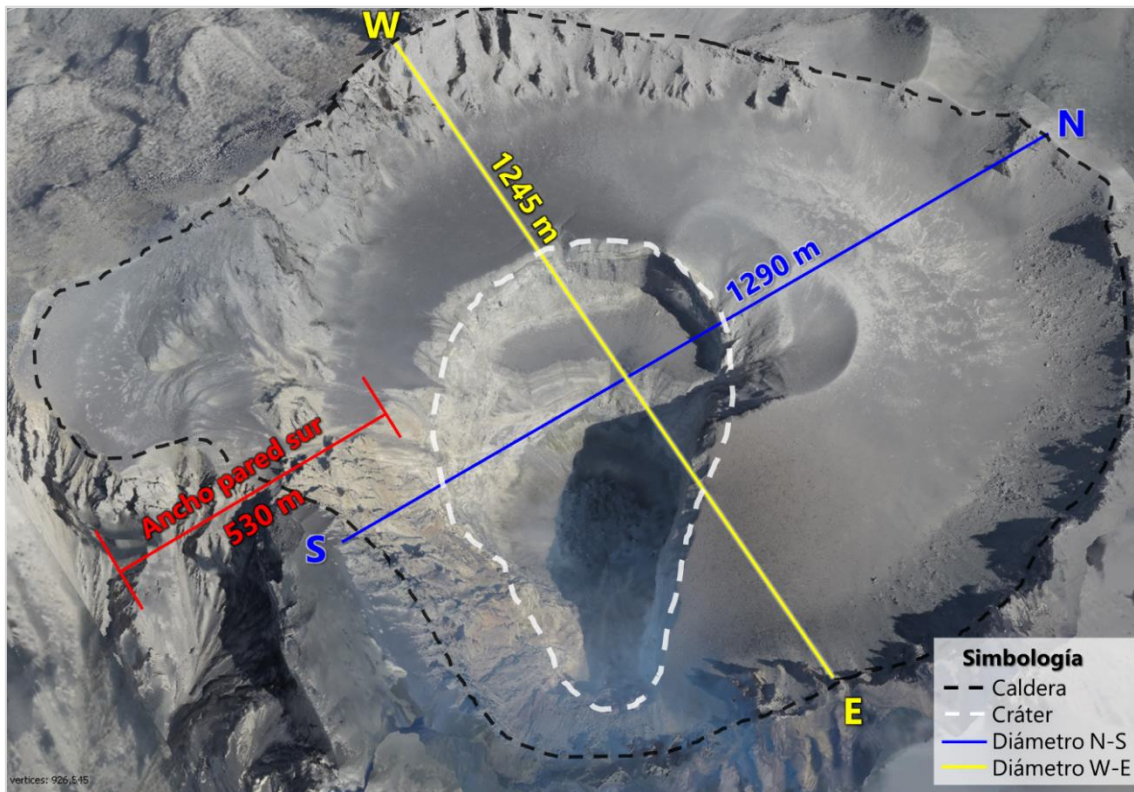


Figura 13.- Imagen 3D de la zona de la caldera y cráter del volcán Ubinas obtenida a partir de levantamiento fotogramétrico realizado en agosto de 2019.

En este estudio, el DEM obtenido para el volcán Ubinas ha permitido reconstruir en 3D la morfología de la caldera y cráter del volcán Ubinas a fin de observar en detalle sus características, así por ejemplo (Figura 13):

- El diámetro norte-sur es de  $\sim 1290$  m (línea de color azul)
- El diámetro oeste-este de  $\sim 1245$  m (línea de color amarillo).

- La línea discontinua de color blanco representa la longitud del cráter, calculada en  $\sim 1950$  m, con una profundidad promedio de  $\sim 200$  m desde la base de la caldera.
- El ancho de la pared sur (representado con líneas de color rojo) es de  $\sim 530$  m.

### **5.1.- Zona de potencial colapso**

El flanco sur del volcán Ubinas es una zona que ha sido afectada anteriormente por al menos dos colapsos de flanco (Rivera et al., 2011). Esta zona tiene una forma triangular con aproximadamente 750 m de largo y 460 m de ancho, cubriendo un área irregular de  $292,000 \text{ m}^2$  y un volumen de  $3.7 \times 10^7 \text{ m}^3$  (Figura 14A). Por otro lado, el perfil A–A' (Figura 14A, inferior izquierda) se inicia desde el interior del cráter, atraviesa la pared sur de la caldera y la zona de potencial colapso (sombreado de color rojo). Esta zona inestable se inicia con una pendiente pronunciada de aproximadamente  $70^\circ$  y luego continúa con una pendiente de  $45^\circ$ . En la parte superior de esta zona sobresale un apilamiento de lavas en forma de "domo", con un volumen aproximado de  $6'840,000 \text{ m}^3$  que incrementa el riesgo de colapso (Figura 14B).

Ante una eventual erupción explosiva violenta del volcán Ubinas, el área de potencial colapso generaría productos (fragmentos de roca, bloques,

etc.) que descenderían por la quebrada Volcanmayo hacia el valle de Ubinas, afectando a los centros poblados ubicados valle abajo.

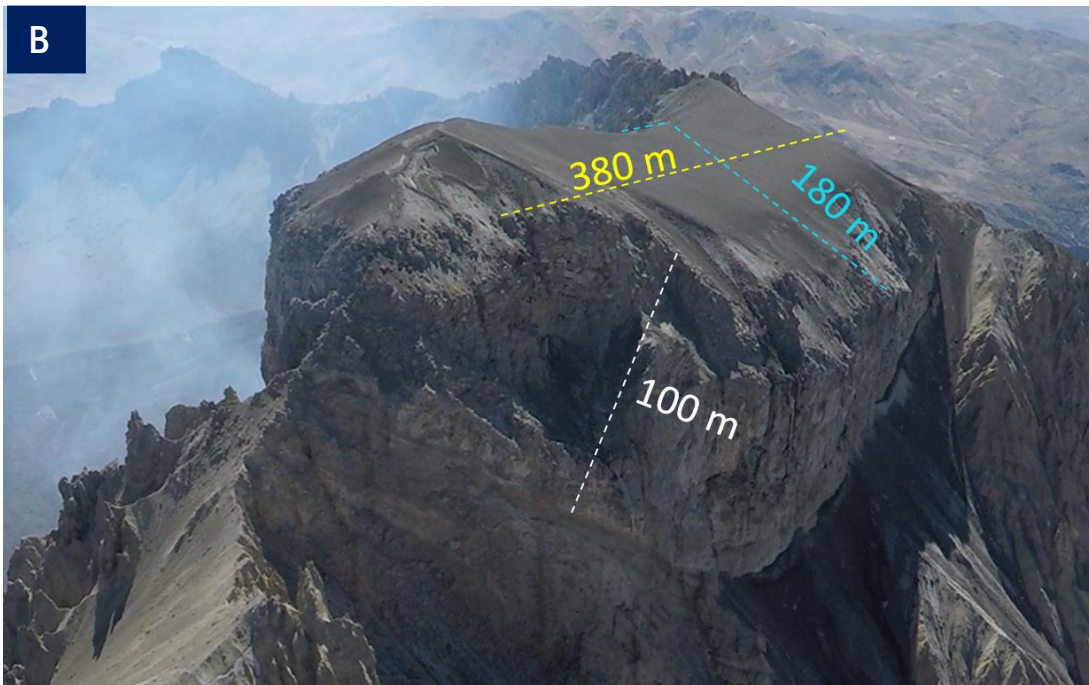
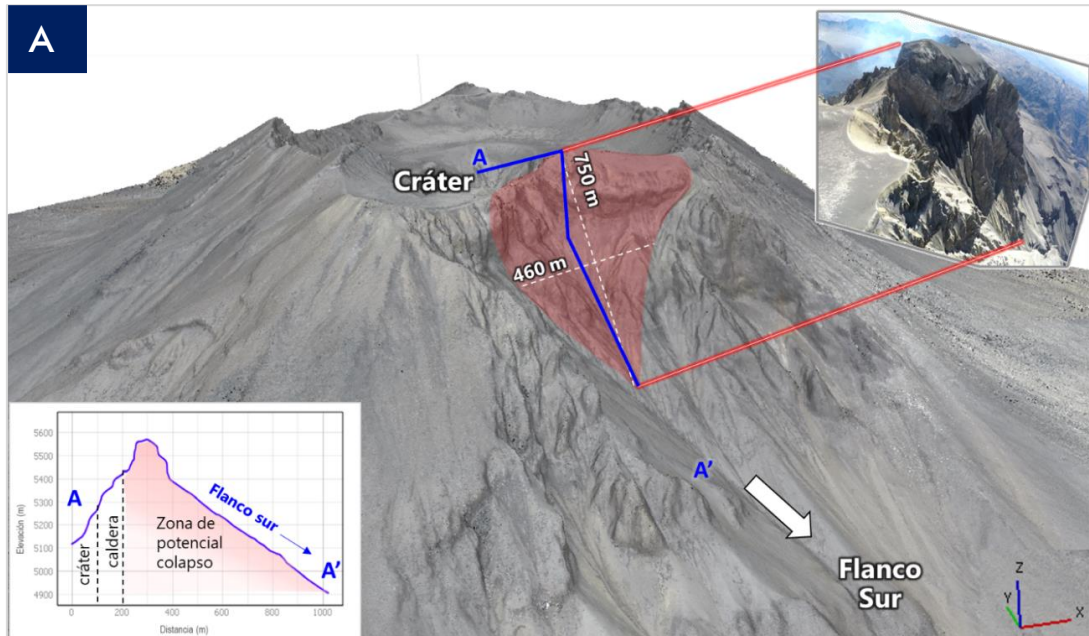


Figura 14.- A) Modelo en tres dimensiones de la cima del volcán Ubinas obtenido con el levantamiento fotogramétrico de 2019. En color rojo se resalta la zona del flanco sur propensa a colapsar. En la esquina inferior izquierda se muestra un perfil (A-A') que parte desde el cráter y abarca la zona inestable. B) Dimensiones de la parte superior del bloque rocoso con riesgo de colapso.

## **5.2.- Escenarios post colapso**

Para simular el colapso de zonas inestables como la identificada en el flanco sur del volcán Ubinas, así como estimar la distancia a recorrer por la avalancha de escombros generada, se ha empleado el cálculo de línea de energía o el cálculo de la relación H/L (Crandell, 1988; Siebert et al., 1987). Esta relación se obtiene a partir de la altura o desnivel (H) del edificio volcánico y la distancia (L) recorrida por los depósitos de avalanchas preexistentes generadas en eventos pasados.

Estudios realizados por Hayashi y Self (1992) sobre 40 avalanchas producidas en volcanes calcoalcalinos calcularon una relación H/L de 0,22. Este valor fue tomado por Rivera et al., (2011) para el volcán Ubinas obteniendo una distancia para las avalanchas de 3 km y una máxima de 11 km. Para las avalanchas que se producirían en dirección sureste, obtuvieron un valor promedio de 5.45 km, cercano a las distancias estimadas de 6 km a partir de estudios geológicos realizados en campo (Rivera et al., 1998). Teniendo en consideración el DEM de alta resolución obtenido en este estudio, se ha delimitado el cono de energía con el fin de definir la zona de peligro proximal sobre la quebrada Volcanmayo – río Ubinas y el eventual alcance de una avalancha de escombros. Los resultados muestran que la avalancha de escombros tendría un alcance mayor a 8 km, aproximadamente de la fuente.

Posteriormente, se han realizado simulaciones del comportamiento de una avalancha de escombros con el software TITAN2D desarrollado con el propósito de simular flujos de masas, como avalanchas de escombros y deslizamientos, sobre modelos de elevación digital (DEM) de terreno (Pitman et al., 2003; Patra et al., 2005). TITAN2D ha sido aplicado en años anteriores en el volcán Misti, para la simulación de lahares (Vargas Franco et al., 2010, Delaite et al., 2005; Sandri et al., 2013) y ello permitió considerar valores para el ángulo de fricción interna, a fin de reproducir con mayor fiabilidad el comportamiento de los flujos. También se puede citar la simulación de la avalancha de escombros de Little Tahoma en Mount Rainier (Washington, EEUU) realizada por Stinton et al. (2004), y que permitió corroborar con la simulación la distancia y área ocupada por la avalancha ocurrida en 1963.

En este estudio, para realizar la simulación de avalancha en el volcán Ubinas, se consideró como datos de entrada la ubicación y dimensiones de la zona de colapsos representados por un paraboloides con las dimensiones, coordenadas y volumen calculados a partir del modelo DEM obtenido para este volcán. Además, se consideró un valor de  $34^\circ$  para el ángulo de fricción interno (Galarza et al., 2014) y otro de  $15^\circ$  para el ángulo de fricción basal, así como un coeficiente de 0.22 obtenido con la relación H/L, tal como propone Stinton et al. (2004). En la simulación, no se estimó una velocidad inicial incorporada como para el caso de una erupción lateral dirigida, solo se ha considerado que el bloque colapsa por gravedad (velocidad inicial en

sentido vertical). Además, como dato de entrada, se ha tomado en cuenta una escala de longitud o distancia de 8 km, calculada con la relación H/L.

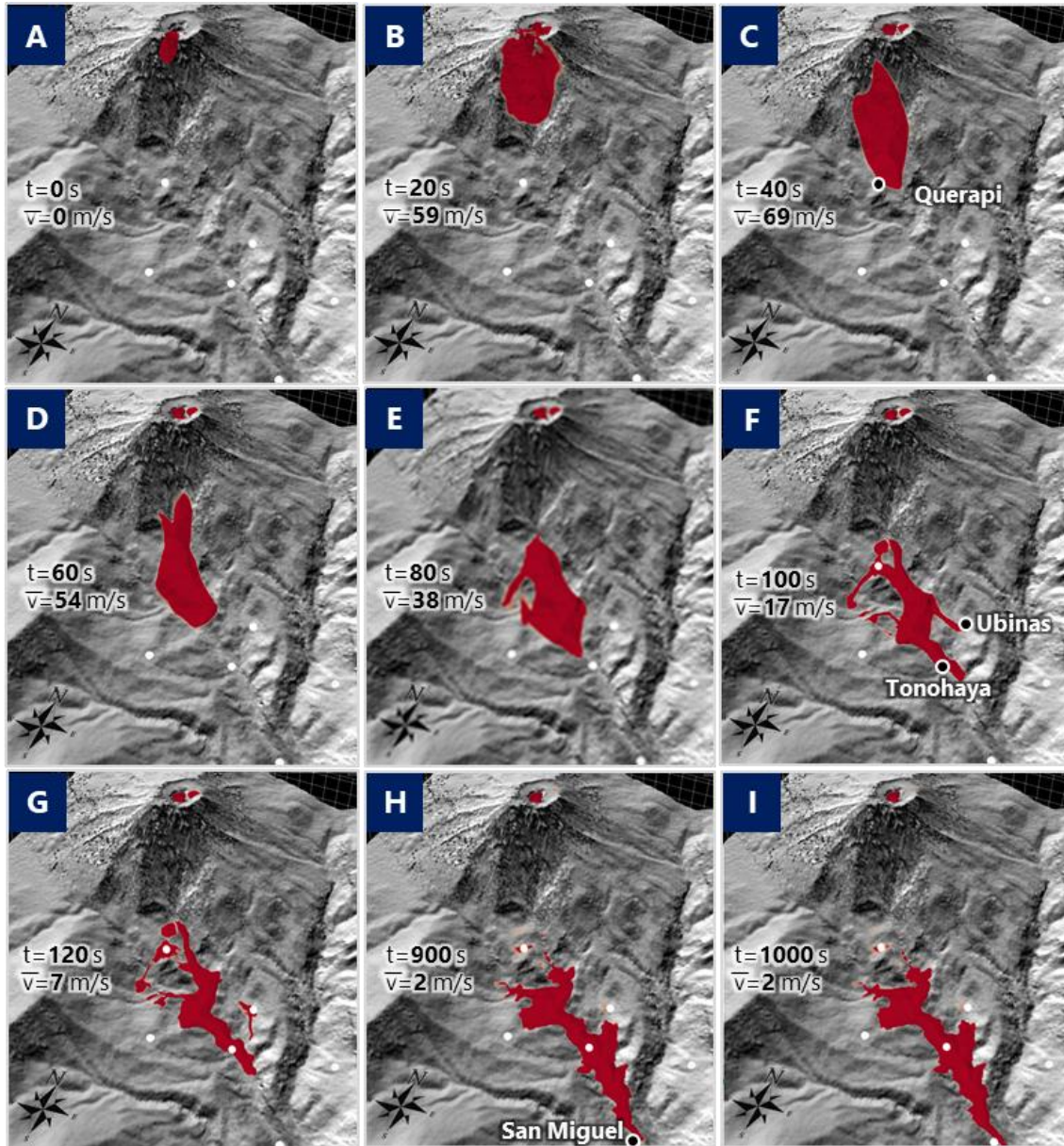


Figura 15.- Resultados del modelamiento con el software TITAN2D y escenarios críticos construidos para la avalancha a producirse en el flanco sur del volcán Ubinas. La imagen muestra 09 estadios de tiempo y velocidades.

A fin de analizar el escenario a presentarse en la quebrada Volcanmayo después del colapso del flanco sur del volcán Ubinas, se ha construido 09 escenarios críticos en el tiempo, desde un tiempo en donde el

bloque inestable está en reposo, hasta el momento en que llega, valle abajo, a inmediaciones de la localidad de Ubinas, siendo sus características las siguientes (Figura 15):

- Figura 15A: muestra el paraboloide que simula el bloque inestable en estado de reposo (tiempo y velocidad nula).
- Figura 15B: A los 20 segundos de ocurrido el colapso, el bloque se desplazaría a una velocidad promedio de 59 m/s.
- Figura 15C: A los 40 segundos, el bloque continúa avanzando a una velocidad promedio de 69 m/s.
- Figura 15D: A poco más de 1 minuto, la avalancha alcanzaría la localidad de Querapi con una velocidad promedio de 54 m/s.
- Figura 15E: se muestra el desplazamiento del material a 1 minuto y 20 segundos, con una velocidad promedio de 38 m/s, lo que evidencia que la tasa de desaceleración es importante.
- Figura 15F: A poco de alcanzar los dos minutos de ocurrido el colapso, la avalancha de escombros llegaría a inmediaciones de la localidad de Ubinas con una velocidad promedio de 17 m/s, casi al mismo tiempo alcanzaría la localidad de Tonohaya.
- Figura 15G: Después de 120 segundos la avalancha se desplazaría en el terreno de menor pendiente a velocidades de 7 m/s.
- Figura 15H: La avalancha llegaría a inmediaciones de la localidad de San Miguel, aproximadamente después de 15 minutos, con una velocidad de 2 m/s.

- Figura 15l: Finalmente, la avalancha recorre casi 8 m de distancia a una velocidad final de 2 m/s.

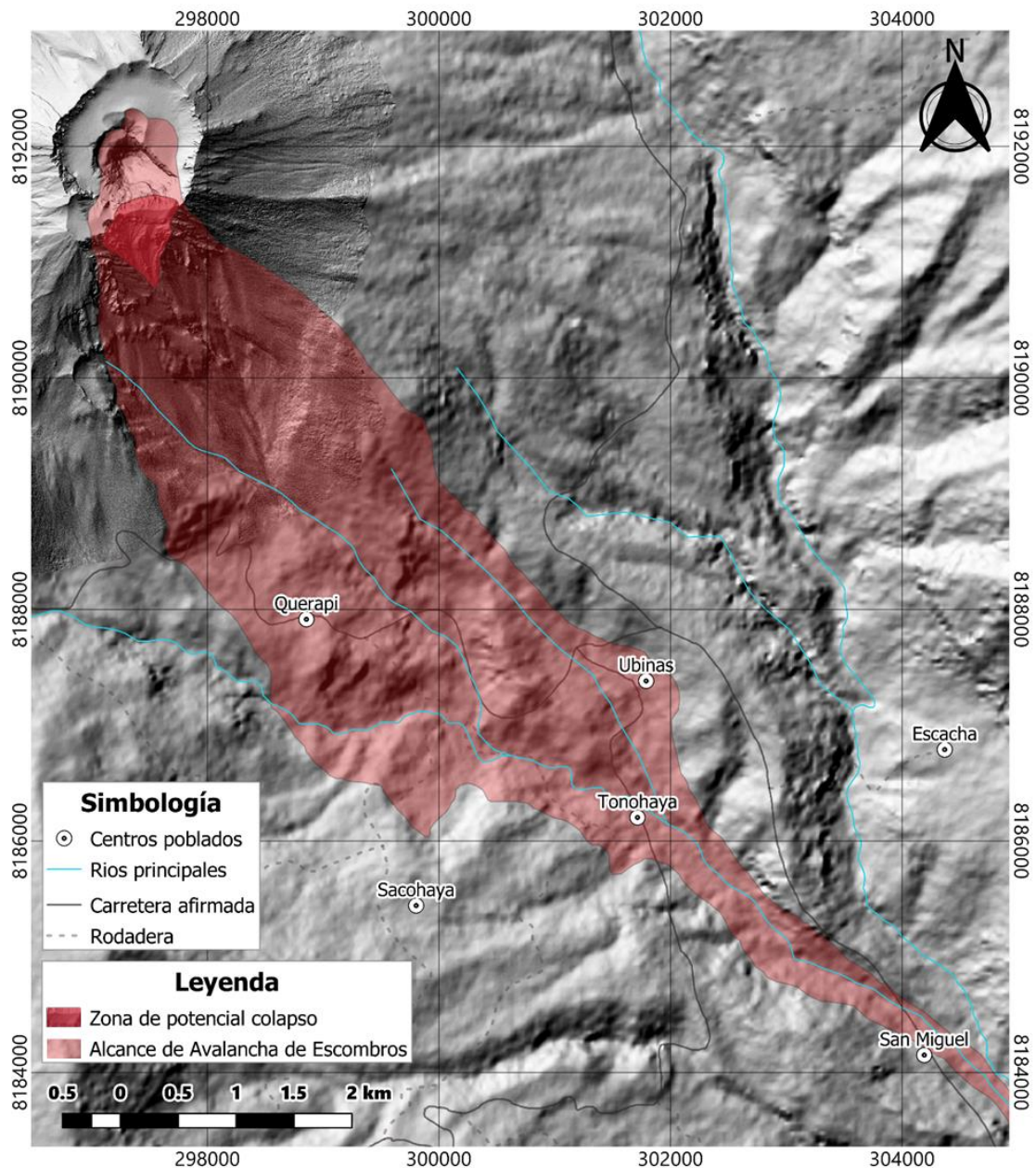


Figura 16.- Mapa de alcance de una eventual avalancha de escombros por colapso de un sector del flanco sur del volcán Ubinas.

De acuerdo a estos escenarios, el alcance de esta avalancha superaría los 8 km del volcán (área de color rojo claro en la Figura 16). Las localidades de Querapi (con población reasentada), Ubinas, Tonohaya y San Miguel serían



las más afectadas en caso presentarse este escenario. En consecuencia, es necesario prever una zona elevada ubicada a más de 12 km al sureste del cráter donde se pueda evacuar a la población. El refugio de Siraguaya, actualmente habilitado, podría ser considerado como una opción.

El escenario de colapso del flanco sur del volcán Ubinas puede presentarse considerando los siguientes detonadores:

- Si el volcán Ubinas desarrolla un proceso eruptivo con el mayor Índice de Explosividad Volcánica (IEV),
- A la ocurrencia de un sismo de considerable magnitud con epicentro en la región sur,
- Al crecimiento de un domo de lava al interior del volcán,

Por otro lado, parte del material propio del colapso del flanco sur del volcán Ubinas podría caer al interior del cráter, lo cual incrementa el peligro ante futuras explosiones con la emisión de fumarolas.

## **CONCLUSIONES**

Se ha construido un DEM con una resolución de 60 cm para el cráter, la caldera y flanco sur del volcán Ubinas usando información de un levantamiento aerofotogramétrico realizado en agosto de 2019.

Utilizando la información del DEM se han identificado cambios morfológicos en el cráter del volcán Ubinas asociados a la acumulación de material volcánico en el fondo del cráter, constituido de ceniza retrabajada, lapilli y fragmentos de lava expulsados durante los procesos eruptivos 2013-2017 y 2019. El espesor de dicho relleno ha sido calculado en 100 m y el volumen aproximado alcanza los 2´640,000 m<sup>3</sup>.

Utilizando el DEM y en base al modelamiento numérico y grado de ocurrencia de lahares se han elaborado tres escenarios de peligro por descenso de lahares en el valle de Ubinas. En el primer escenario y el más frecuente, serían afectadas las vías de acceso hacia los centros poblados de Ubinas, Tonohaya, Huarina y Matalaque. En el segundo escenario, además serían afectadas las áreas de cultivo y obras de infraestructura de los centros poblados de Tonohaya, San Miguel y Huatagua. El tercer escenario es el más extremo y además afectaría vías de comunicación, terrenos de cultivo, canales de agua, puentes peatonales, etc. Asimismo, causaría derrumbes en ambas márgenes del río Ubinas, ocasionando eventualmente el represamiento del río Tambo en inmediaciones de la localidad de Huarina.

El DEM ha permitido identificar la existencia de una zona de potencial colapso ubicada en la parte superior del flanco sur del volcán Ubinas, abarcando un área de 292,000 m<sup>2</sup> y un volumen aproximado de 3.7x10<sup>7</sup> m<sup>3</sup>. De producirse una explosión volcánica violenta de alto Índice de Explosividad Volcánica (IEV), un sismo de considerable magnitud o el crecimiento de un domo de lava al interior del cráter, se podría generar una avalancha de escombros que se emplazaría en el fondo del valle de Ubinas y cuyos productos alcanzarían una distancia aproximada de 8 km a lo largo del río Ubinas afectando a las localidades de Querapi (con población reasentada), Ubinas, Tonohaya y San Miguel.

## **BIBLIOGRAFÍA**

- Charbonnier S.J., Gertisser R. (2009). Numerical simulations of block-and-ash flows using Titan2D flow model: examples from the 2006 eruption of Merapi Volcano, Java, Indonesia. *Bull Volcanol* 71: 953–959
- Crandell, D.R. (1987). Deposits of pre-1980 pyroclastic flows and lahars from Mount St. Helens volcano, Washington. U.S. Geological Survey Professional Paper 1444, 94 p.
- Delaite G., Thouret J.-C., Sheridan M., Labazuy P., Stinton A., Souriot T., Westen C.-V. (2005). Assessment of volcanic hazards of El Misti and in the city of Arequipa, Peru, based on GIS and simulations, with emphasis on lahars. *Z. Geomorph. N. F.*, v. 140, p. 209-231.
- Del Carpio J., Macedo O., Chijcheapaza R., Puma N., Torres J., (2016b). Observaciones asociadas a los lahares ocurridos el 06 de febrero y 11-13 de abril de 2015 en el valle de Ubinas. Poster, XVIII Congreso Peruano de Geología. 2016.
- Diefenbach, A. K., Crider, J. G., Schilling, S. P., & Dzurisin, D. (2012). Rapid, low-cost photogrammetry to monitor volcanic eruptions: an example from Mount St. Helens, Washington, USA. *Bulletin of volcanology*, 74(2), 579-587.
- Galarza, J., Laverde C., Zuluaga I., Monsalve M. (2014). Implementación de herramientas computacionales para la simulación de fenómenos volcánicos, como soporte para la actualización del mapa de amenaza del volcán Puracé (Uso de Tephra2, Titan2D, Lava PL y LaharZ). SGC. Informe Interno.
- Hayashi, J.N. & Self, S. (1992). A comparison of pyroclastic flow and debris avalanche mobility. *Journal of Geophysical Research*, 97(B6): 9063-9071.
- Instituto Geológico Minero y Metalúrgico (2019). Informe Técnico Especial: Inicio de un nuevo proceso eruptivo del volcán Ubinas (Moquegua), 2019: Respuestas a preguntas formuladas por INDECI.

- Mariño J., Valdivia, D., Zonco Y., Miranda R., Machacca Puma, R. (2017). Lahares emplazados en el valle de Ubinas en febrero del 2016: Geología, impacto, modelamiento y evaluación de peligros, región Moquegua. Informe técnico N° A6745.
- Malin, M.C., Sheridan, M.F. (1982). Computer-assisted mapping of pyroclastic surges. *Science*, 217(4560): 637-640.
- Patra, A., Bauer A., Nichita, C., Pitman, E.B., Sheridan, M. F. Bursik, M., Rupp, B., Webber, A., Namikawa, L. And Renschler, C. (2005). Parallel adaptive numerical simulation of dry avalanches over natural terrain. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 139:1–21.
- Pitman, E.B., Patra, A., Bauer, A., Sheridan, M.F., Bursik, M.I. (2003). Computing debris flow and landslides. *Physics of Fluids* 15, 3638–3646.
- Procter, J.N., Cronin, S.J., Platz, T., Patra, A., Dalbey, K., Sheridan, M.F., Vince, V.E. (2010). Mapping block-and-ash flow hazard based on TITAN2D simulations: a case study from Mt. Taranaki, NZ. *Nat Hazards* 53: 483–501
- Rivera, M.; Mariño, J.; Thouret, J.C. (2011). Geología y evaluación de peligros del volcán Ubinas. INGEMMET. Boletín, Serie C: Geodinámica e Ingeniería Geológica, 46, 88 p.
- Sandri, L., Thouret, J.-C., Constantinescu, R., Biass, S., Tonini R (2014). Long-term multi-hazard assessment for El Misti volcano (Peru). *Bull Volcanol* 76:771
- Schilling, S. P. (1998). LAHARZ; GIS programs for automated mapping of lahar-inundation hazard zones (No. 98-638). US Geological Survey; Information Services [distributor].
- Siebert, L.; Glicken, H., Tadahide, U. (1987). Volcanic hazards from Bezymianny and Bandai-type eruptions. *Bulletin of Volcanology*, 49(1): 435-459
- Stinton, A. J., Sheridan, M.F., Patra, A., Dalbey, K., Namikawa, L.M. (2004). Integrating variable bed friction into TITAN2D mass-flow model:

application to the Little Tahoma Peak avalanches. Washington. Acta Vulcanol. 16, 153-163.

Thouret, J. C., Rivera, M., Wörner, G., Gerbe, M. C., Finizola, A., Fornari, M., & Gonzales, K. (2005). Ubinas: the evolution of the historically most active volcano in southern Peru. *Bulletin of Volcanology*, 67(6), 557-589.

Vargas Franco, R., Thouret, J.-C., Delaite, G., van Westen, C., Sheridan, M.F., Siebe, C., Mariño, J., Souriot, T., Stinton, A. (2010) Mapping and assessing volcanic hazards and risks in the city of Arequipa, Peru, based on GIS techniques. In: G Groppelli & L. Viereck-Goette(eds) *Stratigraphy and geology of volcanic areas*. Geol Soc AmerSpecial Paper 464: 265–280, doi: 10.1130/2010.2464 (13).

