



PERÚ

Ministerio
del Ambiente



EVALUACIÓN DEL PELIGRO VOLCÁNICO EN PERÚ: UNA HERRAMIENTA PARA LA GESTIÓN DEL RIESGO DE DESASTRES

Informe Técnico N°029-2022/IGP CIENCIAS DE LA TIERRA SÓLIDA



Lima – Perú
Agosto, 2022

Instituto Geofísico del Perú

Presidente Ejecutivo: Hernando Tavera

Director Científico: Edmundo Norabuena

Informe Técnico

Evaluación del peligro volcánico en Perú: Una herramienta para la gestión del riesgo de desastres

Autores

José Del Carpio
Marco Rivera
José Torres
Hernando Tavera
Nino Puma

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

**EVALUACIÓN DEL PELIGRO VOLCÁNICO EN PERÚ: UNA
HERRAMIENTA PARA LA GESTIÓN DEL RIESGO DE
DESASTRES**

Arequipa–Perú
Agosto, 2022

RESUMEN

Para los volcanes que integran la cadena volcánica del sur del Perú, se ha determinado 15 factores de peligro volcánico y 9 por exposición relativa de la población, aviación civil e infraestructura. Para esta evaluación y ante una eventual erupción, se ha aplicado la metodología modificada de Ewert et al. (2005); Ewert et al. (2018) y Ewert (2007). En este estudio se considera los volcanes activos y potencialmente activos existentes en el sur peruano, que presentaron erupciones desde el Pleistoceno, Holoceno hasta la actualidad. La correlación de los factores de peligro y de exposición relativa frente a la probabilidad de ocurrencia de erupciones volcánicas permitió determinar cinco Niveles de Peligrosidad Volcánica (NPV): Muy Alta, Alta, Moderada, Baja y Muy Baja, que a su vez ha permitido categorizar a 17 volcanes activos y potencialmente activos.

Los volcanes de Muy Alta Peligrosidad son el Misti, Sabancaya y Ubinas, debido a la recurrente actividad eruptiva que presentan y al alto número de población expuesta al peligro volcánico, y por ello requieren de un nivel 4 de monitoreo (sismología, deformación, análisis acústico, sensores remotos, y geoquímica de gases y fuentes termales). Los volcanes de Alta Peligrosidad son Chachani, Ticsani, Huaynaputina y Coropuna, y requieren de un nivel 3 de monitoreo (sismología, deformación, sensores remotos, y geoquímica de gases y fuentes termales). Los volcanes de Moderada Peligrosidad son Sara Sara, Tutupaca Yucamane y Solimana, los cuales requieren de un nivel 2 de monitoreo (sismología, sensores remotos superficiales y satelitales, y geoquímica de fuentes termales). Los volcanes de Baja Peligrosidad son Casiri y Purupuruni; mientras que, los volcanes de Muy Baja Peligrosidad están conformados por el Campo Volcánico Monogenético (CVM) de Andagua, volcán Cerro Auqui huato, volcán Quimsachata y CVM Huambo. Ambos grupos requieren de un monitoreo Nivel 1 (sísmico y deformación).

INDICE

RESUMEN

1.- INTRODUCCIÓN

2.- CONTEXTO GEOLÓGICO

3.- MONITOREO VOLCÁNICO ACTUAL

4.- METODOLOGÍA DE LA EVALUACIÓN

4.1.- Factores de Peligro Volcánico

4.2.- Factores de Exposición Relativa

4.3.- Cálculo del Nivel de Peligrosidad Volcánica (NPV)

5.- RESULTADOS

5.1.- Nivel de Peligrosidad Volcánica

5.1.1.- Volcanes de Muy Alta Peligrosidad

5.1.2.- Volcanes de Alta Peligrosidad

5.1.3.- Volcanes de Moderada Peligrosidad

5.1.4.- Volcanes de Baja Peligrosidad

5.1.5.- Volcanes de Muy Baja Peligrosidad

6.- DISCUSIÓN

6.1.- Actividad Volcánica y Peligros Asociados

6.2.- Niveles de Monitoreo

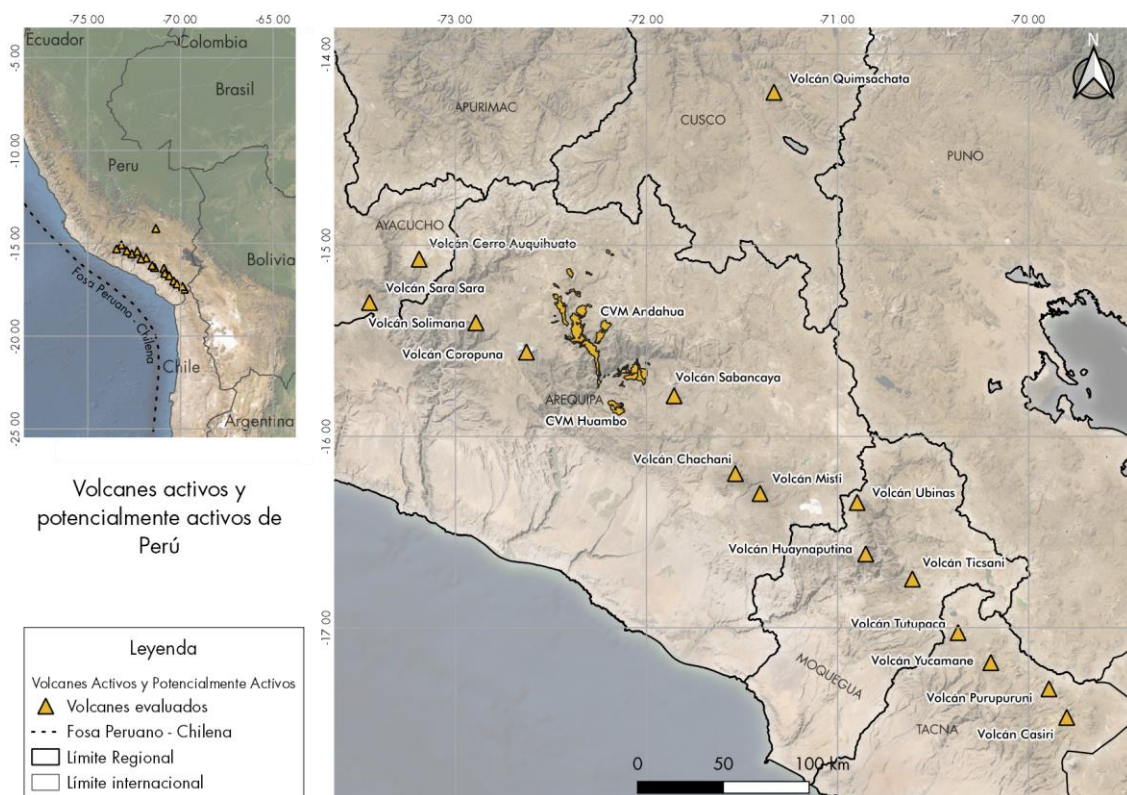
6.3.- Evaluación del Nivel de Monitoreo Actual

CONCLUSIONES

BIBLIOGRAFÍA

1.- INTRODUCCIÓN

Las erupciones volcánicas pueden causar pérdidas de vidas humanas y propiedades, y su impacto puede ser de gran envergadura a escala local, regional y/o global, dependiendo de la magnitud o Índice de Explosividad Volcánica (IEV) que estas generen. En el mundo se estima que unas 250 mil personas murieron durante los últimos dos siglos como consecuencia directa de las erupciones volcánicas y que, de estos, aproximadamente 26 mil murieron en las últimas dos décadas, sobre todo en los países en vías de desarrollo (Blong, 1984; Siebert et al., 2011; Auker et al., 2013). En el sur del Perú, en las regiones de Ayacucho, Arequipa, Moquegua, Cusco y Tacna, se han identificado 17 volcanes activos y potencialmente activos (de Silva & Francis, 1991; Siebert *et al.*, 2011; Bromley *et al.*, 2019) y en las ultimas décadas, algunos de ellos han esarrollado procesos eruptivos (Figura 1).



Los volcanes activos son aquellos que han presentado erupciones en los últimos 11700 años (Casadevall et al., 2020); mientras que, los potencialmente activos son aquellos que generaron actividad hace más de 11700 años y que presentan una cumbre bien conservada, evidencia de actividad post-glacial, entre otros (Francis & De Silva, 1989), así mismo, presentan manifestaciones como actividad sísmica, emisiones de gases, etc.

En el Perú, en un radio de 30 km de los volcanes activos y potencialmente activos habitan alrededor de 1.5 millones de personas, distribuidas en 141 distritos (INEI, 2018). Asimismo, se ha identificado la presencia de aproximadamente 258 centros de salud y 3500 instituciones educativas, así como represas, centrales hidroeléctricas, aeropuertos, líneas de transmisión eléctrica, entre otros. Además, las aerolíneas con rutas entre Lima y las ciudades de Arequipa, Cusco, Juliaca, Tacna, Ilo, La Paz (Bolivia) y Arica (Chile) diariamente desplazan aproximadamente 23 mil personas que podrían ser afectadas por una erupción volcánica. El incremento de la población en el sur del Perú, ocurrido en las últimas décadas, ha venido acompañado de un crecimiento desordenado de las urbes, como es el caso de la ciudad de Arequipa, donde se vienen desarrollando zonas con alta exposición al peligro volcánico, es decir, nuevos asentamientos poblacionales que se vienen instalando al pie de los volcanes Misti y Chachani.

Los daños observados post-erupción volcánica ocurridos a nivel global muestran la importancia de la implementación de sistemas de alerta temprana, a través del monitoreo permanente y en tiempo real de volcanes, efectuado por instituciones científicas, como es el caso del Instituto Geofísico del Perú (IGP). El fin de dicho monitoreo es detectar e interpretar correctamente una reactivación volcánica para proporcionar alertas oportunas dirigidas a las autoridades encargadas de la gestión del riesgo de desastres y la toma de decisiones (Moran *et al.*, 2008). De acuerdo con Pallister & McNutt (2015), el monitoreo volcánico tiene dos objetivos

principales: 1) proveer datos científicos básicos para el estudio y entendimiento del dinamismo de la actividad volcánica, y 2) es crucial para la evaluación del peligro, el pronóstico y alerta de erupciones, además de la mitigación del riesgo en tiempos de intranquilidad volcánica. En Perú, el IGP, a través del Centro Vulcanológico Nacional (CENVUL), es el ente oficial del Estado peruano, encargado del monitoreo permanente y en tiempo real de los principales volcanes de la región sur del Perú.

En el presente estudio, se analizan diversos factores de peligro ligados a una erupción volcánica, así como la exposición relativa de poblaciones, obras de infraestructura y otros, ubicados en los alrededores de los volcanes, de acuerdo con la metodología modificada de Ewert *et al.* (2005); Ewert *et al.* (2018) y Ewert (2007). Esta metodología permite categorizar a los volcanes evaluados en Niveles de Peligrosidad Volcánica (NPV) y a la vez, identificar posibles brechas para el óptimo monitoreo en tiempo real de volcanes activos. Metodologías similares han sido aplicadas en Argentina (Elissondo & Villegas, 2011), Chile (Silva, 2011; Lara *et al.*, 2006), Nueva Zelanda (Miller, 2011), Guatemala, El Salvador, Nicaragua y Costa Rica (Palma *et al.*, 2009), Grecia (Kinvig *et al.*, 2010), entre otros.

2.- CONTEXTO GEOLÓGICO

Los volcanes activos y potencialmente activos del sur peruano corresponden a estratovolcanes, complejos volcánicos, complejo de domos, campos monogenéticos, etc., los cuales están ubicados a lo largo de la cordillera occidental de los Andes (Figura 1) y deben su presencia al proceso de subducción de la Placa de Nazca debajo de la Sudamericana. Dependiendo del tipo de volcán, caso de los estratovolcanes y complejos volcánicos, a lo largo de su evolución presentaron diferentes tipos de erupciones, desde efusivas con emisiones de flujos de lava hasta erupciones explosivas con voluminosas emisiones de tefras y flujos piroclásticos que tuvieron diversos Índices de Explosividad Volcánica (IEV). Desde luego las áreas cubiertas por los depósitos emitidos por los volcanes durante su evolución fueron variables, incluso a nivel de cada volcán. En la Tabla 1 se presentan las principales características geológicas de cada volcán evaluado.

Tabla 1. Resumen sobre la actividad pasada de los volcanes evaluados y tipos de peligros que pueden presentar.

Volcán/ubicación	Tipo	Última erupción	Tipo de actividad pasada	Tipos de peligro volcánico	Referencias
Sara Sara (Ayacucho) -73.450; -15.300; 5522 m s.n.m.	Estratovolcán andesítico	Fines del Pleistoceno inicios del Holoceno (~14 000 años)	<ul style="list-style-type: none"> • Erupciones explosivas: Plinianas Subplinianas, Vulcanianas. • Erupción efusiva con emisión de flujos de lava. • Crecimiento y destrucción de domos riolíticos. 	<ul style="list-style-type: none"> • Erupciones explosivas que pueden generar caídas de tefra, flujos piroclásticos, avalanchas de escombros y lahares. • Erupciones efusivas, con la emisión de flujos de lava. • Crecimiento y destrucción de domos de lava que pueden generar flujos piroclásticos. 	Siebert <i>et al.</i> (2011), Rivera <i>et al.</i> (2020).
Cerro Auquihuato (Ayacucho) -73.190; -15.073; 4980 m s.n.m.	Cono monogenético	Probablemente en el Pleistoceno superior	<ul style="list-style-type: none"> • Erupción efusiva con emisión de flujos de lava. 	<ul style="list-style-type: none"> • Erupciones explosivas que pueden generar caídas de tefra, flujos piroclásticos, y lahares. • Erupciones efusivas que van a generar la emisión de flujos de lava. 	Siebert <i>et al.</i> (2011), Morales & Amelung (2016).
Solimana (Arequipa) -72.8931; - 15.4050; 5980 m s.n.m.	Estratovolcán andesítico	Presentó erupciones en el Pleistoceno	<ul style="list-style-type: none"> • Erupciones explosivas: Plinianas, Subplinianas, Vulcanianas. • Erupción efusiva con emisión de flujos de lava. 	<ul style="list-style-type: none"> • Erupciones explosivas que pueden generar caídas de tefra, flujos piroclásticos, y lahares. • Erupciones efusivas, con la emisión de flujos de lava. 	Goemans <i>et al.</i> (1990), Vatin-Pérignon <i>et al.</i> , (1991).
Coropuna (Arequipa) -72.6285; - 15.5590; 6377 m s.n.m.	Complejo volcánico andesítico	Presentó Actividad eruptiva hace poco más de 1440 años A.P.	<ul style="list-style-type: none"> • Erupciones explosivas: Subplinianas y Vulcanianas • Erupción efusiva con emisión de flujos de lavas. • Crecimiento y destrucción de domos. 	<ul style="list-style-type: none"> • Erupciones explosivas que pueden generar caídas de tefra, flujos piroclásticos, y lahares. • Erupciones efusivas que producirían la emisión de flujos de lava. 	Ubeda (2011), Mariño <i>et al.</i> (2017), Kochitzky <i>et al.</i> (2018), Bromley <i>et al.</i> (2019).

Tabla 1. Continuación....//Resumen sobre la actividad pasada de los volcanes evaluados y tipos de peligros que pueden presentar.

Volcán/ubicación	Tipo	Última erupción	Tipo de actividad pasada	Tipos de peligro volcánico	Referencias
Sabancaya (Arequipa) -71.8558; - 15.7880; 5967 m s.n.m.	Estratovolcán andesítico	Desde noviembre de 2016 hasta la actualidad	<ul style="list-style-type: none"> Erupciones explosivas: Vulcanianas, freatomagmáticas Erupción efusiva con emisión de flujos de lavas Crecimiento de domos de lava. 	<ul style="list-style-type: none"> Erupciones explosivas moderadas que pueden generar caídas de tefra, flujos piroclásticos y lahares. 	Juvigné <i>et al.</i> (1998), Gerbe & Thouret (2004), Thouret <i>et al.</i> (2008), Juvigné <i>et al.</i> (2008), Samaniego <i>et al.</i> (2016), Rivera <i>et al.</i> (2016).
Misti (Arequipa) -71.4055; - 16.2990; 5822 m s.n.m.	Estratovolcán andesítico	1440-1470 d.C.	<ul style="list-style-type: none"> Erupciones explosivas: Plinianas, Subplinianas y Vulcanianas. Erupción efusiva con emisión de flujos de lava. Crecimiento y destrucción de domos de lava. 	<ul style="list-style-type: none"> Erupciones explosivas que pueden generar caídas de tefra, flujos piroclásticos, avalancha de escombros y lahares. Erupciones efusivas, con la emisión de flujos de lava. Crecimiento y destrucción de domos de lava que pueden generar flujos piroclásticos. 	Thouret <i>et al.</i> (2001), Harpel <i>et al.</i> (2011), Cobeñas <i>et al.</i> (2012).
Chachani (Arequipa) -71.5349; - 16.1940; 6057 m s.n.m.	Complejo volcánico andesítico	Probablemente en el Pleistoceno.	<ul style="list-style-type: none"> Erupciones explosivas: Plinianas, Subplinianas, Vulcanianas. Erupción efusiva con emisión de flujos de lavas. Crecimiento y destrucción de domos de lava. 	<ul style="list-style-type: none"> Erupciones explosivas que pueden generar caídas de tefra, flujos piroclásticos, y lahares. Erupciones efusivas, con la emisión de flujos de lava. Crecimiento y destrucción de domos de lava que pueden generar flujos piroclásticos. 	García <i>et al.</i> (1997), Suaña (2012), Aguilar <i>et al.</i> (2022), Alavi (2020).
Ubinas (Moquegua) -70.8977; - 16.3460; 5672 m s.n.m.	Estratovolcán andesítico	En 2019 presentó su última erupción, la cual fue de tipo vulcaniana.	<ul style="list-style-type: none"> Erupciones explosivas: Plinianas, Subplinianas, Vulcanianas Erupción efusiva con emisión de flujos de lavas. Crecimiento y destrucción de domos de lava. 	<ul style="list-style-type: none"> Erupciones explosivas que pueden generar caídas de tefra, flujos piroclásticos, avalanchas de escombros y lahares. Erupciones efusivas, con la emisión de flujos de lava. Crecimiento y destrucción de domos de lava que pueden generar flujos piroclásticos. 	Thouret <i>et al.</i> (2005), Rivera <i>et al.</i> (2011), Del Carpio <i>et al.</i> (2016), Samaniego <i>et al.</i> (2020), Del Carpio & Torres (2020).

Tabla 1. Continuación...//Resumen sobre la actividad pasada de los volcanes evaluados y tipos de peligros que pueden presentar.

Volcán/ubicación	Tipo	Última erupción	Tipo de actividad pasada	Tipos de peligro volcánico	Referencias
Huaynaputina (Moquegua) -70.8525; - 16.6150; 4850 m s.n.m.	Estratovolcán andesítico	En el año 1600 d. C., fue de tipo pliniana con IEV 6.	<ul style="list-style-type: none"> • Erupciones explosivas: Pliniana y Subplinianas. • Erupción efusiva con emisión de flujos de lava. • Presenta una caldera de avalancha en forme de herradura y tres cráteres en forma de embudo. 	<ul style="list-style-type: none"> • Erupciones explosivas que pueden generar caídas de tefra, flujos piroclásticos, y lahares. • Erupciones efusivas, con la emisión de flujos de lava. • Crecimiento y destrucción de domos de lava que pueden generar flujos piroclásticos. 	Thouret <i>et al.</i> (1999), Thouret <i>et al.</i> (2002), Lavallée <i>et al.</i> (2006).
Ticsani (Moquegua) -70.6083; - 16.7460; 5408 m s.n.m.	Complejo de domos de lava dacíticos	Erupción vulcaniana o freatomagmática a hace menos de 500 años.	<ul style="list-style-type: none"> • Erupciones explosivas: Plinianas, Subplinianas, Vulcanianas • Erupción efusiva con emisión de flujos de lava. • Crecimiento y destrucción de domos de lava. 	<ul style="list-style-type: none"> • Erupciones explosivas que pueden generar: caídas de tefra, flujos piroclásticos, y lahares. • Erupciones efusivas, con la emisión de flujos de lava. • Crecimiento y destrucción de domos de lava que pueden generar flujos piroclásticos. 	Mariño (2002), Mariño & Thouret (2003), Byrdina <i>et al.</i> (2013).
Tutupaca (Tacna) -70.3693; - 17.0260; 5801 m s.n.m.	Complejo de domos de lava dacíticos	Erupción explosiva con crecimiento y explosión de domo ocurrido en el año 1802 d. C.	<ul style="list-style-type: none"> • Erupciones explosivas: Plinianas, Subplinianas, y Vulcanianas • Erupción efusiva con emisión de flujos de lava. • Crecimiento y destrucción de domos. 	<ul style="list-style-type: none"> • Erupciones explosivas que pueden generar caídas de tefra, flujos piroclásticos, y lahares. • Erupciones efusivas, con la emisión de flujos de lava. • Crecimiento y destrucción de domos de lava que pueden generar flujos piroclásticos. 	Samaniego <i>et al.</i> (2015), Valderrama <i>et al.</i> (2016), Manrique <i>et al.</i> (2020), Mariño <i>et al.</i> (2021).
Yucamane (Tacna) -70.1978; - 17.1830; 5495 m s.n.m.	Estratovolcán andesítico	Erupción subpliniana hace 3 085 años AP.	<ul style="list-style-type: none"> • Erupciones explosivas: Plinianas, Subplinianas y Vulcanianas • Erupción efusiva con emisión de flujos de lava. • Crecimiento y destrucción de domos de lava. 	<ul style="list-style-type: none"> • Erupciones explosivas que pueden generar caídas de tefra, flujos piroclásticos, y lahares. • Erupciones efusivas, con la emisión de flujos de lava. • Crecimiento y destrucción de domos de lava que pueden generar flujos piroclásticos. 	Rivera <i>et al.</i> (2016), Vela (2015), Rivera <i>et al.</i> (2020).

Tabla 1. Continuación....//Resumen sobre la actividad pasada de los volcanes evaluados y tipos de peligros que pueden presentar.

Volcán/ubicación	Tipo	Última erupción	Tipo de actividad pasada	Tipos de peligro volcánico	Referencias
Activo Purupuruni (Tacna) -69.8934; - 17.3200; 5150 m s.n.m.	Complejo de domos de lava dacíticos	Erupción subpliniana y crecimiento de domo durante el Holoceno.	<ul style="list-style-type: none"> Erupciones explosivas: Subplinianas y Vulcanianas. Crecimiento y destrucción de domos. Efusiva con emisión de flujos de lavas. 	<ul style="list-style-type: none"> Erupciones explosivas que pueden generar caídas de tefra, flujos piroclásticos, y lahares. Erupciones efusivas, con la emisión de flujos de lava. Crecimiento y destrucción de domos de lava que pueden generar flujos piroclásticos. 	Bromley <i>et al.</i> (2019).
Activo Casiri (Tacna) -69.8004; - 17.4700; 5650 m s.n.m.	Estratovolcán andesítico	Erupción efusiva ocurrida hace 2 600 años.	<ul style="list-style-type: none"> Erupciones explosivas: Subplinianas, y Vulcanianas Crecimiento y destrucción de domo. Erupción efusiva con emisión de flujos de lava. 	<ul style="list-style-type: none"> Erupciones explosivas que pueden generar caídas de tefra, flujos piroclásticos, y lahares. Erupciones efusivas, con la emisión de flujos de lava. Crecimiento y destrucción de domos de lava que pueden generar flujos piroclásticos. 	Siebert <i>et al.</i> (2011), Bromley <i>et al.</i> (2019).
Potencialmente Activo Quimsachata (Cusco) -71.3637; - 14.1640; 3923 m s.n.m.	Cono monogenético	Erupción efusiva hace aproximadamen te 4 450 años.	<ul style="list-style-type: none"> Erupción efusiva con emisión de flujos de lava. 	<ul style="list-style-type: none"> Erupciones explosivas que pueden generar caídas de tefra, así como erupciones efusivas, con la emisión de flujos de lava. 	Kaneoka & Guevara, (1984); Siebe <i>et al.</i> (2006), Siebert <i>et al.</i> (2011).
Activo Campo volcánico Andagua (Arequipa) -72.3388; - 15.4260; 4713 m s.n.m.	Volcanes monogenéticos	Erupción estromboliana y efusiva en los últimos 500 años, en erupción	<ul style="list-style-type: none"> Erupción explosiva: estromboliana, freatomagmática. Erupción efusiva con emisión de flujos de lava. Erupción explosiva: estromboliana, freatomagmática. Erupción efusiva con emisión de flujos de lava. 	<ul style="list-style-type: none"> Erupciones explosivas de tipo estromboliana que pueden generar caídas de tefra y lahares. Erupciones efusivas, con la emisión de flujos de lava. Erupciones explosivas moderadas que pueden generar caídas de tefra y lahares. Erupciones efusivas, con la emisión de flujos de lava. 	Cabrera & Thouret (2000), Delacour <i>et</i> <i>al.</i> (2007), Sorensen & Holm (2008), Zavala & Marino (2010), Siebert (2000), Delacour <i>et</i> <i>al.</i> (2007)
Activo Huambo (Arequipa) -72.1328; - 15.8360; 4550 m s.n.m.	Volcanes monogenéticos	Erupción estromboliana y efusiva con emisión de flujos de lava en el Holoceno.	<ul style="list-style-type: none"> Erupción explosiva: estromboliana, freatomagmática. Erupción efusiva con emisión de flujos de lava. 	<ul style="list-style-type: none"> Erupciones explosivas moderadas que pueden generar caídas de tefra y lahares. Erupciones efusivas, con la emisión de flujos de lava. 	Cabrera & Thouret (2000), Delacour <i>et</i> <i>al.</i> (2007)

3.- MONITOREO VOLCANICO ACTUAL

El IGP es la institución responsable del monitoreo volcánico en el Perú y para ello mantiene operativa una red geofísica compuesta por 52 estaciones que integran 77 instrumentos (Tabla 2) como sismómetros, estaciones GNSS, inclinómetros, equipos de infrasonido, espectrómetros DOAS, equipos multigases, videocámaras, entre otros, todos instalados sobre los volcanes y en su entorno. La información que se recoge en tiempo de real de estas redes, es utilizada por el Centro Vulcanológico Nacional (CENVUL) para el seguimiento del proceso eruptivo de volcanes y si fuera el caso, elaborar boletines, reportes y alertas para las instituciones integrantes del SINAGERD.

Tabla 2.- Instrumentación instalada en los 14 volcanes activos y potencialmente activos que monitorea el IGP.

Método de monitoreo:		Sismología	Señales acústicas	Geodesia		Sensores Remotos en superficie	Geoquímica de gases
Región	Volcán	Sismómetros	Infra-sonido	GNSS	Inclinómetros	Videocámara	Multigas
Ayacucho	Sara Sara	2			1	1	
	Cerro Auqui huato	1			1		
Arequipa	Coropuna	4			2	1	
	Solimana	1					
	Sabancaya	6	1	2		3	1
	Chachani	1			1		
	Misti	6		1		2	
Moquegua	Ubinas	7		2	3	2	1
	Huaynaputina	3			1		
	Ticsani	5			1	1	
Tacna	Tutupaca	3			1		
	Yucamane	3			2	1	
	Casiri	1			1		
	Purupuruni	1					
Total		44	1	5	14	11	2
TOTAL INSTRUMENTOS							77

De acuerdo a la Tabla 2: el volcán Sabancaya cuenta con 6 estaciones sísmicas, 2 estaciones GNSS, 3 videocámaras, 1 multigas y 1 infrasonido. El volcán Ubinas con 7 estaciones sísmicas, 2 estaciones GNSS, 1 multigas, 3 videocámaras y 3 inclinómetros. Además, para estos volcanes se emplean

datos de sistemas satelitales para el seguimiento de anomalías térmicas (MIROVA), densidad de SO₂ (TROPOMI, MOUNTS) y deformación superficial (SENTINEL), todos en tiempo casi real. Los volcanes con menor cantidad de instrumentos son Cerro Auqui huato, Solimana, Chachani, Purupuruni y Casiri, por presentar mínima actividad dinámica de tipo sísmico.

En la actualidad se viene proyectando la implementación de redes de monitoreo permanente para los volcanes Quimsachata (Cusco) y los Campos Volcánicos Monogenéticos (CVM) de Andagua y Huambo (Arequipa).

4.- METODOLOGÍA DE EVALUACIÓN

La metodología considerada para determinar los Niveles de Peligrosidad Volcánica (NPV) para los 17 volcanes evaluados es la propuesta por Ewert *et al.* (2005), Ewert (2007) y la reciente actualización de Ewert *et al.* (2018). Esta metodología considera información sobre la actividad volcánica pasada como principal indicador del impacto potencial; así como el nivel de exposición relativa (Nieto-Torres *et al.*, 2021) considerando 15 factores de peligro por actividad volcánica (Tabla 3) y 9 por exposición relativa (Tabla 4). La relación de estos factores determina el NPV. Para este estudio y de acuerdo a la dinámica de los volcanes del sur del Perú, así como la distribución de las áreas urbanas ha sido necesario modificar 2 factores de peligro y la eliminación de 1 de ellos, así como la modificación de 2 factores de exposición relativa, y que más adelante serán detallados.

Los volcanes evaluados son: Quimsachata en Cusco; Cerro Auqui huato y Sara Sara en Ayacucho; Solimana, Coropuna, CVM Andagua, CVM Huambo, Sabancaya, Chachani y Misti en Arequipa; Ubinas, Ticsani y Huaynaputina en Moquegua, y Tutupaca, Yucamane, Purupuruni y Casiri en Tacna. El análisis de los factores de peligro y exposición relativa permitirá definir cuáles son los volcanes de mayor peligrosidad volcánica. Asimismo, el análisis del ranking de NPV permite agrupar volcanes con un similar nivel de peligrosidad sobre el cual se sustenta un determinado nivel de monitoreo requerido que permitirá determinar el nivel de actividad y proporcionar información oportuna sobre cambios de actividad volcánica.

La información sobre factores de exposición relativa empleados en este estudio corresponde a datos de población, tipos de infraestructura, información sobre aviación civil, afectación histórica sobre la población, evacuaciones históricas, etc. El análisis de los factores de exposición no considera factores económicos y por ello, se define como "exposición relativa".

4.1.- Factores de Peligro Volcánico

El peligro es la probabilidad de ocurrencia de un fenómeno natural potencialmente dañino dentro de un período de tiempo específico y en un área determinada. Este fenómeno puede causar la pérdida de vidas, lesiones u otros impactos en la salud, daños a la propiedad, pérdida de medios de subsistencia y servicios, perturbación social y económica, o daño ambiental (UNDRO, 1991; UNISDR, 2009; Tilling, 1989).

De acuerdo con la metodología de Ewert *et al.* (2005), Ewert (2007) y la reciente actualización de Ewert *et al.* (2018), en este estudio se considera el análisis de 15 factores de peligro, **FP** (Tabla 3):

(a) Tipo de volcán. Factor que identifica los diferentes tipos de volcanes que presentaron o presentan actividad efusiva y/o explosiva y son clasificados como: Volcanes Tipo 0 (poco o menos explosivos), entre los que destacan el volcán Quimsachata, volcán Cerro Auquihuato, CVM Andagua y CVM Huambo; Volcanes Tipo 1 (más explosivos), como Sara Sara, Solimana, Coropuna, Sabancaya, Chachani, Misti, Ubinas, Huaynaputina, Ticsani, Tutupaca, Yucamane, Purupuruni y Casiri.

(b) Máximo IEV. Factor referido al mayor Índice de Explosividad Volcánica (IEV) que ha presentado cada uno de los volcanes evaluados. Los volcanes activos o potencialmente activos peruanos, desde el Pleistoceno hasta la actualidad, han presentado erupciones con IEV que varían entre 2 y 6, siendo la erupción del volcán Huaynaputina, ocurrida en el año 1600 d. C., la de mayor índice (IEV 6).

Tabla 3.- Rango de puntuación de los factores de peligro, modificado de Ewert (2005 y 2018) y Ewert (2007).

Factores de Peligro	Rango de Puntuación	Descripción
Tipo de Volcán (a)	0-1	0→Conos de escoria, conos de ceniza, campos volcánicos monogenéticos. 1→Estratovolcán, domo de lava, complejo volcánico.
Máximo Índice de Explosividad Volcánica (b)	0-3	0→IEV 1 - 2 1→IEV 3-4 o desconocido volcán de tipo 1. 2→IEV 5-6 3→IEV \geq 7
Actividad explosiva menor a 500 años IEV \geq 2 (c)	0-1	0→Desconocido 1→Actividad explosiva en los últimos 500 años
Actividad explosiva menor a 5000 años IEV \geq 4 (d)	0-1	0→Desconocido 1→Actividad explosiva en los últimos 5000 años
Recurrencia eruptiva (e)	0-4	0→Desconocido erupciones en el Holoceno. 1→intervalo eruptivo 5 000 - 10 000 años. 2→intervalo eruptivo 1 000 a miles de años. 3→intervalo eruptivo 100 - 1 000 años. 4→intervalo eruptivo 1 - 99 años.
Flujos piroclásticos en el Holoceno (f)	0-1	0→No existieron o se desconocen 1→Sí existieron flujos piroclásticos
Flujos de lava en el Holoceno (g)	0-1	0→No existieron o se desconocen 1→Sí existieron y alcanzaron áreas pobladas holocenos.
Lahares en el Holoceno (h)	0-1	0→No existieron o se desconocen 1→Sí existieron y alcanzaron áreas pobladas
Potenciales explosiones hidrotermales (i)	0-1	0→No presenta o se desconoce 1→Evidencia en el holoceno o existencia de actividad termal o sistemas hidrotermales.
Potencial sector colapso (j)	0-1	0→No presenta o se desconoce. 1→Existencia de sector de colapso o presenta laderas escarpadas con alteración.
Fuente de lahar primario (k)	0-1	0→No presenta. 1→si el volcán tiene cuerpo glaciar permanente.
Fuente de lahar secundario (asociado a lluvias) (l)	0-1	0→No presenta. 1→Si presenta y existen drenajes en dirección de zonas pobladas o infraestructura crítica.
Actividad sísmica observada (m)	0-1	0→No presenta. 0.5→ Se Desconoce. 1→Presenta actividad sísmica anómala (asociada a intranquilidad volcánica).
Deformación observable de la superficie (n)	0-1	0→No presenta o se desconoce. 1→Presenta o ha presentado deformación superficial asociada a la inyección de magma.
Fumarola o desgasificación (o)	0-1	0→No presenta o se desconoce. 1→Presenta fuente de calor, vapor de agua o gases magmáticos.

(c) **Actividad explosiva en los últimos 500 años con IEV \geq 2.** Este factor fue modificado dado que el criterio originalmente consideraba información acerca de la "actividad explosiva ocurrida en últimos 500 años con IEV \geq 3". La modificación se sustenta en el hecho que, en Perú, los estudios realizados indican que en los

últimos 500 años un número importante de volcanes han presentado erupciones explosivas con IEV igual a 2, resaltando los volcanes Sabancaya (Gerbe & Thouret, 2004; Siebert *et al.*, 2011; Samaniego *et al.*, 2016) y Ubinas (Thouret *et al.*, 2005; Rivera *et al.*, 2014; Del Carpio & Torres, 2020); únicamente tres volcanes: Huaynaputina (Thouret *et al.*, 2002; Lavallée *et al.*, 2006), Tutupaca (Samaniego *et al.*, 2015), y Ubinas (erupción de 1677) han presentado erupción con $IEV \geq 3$. Algunos de estos volcanes continúan presentando actividad eruptiva en la actualidad (por ej. volcán Sabancaya). En ese sentido, se ha considerado importante brindar una puntuación adicional a volcanes que han presentado un IEV 2.

(d) Actividad explosiva en los últimos 5 000 años con $IEV \geq 4$. Se aplica el criterio al volcán Misti, el cual ha presentado una erupción explosiva con IEV 5 hace aproximadamente 2 mil años A.P. (Thouret *et al.*, 2001; Harpel *et al.*, 2011), y al volcán Ubinas que presentó una erupción pliniana hace aproximadamente 980 años A.P. (Thouret *et al.*, 2005; Samaniego *et al.*, 2020).

(e) Recurrencia eruptiva. Factor que considera el intervalo o frecuencia de las erupciones volcánicas, siendo el volcán Ubinas el que más procesos eruptivos o erupciones ha presentado en los últimos 500 años (27 erupciones desde el año 1550 [Rivera *et al.*, 2014]).

(f) Presencia de depósitos de flujos piroclásticos, (g) flujos de lava y (h) lahares ocurridos desde el Holoceno (3 factores). Los criterios establecen que, actualmente, sobre los depósitos de flujos piroclásticos, lavas y/o lahares generados por actividad volcánica y que datan de hace menos de 12 mil años, se asiente una comunidad o población. En ese contexto, en el sur peruano existen poblaciones asentadas sobre depósitos de flujos

piroclásticos ubicados próximos a los volcanes Misti (Harpel *et al.*, 2011; Thouret *et al.*, 2001), Huaynaputina (Thouret *et al.*, 2002) y Ticsani (Mariño & Thouret, 2003). Asimismo, existen poblaciones asentadas sobre flujos de lava de los volcanes Cerro Auqui huato (Morales & Amelung, 2016), CVM Andagua (Galas & Paulo, 2008; Delacour *et al.*, 2007) y Sara Sara (Rivera *et al.*, 2020). Finalmente, existen centros poblados ubicados sobre depósitos de lahares en cercanías de los volcanes Sara Sara (Rivera *et al.*, 2020), Coropuna (Bromley *et al.*, 2019; Ubeda, 2011), Misti (Harpel *et al.*, 2011; Thouret *et al.*, 2001; Cobeñas *et al.*, 2012), Chachani (Alavi, 2020), Ubinas (Thouret *et al.*, 2005; Rivera *et al.*, 2014; Del Carpio *et al.*, 2016), Huaynaputina (Thouret *et al.*, 2002) y Yucamane (Rivera *et al.*, 2016).

- (i) **Potenciales explosiones hidrotermales.** Criterio referido a evidencias de erupciones freatomagmáticas, así como, la presencia de un sistema hidrotermal o fuentes termales activas en inmediaciones de los volcanes. De los 17 volcanes evaluados, se desconoce si el volcán Cerro Auqui huato, CVM Huambo y Purupuruni presentaron erupciones freatomagmáticas o si presentan un sistema hidrotermal activo.

- (i) **Potencial sector de colapso.** Comprende la identificación de zonas que presentan: alto grado de fracturamiento, fallas, alteración hidrotermal, erosión o cobertura glaciar del edificio volcánico, etc. También está referido a evidencias pasadas de colapso sectorial de flanco que, en algunos casos, fue cubierto por depósitos volcánicos más recientes. Los volcanes Sara Sara (Rivera *et al.*, 2020), Solimana (Goemans *et al.*, 1990; Vatin-Pérignon *et al.*, 1991), Coropuna, Chachani (García *et al.*, 1997; Suaña, 2012), Misti (Thouret *et al.*, 2001), Ubinas (Thouret *et al.*, 2005; Rivera *et al.*, 2014), Ticsani (Mariño & Thouret, 2003), Tutupaca (Samaniego

et al., 2015) y Yucamane (Rivera *et al.*, 2020) presentan evidencias de colapsos en el pasado que pueden volver a presentarse en el futuro.

(k) Fuente de lahar primario. Factor ligado a volcanes que han generado lahares (flujos de lodo y escombros volcánicos) a consecuencia de la fusión súbita de un casquete glaciar debido al desarrollo de una erupción volcánica (Vallance, 2015). Según los estudios vulcanológicos los únicos volcanes que han generado lahares primarios debido a la fusión del hielo o nieve son el Coropuna, Sabancaya y posiblemente el Misti y Tutupaca (Rivera *et al.*, 2021). Actualmente, el Coropuna es el único volcán que presenta un casquete glaciar permanente.

El factor "Generación de tsunamis en el holoceno", ha sido eliminado de la lista de Ewert *et al.* (2005) de factores de peligro debido a que próximo a los volcanes peruanos no existen cuerpos de agua que condicionen la generación de este proceso.

(l) Inclusión de fuente de lahar secundario. - Se ha considerado como un nuevo factor, la ocurrencia de lahares secundarios generados debido a intensas precipitaciones pluviales y que presenten afectación, incluso si dicho volcán se mantiene en reposo o calma, resaltando el hecho que, en años recientes, lahares de este tipo han provocado la pérdida de vidas humanas en Arequipa. En el sur peruano, los lahares secundarios representan un peligro recurrente durante el verano (diciembre-marzo). En los últimos años se ha registrado el descenso de lahares secundarios en los volcanes Misti (Ettinger *et al.*, 2014), Chachani (Alavi, 2020), Sabancaya (Rivera *et al.*, 2016), Ubinas, Coropuna y Huaynaputina (Rivera *et al.*, 2021); además, existe la posibilidad de la ocurrencia de este tipo de peligro en los volcanes Solimana, Ticsani, Tutupaca y Yucamane.

Dentro de los factores de peligro se incluyen también los denominados factores de intranquilidad:

(m) Actividad sísmica observada. Implica la detección de actividad sísmica asociada a la generación de un proceso eruptivo o que dicha actividad este directamente relacionada con el sistema volcánico. Los 14 volcanes sobre los cuales el IGP mantiene un monitoreo permanente manifiestan actividad sísmica dentro de niveles "habituales". Asimismo, los volcanes Sabancaya (Macedo *et al.*, 2013; Macedo *et al.*, 2014), Ubinas (Del Carpio *et al.*, 2016) y Huaynaputina (Barriga, 1951; Navarro, 1994) desarrollaron procesos eruptivos luego del registro del incremento de la actividad sísmica. Mientras que, desde el año 2020, los volcanes Casiri y Purupuruni (Velarde *et al.*, 2020; Antayhua *et al.*, 2021) presentan o presentaron actividad sísmica recurrente, posiblemente ligado a la actividad de fallas tectónicas que, en consecuencia, no ha devenido en una erupción.

(n) Deformación observable de la superficie. Referida al registro de deformación de la superficie de los volcanes con ayuda de equipos GNSS, inclinómetros o con la técnica de interferometría de radar (InSAR) producto de la intrusión o ascenso de magma. Este criterio, con valor 1, se ha considerado para los volcanes Sabancaya (Boixart *et al.*, 2020; MacQueen *et al.*, 2020), Ubinas (Del Carpio *et al.*, 2020b) y Cerro Auqui huato (Morales *et al.*, 2016) en donde se ha evidenciado deformación de la superficie del volcán producto del ascenso de magma. Pero, deformaciones observadas en las últimas décadas en los volcanes Ticsani (Gonzales *et al.*, 2009), Purupuruni y Casiri (Antayhua *et al.*, 2021) tienen orígenes ligados a la reactivación de fallas locales, es decir, no hay evidencia actual

de la participación de una componente magmática, por lo tanto, se considera una puntuación de cero.

(o) Fumarolas o desgasificación. Se refiere a las emisiones de gases volcánicos previas al inicio de una erupción o en ausencia de esta. En años recientes, los volcanes Sabancaya y Ubinas presentaron erupciones volcánicas luego de un incremento sustancial de la actividad fumarólica. Otros volcanes, como el Misti en los años 1542, 1599, 1826, 1830 y 1831, 1869 y 1870 (Hantke & Parodi, 1966; Siebert *et al.*, 2011), y en el año 2001 (Cruz *et al.*, 2004) presento emisiones de gases que no involucró el desarrollo de un proceso eruptivo. También, existen otros volcanes que, actualmente, presentan emisiones difusas de gases como el Tutupaca y Ticsani, pero que no implican una situación anómala.

Finalmente, la suma algebraica de estos factores (**FP**) permite obtener la puntuación del peligro volcánico para cada volcán evaluado según la formula siguiente:

FP = suma total de la puntuación asignada a cada factor de la Tabla 3

4.2.- Factores de Exposición Relativa

Los factores de exposición relativa (**FER**), de acuerdo a la metodología de Ewert et al. (2018), se refieren a las estimaciones sobre la cantidad de población potencialmente expuesta al peligro volcánico. También están referidos a la exposición de las obras de infraestructura y medios de vida que pueden ser afectados por productos volcánicos en futuras erupciones.

Según la Tabla 4, para la evaluación de los factores de exposición relativa de los volcanes evaluados, ha requerido la siguiente información:

Tabla 4.- Rango de puntuación de los factores de Exposición Relativa, modificado de Ewert et al. (2005, 2018) y Ewert (2007).

Factores de Exposición	Rango de puntuación	Descripción
Población existente en un radio de 30 km (p)	0-5.4	Log ₁₀ de población cercana al volcán en un radio de 30 km.
Población cercana a zonas de peligro por descenso de lahares localizada a más de 30 km del centro volcánico(q)	0-5.1	Log ₁₀ de población fuera del radio de 30 km asentada sobre depósitos de lahar (flujos de lodo y escombros volcánicos) o están en peligro ante descenso de lahares.
Muertes históricas (r)	0-1	0→No presenta o se desconoce 1→Si existen registros de muertes por erupción volcánica o peligros asociados (ej. lahares).
Evacuaciones históricas (s)	0-1	0→No presenta o se desconoce 1→Si existen registro de evacuaciones de población debido a potencial amenaza eruptiva.
Exposición de la Aviación local (t)	0-2	0→No existen aeropuertos en 300 km de radio. 1→Aeropuerto ubicado hasta 50 km del volcán de tipo 1. 2→Volcán de tipo 1 y dentro de 300 km de radio existe algún aeropuerto internacional.
Exposición de la Aviación regional (u)	0-5.15	Log ₁₀ número de pasajeros de líneas aéreas que transitan por día en un radio de 300 km del volcán, aplicado a volcanes de tipo 1.
Infraestructura energética en 30 km (v)	0-1	0→No presenta 1→Existen infraestructuras de generación, transmisión o distribución de electricidad dentro de un radio de 30 km.
Infraestructura de transporte en 30 km (w)	0-1	0→No presenta 1→Existe desarrollo de infraestructuras de transporte (líneas ferroviarias o carreteras principales).
Mayor desarrollo y zonas sensibles en 30 km (x)	0-1	0→No presenta 1→Existen zonas de sensibilidad y vulnerabilidad (represas, unidades y proyectos mineros, áreas naturales protegidas, zonas arqueológicas y zonas turísticas, I. E., centros de salud, etc.) frente a una erupción volcánica.

- Datos demográficos de población asentada en inmediaciones de los volcanes. Esta información fue obtenida del último censo nacional de población y vivienda efectuado por el Instituto Nacional de Estadística e Informática en el año 2017 (INEI, 2018).
- Número de centros poblados ubicados en inmediaciones de los volcanes. Esta información corresponde al último censo nacional de población y vivienda efectuado en 2017 (INEI, 2018).
- Proyectos mineros y unidades de producción minera ubicados en inmediaciones de los volcanes. Esta información fue obtenida del Ministerio de Energía y Minas (MINEM, 2021).

- Red vial y líneas férreas, puentes, terminales terrestres y aeródromos. Esta información fue obtenida del Ministerio de Transportes y Comunicaciones (MTC, 2018).
- Centrales hidroeléctricas (C.H.), líneas de transmisión eléctrica (L.T.) y sub-estaciones de tensión eléctrica (S.E.). Esta información fue obtenida del Ministerio de Energía y Minas (MINEM).
- Inventario nacional de presas de la Autoridad Nacional del Agua (ANA, 2015).
- Áreas naturales protegidas según la información del Servicio Nacional de Áreas Protegidas por el Estado (SERNANP, 2020).
- Sitios arqueológicos según la información del Ministerio de Comercio Exterior y Turismo (MINCETUR, 2021).
- Instituciones educativas según la información del Ministerio de Educación (MINEDU, 2021).
- Hospitales y Puestos de Salud según la información del Ministerio de Salud (MINSa, 2021).
- Aeropuertos y vuelos comerciales según la información obtenida de la Corporación Peruana de Aeropuertos y Aviación Comercial (CORPAC, 2019) y el Ministerio de Transportes y Comunicaciones (MTC, 2018).

A continuación, se detalla los factores de exposición relativa considerados en el análisis:

(p) Población expuesta en un radio de 30 km del volcán. Se obtiene al evaluar el número de población existente dentro de un radio de 30 km alrededor de cada volcán (Tabla 5). En este caso se

considera la población, que al ocurrir erupciones explosivas con IEV >1 tienen gran probabilidad de ser afectadas, principalmente por la caída de tefra (ceniza, lapilli, bloques, etc.), flujos piroclásticos, lahares, avalanchas de escombros, u otros. Futuras erupciones explosivas con IEV igual a 4-6, como las generadas por los volcanes Ubinas, Misti y Huaynaputina en los últimos 2 mil años, tienen posibilidades de afectar áreas o poblaciones ubicadas a más de 30 km de distancia de los volcanes.

Tabla 5.- Datos de la población asentada en un radio de 30 km de los volcanes evaluados. Además, datos de turistas en 2019 que accedieron hasta un radio de 30 km de los volcanes. *Se considera un radio de 30 km por volcán, el cual puede sobreponerse en el ámbito de otro macizo, cuya suma total no debe ser contabilizada.

Volcán	Nº Distritos ubicados en un radio de 30 km	Nº Población asentada en un radio de 30 km de los volcanes	Nº Poblados en un radio de 30 km de los volcanes	Nº de turistas por día en un radio de 30 km	VPI
Quimsachata	19	114 680	772	---	5.1
Cerro Auqui huato	17	10 404	223	---	4.0
Sara Sara	16	11 242	175	---	4.1
Solimana	11	7 067	191	---	3.8
Coropuna	12	5 673	166	---	3.8
CV Andagua	9	11 763	120	---	4.1
CV Huambo	6	3 329	149	---	3.5
Sabancaya	13	10 204	188	277	4.0
Chachani	19	927 428	123	5 454	6.0
Misti	24	1 031 807	167	5 454	6.0
Ubinas	8	5 354	159	12	3.7
Huaynaputina	10	9 935	174	---	4.0
Ticsani	8	4 446	126	---	3.6
Tutupaca	6	3 988	100	---	3.6
Yucamane	9	6 711	147	---	3.8
Casiri	8	5 860	167	---	3.8
Purupuruni	12	5 940	156	---	3.8

Este factor utiliza el \log_{10} de la población expuesta, obtenida de la cantidad de habitantes asentados dentro de un radio de 30 km del cráter de los volcanes evaluados. De acuerdo con la metodología de Ewert *et al.* (2005), este cálculo está estrechamente relacionado

con el Índice de Población de Volcanes o VPI (por sus siglas en inglés). El VPI cuantifica el riesgo en función del número de población que vive alrededor de volcanes (Ewert & Harpel, 2004).

Por otro lado, en el sur del Perú, varias zonas turísticas se ubican próximas a los centros volcánicos, como, por ejemplo, el valle del Colca, ubicado a menos de 20 km del volcán Sabancaya. En este caso, se ha promediado el número diario de turistas (AUTOCOLCA, 2021) expuestos al peligro volcánico que desarrollan sus actividades dentro de un radio de 30 km de los volcanes.

Este factor se ha mantenido sin cambios en el presente estudio. Sin embargo, para futuras actualizaciones del NPV, es preciso señalar que el nivel de afectación depende principalmente del tipo de volcán y del IEV (Tabla 3, factores "a y b"). Por ejemplo, dicho radio puede quedar pequeño en caso de erupciones de volcanes de tipo 1 que generen erupciones con $IEV \geq 2$, caso de la erupción del volcán Ubinas que, en julio de 2019, luego de la actividad explosiva en conjugación con los vientos predominantes facilitaron que las cenizas viajaran a más de 250 km de distancia respecto al volcán. Volcanes de tipo 0 producen impactos o daños más sectorizados en quebradas o valles, y sus peligros asociados, como flujos de lava, tienen menores probabilidades de superar distancias mayores a 30 km.

(q) Población cercana a zonas de peligro por descenso de lahares localizada a más de 30 km del volcán. Se obtiene estimando el número de población asentada sobre depósitos de lahares (flujos de lodo) pasados y que están fuera de un radio de 30 km del volcán. Se ha determinado a partir de los datos del INEI (2018) y mapas de peligros de lahares (por ej. Rivera *et al.*, 2021; Mariño *et al.*, 2016). En ese sentido, los volcanes con mayor

población cercana a cursos de agua son Misti, Chachani, Coropuna, Solimana y Sabancaya (Figura 2). El criterio utiliza el \log_{10} del número de población expuesta para simplificar el cálculo.

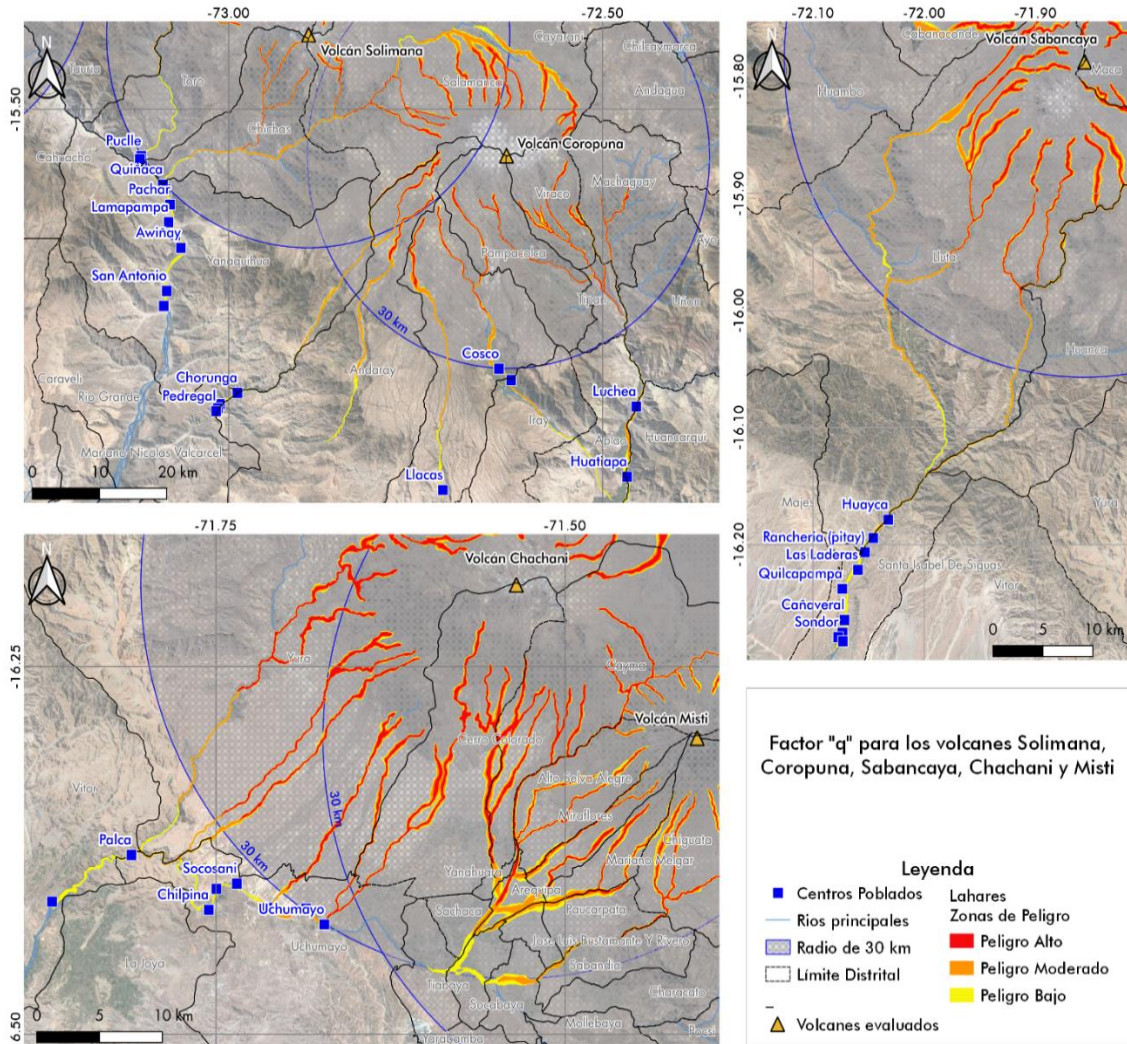


Figura 2.- Mapa de centros poblados (cuadrados azules) localizados a más de 30 km del centro volcánico y ubicados en zonas de peligro por descenso de lahares. Factor de exposición relativa "q" para los volcanes Solimana, Coropuna, Sabancaya, Chachani y Misti. Capa de zonas de peligro por descenso de lahares extraído de Rivera et al. (2021).

(r) y (s) **Muertes y evacuaciones históricas (2 factores)**. Se refiere al número de víctimas y evacuaciones producidas en la época histórica a consecuencia de erupciones volcánicas. De acuerdo con la metodología empleada, se considera el valor de 1, cuando se presenta la erupción y se tiene muertes o evacuaciones. El presente estudio también considera el número de víctimas a raíz de la

generación de lahares “secundarios” en volcanes y que, en las últimas décadas, han estado o están en “reposo”.

De acuerdo con los registros históricos, la gran erupción del volcán Huaynaputina ocurrida en el año 1600 d. C. ocasionó la muerte de más de mil quinientas personas (*Navarro et al., 2000; Thouret et al., 2002*) y generó un proceso de autoevacuación de la población, quienes abandonaron las zonas aledañas al volcán Huaynaputina dirigiéndose a las ciudades de Arequipa y Moquegua. Recientemente, el INDECI reportó 6 personas fallecidas en Arequipa por el descenso de lahares secundarios de los volcanes Misti y Chachani, ocurridas en los años 2013 y 2018, respectivamente (*Ettlinger et al., 2015; Alavi, 2020*). También, existen registros de procesos de evacuación de poblaciones asentadas en el entorno de los volcanes Ubinas (erupciones de 2006-2019, 2013-2017 y 2019) y Sabancaya (erupción de 1988-1998).

(t) Exposición de la aviación local. Información obtenida a partir de la ubicación de aeropuertos nacionales e internacionales que existen en un radio que varía entre 50 km y 300 km de los volcanes de tipo 1 o de tipo explosivos (Tabla 3, Factor “a”). En Perú, los aeropuertos que están dentro del ámbito de influencia de los volcanes se ubican en las ciudades de Cusco, Arequipa, Ilo, Tacna, Juliaca, Nasca, Puerto Maldonado y Ayacucho. También se ha considerado los aeropuertos internacionales de La Paz (Bolivia) y Arica (Chile), ver Figura 3.

(u) Exposición de la aviación regional. La información fue obtenida de la Corporación Peruana de Aeropuertos y Aviación Comercial (*CORPAC, 2019*), el Ministerio de Transportes y Comunicaciones de Perú (*MTC, 2018*) y la Dirección de Concesiones del Ministerio de Obras Publicas de Chile (*DGG Chile, 2020*).

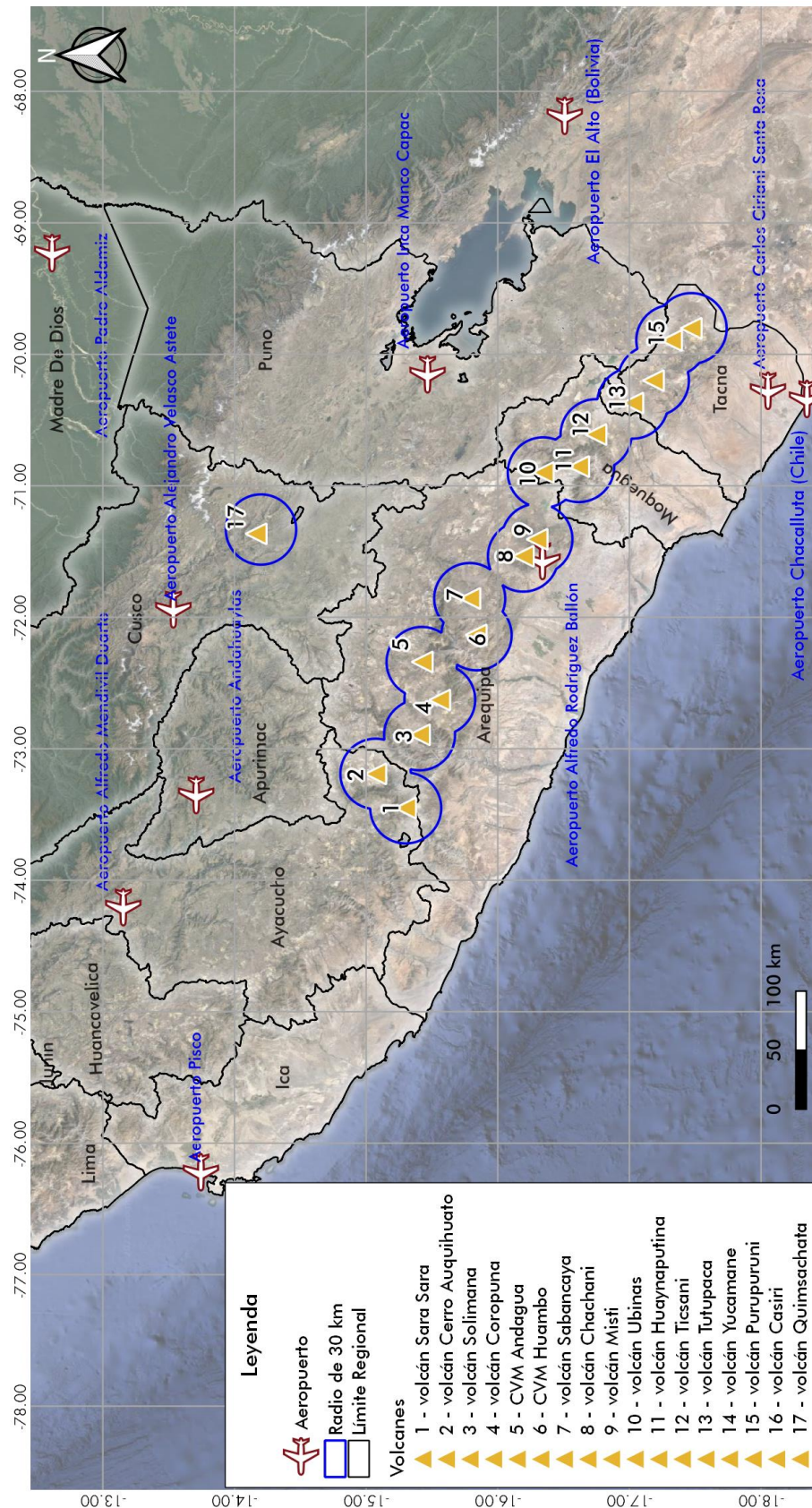


Figura 3.- Mapa de ubicación de los principales aeropuertos del Perú (CORPAC, 2019; MTC, 2018), norte de Chile (DGG Chile, 2020) y Bolivia en relación con los volcanes evaluados en el presente estudio.

Se ha considerado el número de pasajeros aéreos diarios que son embarcados en los aeropuertos identificados en el factor de exposición de la aviación local. Dicho número es el promedio por día del registro anual de las entidades mencionadas. Según los resultados obtenidos, se estima que aproximadamente 11 mil pasajeros viajan diariamente en las diferentes aerolíneas y están expuestos a las erupciones de los volcanes de tipo 1. Las rutas aéreas de Lima hacia el sur del país, incluso con dirección a La Paz (Bolivia), sobrevuelan la cadena volcánica. Para simplificar el cálculo el criterio utiliza el \log_{10} del número de pasajeros expuestos.

- (v) Infraestructura energética en 30 km.** Considera la ubicación de plantas de generación eléctrica (hidroeléctricas, etc.), líneas de transmisión (L.T.) y subestaciones eléctricas (S.E.), como la red interconectada nacional, entre otras, ubicadas dentro de un radio de 30 km de los volcanes (Figura 4). Ante la ocurrencia de una erupción, las cenizas o productos volcánicos emitidos dañarían componentes eléctricos o cables de poder a través de descargas disruptivas, corrosión y/o abrasión, lo que provocaría interrupciones en el servicio eléctrico.
- (t) Infraestructura de transporte en 30 km.** Referido a la ubicación de tramos de carretera y líneas férreas que atraviesan zonas próximas a menos de 30 km de los 17 volcanes evaluados. Aquí se consideran las redes viales de carácter nacional y regional (Figura 4 y Tabla 6).
- (u) Mayor desarrollo y zonas sensibles en 30 km.** Se considera la existencia de represas, áreas naturales protegidas, zonas turísticas y culturales (zonas arqueológicas, museos, monumentos, etc.), unidades y proyectos mineros, instituciones educativas y centros de salud (C.S.) ubicados dentro de un radio de 30 km del volcán

(Figura 4 y Tabla 6). Todos los volcanes evaluados presentan alguno o varios de estos criterios.

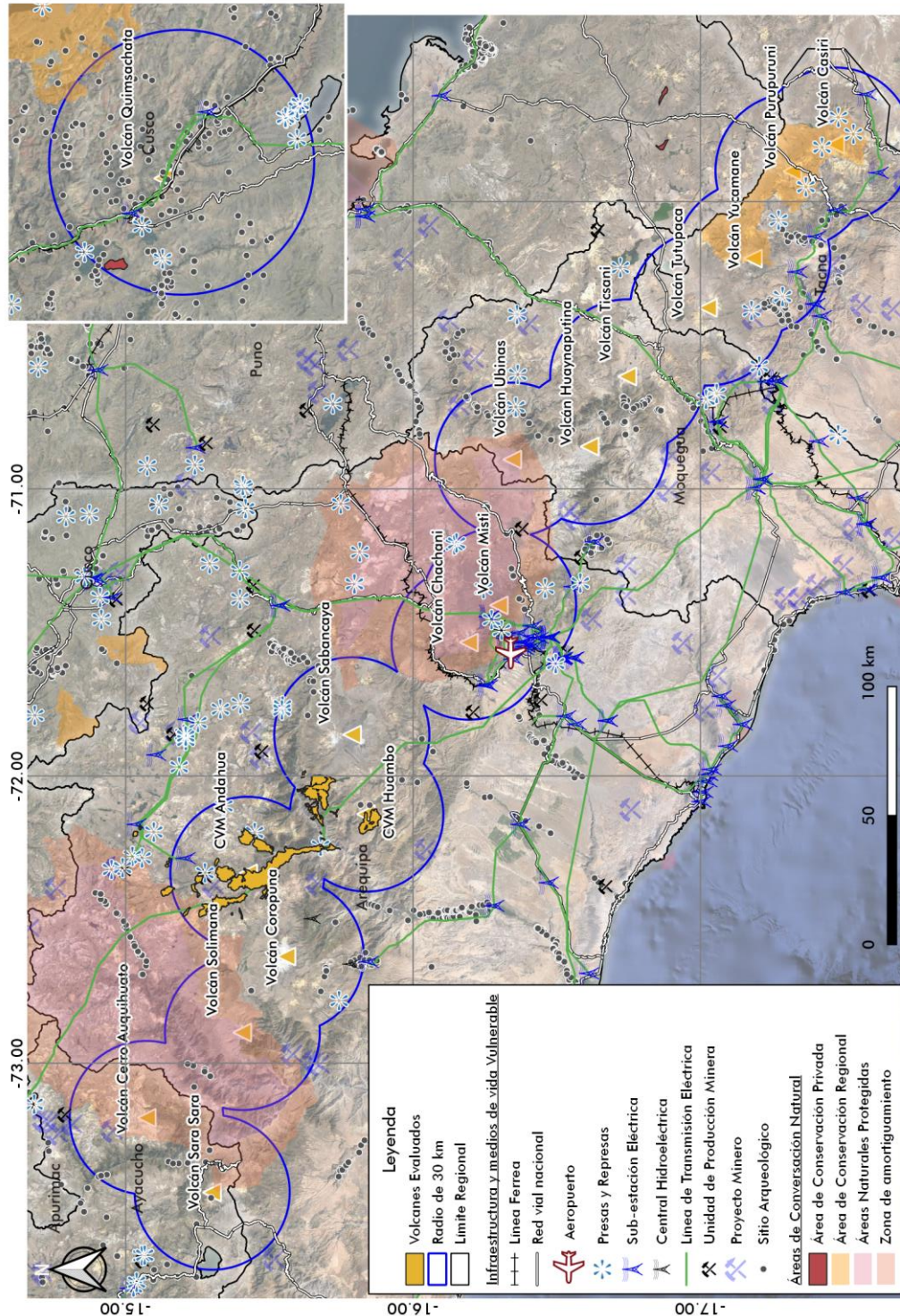


Figura 4.- Elementos expuestos a una erupción de cualquiera de los 17 volcanes evaluados. Infraestructura existente: vías de comunicación, represas, líneas de transmisión eléctrica, sub-estaciones eléctricas, unidades mineras en producción y en proyecto, sitios arqueológicos y áreas de conservación natural.

Finalmente, la suma algebraica de estos factores **FER** permite obtener la puntuación de la exposición relativa al peligro volcánico para cada volcán evaluado:

FER = suma total de la puntuación asignada a cada factor de la Tabla 4

Tabla 6.- Infraestructura y medios de vida expuestos al peligro volcánico. Se considera un radio de 30 km por volcán, el cual puede sobreponerse en el ámbito de otro macizo, cuya suma total no se contabiliza.

Volcán	Red Vial (Tramo-ruta) (MTC, 2018).	Represas y presas (ANA, 2018).	Áreas Naturales Protegidas (SERNANP, 2020).	Unidad y/o Proyecto Minero (MINEM, 2020 y 2021)	N° Centros de Salud (MINSAL, 2021)	N° Instituciones Educativas (MINEDU, 2021)
Quimsachata	PE-34F, PE-34G, PE-3S	Pampamarca y Qochapata			35	659
Cerro Auqui huato	AY-1235, AY-1236, AY-1239		Reserva Paisajista	UM Inmaculada PM Palca	19	122
Sara Sara	PE-32, PE-32C		Subcuenca del Cotahuasi		21	150
Solimana	AR-105			PM Tororume, PM Pecoy	12	73
Coropuna	AR-105, AR-106, AR-107	Presas 1			4	61
CVM Andagua	AR-106, AR-647, AR-672	San Félix		UM Orcopampa, PM Iluminadora, PM Pucay	7	61
CVM Huambo	AR-109, AR-106, AR-679, AR-704		Geoparque del Colca y valle de los volcanes de Andagua	PM Zafranil	5	21
Sabancaya	AR-109, AR-704	Presas Ticllacocha y Jatuncocha, Canal del Proyecto Majes-Sihuas			14	61
Chachani	PE-34A, AR-116	Represa Aguada Blanca		Cementos Yura	91	1 997
Misti	PE-34A, AR-115, AR-116, AR-123	Represa Aguada Blanca Represa El Frayle	Reserva Nacional Salinas y Aguada Blanca		101	2 106
Ubinas	MO-104, MO-531, MO-101, MO-100, AR-119	Chirimayuni		UM Borax, PM Conquemayo	14	85
Huaynaputina	PE-100, PE-108			PM Conquemayo, PM Amata	18	124
Ticsani	PE-36A, PE-36B, MO-100, MO-103, etc.				9	51
Tutupaca	PE-36A, TA-103, TA-104, TA-105, TA-509, etc.	Cularjahuire Pasto Grande		PM Suyawi, PM Quellaveco	4	32
Yucamane	TA-103, TA-104, TA-516, TA-530, PU-132, etc.	Huayñuma y Cularjahuire		PM Suyawi	13	98
Casiri	TA-105, TA-596, TA-599, TA-600	Casiri, Paucarani y Condorpico	Área de conservación Vilacota Maure	PM Ataspaca	14	63
Purupuruni	PE-38, TA-557, TA-106, TA-107	Jaruma			13	61

4.3.- Nivel de Peligrosidad Volcánica (NPV)

El producto de la suma total de los factores de peligro y exposición relativa determinados para cada volcán evaluado, permite calcular el Nivel de Peligrosidad Volcánica-NPV:

$$NPV = \text{Factor de Peligro} \times \text{Factor de Exposición Relativa}$$

Los factores de peligro y de exposición relativa evaluados han sido cuantificados en la Tabla 7. En dicha tabla, los volcanes están ordenados geográficamente de norte a sur, la columna marcada en rojo corresponde al valor final del NPV, las columnas en naranja corresponden a los factores de peligro y las columnas en verde a los factores de exposición relativa. Finalmente, las columnas con celdas amarillas muestran los valores finales calculados para el factor de peligro y el factor de exposición relativa para cada volcán.

Tabla 7.- Factores de Peligro y Exposición Relativa evaluados para los 17 volcanes considerados en este estudio a fin de determinar el Nivel de Peligrosidad Volcánica.

VOLCÁN	Purupuruni	Casiri	Yucamane	Tutupaca	Ticsani	Hueyñoputina	Ubinas	Misti	Chachani	Sabancaya	CVM Huambo	CVM Andagwa	Coropuna	Sollimana	Sara Sara	C. Anguñuato	Quimsachata
Tipo de Volcán	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1	0	0
Máximo IEV	1	1	1	1	1	2	2	2	1	1	0	0	1	1	2	0	0
Actividad Explosiva < 500 a. (IEV≥2)	0	0	0	1	1	1	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
Actividad Explosiva < 5000 a. (IEV≥4)	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Recurrencia Eruptiva	0	0	1	2	2	0	4	3	0	4	0	2	0	0	0	0	0
Flujo Piroclástico en el Holoceno	0	0	0	0	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Flujo de lava en el Holoceno	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0
Lahares en el Holoceno	0	0	1	0	0	1	1	1	1	1	0	0	1	0	1	0	0
Potenciales Explosiones Hidrotermales	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	0	1
Potencial Sector de Colapso	0	0	1	1	1	0	1	1	1	1	0	0	1	1	1	0	0
Fuente de lahar primario	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	1	1	1	0	0
Fuente de lahar secundario	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1	0	0
Actividad Sísmica observada	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	0
Deformación observable en superficie	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0
Fumarola o desgasificación magmática	0	0	0	0	1	1	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0
Log10 de Población existente en 30 km	3.8	3.8	3.8	3.6	3.6	4.0	3.7	6.0	6.0	4.0	3.5	4.1	3.8	3.8	4.1	4.0	5.1
Log10 de Población cercana a zonas de peligro por descenso de lahares localizada a mas de 30 km del volcán	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	4.8	3.1	2.5	0.0	0.0	3.4	1.4	0.0	0.0	0.0
Muertes históricas	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	0.0	1.0	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Evacuaciones históricas	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	0.0	0.0	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Exposición de la aviación local	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	0.0	0.0	2.0	2.0	2.0	0.0	0.0
Log10 de la exposición a la aviación regional	4.1	4.1	4.1	4.1	4.1	4.1	4.1	4.0	4.3	4.2	0.0	0.0	4.3	4.3	4.2	0.0	0.0
Infraestructura Energética en 30 km.	1.0	1.0	1.0	0.0	1.0	0.0	0.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.0	0.0	1.0
Infraestructura de transporte en 30 km.	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
Mayor desarrollo y zonas sensibles en 30 km.	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Factor de Peligro	3.0	4.0	8.0	9.0	11.0	10.0	16.0	14.0	8.0	15.0	0.0	4	8	7	9	3	1
Factor de Exposición Relativa	12.8	12.8	12.9	11.7	12.7	13.1	12.8	20.9	19.4	16.7	6.5	7	16	14	12	6	8
Nivel de Peligrosidad Volcánica (NPV)	38.5	51.3	103.1	105.0	139.8	130.6	204.7	292.4	155.3	251.1	0.0	28	132	101	111	18	8

5.- RESULTADOS

5.1.- Nivel de Peligrosidad Volcánica (NPV)

Para el cálculo del Nivel de Peligrosidad Volcánica (NPV) se ha realizado el análisis de los factores de peligro volcánico y de exposición relativa. Los volcanes con un alto factor de peligro (Tabla 7), indican que estos han presentado erupciones con mayor recurrencia al menos en los últimos siglos y décadas; por lo tanto, tienen mayor probabilidad de erupcionar en el futuro y afectar a la población y/u obras de infraestructura existentes en sus alrededores. Estos volcanes son el Ubinas (considerado como el más activo del Perú), Sabancaya y Misti; seguidos de los volcanes Ticsani, Huaynaputina, Sara Sara y Tutupaca (Figura 5). Estos volcanes, a excepción del Sara Sara, han presentado erupciones explosivas en los últimos 500 años.

Asimismo, volcanes con alto factor de exposición relativa (Tabla 7) consideran la existencia en sus inmediaciones de ciudades o centros poblados densamente habitados, así como de infraestructuras expuestas a una erupción volcánica. Estos volcanes son el Misti y Chachani, debido a la presencia de un gran número de personas asentadas en la ciudad de Arequipa, que serían afectadas en caso de erupciones volcánicas y/o peligros asociados, incluso en eventos de baja magnitud (IEV 1-2). Asimismo, otros volcanes que tienen en su entorno mayor población y/u obras de infraestructura expuestas son el Sabancaya, Coropuna y Solimana. Una probable erupción volcánica con la emisión de cenizas, generación de lahares de importante volumen ($>15 \text{ Mm}^3$) y/o el desarrollo de avalanchas de escombros de cualquiera de estos volcanes puede afectar a poblaciones ubicadas en sus inmediaciones.

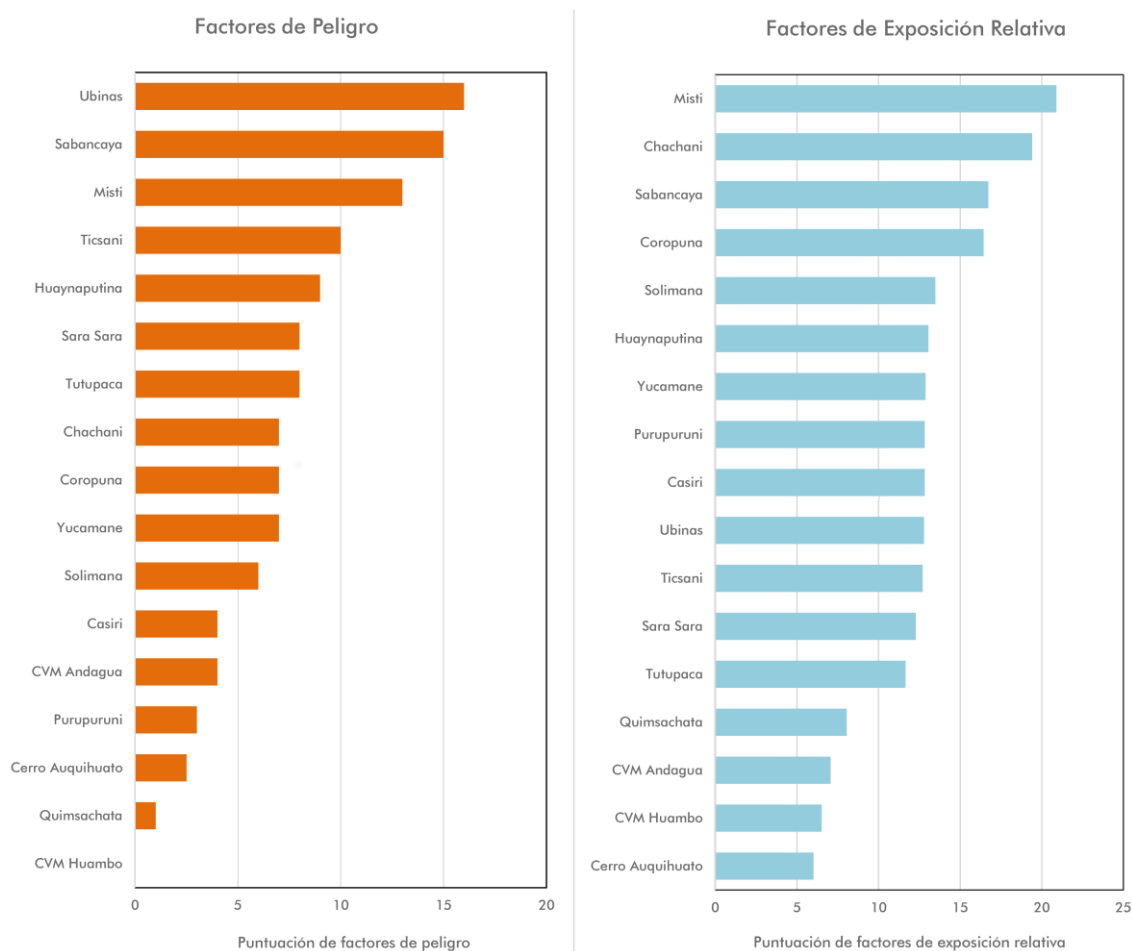


Figura 5.- Puntuación de los factores de peligro (izquierda) y factores de exposición relativa (derecha) para los 17 volcanes evaluados.

El análisis de los factores de peligro volcánico y exposición relativa, ha permitido categorizar a los volcanes peruanos de acuerdo con su Nivel de Peligrosidad Volcánica (NPV) en 5 niveles. La categorización o división por grupos de volcanes ha sido realizada mediante la observación de cambios abruptos o moderados en la pendiente de la curva de puntuación observada en la Figura 6 (línea roja).

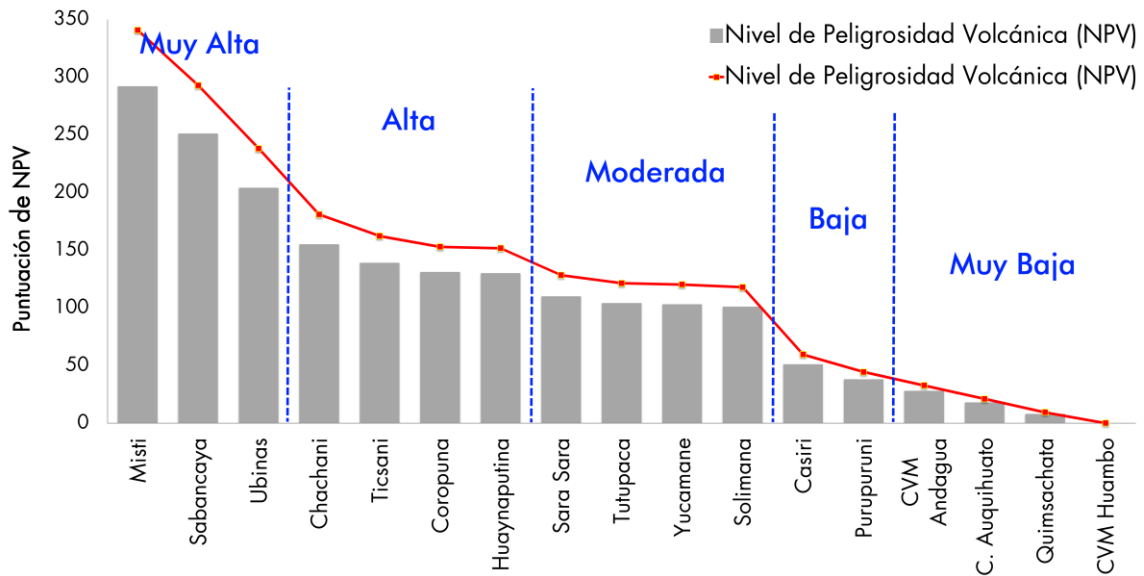


Figura 6.- Puntuación obtenida que determina 5 Niveles de Peligrosidad Volcánica: Muy Alta, Alta, Moderada, Baja y Muy Baja.

5.1.1.- Volcanes de Muy Alta Peligrosidad

Según la Figura 6, los volcanes de muy alta peligrosidad son el Misti, Sabancaya y Ubinas. Los principales factores que determinaron su nivel de peligrosidad son: 1) la alta densidad poblacional, pues en un radio de 30 km del cráter de estos volcanes habita una población aproximada de 1 millón de personas (INEI, 2018). El 98.5% de esta población se encuentra en la ciudad de Arequipa; 2) la presencia de obras de infraestructura próximas a los volcanes. En el caso del volcán Misti, en el área de influencia se sitúan el aeropuerto internacional Alfredo Rodríguez Ballón, la represa Aguada Blanca, las centrales hidroeléctricas de Charcani I, II, III, IV, V y VI, la central térmica de Chilina, líneas de transmisión eléctrica, aproximadamente 100 centros de salud, alrededor de 2 mil instituciones educativas, entre otras infraestructuras (Figura 7), y 3) la recurrencia eruptiva registrada durante los últimos 500 años.

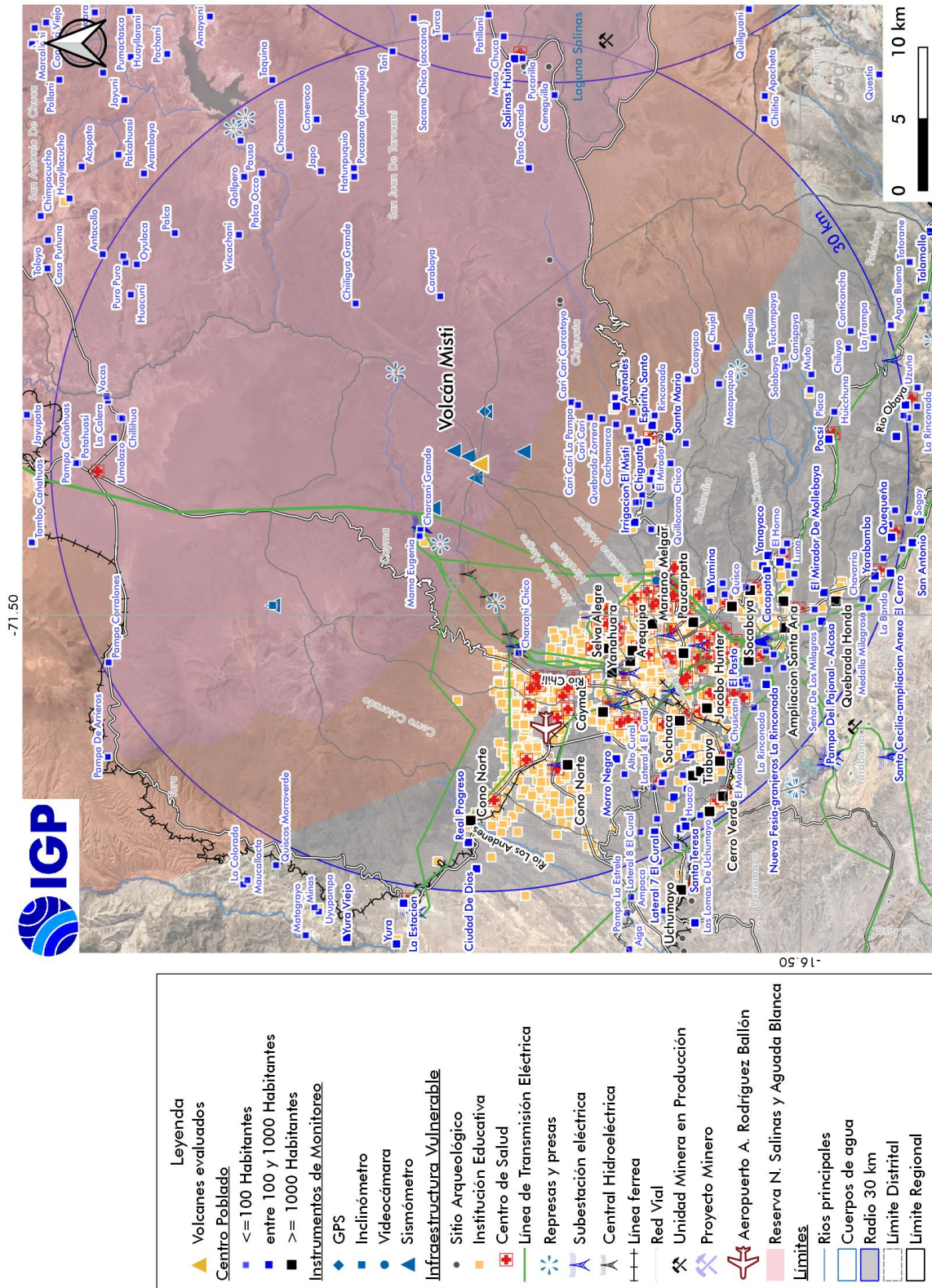


Figura 7.- Mapa de ubicación del volcán Misti, considerado como el de más alta peligrosidad volcánica (NPV Muy Alta), junto a la infraestructura expuesta y medios de vida. La instrumentación de monitoreo volcánico actual se muestra en símbolos azules

Tal como se indicó, el primer volcán de muy alta peligrosidad es el Misti, el cual tiene la posibilidad de generar una erupción explosiva pequeña a moderada (IEV 1-2), como la ocurrida en el siglo XV (1440-1470), poniendo en riesgo y/o afectando las actividades socio-económicas de la ciudad de Arequipa, que actualmente cuenta con una población de aproximadamente 1 millón de habitantes (INEI, 2018). También el Misti puede presentar una erupción explosiva mayor con un IEV 4 o 5, tal como ocurrió hace aproximadamente 2 mil años (Thouret *et al.*, 2001; Harpel *et al.* 2011), con el emplazamiento de más de 1.0 km³ de caídas de tefras y flujos piroclásticos que pueden impactar parte de la ciudad de Arequipa.

Por su parte, el volcán Sabancaya desde noviembre de 2016, viene presentando un proceso eruptivo con la constante generación de explosiones y emisiones de cenizas. Este proceso eruptivo es muy similar a la ocurrida entre los años 1990 y 1998, y de la misma manera afecta a aproximadamente 10 mil personas que viven en un radio de 30 km del cráter (INEI, 2018), con la caída de ceniza y el descenso de lahares. Adicional a la población expuesta (Figura 8), se calcula que alrededor de 277 turistas por día o más de 100 mil foráneos al año visitan el valle del Colca (MINCETUR, 2021), ubicado a 20 km al norte del Sabancaya.

El volcán Ubinas, también considerado como el volcán más activo del Perú por haber presentado 27 erupciones desde el año 1550, 3 de ellas en el presente siglo (2006-2009; 2013-2017; 2019), afectaron a cerca de 5 mil personas que habitan dentro de un radio de 30 km del volcán (INEI, 2018), ver Figura 8. También, erupciones moderadas, como la presentada en 2019, pueden afectar a poblaciones ubicadas a más de 250 km de distancia del volcán.

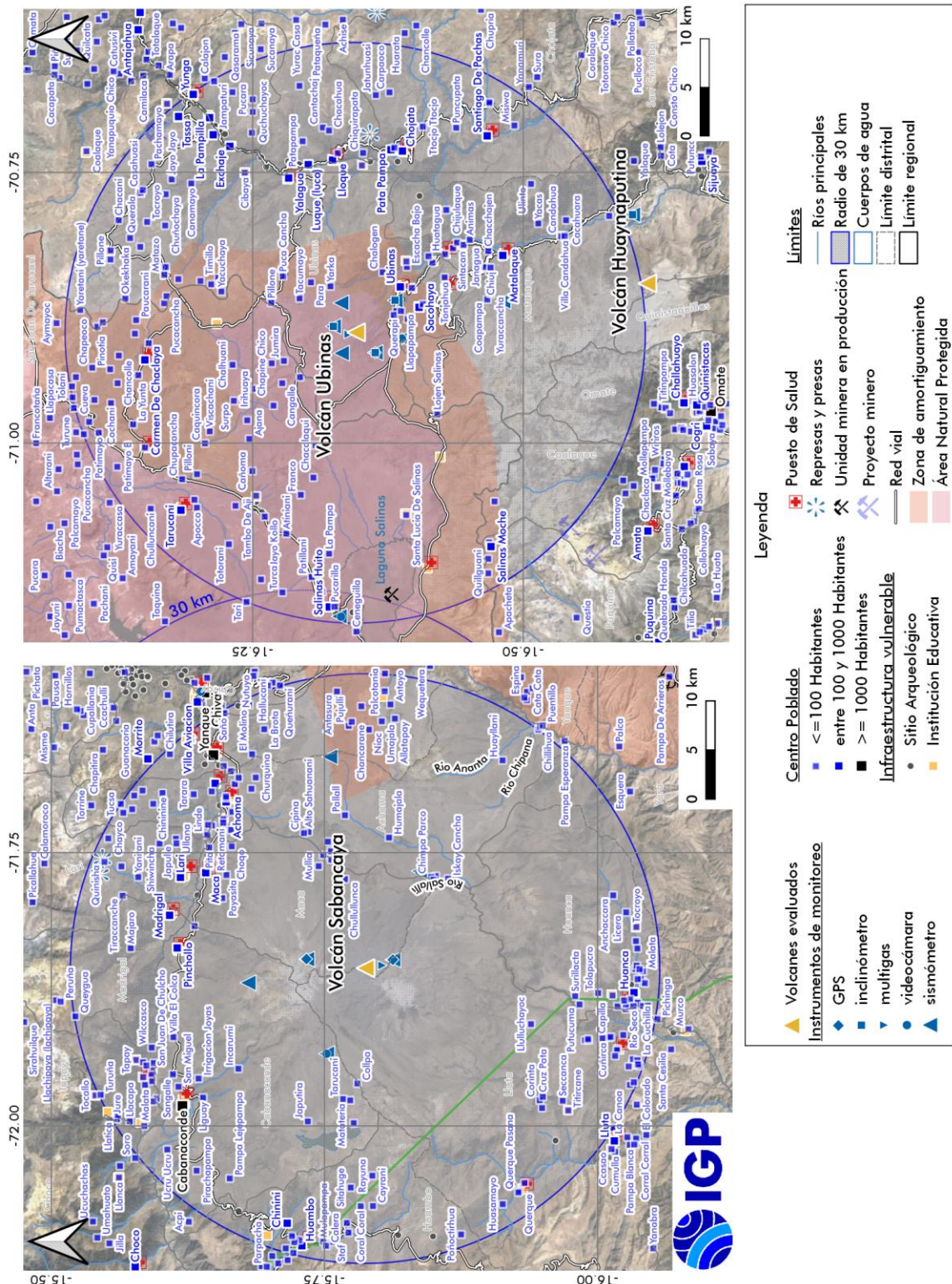


Figura 8.- Mapa de ubicación de volcanes de Muy Alta Peligrosidad: Sabancaya y Ubinas, junto a la infraestructura expuesta y medios de vida. La instrumentación de monitoreo volcánico actual se muestra en símbolos azules.

Durante sus erupciones, el Ubinas, generó caídas de tefras (cenizas, lapilli, bloques) y descenso de lahares. Estos últimos desarrollados principalmente durante la temporada de lluvias (Rivera *et al.*, 2021). Además, presenta potencial peligro por colapso del flanco sur del volcán que provocaría una nueva avalancha de escombros y afectaría poblados del valle de Ubinas (Vargas *et al.*, 2022). De ocurrir una gran erupción explosiva con IEV 4-5, como la presentada hace 980 ± 60 años (Thouret *et al.*, 2005), generaría el descenso de flujos piroclásticos en dirección del valle de Ubinas que podría ocasionar víctimas.

5.1.2.- Volcanes de Alta Peligrosidad

Según las Figuras 9 y 10, los volcanes de alta peligrosidad son Chachani, Ticsani, Coropuna y Huaynaputina, ya que sus futuras erupciones pueden afectar aproximadamente a 1 millón de habitantes de las regiones de Arequipa, Moquegua y Tacna. Aunque el volcán Chachani no ha presentado una erupción volcánica probablemente desde el Holoceno o la época histórica (Aguilar *et al.*, 2022), aún existen manifestaciones de actividad sísmica y presencia de fuentes termales al pie de su flanco suroeste que muestran que el volcán está en estado latente. Por lo tanto, una población de aproximadamente 1 millón de personas asentadas en un radio de 30 km de este volcán, donde se ubica la ciudad de Arequipa, está expuesta a una probable erupción volcánica y, más recurrentemente, al desarrollo de lahares secundarios como peligros asociados. Además, el aeropuerto internacional Alfredo Rodríguez Ballón y otros tipos de obras de infraestructura importante de la ciudad pueden ser afectados por los productos emitidos durante una erupción del volcán Chachani (Figura 9).

En cuanto al volcán Ticsani, actualmente presenta actividad sísmica inducida, principalmente por la actividad de fallas tectónicas, probablemente influenciada por una componente magmática. Este volcán ha presentado tres erupciones importantes en los últimos 11 mil años, la última de ellas

desarrollada hace menos de 400 años (Mariño & Thouret, 2003). Una eventual erupción del Ticsani afectaría a una población de aproximadamente 5 mil personas que viven en 126 centros poblados. Asimismo, en un radio de 30 km se encuentran 9 centros de salud y 51 instituciones educativas (Figura 10).

Por su parte, el volcán Coropuna ha presentado su última erupción con emisión de flujos de lavas hace aproximadamente mil quinientos años A.P. (Bromley et al., 2019). Estudios recientes muestran que el Coropuna presenta leve actividad sísmica ligada a la circulación de fluidos volcánicos y la actividad de fallas tectónicas. Además, existe presencia de fuentes termales al pie de su flanco sur (Masias, 2018).

El volcán Huaynaputina ha registrado en el año 1600 d. C. una gran erupción explosiva de tipo pliniana (IEV 6). Dicha actividad generó importante afectación local con la muerte de aproximadamente mil quinientas personas y el sepultamiento de al menos 17 poblados (Navarro, 1994). Asimismo, las cenizas y gases emitidos durante dicha erupción generaron un gran impacto a nivel regional (Thouret *et al.*, 2002) y global (Stoffel *et al.*, 2015). El Huaynaputina, de producir un proceso eruptivo de similares características, podría afectar directamente a una población asentada en un radio no menor de 250 km del volcán, incluso, poblaciones más alejadas. Actualmente, este volcán presenta leve actividad sísmica y actividad fumarólica mínima, aunque en temporada de lluvia (diciembre a marzo) es recurrente la generación de lahares secundarios que descienden de sus laderas, principalmente del sector sur, atravesando el distrito de Quinistaquillas (Moquegua) en dirección hacia el río Tambo.

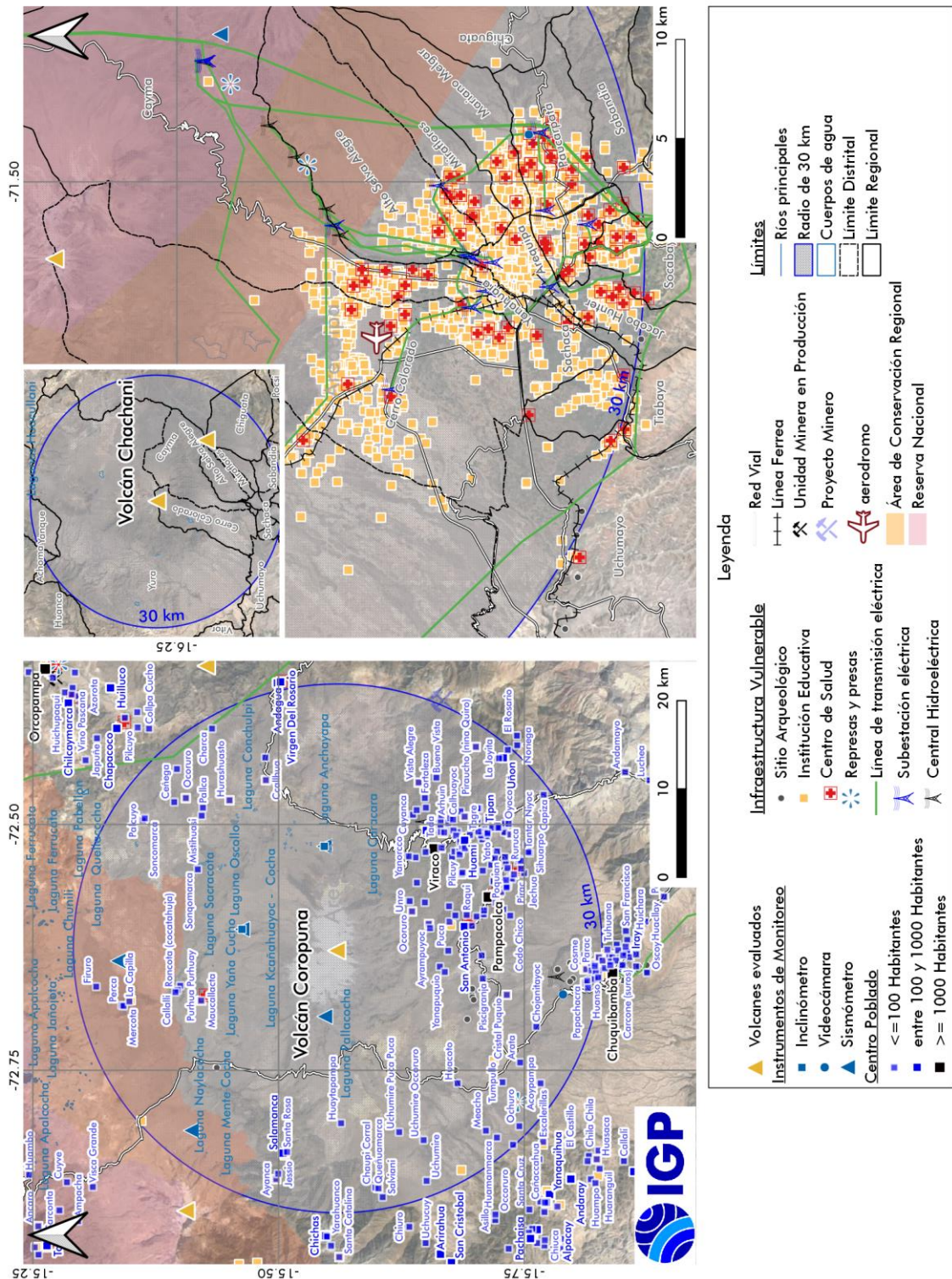


Figura 9.- Mapa de ubicación de volcanes de Alta Peligrosidad en la región Arequipa: Chachani y Coropuna, junto a infraestructura expuesta y medios de vida. La instrumentación de monitoreo volcánico actual se muestra en símbolos azules.

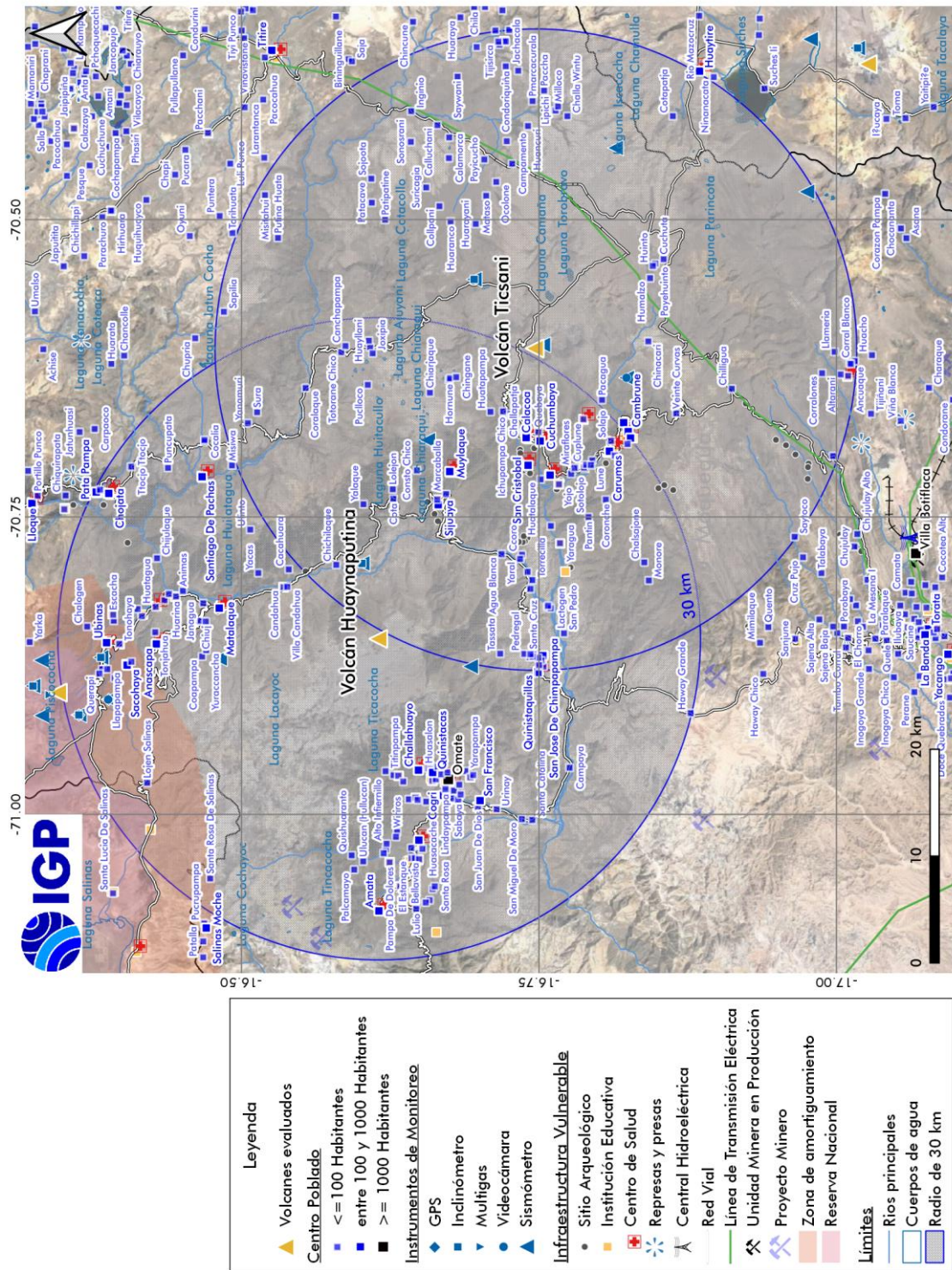


Figura 10.- Mapa de ubicación de volcanes de Alta Peligrosidad en la región Moquegua: Ticsani y Huaynaputina, junto a infraestructura expuesta y medios de vida. La instrumentación de monitoreo volcánico actual se muestra en símbolos azules.

Una eventual erupción del volcán Coropuna con emisión de flujos de lava podría generar lahares primarios por la fusión de una parte de su casquete glaciar, calculado en 44 km² (Kochtitzky *et al.*, 2018), lo que podría afectar a una población de aproximadamente 6 mil personas de las provincias de Condesuyos y Castilla, ubicadas fuera del radio de 30 km. Además, la principal fuente de agua del valle de Majes proviene de este volcán nevado, la cual se vería contaminada por una eventual erupción volcánica.

5.1.3.- Volcanes de Moderada Peligrosidad

Los volcanes considerados como de moderada peligrosidad son Sara Sara, Tutupaca, Yucamane y Solimana. Respecto a la actividad reciente de dichos volcanes, el volcán Sara Sara presentó su última actividad eruptiva hace aproximadamente 14 mil años A.P. (Rivera *et al.*, 2020) y estuvo caracterizado por la emisión de flujos de lava. El volcán Tutupaca presentó su última erupción explosiva con IEV 3, entre los años 1787 y 1802 (Samaniego *et al.*, 2015), caracterizada por el crecimiento y explosión de un domo de lava y el consecuente colapso del edificio volcánico (Samaniego *et al.*, 2015; Manrique *et al.*, 2020). El volcán Yucamane tuvo su última erupción explosiva de IEV 3 hace poco más de 3 mil años A.P., caracterizada por la emisión de ceniza y lapilli de pómez (Rivera *et al.*, 2020) y la generación de flujos piroclásticos que discurrieron hacia el Este del volcán. El volcán Solimana, presentó actividad eruptiva hace más de 500 mil años (Vatin-Pérignon *et al.*, 1991). En la actualidad, los 4 volcanes de moderada peligrosidad aún presentan manifestaciones de leve actividad sísmica, presencia de fuentes termales y, algunos de ellos, leve actividad fumarólica.

Estos volcanes pueden reactivarse y generar erupciones explosivas, con la emisión de ceniza, la cual representaría el principal peligro volcánico que puede afectar a la población ubicada en un radio de 30 km y en ocasiones a mayor distancia (Figura 11). El impacto dependerá de la

magnitud o Índice de Explosividad Volcánica de la erupción. Durante erupciones explosivas moderadas a grandes de cualquiera de estos volcanes, las cenizas pueden afectar a aeropuertos ubicados a más de 200 km de distancia, como el aeropuerto Alejandro Velasco Astete de Cusco, Alfredo Mendivil Duarte de Ayacucho, Alfredo Rodríguez Ballón de Arequipa, Inca Manco Capac de Juliaca, aeropuerto de Ilo, Carlos Ciriani Santa Rosa de Tacna, el aeropuerto de El Alto en La Paz-Bolivia y/o el aeropuerto Chacalluto de Arica-Chile (Figura 3), que en total mantienen un flujo promedio diario de 23 056 pasajeros (CORPAC, 2019; MTC, 2018; DGG Chile, 2020).

Asimismo, se han identificado la existencia de represas de agua y líneas de transmisión eléctrica próximos a estos volcanes, así como, importantes proyectos mineros como Quellaveco (Moquegua), Cuajone (Moquegua), Suyawi (Tacna), Tororume (Arequipa) y Pecoy (Arequipa), los cuales se verían afectados en caso de erupción de cualquiera de estos volcanes. Para el caso puntual de los volcanes Tutupaca y Yucamane, estos se ubican en el ámbito del Área de Conservación Regional Vilacota Maure, cuya eventual actividad contaminaría importantes fuentes de agua y recursos hidrobiológicos de la región Tacna (Figura 12).

5.1.4.- Volcanes de Baja Peligrosidad

A este grupo corresponden los volcanes Casiri y Purupuruni, ubicados en la zona alto andina de la región Tacna. Estos volcanes son considerados como activos, ya que presentaron actividad efusiva con el emplazamiento de flujos de lava y crecimiento de domos de lava en los últimos 2 600 y 5 300 años A.P., respectivamente (Bromley *et al.*, 2019). Los volcanes Casiri y Purupuruni se ubican dentro de un ambiente tectónico local muy activo caracterizado por la presencia del sistema de fallas Pacollo. En el entorno de dichos volcanes, en los años 2020 y 2021, se ha producido importante

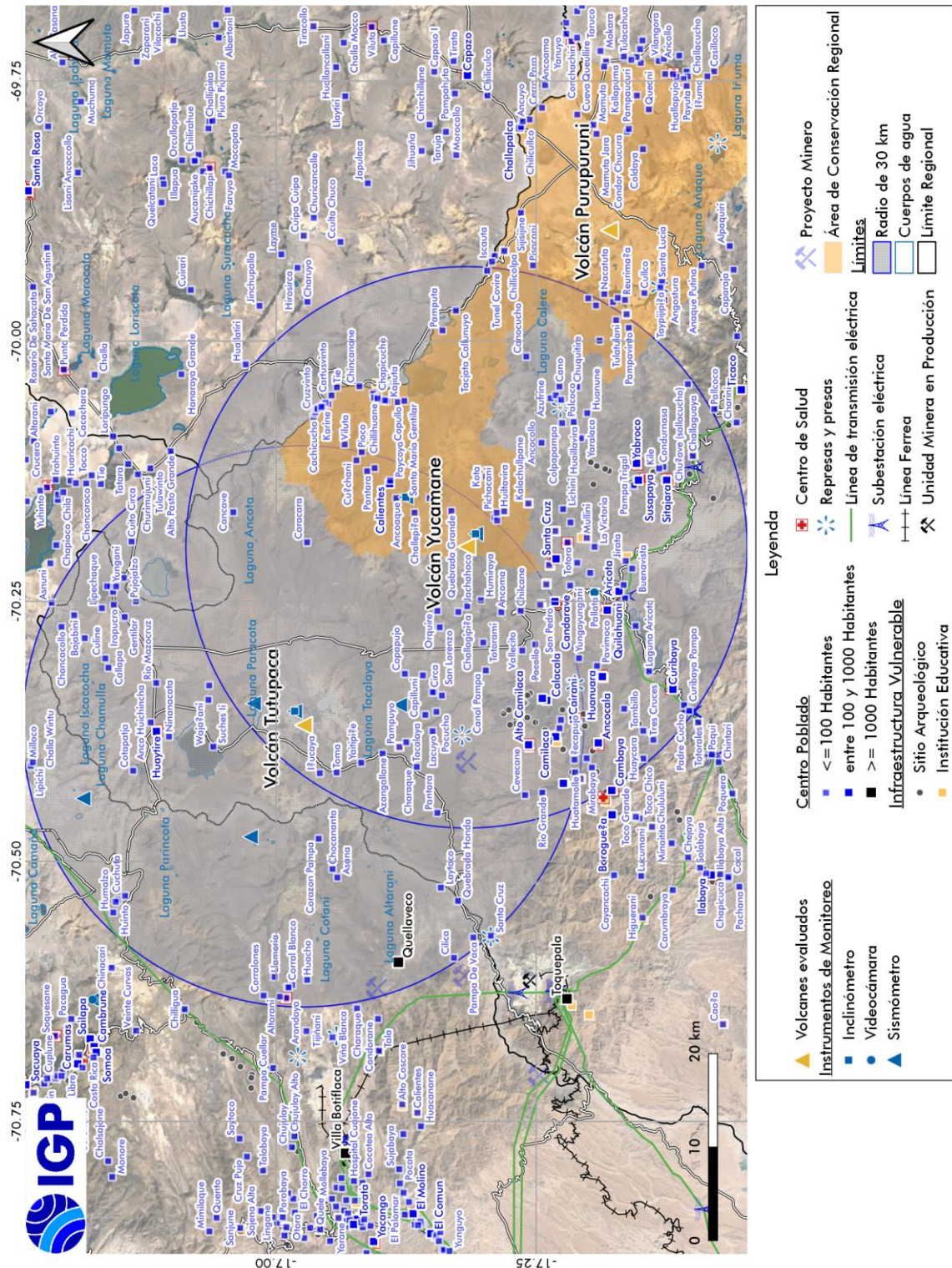


Figura 12.- Mapa de ubicación de volcanes de moderada peligrosidad de la región Tacna: Tutupaca y Yucamane, junto a infraestructura expuesta y medios de vida ubicada dentro de un radio de 30 km (círculo azul). La instrumentación de monitoreo actual se muestra en símbolos azules.

En el caso de una reactivación de estos volcanes, se puede presentar el emplazamiento de domos de lava y/o la emisión de flujos de lava. También puede presentar erupciones explosivas con la emisión de tefras. En un radio de 30 km existe una población aproximada de 12 mil habitantes expuestos a una eventual erupción. Además, ambos volcanes se encuentran dentro del Área de Conservación Regional Vilacota – Maure, en tal sentido, una erupción con emisión de ceniza y otro producto contaminaría esta importante área, además de sus fuentes de agua y recursos hidrobiológicos de la región Tacna. Asimismo, en sus inmediaciones de dichos volcanes se ubican 18 centros de salud, 80 instituciones educativas, 5 represas, 2 tambos, 1 subestación eléctrica, proyectos mineros, vías de comunicación, líneas de transmisión eléctrica y sitios arqueológicos (Figura 13), que podrían verse afectados por una erupción de dichos volcanes.

5.1.5.- Volcanes de Muy Baja Peligrosidad

En este grupo se encuentran los volcanes del Campo Volcánico Monogenético de Andagua, volcán Cerro Auqui huato, volcán Quimsachata y el Campo Volcánico Monogenético de Huambo. Estos volcanes son del Tipo 0; es decir, que en el pasado han presentado actividad explosiva leve a moderada caracterizada por la emisión de ceniza y escoria, y actividad efusiva con el emplazamiento de flujos de lava andesíticos (Delacour *et al.*, 2007). La baja puntuación de este grupo de volcanes se debe a que presentaron uno o pocos episodios eruptivos durante su formación, caracterizado por erupciones de bajo IEV (1-2).

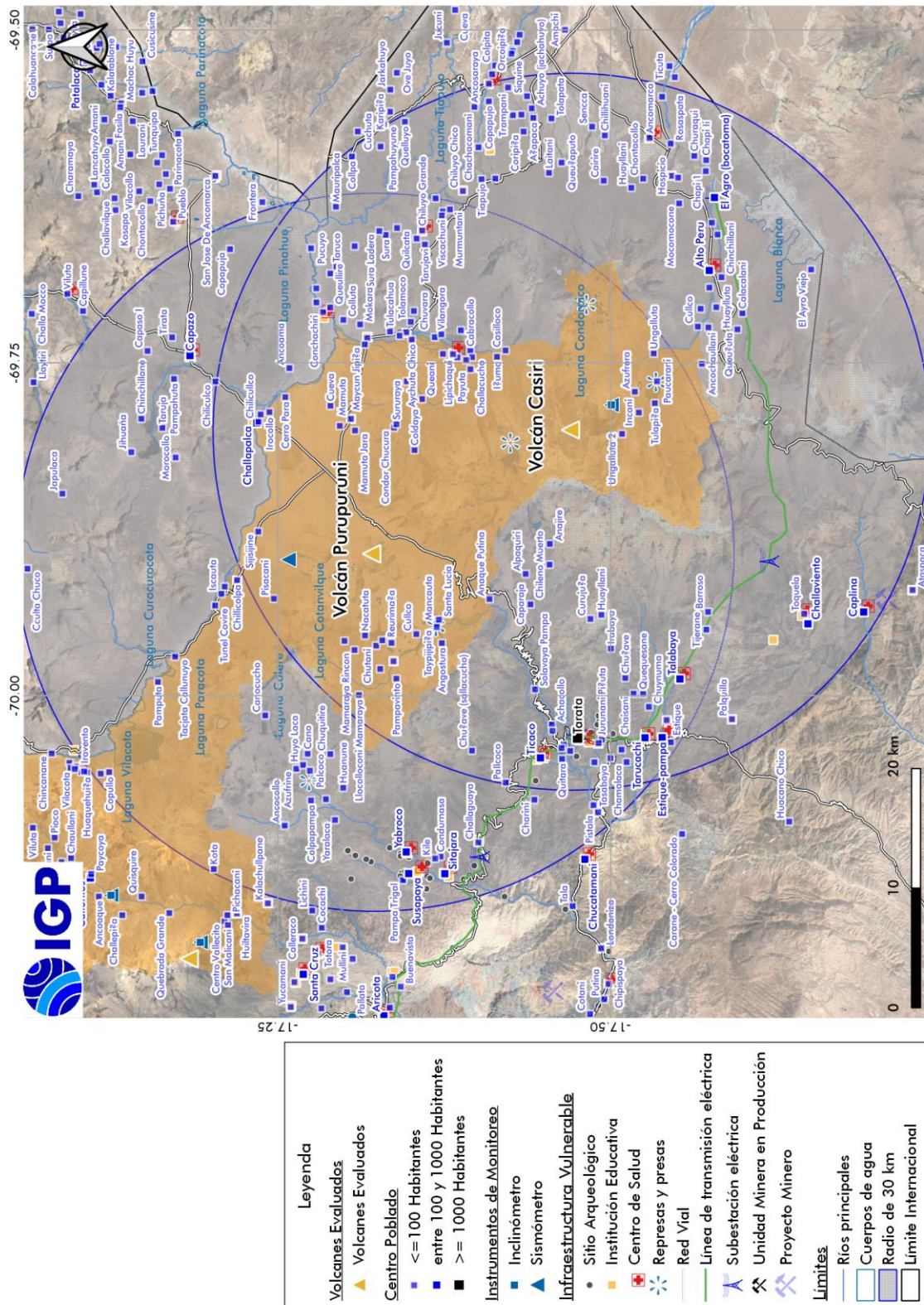


Figura 13.- Mapa de ubicación de los volcanes Casiri y Purupuruni categorizados como de Baja Peligrosidad, junto a la infraestructura expuesta y medios de vida. El círculo azul tiene un radio de 30 km, el cual representa el área que puede ser afectado en caso de una erupción de cualquiera de los dos volcanes.

En un radio de 30 km, los campos volcánicos monogenéticos (CVM) de Andagua y Huambo, están conformado por más de 20 pequeños conos volcánicos de ceniza y escoria que, individualmente, erupcionaron en un corto periodo de tiempo y hoy permanecen inactivos (Delacour et al., 2007). Asimismo, el CVM de Huambo está conformado por más de 6 conos volcánicos de escoria. En el entorno del CVM habitan aproximadamente 15 mil personas y de producirse una erupción en cualquiera de los campos monogenéticos, la población sería afectada por la emisión de flujos de lava y expulsión de escorias y ceniza (típica erupción estromboliana) que viajarían hasta varios kilómetros de distancia (Figura 14).

Asimismo, los volcanes Cerro Auqui huato (Ayacucho) y Quimsachata (Cusco) han emitido en el pasado, principalmente flujos de lava andesítica, y la población expuesta a una posible reactivación es de aproximadamente 10 mil y 11 mil personas, respectivamente. En inmediaciones del volcán Quimsachata se han edificado monumentos Incas (Figura 15) y en la actualidad tiene alta afluencia diaria de turistas nacionales y extranjeros. Estos volcanes pueden reactivarse y generar principalmente erupciones efusivas con la emisión de flujos de lava que afectarían monumentos históricos, terrenos de cultivos, etc.

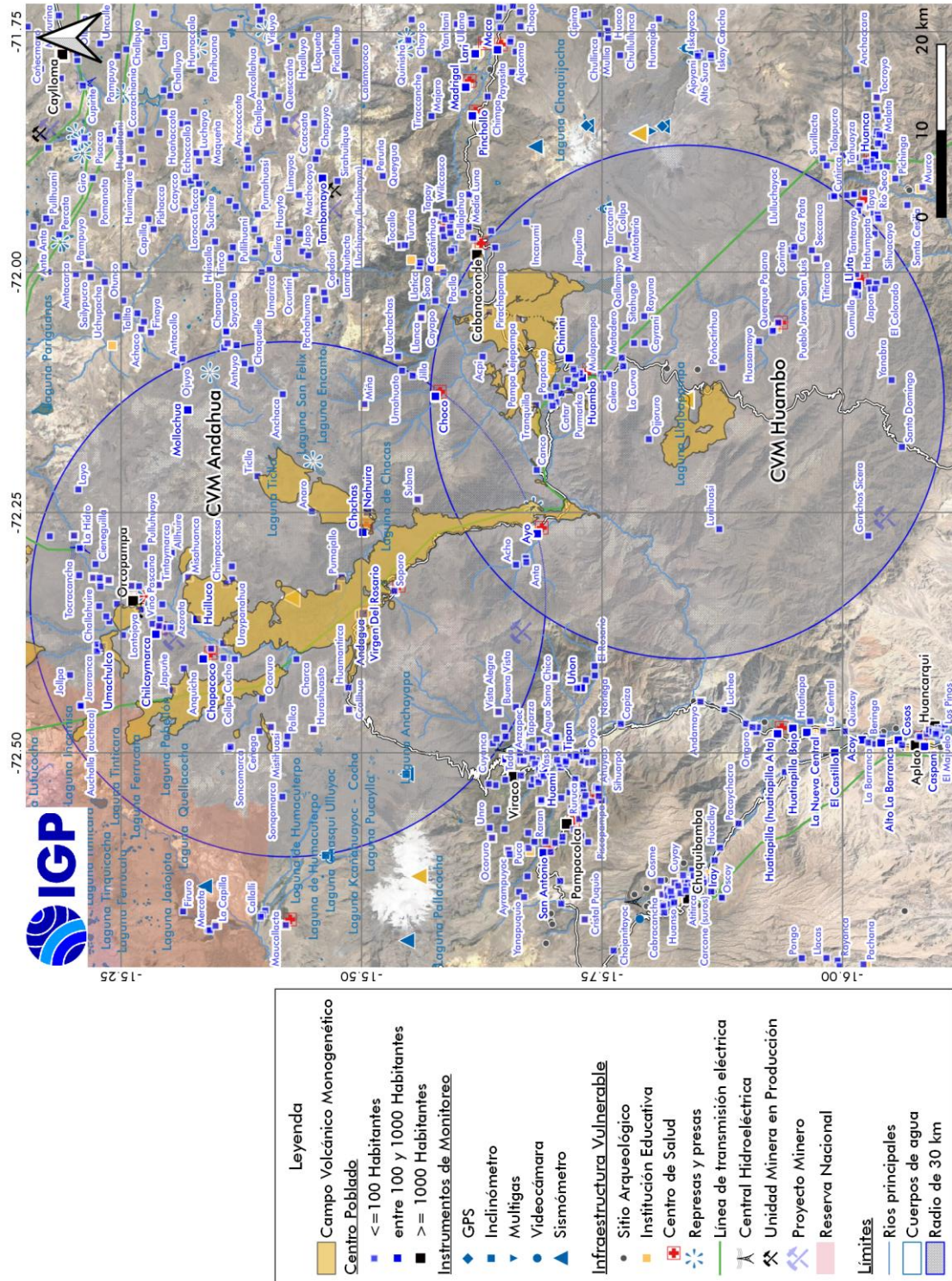


Figura 14.- Mapa de ubicación de los Campos Volcánicos Monogenéticos de Andagua y Huambo categorizados como de muy Baja Peligrosidad, junto a la infraestructura expuesta y medios de vida. El círculo azul tiene un radio de 30 km, el cual representa el área que puede ser afectado en caso de una erupción de cualquiera de los dos volcanes.

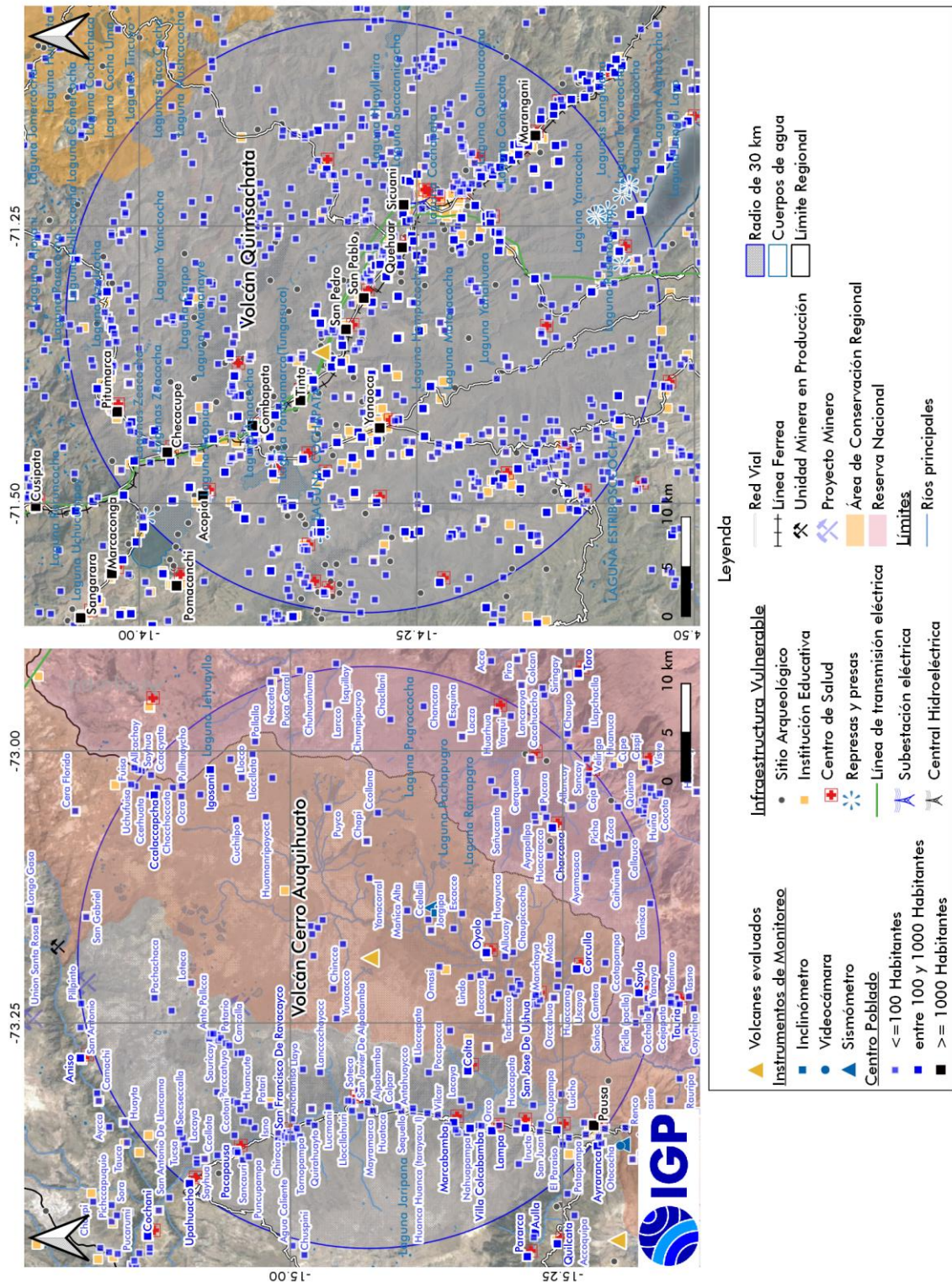


Figura 15.- Mapa de ubicación de los volcanes Cerro Auqui huato y Quimsachata categorizados como de muy Baja Peligrosidad, junto a la infraestructura expuesta y medios de vida. El círculo azul tiene un radio de 30 km, el cual representa el área que puede ser afectado en caso de una erupción de cualquiera de los dos volcanes.

6.- DISCUSIÓN

6.1.- Afectación por actividad volcánica y efectos asociados

La evaluación del NPV permitió identificar los volcanes de Muy Alta, Alta, Moderada, Baja y Muy Baja peligrosidad, también permitió, determinar la cantidad de población expuesta a los peligros volcánicos y algunas de ellas asentadas sobre depósitos de flujos piroclásticos, flujos de lava y lahares generados o asociados a erupciones volcánicas ocurridas desde el Pleistoceno hasta el presente. Como todo proceso que desarrolla el planeta Tierra, las erupciones son repetitivas en el tiempo, de ahí la importancia de conocer la historia y cronología eruptiva de cada volcán.

El análisis de los factores de peligro "f", "g" y "h" (Tabla 3), permitió determinar los volcanes que, durante procesos eruptivos en los últimos 12 mil años, han desarrollado flujos de lava, flujos piroclásticos y lahares que han formado importantes depósitos sobre los cuales se han asentado poblaciones. Asimismo, el análisis del factor de exposición "q" (Tabla 4) determino el número de pobladores que habitan a más de 30 km del volcán expuestos al descenso de lahares, mas no cuantifica a la población expuesta a tales peligros asentada al interior de dicho radio. Finalmente, el análisis de los factores de peligro "c" y "d" (Tabla 3) han permitido identificar a los volcanes que han presentado erupciones explosivas con la emisión de tefras (cenizas, lapilli, bloques).

Teniendo en cuenta el tipo de actividad eruptiva presentada en el pasado por los 17 volcanes evaluados y el número de poblados existentes en sus inmediaciones, se ha determinado el número de población expuesta a los diversos tipos de peligros volcánicos, asentada dentro de un radio de 30 km de la estructura volcánica, así como, en sus alrededores (Tabla 8).

Tabla 8.- Población potencialmente expuesta (INEI, 2018) a diversos tipos de peligros volcánicos, de acuerdo con la información vulcanológica disponible.

NPV	Volcán	Peligros asociados	Personas expuestas (aprox.)	Eventos registrados en el pasado	Referencias
Muy Alto	Misti	Flujo piroclástico	2 548	Generados en la erupción de hace ~2 050 años A.P. y visible en el río Chili, y algunas quebradas (distritos de Alto Selva Alegre, Paucarpata).	Thouret et al. (2001); Harpel et al. (2011)
		Lahares con volúmenes de 0.5 a 11 x Mm ³	149 751	Generados por precipitaciones importantes (por ej., en 1989, 1997, 2011 y 2013) de > 125 mm durante períodos de 4 a 8 horas. También se generaron en la erupción explosiva de hace ~2 050 años A.P.	Delante et al. (2005); Thouret et al. (2013); Rivera et al. (2021)
		Caída de tefras	978 278	Generadas en la gran erupción explosiva de hace ~2 050 años A.P. y en la erupción del siglo XV (1440-1470 d.C.).	Thouret et al. (2001); Harpel et al. (2011)
		Flujos de lava	27 456	Flujos del Misti datados en 112 000 y 40 000 años A.P.	Thouret et al. (2001); Mariño et al. (2016)
	Sabancaya	Lahares con volúmenes de 1 a 20 Mm ³	423	Eventos generados en 1990, visibles en la quebrada Huayuray.	Rivera et al. (2016); Rivera et al. (2021)
		Flujos de lava	0	Flujos de lava recientes de hace 4 100 años A.P.	Bromley et al. (2019)
		Caídas de tefras con volúmenes >0.025 km ³	13 134	Registradas en la erupción de 1990-1997; 2016-actualidad.	Gerbe and Thouret (2004); Coppola et al. (2022); Thouret et al. (1994)
	Ubinas	Lahares con volúmenes de hasta 1.2 Mm ³	216	Ocurridos en febrero de 2016 con volúmenes de 0.025 Mm ³ a 0.16 Mm ³ y otros en años anteriores.	Mariño et al. (2018); Rivera et al. (2021)
		Caída de tefras	29 703	Cenizas ocurridas en la erupción de 2019 y en años anteriores.	COEN-INDECI (2019)
		Flujos de lava	0	Lavas más recientes emplazadas hace 20 000 años A.P.	
Flujos piroclásticos		603	Datados entre 150 000 y 20 000 años A.P., visibles en el sector de Corohuayo (Ubinas).	Thouret et al. (2005); Rivera et al. (2011)	
Alto	Chachani	Avalanchas de escombros	649	Avalanchas emplazadas hace ~3 670 años A.P.	
		Lahares con volúmenes de hasta 9 Mm ³	117 196	Ocurridos en enero de 2017, febrero de 2018 y en años anteriores.	Arapa (2018); Rivera et al. (2021); Alavi (2020)
		Caída de tefras	1 141 830	Caídas de tefras ocurridas en el Holoceno y Pleistoceno.	Aguilar et al. (2022); Alavi (2020)
		Flujo piroclástico	205 342	Uno de los más recientes visible en Cayma (Arequipa) ocurrió hace ~56 000 años A.P.	Aguilar et al. (2022); Sanz (2020)
		Flujos de lava	38 865	Lavas más jóvenes emitidas hace 13 000 años A.P.	Aguilar et al. (2022)

Tabla 8.- Continuación...//Población potencialmente expuesta (INEI, 2018) a diversos tipos de peligros volcánicos, de acuerdo con la información vulcanológica disponible.

NPV	Volcán	Peligros asociados	Personas expuestas (aprox.)	Eventos registrados en el pasado	Referencias
Alto	Ticsani	Flujo piroclástico	2	Flujos generados en el Pleistoceno superior y probablemente Holoceno.	Mariño & Thouret (2003)
		Lahares	8	Generados en el Holoceno.	Mariño & Thouret (2003); Rivera et al. (2021)
		Caída de tefras	99 937	Generados hace menos de 400 años A.P. y otros más antiguos	Mariño & Thouret (2003)
		Flujos de lava	0	Generados en el Holoceno – Pleistoceno.	Mariño & Thouret (2003)
		Flujo piroclástico	308	Generados en la erupción pliniana del año 1600 d.C., los cuales descendieron por las quebradas y valles radiales del volcán.	Thouret et al. (2002)
	Huaynaputina	Lahares de hasta 20 Mm ³	28	Lahares voluminosos generados en la erupción pliniana del año 1600 d.C. Lahares secundarios generados en febrero de 2020 quebrada El Volcán y en años anteriores.	Rivera et al. (2021)
		Caída de tefras	1 536	De gran volumen generados en la erupción explosiva del año 1600 d.C.	Thouret et al. (2002)
		Lahares de hasta 20 Mm ³	1 473	Lahares del 22 de diciembre de 2016 y otros ocurridos en el Holoceno y Pleistoceno.	Valdivia (2019); Rivera et al. (2021)
		Flujos de lava	0	Flujos de lava recientes de hace 1 440 años A.P.	Bromley et al. (2019)
		Lahares de hasta 4 Mm ³	577	Ocurridos en el Holoceno y época histórica.	Rivera et al. (2021)
Coropuna	Flujo piroclástico	3 107	Flujos de hace 160 000 años A.P. visibles al Este del volcán.	Rivera et al. (2021)	
	Flujos de lava	35	Lavas de hace 14 000 años A.P. que recorrieron más de 13 km del volcán.	Rivera et al. (2021)	
	Avalancha de escombros	3 107	Depósitos de hace 160 000 años A.P. visibles al Este y Oeste del volcán.	Rivera et al. (2021)	
	Lahares con volumen de hasta 12 Mm ³	63	Ocurridos en el Holoceno y época histórica.	Rivera et al. (2021)	
	Avalancha de escombros	0	La más reciente generada durante la erupción de 1787 – 1802 d.C.	Samaniego et al. (2015); Valderrama et al. (2016)	
Moderado	Tutupaca	Flujo piroclástico	0	Deposito de flujo piroclástico "Paipatja" generado durante la erupción de 1787 – 1802 d.C.	Samaniego et al. (2015); Valderrama et al. (2016)

Tabla 8.- Continuación....//Población potencialmente expuesta (INEI, 2018) a diversos tipos de peligros volcánicos, de acuerdo con la información vulcanológica disponible.

NPV	Volcán	Peligros asociados	Personas expuestas (aprox.)	Eventos registrados en el pasado	Referencias
Moderado	Yucamane	Lahares con volumen de hasta 2.5 Mm ³	53	Ocurridos en el Holoceno y época histórica.	Rivera et al. (2020, 2021)
		Flujos de lava	0	Lavas andesíticas recientes emplazados hace ~3 000 años A.P.	Rivera et al. (2020)
		Caída de tefra con volumen > 0.007 km ³	9 469	Generada durante la erupción de hace 3 085 años A.P.	Rivera et al. (2020)
	Solimana	Flujo piroclástico	1 089	Generado en la erupción de hace ~3 000 años A.P.	Rivera et al. (2020)
		Avalancha de escombros	510	Generado entre 30 000 y 40 000 años A.P. Actualmente visible en Yucamani, Patapatani, Santa Cruz.	Rivera et al. (2020)
		Lahares	626	Ocurridos en el Holoceno y época histórica.	Este estudio
Muy Bajo	CV Andagua	Caída de tefras	7 067	Caídas de tefras generadas por una erupción explosiva de IEV 2, con afectación en un radio de 30 km del volcán.	Vatin-Pérignon et al. (1991)
		Flujo piroclástico	179	Depósito de flujos piroclásticos de menos de 500 000 años A.P.	Vatin-Pérignon et al. (1991)
		Flujo de lava	2 918	Emitidos durante el Pleistoceno y Holoceno.	Delacour et al. (2007)
	CV Huambo	Caída de tefras	14 159	Generadas en erupciones ocurridas en el Pleistoceno – Holoceno. Las más recientes ocurrieron hace 4 060 años A.P. y otra entre 1451-1523 d.C.	Delacour et al. (2007)
		Flujo de lava	0	Emitidos durante el Pleistoceno y Holoceno.	Delacour et al. (2007)
		Caída de tefras con un volumen < 0.0001 km ³	581	Ocurridas durante el Pleistoceno y Holoceno.	Delacour et al. (2007)
Cerro Auguinuato	Flujo de lava	9	Emitidos durante el Pleistoceno.	Morales et al. (2016)	

De acuerdo a los resultados obtenidos, la mayoría de volcanes han presentado erupciones explosivas con la generación de caídas de tefras, flujos piroclásticos, flujos de lava y lahares. Eventos menos frecuentes fueron las avalanchas de escombros presentes durante los procesos eruptivos de los volcanes Misti, Ubinas, Sara Sara, Ticsani, Solimana, Tutupaca y Yucamane. Erupciones explosivas con alto IEV fueron desarrollados por los volcanes Misti y Huaynaputina, que generaron emisiones de tefras y flujos piroclásticos, y como productos asociados lahares que viajaron a distancias considerables respecto al volcán. En tal sentido, se justifica que estos volcanes tengan un nivel peligrosidad de Muy Alto y Alto, respectivamente. Finalmente, según el análisis, una erupción del Misti representaría un peligro mayor para una numerosa población del sur peruano.

6.2.- Niveles de monitoreo requerido

Moran *et al.* (2008), con base en la metodología de Ewert *et al.* (2005) y Ewert (2007), recomiendan para el monitoreo permanente de volcanes cinco métodos: sismología, geodesia, geoquímica de gases, hidrología y sensores remotos. Con la información recolectada en tiempo real y emitido las alertas respectivas, es posible mitigar o prevenir los efectos de las erupciones volcánicas. En el presente estudio, se hace uso de los resultados obtenidos de los Niveles de Peligrosidad Volcánica (NPV) establecidos para los volcanes evaluados y con ello, determinar la composición y distribución de instrumentos geofísicos necesarios para implementar sistemas óptimos de monitoreo volcánico.

Asimismo, a partir del trabajo de Moran *et al.* (2008), el presente estudio considera establecer 6 métodos de monitoreo volcánico de acuerdo al nivel de información requerida para el pronóstico de erupciones. Los métodos son los siguientes: (1) sismología, (2) deformación, (3) señales acústicas, (4) geoquímica de gases y fuentes termales, (5) sensores remotos en superficie y (6) sensores remotos satelitales (Tabla 9).

Tabla 9.- Métodos de monitoreo volcánico y consideraciones establecidas para la vigilancia del comportamiento dinámico de los volcanes evaluados.

Método	Instrumentos (tiempo real)	Función o utilidad	Observaciones
Sismología		Detectar la actividad sísmovolcánica	2 sismómetros, permiten identificar los tipos de eventos sísmovolcánicos relacionados con la actividad del volcán. Permiten diferenciar la actividad volcánica de aquella relacionado a la actividad tectónica regional o local. Brindan datos para establecer una línea base (<i>background</i>) de actividad sísmovolcánica y permite detectar cambios de nivel o intensidad, detectar formas de ondas de diferentes tipos de sismos y anunciar el inicio de una erupción (McNutt <i>et al.</i> , 1999).
		Identificar cambios de velocidad sísmica	1 sismómetro, mediante el análisis del ruido sísmico ambiental permite identificar cambios de velocidad que, en algunas ocasiones, preceden la ocurrencia de erupciones volcánicas (De Plaen <i>et al.</i> , 2016; Machacca <i>et al.</i> , 2021).
		Detección de señales sísmicas de tipo VLP (<i>Very Low Period</i>).	2 sismómetros permiten identificar señales VLP que, recurrentemente, preceden las erupciones volcánicas (Bean <i>et al.</i> , 2014; Maeda <i>et al.</i> , 2014; Park <i>et al.</i> , 2020).
	Sismómetro de banda ancha	Monitoreo de migración de fuentes sísmicas	4 sismómetros permiten realizar localización de sismos Volcano-Tectónicos (VT), con los siguientes parámetros: QC alto, error horizontal <5 km, error vertical <10 km, RMS < 0.5, GAP < 270. Los eventos VT preceden erupciones volcánicas y permiten estimar el volumen de magma intruido (White & McCausland, 2015).
		Identificar cambios en el valor de "b"	5 sismómetros permiten obtener valores "b", relacionados al desencadenamiento de sismos debido al fracturamiento de rocas antes y durante una erupción volcánica (Smith <i>et al.</i> , 2009; Roberts <i>et al.</i> , 2015). Valores "b" se incrementan antes de una erupción volcánica (Vinciguerra, 2002).
		Localizar señales sísmicas de tipo temblor y eventos de bajas frecuencias	6 sismómetros permiten localizar sismicidad superficial de largo periodo (Moran <i>et al.</i> , 2008) localizada a menos de 2 km bajo el volcán. En volcanes sin proceso eruptivo, su presencia permite conocer el comportamiento del sistema hidrotermal. En volcanes en erupción, su presencia permite estimar la geometría del conducto y la ubicación del magma en ascenso hacia la superficie.
Señales Acústicas		Determinar cambios de esfuerzos, mecanismos focales.	10 sismómetros permiten estimar la fuente del sismo y discrimina entre eventos sísmicos generados durante diferentes tipos de actividad volcánica (Zobin, 2012). Cambios de esfuerzos estarían relacionados con intrusiones magmáticas (Moran <i>et al.</i> , 2008).
		Detectar, ubicar y caracterizar los lahares	2 sistemas, compuesto cada uno por 1 geófono, 1 sensor de elevación, 1 cámara IP y 1 medidor de saturación del suelo, permite generar alertas por el descenso de estos flujos en dirección de poblaciones y/o infraestructura. Se recomienda la implementación de 2 sistemas por quebrada (Valdez, 2015).
	Infrafrasonido	Caracterizar explosiones	2 sensores de infrafrasonido permiten caracterizar mediante señales acústicas las explosiones volcánicas (Johnson, 2003; Grangeon & Lesage, 2019).
		Detectar el emplazamiento de lahares y emisión de ceniza.	5 sensores de infrafrasonido implementados en <i>array</i> , permite el seguimiento de lahares y caída de tefra (Ripepe <i>et al.</i> , 2010; Moran <i>et al.</i> , 2008). Permite la localización de nuevos ventos.

Tabla 9.- Continuación...//Métodos de monitoreo volcánico y consideraciones establecidas para la vigilancia del comportamiento dinámico de los volcanes evaluados.

Método	Instrumentos (tiempo real)	Función o utilidad	Observaciones
Deformación	GNSS	Detectar cambios de patrones de desplazamiento superficial	2 GNSS como mínimo permiten identificar la deformación de los volcanes debida a la migración y almacenamiento de magma en el interior del sistema volcánico (Tibaldi, 2015).
		Localizar fuentes de desplazamiento superficial	6 GNSS permiten realizar la inversión de datos geodésicos con modelos mecánicos capaz de localizar la fuente de presión en profundidad y cuantificar sus características (Beauducel <i>et al.</i> , 2010; Anderson <i>et al.</i> , 2010; Beauducel <i>et al.</i> , 2004).
	Inclinómetro	Detectar cambios en patrones de desplazamiento superficial	Entre 2 y 4 inclinómetros permiten registrar la deformación superficial continua de volcanes ligada al ascenso de magma (Furst <i>et al.</i> , 2019).
Geoquímica de gases y fuentes termales	Phmetro	Establecer una línea base geoquímica base de fuentes termales	1 Phmetro por fuente permite observar la variación de la composición química causada, probablemente, por el ascenso o circulación de fluidos magmáticos (Moran <i>et al.</i> , 2008).
	Termómetro	Establecer una línea base de temperatura de fuentes frías y termales	1 termómetro por fuente identifica el incremento de la temperatura de fluidos volcánicos (gases, aguas termales, etc.) causada, probablemente, por el ascenso o circulación de fluidos magmáticos (Moran <i>et al.</i> , 2008).
	DOAS/	Establecer una línea base de la tasa de emisión de gases.	1 equipo multigas y 2 DOAS ubicados a una distancia no mayor de 2 km del volcán y/o mínimo 2 DOAS ubicados acimutalmente en un radio no mayor de 10 km permiten identificar la línea base del flujo de SO ₂ y/o CO ₂ (Galle <i>et al.</i> , 2009).
	Multigas (MG)	Identificar variación de emisión y caracterizar los tipos de gases.	2 equipos Multigas y 4 DOAS permiten identificar las altas concentraciones de CO ₂ , SO ₂ y HCl en las plumas o columnas eruptivas asociadas con la intrusión de magma (Moran <i>et al.</i> , 2008).
Sensores remotos en superficie	Videocámara	Detección de emisiones volcánicas	1 videocámara permite identificar el tiempo de ocurrencia, elevación y las características de emisiones de cenizas, gases, etc., desde el volcán o su entorno (Korolev <i>et al.</i> , 2021).
	FLIR	Estimar altura y tipo de emisiones Detección de flujos de calor	3 videocámaras permiten triangular la dirección de dispersión y caracterizar las plumas volcánicas. 1 cámara FLIR permite detectar la emisión de flujos piroclásticos y flujos de lava. Permite identificar nuevos ventos en el volcán. Hace posible la identificación nocturna de la actividad volcánica superficial.

Tabla 9.- Continuación...//Métodos de monitoreo volcánico y consideraciones establecidas para la vigilancia del comportamiento dinámico de los volcanes evaluados.

Método	Instrumentos (tiempo real)	Función o utilidad	Observaciones
Sensores remotos satelitales	Imagen	Anomalías térmicas	Los sistemas MIROVA (Coppola <i>et al.</i> , 2015), VOLCANOMS (Layana <i>et al.</i> , 2020), Sentinel-2 (Massimetti <i>et al.</i> , 2020) permiten observar puntos de calor sobre la superficie del cráter diariamente.
		Densidad de gas SO ₂	Imágenes Sentinel-5P (Theys <i>et al.</i> , 2021) permiten estimar la densidad de SO ₂ emitida desde centros volcánicos diariamente.
		Interferometría Radar.	Imágenes Sentinel-1 permite determinar superficies de deformación mediante imágenes de tipo radar semanalmente (Edmeier <i>et al.</i> , 2019).
		imágenes satelitales.	Imágenes GOES-R (Pavlonis <i>et al.</i> , 2020) permiten la observación de la dispersión de tefra, de la morfología del cráter o edificio volcánico cada 15 minutos hasta 4 veces por día.

Es preciso mencionar, tal como se indica en la Tabla 2, la mayoría de estos métodos han sido implementados por el IGP para el monitoreo de volcanes en la región sur del Perú.

La correlación de la información adquirida por los métodos establecidos (Tabla 9) atiende necesidades básicas para la elaboración y emisión de información oportuna sobre la dinámica interna y externa de los volcanes, hacia las autoridades. De acuerdo al NPV, para los volcanes evaluados en el presente estudio se han establecido 4 niveles de monitoreo y cuyo detalle se encuentra en la Tabla 10. Asimismo, los métodos de monitoreo volcánico considerados en esta evaluación, son aquellos cuya instrumentación permite disponer de la información en tiempo real.

Tabla 10.- Cantidad y tipo de instrumentación requerida por método, para el monitoreo volcánico de acuerdo con el Nivel de Peligrosidad Volcánica (NPV).

Nivel de Peligrosidad Volcánica	Nivel de Monitoreo Requerido	Cantidad y tipo de instrumentación en tiempo real requerida por NPV										
		n.º sismómetro (sismología)	n.º Infrasonido (señales acústicas)	n.º GNSS (Deformación)	n.º Inclínómetro (Deformación)	n.º Video-cámara (Sensores remotos superficiales)	n.º Cámara térmica (Sensores remotos superficiales)	n.º Estación Multígas (Geoquímica)	n.º DOAS (Geoquímica)	n.º PH metro (Geoquímica)	n.º Termómetro (Geoquímica)	Total
Baja y Muy Baja	1	2	0	0	1	0	0	0	0	0	0	3
Moderada	2	3	0	0	2	1	0	0	0	1	1	8
Alta	3	5	0	2	4	1	0	1	2	2	2	19
Muy Alta	4	10	5	6	4	3	3	2	4	3	3	43

Los volcanes de Muy Alta peligrosidad, como el Misti, Sabancaya y Ubinas que han presentado actividad explosiva de manera recurrente y reciente, y en cuyo entorno se ubican ciudades densamente pobladas (por ej. Arequipa), así como infraestructura crítica, necesitan ser monitoreados con todos los métodos propuestos de manera permanente y en tiempo real; por tanto, les corresponde un nivel 4 de monitoreo (Tabla 10): instrumentación que permita el monitoreo sismológico, señales acústicas, deformación,

geoquímica de gases y fuentes termales, y sensores remotos en superficie (videocámaras y cámaras térmicas).

Los volcanes de Alto Peligrosidad (Chachani, Ticsani, Coropuna y Huaynaputina y de Moderada Peligrosidad (Sara Sara, Tutupaca, Yucamane y Solimana), son aquellos que han presentado en el pasado erupciones explosivas importantes, algunos en la época histórica, y en cuyo entorno se encuentran ciudades y poblados, así como, obras de infraestructura, requieren un nivel de monitoreo 2 y 3, respectivamente. Estos volcanes deben ser monitoreados empleando instrumentación para los siguientes métodos: sismología, deformación, geoquímica de gases y de fuentes termales, y sensores remotos en superficie (videocámaras). El número de instrumentos es menor en comparación con el nivel 4.

Los volcanes con poca probabilidad de desarrollar procesos eruptivos en el futuro, y que presentan un nivel de Baja Peligrosidad (volcanes Casiri y Purupuruni) y Muy Baja Peligrosidad (CVM de Andagua, volcán Cerro Auqui huato, volcán Quimsachata y el CVM de Huambo), requieren de un monitoreo Nivel 1, suficiente para determinar el nivel base (*background*) de su actividad y para ello es primordial la sismología y deformación (Tabla 10).

6.3.- Nivel de monitoreo volcánico actual

De acuerdo con la Tabla 2, de los 17 volcanes evaluados en el presente estudio, el IGP, a través del CENVUL, realiza el monitoreo permanente y en tiempo real de 14 de ellos utilizando diversos métodos. En la actualidad se ha incrementado el número de instrumentos geofísicos en volcanes que han presentado recientes procesos de reactivación, como el volcán Sabancaya en el año 1990 y posteriormente Ubinas en 2006. Asimismo, considerando el nivel de exposición al peligro volcánico de la ciudad de Arequipa, en el 2005 se priorizó la implementación y mejoramiento de la red de monitoreo del volcán Misti, la misma que fue

repotenciada tecnológicamente en 2012. En 2015, se instaló la red de monitoreo permanente del volcán Ticsani y, desde 2019 hasta 2020, se adicionaron 8 redes geofísicas para la vigilancia de los volcanes Sara Sara, Cerro Auqui huato, Coropuna, Chachani, Huaynaputina, Tutupaca, Yucamane y Casiri. Finalmente, en 2021, se implementó una estación sísmica en el volcán Purupuruni y para 2022 se tiene previsto la instalación de una red de estaciones GNSS para el monitoreo de la deformación de este volcán, además del Casiri.

La implementación de los sistemas de monitoreo volcánico, a cargo del IGP, contó con el apoyo de diversas instituciones nacionales e internacionales como el Instituto de Investigación para el Desarrollo (IRD) de Francia, el Programa de Asistencia para Desastres Volcánicos (VDAP-USGS) de los EE.UU., entre otros.

Para la evaluación del nivel de monitoreo actual que realiza el IGP, se ha considerado el número y tipo de instrumentos instalados en 14 volcanes (Tabla 2) y para su correlación con el nivel de monitoreo requerido se ha establecido un “peso” distinto para cada método de monitoreo, repartido en cada instrumento que lo conforma. En ese sentido, considerando que la información sísmica es primordial en la evaluación del comportamiento dinámico interno de los volcanes y en el pronóstico de erupciones, se le ha asignado un peso superior equivalente al 30% (0.3), seguido por la deformación, sensores remotos superficiales y geoquímica con 20% (0.2) cada uno, distribuido en cada instrumento asignado y finalmente, infrasonido con 10% (0.1). Estos pesos hacen un total de 100% para cada nivel de monitoreo (Tabla 11).

El análisis de los resultados obtenidos indica que en general se ha avanzado un 27% en la implementación de un sistema de monitoreo volcánico óptimo con respecto a lo establecido en la Tabla 10. Más relevante aun, es el hecho de que volcanes que hasta hace 3 años no contaban con

ningún tipo de instrumentación, hoy en día, de forma individual, presenten avances en el monitoreo desde el 10% hasta el 70% (Figura 16). En este sentido, el IGP ha establecido un proceso de fortalecimiento continuo de los sistemas de monitoreo con el incremento de sismómetros, equipos GNSS, equipos DOAS, Multigas, video cámaras de monitoreo, entre otros, priorizando a los volcanes enmarcados en los 3 primeros niveles de peligrosidad volcánica (Figura 16).

Tabla 11.- Pesos asignados a la instrumentación requerida para el cálculo del nivel de monitoreo actual.

		Tipos de instrumentación de monitoreo										
Nivel de Peligrosidad Volcánica	Nivel de Monitoreo Requerido	n° sismómetro	n° Infrasonido	n° GNSS	n° Inclinómetro	n° Videocámara	n° Cámara térmica	n° Estación Multigas	n° MiniDOAS	n° medidor de PH	n° Termómetro	Total
Baja y Muy Baja	1	0.6	0.0	0.0	0.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0
Moderada	2	0.3	0.0	0.0	0.2	0.2	0.0	0.0	0.0	0.1	0.2	1.0
Alta	3	0.3	0.1	0.15	0.05	0.1	0.1	0.05	0.05	0.05	0.05	1.0
Muy Alta	4	0.3	0.1	0.15	0.05	0.1	0.1	0.05	0.05	0.05	0.05	1.0

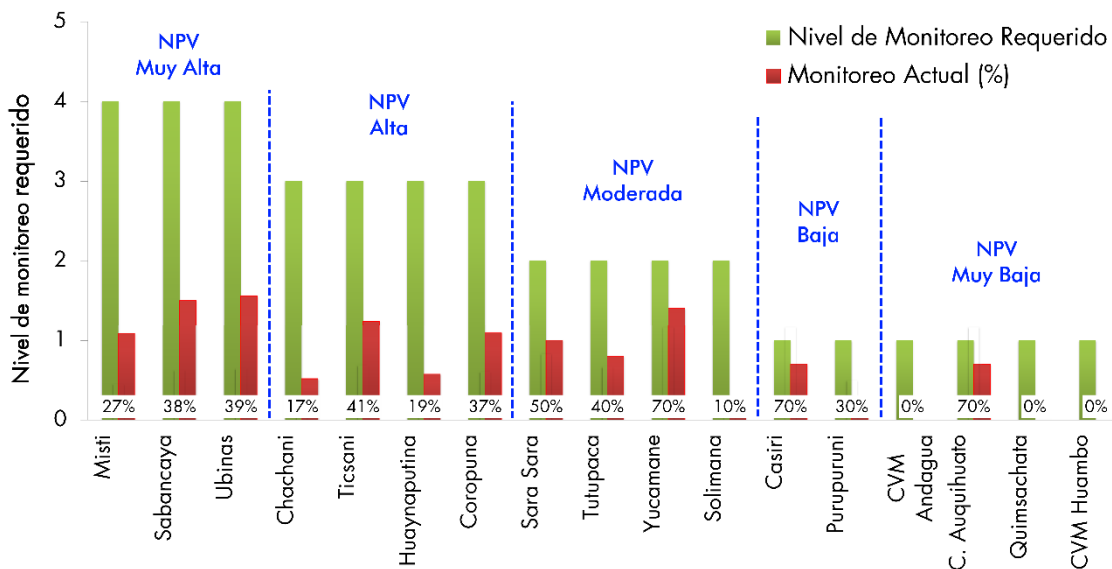


Figura 16.- Nivel de monitoreo actual en porcentaje (barras rojas: considera todas las técnicas o métodos de monitoreo), y los 4 niveles de monitoreo requeridos (barras verdes).

El número de instrumentos sísmicos, GNSS, inclinómetros, DOAS, multigases y videocámaras operativas y el número de instrumentos requeridos por los mismos métodos de monitoreo son mostrados en la Figura 17. Se precisa que los volcanes con un nivel de peligrosidad volcánica Muy Alta (Misti, Sabancaya y Ubinas) y con un nivel de monitoreo 4, presenta un avance global del 35%. Actualmente, constan con 6 y 7 equipos sísmicos de los 10 requeridos, es decir, presentan un avance de menos del 70%. Asimismo, en estos volcanes operan entre 1 y 2 estaciones GNSS, de las 6 consideradas para el monitoreo óptimo, alcanzando un avance del 33.3%. En cuanto a sensores remotos superficiales, para videocámaras, Sabancaya presenta una cobertura del 100%, mientras que Ubinas y Misti alcanzan el 67% de avance, sin embargo, la implementación de inclinómetros aún es deficiente para Misti y Sabancaya, caso contrario al 75% de Ubinas (Figura 17).

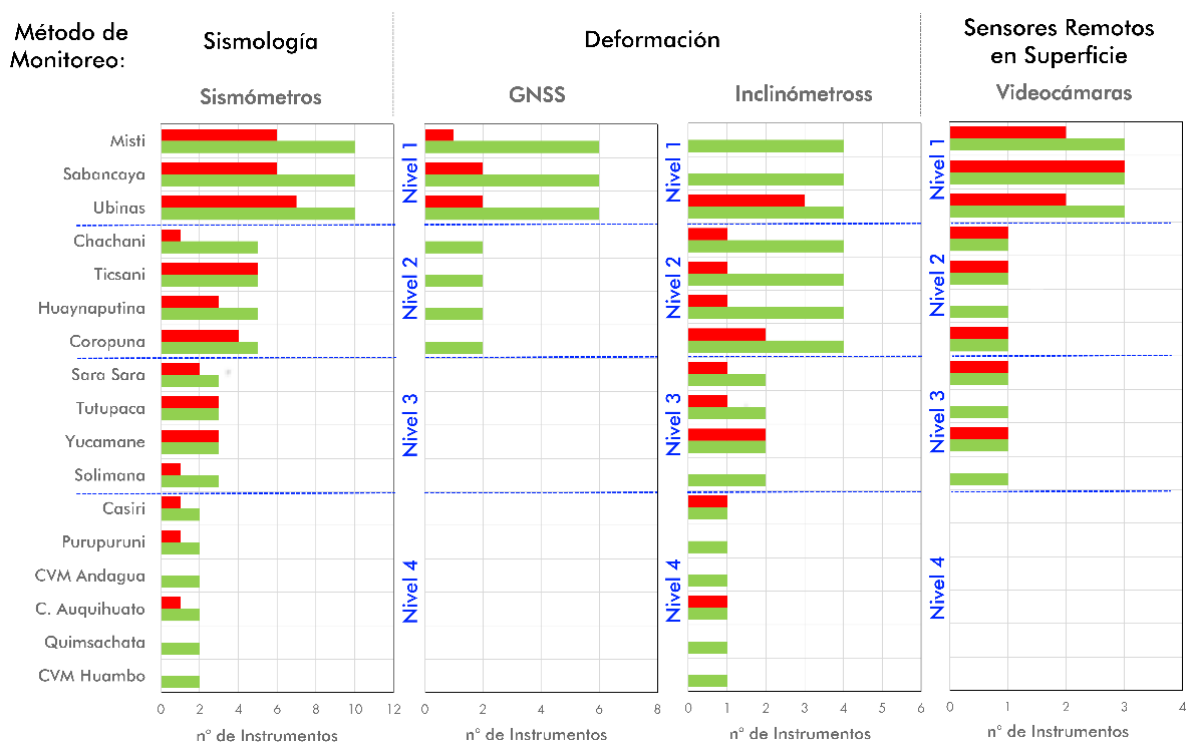


Figura 17.- Número de instrumentos operativos (barras rojas, monitoreo actual) en comparación con el número de instrumentos requeridos (barras verdes) para la vigilancia de los 17 volcanes evaluados, clasificados en 4 niveles de monitoreo.

Los volcanes que presentan un nivel de peligrosidad volcánica Alta como Chachani, Huaynaputina y Coropuna, presentan un avance global del

29%, constan actualmente de 1, 3 y 4 sismómetros en sus redes de monitoreo, respectivamente, que representa menos del 75% y aun requieren llegar a un total de 5 sensores de este tipo de equipamiento. Únicamente el volcán Ticsani alcanza el 100% del nivel requerido en cuanto a sismómetros. Sin embargo, dentro de este grupo de volcanes el monitoreo geodésico mediante estaciones GNSS e inclinómetros debe ser implementado. Por otro lado, y similar al grupo de volcanes de nivel de peligrosidad Muy Alta, el número de videocámaras operando actualmente está completo para Chachani, Coropuna y Ticsani (100% de avance).

Dentro del grupo de volcanes de nivel de peligrosidad volcánica moderada, como Sara Sara, Tutupaca y Yucamane, presentan un nivel de monitoreo volcánico aceptable, con un avance del 43%. Por su parte, el volcán Solimana, opera con el 33.3% de sismómetros requeridos y la ausencia de inclinómetros y videocámaras, quedando rezagado con el resto del grupo, ello evidencia un avance general del 10% en la implementación del sistema de monitoreo para alcanzar el nivel asignado en relación con su NPV.

Los volcanes de baja peligrosidad (Casiri y Purupuruni), cuentan con un avance global del 50% y volcanes de muy baja peligrosidad (CVM de Andagua, volcán Cerro Auquihuato, volcán Quimsachata y el CVM de Huambo), con avance global de 18%.

De acuerdo a estos resultados, el IGP ha proyectado un plan a mediano plazo para la implementación de las redes de monitoreo con el apoyo del Estado peruano en los 17 volcanes que han sido parte del presente estudio. Además, se desarrollarán proyectos de monitoreo sísmico temporal en el CVM Andagua, CVM Huambo y Quimsachata a fin de establecer sus líneas de base y reconocimiento de su actual comportamiento dinámico.

Asimismo, de presentarse signos de intranquilidad volcánica en cualquiera de los volcanes a nivel nacional, el IGP está en la capacidad de implementar un nivel de monitoreo temporal, constituido de estaciones sísmicas, GNSS y sistemas satelitales.

CONCLUSIONES

- Se han determinado 15 factores de peligro por actividad volcánica y 9 por exposición relativa (población, aviación civil, infraestructura, muertes históricas, evacuaciones históricas, etc.), frente a una eventual erupción de cualquiera de los 17 volcanes activos y potencialmente activos presentes en la región sur del Perú. Estos volcanes presentaron erupciones desde el Pleistoceno, Holoceno y época histórica (últimos 500 años). Algunos de ellos con manifestación actual de algún tipo de dinamismo (actividad eruptiva, sismicidad, actividad fumarólica, etc.).
- La suma y relación de estos factores permitió determinar el Nivel de Peligrosidad Volcánica (NPV) categorizando a los volcanes en 5 niveles: con Muy Alta peligrosidad son el Misti, Sabancaya y Ubinas; con Alta peligrosidad son el Chachani, Ticsani, Coropuna y Huaynaputina; con Moderada peligrosidad, son el Sara Sara, Tutupaca, Yucamane y Solimana; con Baja peligrosidad los volcanes Casiri y Purupuruni; y finalmente, con Muy Baja peligrosidad son el CVM Andagua, Cerro Auqui huato, Quimsachata y CVM Huambo. El NPV indica el impacto potencial de futuras erupciones, así como el grado de daño o destrucción que puede generar en caso de presentarse.
- Para el total de volcanes, el nivel de exposición dentro de un radio de 30 km habita una población de 1´225, 400 personas, distribuidas en 141 distritos. Además, las principales rutas aéreas entre la ciudad de Lima y las ciudades de Arequipa, Cusco, Juliaca, Tacna, Ilo, La Paz (Bolivia) y Arica (Chile), consideran sobrevuelos en la cadena volcánica con un tráfico aéreo diario de aproximadamente 23 mil pasajeros, también expuestos al peligro volcánico. Asimismo, se han identificado 258 centros de salud, 3 560 instituciones educativas, 30 represas/presas, 1 área de

conservación regional, 2 áreas naturales protegidas, 15 tambos y 207 sitios arqueológicos expuestos al peligro volcánico.

- Se ha realizado el diagnóstico del estado actual del monitoreo volcánico en el Perú, considerando los 4 niveles de monitoreo requerido, frente a los cinco Niveles de Peligrosidad Volcánica determinados en este estudio. Los volcanes con Muy Alto y Alto Nivel de Peligrosidad Volcánica presentan un avance en la implementación del sistema de monitoreo de 35% y 29%, respectivamente. Los volcanes de moderado Nivel de Peligrosidad Volcánica, mantienen avances en la implementación del sistema de monitoreo de 43%. Los volcanes de bajo Nivel de Peligrosidad Volcánica, como Casiri y Purupuruni, que actualmente presentan recurrente actividad sísmica y zonas de deformación superficial, presentan un avance global de implementación instrumental del 50%. Finalmente, los volcanes de muy bajo Nivel de Peligrosidad Volcánica, con excepción del Cerro Auqui huato que cuenta con 70 % de avance, no cuentan con ningún tipo de instrumentación y solo son monitoreados a través de sensores remotos satelitales.
- El IGP ha proyectado un plan a mediano plazo para la implementación de las redes de monitoreo con el apoyo del Estado peruano en los 17 volcanes que han sido parte del presente estudio.
- Asimismo, de presentarse signos de intranquilidad volcánica en cualquiera de los volcanes a nivel nacional, el IGP está en la capacidad de implementar un nivel de monitoreo temporal, constituido de estaciones sísmicas, GNSS y sistemas satelitales.

BIBLIOGRAFÍA

- Aguilar, R., Thouret, J., Samaniego, P., Wórner, G., Jicha, B., Paquette, J., . . . Finizola, A. (2022). Growth and evolution of long-lived, large volcanic clusters in the Central Andes: The Chachani Volcano Cluster, southern Peru. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 1-26.
- Alavi, H. (2020). *Evaluación de peligro por ocurrencia de lahares (flujos de lodo) en el complejo volcánico Chachani – Arequipa*. Tesis pre-grado, Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco, Cusco.
- ANA. (2015). *Inventario de Presas en el Perú*. Ministerio de Agricultura y Riego, Autoridad Nacional del Agua, Lima.
- Antayhua, Y., Velarde, L., Vargas, K., Tavera, H., & Villegas, J. (2021). *Actividad sísmica en el entorno de la falla Pacollo y volcanes Purupuruni - Casiri (2020 –2021)*. Distrito de Tarata – Región Tacna. Instituto Geofísico del Perú, Lima. Retrieved from <https://repositorio.igp.gob.pe/handle/20.500.12816/4944>
- Arapa, E. (2018). Análisis de los daños producidos por el flujo de detritos en la quebrada El Chullo en enero 2017, Arequipa, Perú. *Hazard and risk mapping*, 55-60.
- Auker, M., Sparks, R., Siebert, L., Crosweller, H., & Ewert, J. (2013). A statistical analysis of the global historical volcanic fatalities record. *Journal of Applied Volcanology*, 1-24. doi:doi.org/10.1186/2191-5040-2-2
- AUTOCOLCA. (2021). *Arequipa: Llegada de visitantes al Valle del Colca*. Autoridad Autónoma del Colca y Anexos, Arequipa.
- Barriga, V. (1951). Los terremotos en Arequipa (1582-1868)). *Arequipa, La Colmena*, 1-426.
- Blong, R. (1984). *Volcanic Hazards: a Sourcebook on the effects of Eruptions*. Sydney: Academic Press Australia.

- Boixart, G., Cruz, L., Miranda, R., Euillades, P., Euillades, L., & Battaglia, M. (2020). Source Model for Sabancaya Volcano Constrained by DInSAR and GNSS Surface Deformation Observation. *remote sensing*, 1-11. doi:10.3390/rs12111852
- Bromley, G., Thouret, J., Schimmelfennig, I., Mariño, J., Valdivia, D., Rademaker, K., & ASTER-Team. (2019). In situ cosmogenic ^3He and ^{36}Cl and radiocarbon dating of volcanic deposits refine the Pleistocene and Holocene eruption chronology of SW Peru. *Bulletin of Volcanology*, 64.
- Byrdina, S., Ramos, D., Vandemeulebrouck, J., Masias, P., Revil, A., Finizola, A., & Macedo, O. (2013). Influence of the regional topography on the remote emplacement of hydrothermal systems with examples of Ticsani and Ubinas volcanoes, Southern Peru. *Earth and Planetary Science Letters*, 152-164.
- Cabrera, M., & Thouret, J. (2000). Volcanismo Monogenetico en el Sur del Peru: Andagua. *X congreso Peruano de Geología*.
- Casadevall, T., Tormey, D., & Van Sistine, D. (2020). Protecting our global volcanic state: Review of international conservation efforts. *International Journal of Geoheritage and Parks*, 182-191.
- Cobeñas, G., Thouret, J., Bonadonna, C., & Coivin, P. (2012). The c.2030 yr BP Plinian eruption of El Misti volcano, Peru: eruption dynamics and hazard implications. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 105–120.
- COEN-INDECI. (2019). *Explosión volcánica afecta a los departamentos de Moquegua, Arequipa, Tacna y Puno*. Lima: Reporte Complementario n° 1528 - 21/07/2019.
- Coppola, D., Valade, S., Masias, P., Laiolo, M., Massimetti, F., Campus, A., . . . Valdivia, D. (2022). Shallow magma convection evidenced by excess degassing and thermal radiation during the dome-forming Sabancaya eruption (2012-2020). *Bulletin of Volcanology*, 84(16), 1-19.

- CORPAC. (2019). *Corporación Peruana de Aeropuertos y Aviación Comercial*. Obtenido de Movimiento general aeroportuario 2019: <https://www.corpac.gob.pe/Main.asp?T=5551>
- Cruz, V., Finizola, A., Macedo, O., & Sortino, F. (2004). Disruptions in the hydrothermal water geochemistry inside Misti volcano in coincidence with the 8.4 Mw earthquake of June 23rd, 2001, in southern Peru. 1. Obtenido de <https://repositorio.igp.gob.pe/handle/20.500.12816/1252>
- de Silva, S., & Francis, P. (1991). *Volcanoes of the central Andes* (viii ed.). Berlin, Heidelberg, New York, London, Paris, Tokyo, Hong Kong: Springer-Verlag. doi:10.1017/S0016756800008372
- Del Carpio, J., & Torres, J. (2020). *La actividad sísmica en el volcán Ubinas y su variación temporal (1998-2019) para la identificación de patrones de sismicidad a ser considerados en la gestión del riesgo de desastres. Instituto Geofísico del Perú*. Instituto Geofísico del Perú, Lima. Obtenido de <http://repositorio.igp.gob.pe/handle/IGP/4781>
- Del Carpio, J., Macedo, O., Puma, N., Centeno, R., Torres, J., & Cruz, J. (2016). Características de la actividad sísmica en el proceso eruptivo 2013-2015 del volcán Ubinas. *Congreso Peruano de Geología*.
- Del Carpio, J., Rivera, M., Vargas, K., Lazarte, I., & Concha, J. (2020). *Evaluación geofísica del volcán Ubinas (octubre, 2019 – julio, 2020)*. Informe técnico n° 002-2020/IGP, Instituto Geofísico del Perú, Lima. Obtenido de <https://repositorio.igp.gob.pe/handle/20.500.12816/4830>
- Delacour, A., Gerbe, M., Thouret, J., Wörner, G., & Paquereau-Lebti, P. (2007). magma evolution of quaternary minor volcanic centres in southern Peru, Central Andes. *Bulletin of Volcanology*, 69, 581-608.
- Delaite, G., Thouret, J., Sheridan, B., Labazury, P., Stinton, A., Souriot, T., & Van Westen, C. (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.*, 209-231.

- DGG Chile. (2020). *Dirección General de Concesiones del Ministerio de Obras Públicas de la República de Chile*. Obtenido de Aeropuerto Internacional Chacalluta de Arica: https://concesiones.mop.gob.cl/proyectos/Documents/Aeropuerto%20Chacalluta/2020/Operacion/op-AP_ARI_abr-2020.pdf
- Elissondo, M., & Villegas, D. (2011). Evaluación de Peligrosidad Volcánica en Argentina. *XVIII Congreso Geológico Argentino*, 2.
- Ettinger, S., Manrique, N., Talibart, C., Mounaud, L., Yao-Lafourcade, A. F., & Thouret, J. C. (2014). Using HSR imagery to downscale vulnerability assessment of buildings and local infrastructure facing hazards from floods and hyperconcentrated flows. *Geophysical Research Abstracts*, 16.
- Ewert, J., & Harpel, C. (2004). In harm's way: population and volcanic risk. *Geotimes*, 49(4), 14-17.
- Ewert, J., Diefenbach, A., & Ramsey, D. (2018). *Update to the U.S. Geological Survey National Volcanic Threat Assessment*. Scientific Investigations Report 2018-5140. U.S. Department of the Interior, U.S. Geological Survey.
- Ewert, J., Guffanti, M., & Murray, T. (2005). *An Assessment of Volcanic Threat and Monitoring Capabilities in the United States: Framework for a National Volcano Early Warning System NVEWS*. Open File Report 2005-1164, U.S. Geological Survey.
- Francis, P., & De Silva, S. (1989). Application of the Landsat Thematic Mapper to the identification of potentially active volcanoes in the Central Andes. *Remote Sensing of Environment*, 28, 245-255.
- Francis, P., & McAllister, R. (1986). Volcanology from space: Using Landsat thematic Mapper data in the central Andes. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 170-171.
- Galas, A., & Paulo, A. (2008). Idea of protection of Rio Colca Canyon and Valley of Volcanoes. *Geología*, 34, 17-33.
- García, F., Chorowicz, J., & Legros, F. (1997). La caldera Chachani, gran centro explosivo Plioceno-Holoceno del Sur del Perú? Identificación y

- evolución en imágenes landsat y radar ERS. *Congreso Peruano de Geología*, 449-454.
- Gerbe, M., & Thouret, J. (2004). Role of magma mixing in the petrogenesis of tephra erupted during the 1990-98 explosive activity of Nevado Sabancaya, southern Peru. *Bulletin of Volcanology*, 541-561.
- Goemans, P., Vatin-Pérignon, N., Oliver, R., Vivier, G., Briquet, L., & Salas, G. (1990). Crustal contamination at the Nevado Solimana, western Cordillera of the central Andes, southern Peru. *Symposium International Géodynamique Andine*, 403-406.
- Gonzales, K., Froger, J., Audin, L., & Macedo, O. (2009). Ejemplos de deformación producto de la tectónica extensiva en las zonas de Huambo-Cabanaconde en Arequipa y Calacoa-Huaytire en Moquegua, de los Andes Centrales vistos por interferometría radar – InSAR. *Boletín de la Sociedad Geológica del Perú*, 103, 109-124.
- Hantke, G., & Parodi, A. (1966). Catalogue of the active volcanoes of the world; Part XIX, Colombia, Ecuador and Perú. *IAVCEI*, 1-73.
- Harpel, C., De Silva, S., & Salas, G. (2011). The 2 ka eruption of Misti Volcano, southern Peru— the most recent plinian eruption of Arequipa's iconic volcano. *Geological Society of America, Special Papers*, 484, 1-72.
- INEI. (2018). Censos Nacionales XII de Población y VII de Vivienda, 22 de octubre del 2017, Perú: Resultados Definitivos. *Instituto Nacional de Estadística e Informática*.
- Juvigné, E., Thouret, J.-C., Gilot, J., Leclercq, E., & Gourgaud, A. (1998). L'activité du volcan Nevado Sabancaya (Pérou) au cours de l'Holocène [Activity of Nevado Sabancaya volcano (Peru) throughout the Holocene. *Quaternaire*, 9(1), 45-51.
- Juvigné, E., Thouret, J.-C., Loutsch, I., Lamadon, S., Frechen, M., Fontugne, M., Rivera, M., Dávila, J., Mariño, J. (2008). Retombées volcaniques dans des tourbières et lacs autour du massif des Nevados Ampato et Sabancaya (Pérou méridional, Andes Centrales). *Quaternaire*, 19(2), 157-173. doi:doi.org/10.4000/quaternaire.3362

- Kaneoka, I., & Guevara, C. (1984). K/Ar age determinations of late Tertiary and Quaternary Andean volcanic rocks, southern Peru. *Geochemical Journal*, 233-239.
- Kinvig, H., Winson, A., & Gottsmann, J. (2010). Analysis of volcanic threat from Nisyros Island, Greece, with implications for aviation and population exposure. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 10, 1101-1113. doi:10.5194/nhess-10-1101-2010
- Kochtitzky, W., Edwards, B., Enderlin, E., Mariño, J., & Manrique, N. (2018). Improved estimates of glacier change rates at Nevado Coropuna Ice Cap, Peru. *Journal of Glaciology*, 64(244), 175-184. doi:10.1017/jog.2018.2
- Lara, L., Clavero, J., Hinojosa, M., Huerta, S., Wall, R., & Moreno, H. (2006). NVEWS-Chile: Sistema de Clasificación semicuantitativa de la Vulnerabilidad Volcánica. *XI Congreso Geológico Chileno*, 4.
- Lavallée, Y., De Silva, S., Salas, G., & Byrnes, J. (2006). Explosive volcanism (VEI 6) without caldera formation: insight from Huaynaputina volcano, southern Peru. *Bulletin of Volcanology*, 68(4), 333-348.
- Macedo, O., Del Carpio, J., Centeno, R., Machacca, R., Portugal, D., Huancoco, O., & Chijcheapaza, R. (2014). Características Sísmicas de la Actividad Explosiva del Volcán Ubinas ocurrida en setiembre 2013. *XVII Congreso peruano de geología*, 4.
- Macedo, O., Torres, J., Machacca, R., Centeno, R., Ticona, J., Aguilar, V., Del Carpio, J., Portugal, D., Choque, E., Malpartida, A., Villafani, R. (2013). Monitoreo de la intranquilidad observada en el volcán Sabancaya (Perú) en 2013, y su aporte a la gestión del riesgo volcánico. *Segundo Encuentro de Investigadores Ambientales*.
- MacQueen, P., Delgado, F., Reath, K., Matthew, E., Pritchard, M., Bagnardi, M., Milillo, P., Lundgren, P., Macedo, O., Aguilar, V., Ortega, M., Ancasi, R., Lazarte, I., Miranda, R. (2020). Volcano-Tectonic Interactions at Sabancaya Volcano, Peru: Eruptions, Magmatic Inflation, Moderate Earthquakes, and Fault Creep. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1-61. doi:10.1029/2019JB019281

- Manrique, N., Samaniego, P., Médard, E., Schiavi, F., Mariño, J., & Liorzou, C. (2020). Pre-eruptive magmatic processes with the historical (218 ± 14 aBP) explosive eruption of Tutupaca volcano (southern Peru). *Bulletin of Volcanology*, *82*(6), 1-25. doi:10.1007/s00445-019-1335-4
- Mariño, J. (2002). *Estudio geológico vulcanológico y evaluación de peligros del volcán Ticsani (sur del Perú)*. Tesis pre-grado, Universidad Nacional de Ingeniería, Lima.
- Mariño, J., & Thouret, J. (2003). Geología, historia eruptiva y evaluación de peligros del volcán Ticsani (sur del Perú). *Boletín de la Sociedad Geológica del Perú*, 1-27. Obtenido de <http://hdl.handle.net/20.500.12816/1261>
- Mariño, J., Rivera, M., Thouret, J., & Macedo, L. (2016). *Geología y Mapas de Peligros del Volcán Misti*. Boletín, Serie C: Geodinámica e Ingeniería Geológica, INGEMMET, Lima.
- Mariño, J., Samaniego, P., Manrique, N., Valderrama, P., Roche, O., van Wyk de Vries, B., Guillou, H., Zerathe, S., Arias, C., Liorzou, C. (2021). The Tutupaca volcanic complex (Southern Peru): Eruptive chronology and successive destabilization of a dacitic dome complex. *Journal of South American Earth Sciences*, 1-18. doi:10.1016/j.jsames.2021.103227
- Mariño, J., Thouret, J., Cabrera, M., Aguilar, R., Manrique, N., Edwards, B., & Kochtitzky, W. (2017). *Geología y evaluación de peligros del complejo volcánico nevado Coropuna*. Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico, Lima.
- Mariño, J., Valdivia, D., Soncco, Y., Miranda, R., & Machacca, R. (2018). Estudio de lahares emplazados en el valle de Ubinas (sur del Perú) en febrero del 2016. *Hazard and Risk Mapping*(1), 93-98.
- Masias, P. (2018). *Características químicas e isotópicas del sistema hidrotermal del complejo volcánico nevado Coropuna*. Tesis Maestría, Universidad Nacional San Agustín de Arequipa, Arequipa.

- Miller, C. (2011). *Threat assessment of New Zealand's volcanoes and their current and future monitoring requirements*. Institute of Geological and Nuclear Science Limited. Taupo: ISSN 117-2425.
- MINCETUR. (2021). *Ministerio de Comercio Exterior y Turismo*. Obtenido de <https://datosturismo.mincetur.gob.pe/appdatosTurismo/>
- MINEDU. (2021). *Ministerio de Educación*. Obtenido de ESCALE: Estadística de la Calidad Educativa: <http://sigmed.minedu.gob.pe/mapaeducativo/>
- MINEM. (2021). *Mapa de principales unidades mineras en producción*. Ministerio de Energía y Minas, Lima. Obtenido de http://www.minem.gob.pe/minem/archivos/file/Mineria/PUBLICACIONES/MAPAS/2021/2021_MAPA_PRODUCCION.pdf
- MINEM. (2021a). *Mapa de proyectos mineros, unidades en exploración*. Ministerio de Energía y Minas, Lima. Obtenido de http://www.minem.gob.pe/minem/archivos/file/Mineria/PUBLICACIONES/MAPAS/2020/2020_MAPA_PROYECTOS.pdf
- MINSA. (2021). *Ministerio de Salud*. Obtenido de RENIPRESS: Registro Nacional de Instituciones Prestadoras de Servicios de Salud: <http://app20.susalud.gob.pe:8080/registro-renipress-webapp/listadoEstablecimientosRegistrados.htm?action=mostrarBuscador#no-back-button>
- Morales, A., & Amelung, F. (2016). Volcano deformation survey over the Northern and Central Andes with ALOS InSAR time series. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2869-2883.
- Moran, S., Freymueller, J., Lahusen, R., McGee, K., Poland, M., Power, J., Schmidt, D., Schneider, D., Stephens, G., Werner, C., White, R. (2008). *Instrument Recommendations for Volcano Monitoring at U.S. Volcanoes Under the National Volcano Early Warning System*. Scientific Investigations Report 2008-5114, U.S. Geological Survey, Department of the Interior.

- MTC. (2018). *Descarga de los datos espaciales del MTC*. Obtenido de Ministerio de Transportes y Comunicaciones: <https://portal.mtc.gob.pe/estadisticas/descarga.html>
- Navarro, R. (1994). *Antología del Valle de Omate*. Arequipa.
- Navarro, R., Jara, L., Thouret, J.-C., Siebe, C., & Dávila, J. (2000). The AD 1600 eruption of Huaynaputina as described in early Spanish chronicles. *Boletín de la Sociedad Geológica del Perú*, 90, 121-132.
- Nieto-Torres, A., Freitas, L., Bonadonna, C., & Frischknecht, C. (2021). A New Inclusive Volcanic Risk Ranking, Part 1: Methodology. *Frontiers in Earth Science*, 22.
- Pallister, J., & McNutt, S. (2015). Synthesis of volcano monitoring. En H. Sigurdsson (Ed.), *The Encyclopedia of Volcanoes* (págs. 1151-1171). doi:doi.org/10.1016/C2015-0-00175-7
- Palma, J., Rose, W., & Escobar, R. (2009). *Volcanic Threat in Central America: Assessment and Comparison of Volcanic Hazards and Associate Vulnerability in Guatemala, El Salvador, Nicaragua and Costa Rica*. Geological Society America Abstracts.
- Rivera, M., Cueva, K., Le Pennec, J., Vela, J., Samaniego, P., Manrique, N., & Soncco, Y. (2020). *Geología y Evaluación de los peligros del volcán Sara Sara (Ayacucho)*. boletín serie C: Geología e Ingeniería Geológica N° 78, Instituto Geológico Minero y Metalurgico, Dirección de Geología Ambiental y Riesgo Geológico, Lima.
- Rivera, M., Del Carpio, J., Tavera, H., Cruz, J., Vargas, K., Torres, J., & Concha, J. (2021). *Análisis y evaluación de escenarios críticos por descenso de lahares en volcanes peruanos*. Instituto Geofísico del Perú, Lima. Obtenido de <https://repositorio.igp.gob.pe/handle/20.500.12816/4927>
- Rivera, M., Mariño, J., & Thouret, J. (2011). *Geología y evaluación de peligros del volcán Ubinas*. Boletín, Serie C: Geodinámica e Ingeniería Geológica, INGEMMET.
- Rivera, M., Mariño, J., Samaniego, P., Delgado, R., & Manrique, N. (2016). *Geología y evaluación de peligros del complejo volcánico Ampato -*

- Sabancaya (Arequipa)*. Boletín, Serie C: Geodinámica e Ingeniería Geológica, Instituto Geológico Minero y Metalúrgico, Lima.
- Rivera, M., Samaniego, P., Liorzou, C., Guillou, H., & Vela, J. (2014). Geología y evolución del complejo volcánico Yucamane-Calientes (Tacna). *Boletín de la Sociedad Geológica del Perú*, 109, 16-19.
- Rivera, M., Samaniego, P., Vela, J., Le Pennec, J., Guillou, H., Paquette, J., & Liorzou, C. (2020). The eruptive chronology of the Yucamane-Calientes compound volcano: A potentially active edifice of the Central Andes (southern Peru). *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 393, 1-20.
- Samaniego, P., Rivera, M., Manrique, N., Schiavi, F., Nauret, F., Liorzou, C., & Ancellin, M.-A. (2020). Linking magmatic processes and magma chemistry during the post-glacial to recent explosive eruptions of Ubinas volcano (southern Peru). *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 407. doi:doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2020.107095
- Samaniego, P., Rivera, M., Mariño, J., Guillou, H., Liorzou, C., Zerathe, S., Delgado, R., Valderrama, P., Scao, V. (2016). The eruptive chronology of the Ampato–Sabancaya volcanic complex (Southern Peru). *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 323, 110-128.
- Samaniego, P., Valderrama, P., Mariño, J., Van Wyk de Vries, B., Roche, O., Manrique, N., Chédeville, C., Liorzou, C., Fidel, L., Malnati, J. (2015). The historical (218 ± 14 aBP) explosive eruption of Tutupaca volcano (Southern Peru). *Bulletin of Volcanology*, 77(51), 1-18. doi:10.1007/s00445-015-0937-8
- Sanz, S. (2020). *Evaluación del peligro por flujos piroclásticos de bloques y cenizas en el flanco sur del Complejo Volcánico Chachani*. Tesis de Maestría, Universidad Nacional de San Agustín, Unidad de Postgrado de la Facultad de Geología, Geofísica y Minas, Arequipa.
- SERNANP. (2020). *Sistema de áreas naturales protegidas del Perú*. Servicio Nacional de Áreas Naturales Protegidas por el Estado, Lima. Obtenido de

- https://www.sernanp.gob.pe/documents/10181/2872611/Listado_AN_P_28-08-2020/ddc00c79-df75-4d22-bada-5cda642a5b3f
- Siebert, C., Schaaf, P., Carlotto, V., & Gómez, J. (2006). Radiocarbon ages and composition of Holocene-Late Pleistocene monogenetic Kimsachata and Oroscocha volcanoes in Cusco, Peru. En *Cities on Volcanoes 4* (pág. 73). Quito.
- Siebert, L., Simkim, T., & Kimberly, P. (2011). *Volcanoes of the world: Third Edition*. Los Angeles, California: University of California Press.
- Silva, C. (2011). *Evaluación objetiva de la Amenaza Volcánica del Territorio Nacional*. Santiago de Chile: Universidad de Chile.
- Sorensen, E., & Holm, P. (2008). Petrological inferences on the evolution of magmas erupted in the Andagua Valley, Peru (Central Volcanic Zone). *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 1-19. doi:10.1016/j.jvolgeores.2008.05.021
- Stoffel, M., Khodri, M., Corona, C., Guillet, S., Poulain, V., Bekki, S., Guiot, J., Luckman, H., Oppenheimer, C., Lebas, N., Beniston, M., Masson-Delmotte, V. (2015). Estimates of volcanic-induced cooling in the Northern Hemisphere over the past 1,500 years. *Nature Geoscience Letters*, 1-7. doi:10.1038/NGEO2526
- Suaña, E. (2012). *volución tefroestratigráfica, petrológica y geoquímica del Complejo Volcánico Chachani, Arequipa-Perú*. Tesis pre-grado, Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa, Arequipa.
- Thouret, J., Davila, J., & Eissen, J. (1999). Largest explosive eruption in historical times in the Andes at Huaynaputina volcano, AD 1600, southern Peru. *Geology*, 27(5), 435-438.
- Thouret, J., Enjolras, G., Martelli, K., Santoni, O., Luque, J., Nagata, M., Macedo, L. (2013). Combining criteria for delineating lahar- and flash-flood-prone hazard and risk zones for the city of Arequipa, Peru. *Nat Haz Earth Syst Sci*, 13, 339-360.
- Thouret, J., Finizola, A., Fornari, M., Legeley-Padovani, A., Suni, J., & Frechen, M. (2001). Geology of El Misti volcano near the city of

- Arequipa, Peru. *Boletín de la Sociedad Geológica de América*, 1593-1610.
- Thouret, J., Guillaude, R., Huaman, D., Gourgaud, A., Salas, G., & Chorowicz, J. (1994). L'activité actuelle du Nevado Sabancaya (Sud Pérou): reconnaissance géologique et satellitaire, évaluation et cartographie des menaces volcaniques. *Bull. Soc. géol. France*, 165(1), 49-63.
- Thouret, J., Juvigné, E., Gourgaud, A., Boivin, P., & Dávila, J. (2002). Reconstruction of the AD 1600 Huaynaputina eruption based on the correlation of geologic evidence with early Spanish chronicles. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 115(3-4), 529-570.
- Thouret, J., Rivera, M., Wörner, G., Gerbe, M., Finizola, A., Fornari, M., & Gonzales, K. (2005). Ubinas: the evolution of the historically most active volcano in southern Perú. *Bulletin of Volcanology*, 67, 557-589.
- Tilling, R. (1989). Volcanic hazards and their mitigation: progress and problems. *Reviews of Geophysics*, 27(2), 237-269.
- Ubeda, J. (2011). *El impacto del cambio climático en los glaciares del complejo volcánico nevado Coropuna, (cordillera occidental de los andes centrales)*. Tesis doctoral, Universidad Complutense de Madrid, Madrid.
- UNDRO. (1991). *Mitigating Natural Disasters: Phenomena, Effects and Options. A Manual for Policy Makers and Planners*. United Nations Publications.
- UNISDR. (2009). *Terminology on Disaster Risk Reduction*. Geneva: United Nations Publications.
- Valderrama, P., Roche, O., Samaniego, P., van Wyk deVries, B., Bernard, K., & Mariño, J. (2016). Dynamics implications of ridges on a debris avalanche deposit at Tutupaca volcano (southern Peru). *Bulletin of Volcanology*, 78(14), 1-11. doi:10.1007/s00445-016-1011-x
- Valdivia, D. (2019). *Evaluación de peligros volcánicos por flujos de lahares del complejo volcánico nevado Coropuna*. Tesis pregrado, Universidad Nacional de San Agustín, Arequipa.

- Vallance, J. (2015). Lahars. En H. Sigurdsson, B. Houghton, S. McNutt, H. Rymer, & J. Stix, *Encyclopedia of Volcanoes* (págs. 601-616). San Diego, San Francisco, New York, Boston, London, Sydney, Toronto: Academic Press.
- Vargas, K., Cruz, J., Villegas, J., Rivera, M., & Tavera, H. (2022). *Morfología del cráter del volcán Ubinas y peligro potencial de colapso en su flanco sur – Región Moquegua*. Instituto Geofísico del Perú, Lima. Obtenido de <https://repositorio.igp.gob.pe/handle/20.500.12816/5080>
- Vatin-Pérignon, N., Oliver, R., Goemans, P., Keller, F., Briquet, L., & Salas, G. (1991). Geodynamic interpretations of plate subduction in the northernmost part of the Central Volcanic Zone from the geochemical evolution and quantification of the crustal contamination of the Nevado Solimana volcano, southern Peru. *Elsevier Science Publishers, Tectonophysics*, 329-255.
- Velarde, L., Tavera, H., Vargas, K., & Villegas, J. (2020). *Análisis de la Crisis Sísmica ocurrida en julio de 2020 en el distrito de Tarata (region - Tacna)*. Instituto Geofísico del Perú , Lima. Obtenido de <https://repositorio.igp.gob.pe/handle/20.500.12816/4832>
- Zavala, B., & Mariño, J. (2010). Vulcanismo Plio-Cuaternario en el valle de volcanes de Andahua, atractivo geoturístico y proyecto de geoparque en el sur de Perú. *XV Congreso Peruano de Geología*, 286-289.

