

EVALUACIÓN DEL RIESGO VOLCÁNICO EN EL SUR DEL PERÚ

Situación de la vigilancia actual y
requerimientos de monitoreo en el
futuro

INFORME TÉCNICO PREPARADO POR:

INSTITUTO GEOFÍSICO DEL PERÚ

Como resultado del Taller sobre Evaluación del Riesgo Volcánico para el Perú, llevado a cabo del 24 al 26 de Mayo 2016, con la participación de especialistas del Instituto Geofísico del Perú, Instituto Geológico Minero y Metalúrgico, Instituto Geofísico de la Univ. Nac. San Agustín de Arequipa (IG-UNSA), y el Volcano Disaster Assistance Program (VDAP) del US Geological Survey.

EVALUACIÓN DEL RIESGO VOLCÁNICO EN EL SUR DEL PERÚ

**Situación de la vigilancia actual y requerimientos
de monitoreo en el futuro**

2018

Contenido

| | |
|--|-----------|
| Introducción | 1 |
| CAPITULO I | 3 |
| Volcanes Activos en el Sur del Perú | 3 |
| 1.1 Volcán Sabancaya..... | 4 |
| 1.2 Misti..... | 5 |
| 1.3 Ubinas | 6 |
| 1.4 Coropuna | 7 |
| 1.5 Tutupaca..... | 8 |
| 1.6 Huaynaputina..... | 9 |
| 1.7 Ticsani..... | 11 |
| 1.8 Chachani..... | 12 |
| 1.9 Yucamane..... | 13 |
| 1.10 Sara Sara | 14 |
| 1.11 Quimsachata..... | 15 |
| 1.12 Auquihuato | 15 |
| 1.13 Campos Volcánicos de Andahua y Huambo | 16 |
| 1.14 Casiri | 17 |
| 1.15 Purpuruni..... | 18 |
| CAPITULO II | 19 |
| Metodología en la evaluación del riesgo volcánico | 19 |
| 2.1 Factores de Peligro | 20 |
| 2.2 Factores de exposición o vulnerabilidad | 21 |
| 2.3 Determinación de niveles de riesgo..... | 23 |
| 2.4 Categorización de los volcanes activos del Perú según su RVR..... | 26 |
| CAPITULO III..... | 30 |
| Instrumentación necesaria para el monitoreo y para el estudio e intervención..... | 30 |
| 3.1 Requerimientos de monitoreo según los niveles de RVR determinados para cada volcán. | 30 |
| 3.2 Equipos de intervención y estudio | 38 |
| CAPITULO IV | 39 |
| Comparación del monitoreo actual vs monitoreo ideal por niveles, de acuerdo al RVR de cada volcán. | 39 |
| Agradecimientos | 42 |
| Bibliografía..... | 43 |
| Anexo N°1 | 48 |
| Anexo N°2 | 65 |

| | |
|------------------------|----|
| Anexo Nº3 | 66 |
| Anexo Nº4 | 67 |

INTRODUCCIÓN

Una importante área del territorio del sur del Perú está expuesta a las erupciones volcánicas. De acuerdo al “inventario de volcanes del Perú” (Fidel et al, 1997), se reconocieron 401 estructuras volcánicas, todos distribuidos en el sur del territorio nacional (de Ayacucho hasta Tacna), de los cuales 16 son considerados volcanes activos o potencialmente activos. Estos volcanes tienen asociados peligros latentes que pueden afectar a las poblaciones, bienes e infraestructura situados en sus proximidades y en gran parte del sur del país.

Ante esta realidad, es necesario contar con un sistema de alerta volcánica temprana que asegure que todos los volcanes activos sean convenientemente monitoreados y vigilados antes de que presenten signos de “intranquilidad” y en nivel acorde con el riesgo que cada volcán represente. En el presente estudio, el riesgo volcánico que pende sobre una zona está definido por los peligros (o fenómenos naturales destructores que genera el volcán) y la exposición (o vulnerabilidad) de las personas y bienes susceptibles de ser alcanzados por tales peligros.

Se sabe que, en general, el comportamiento eruptivo que sobreviene en un volcán es similar al ocurrido en sus recientes erupciones. En base a la idea anterior se considera que es posible esbozar un escenario de erupción, el cual se puede estimar conociendo factores de peligro volcánico tales como: tipo de volcán, máximo índice de explosividad volcánica ó IEV, recurrencia eruptiva, tipos de material expulsado, presencia de casquete glaciar, sismicidad, deformación, desgasificación, etc.

Por otro lado, en la caracterización de la vulnerabilidad intervienen también diversos factores tales como la ubicación de centros poblados, historia de evacuaciones, decesos ocurridos por erupciones anteriores, la exposición de la aviación, presencia de obras, infraestructura, construcciones urbanas, etc.

En este contexto, en el presente trabajo se efectúa una estimación semicuantitativa, orientada a la evaluación objetiva del riesgo volcánico que representa la actividad volcánica a nivel nacional. Este sistema es una adaptación del modelo utilizado por el Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS) denominado “National Volcano Early Warning System” (NVEWS) desarrollado por Ewert et al. (2005). En todas las etapas de análisis (factores de peligro, y de factores de exposición) para la determinación del nivel de riesgo volcánico, así como la compilación de la instrumentación actualmente instalada sobre los volcanes del sur del Perú, se ha trabajado conjunta y coordinadamente entre especialistas del Observatorio Vulcanológico del Sur (OVS), Observatorio Vulcanológico de INGEMMET (OVI) y del Observatorio Geofísico de la Universidad Nacional de San Agustín (UNSA).

Con este trabajo se busca clasificar a los 16 volcanes activos y potencialmente activos de nuestro país, en grupos de nivel de Riesgo Volcánico Relativo. Por otro lado, en este trabajo se establece también el grado o nivel óptimo de monitoreo y vigilancia actual para cada uno de los volcanes según su respectivo nivel de riesgo, de modo que posteriormente se hace una comparación entre el nivel óptimo y el nivel de vigilancia actualmente alcanzado. Se determina así cuánto falta aún por avanzar en la implementación de instrumental especializado para alcanzar una adecuada vigilancia de la actividad volcánica en el Perú.

Así, los objetivos que se buscan con este informe técnico son:

- Realizar una evaluación del riesgo generado por nuestros volcanes.
- Evaluar las capacidades de monitoreo actual para cada volcán.
- Definir un nivel óptimo de instrumentación para cada volcán, de acorde con el riesgo volcánico que cada uno de ellos represente.
- Reconocer las deficiencias instrumentales en el monitoreo (Gap), comparando la vigilancia actualmente establecida con la que debería ser implementada (instrumentación ideal).
- Priorizar la implementación de estaciones y monitoreo volcánico según la evaluación de riesgo y el Gap de monitoreo encontrado.

CAPITULO I

VOLCANES ACTIVOS EN EL SUR DEL PERÚ

En el sur del Perú se han identificado 16 estructuras volcánicas (Figura 1) catalogados como activos y potencialmente activos (De Silva & Francis, 1991; Simkim & Siebert, 1994; Smithsonian Institution, Global Volcanism Program http://volcano.si.edu/data_criteria.cfm), y desde 1550, ocho de ellos (Huaynaputina, Ubinas, Misti, Sabancaya, Tutupaca, Ticsani, Yucamane y volcanes de Andagua) han presentado erupciones (Rivera et al, 2006).

En los últimos 600 años se han contado un total de 45 erupciones explosivas en los ocho volcanes activos peruanos, lo que hace un promedio de una erupción cada 13 años. Una muestra de las elevadas condiciones de explosividad ha ocurrido en el pasado muy reciente de manera dramática: la terrible explosión del volcán Huaynaputina (Moquegua) hace cerca de 400 años. En efecto, el 19 de Febrero del año 1600 el volcán Huaynaputina inicio una violentísima erupción, catalogada con VEI 6 (Índice de Explosividad Volcánica que va de 0 a 8 en su escala). Los siguientes 17 días fueron de una incesante andanada de explosiones y emisión de material magmático, que género devastación total en un área de 90 x 60 km. Se calcula que 11 km³ de depósitos eruptivos fueron emitidos (Lavallée et al., 2006), es decir un volumen equivalente a un tercio del volcán Misti en la actualidad. Esta fortísima erupción ocasionó la muerte de más de 1500 personas, la destrucción total de más de 16 poblados y tuvo efectos devastadores en todo el sur peruano (Thouret, et al., 1999).

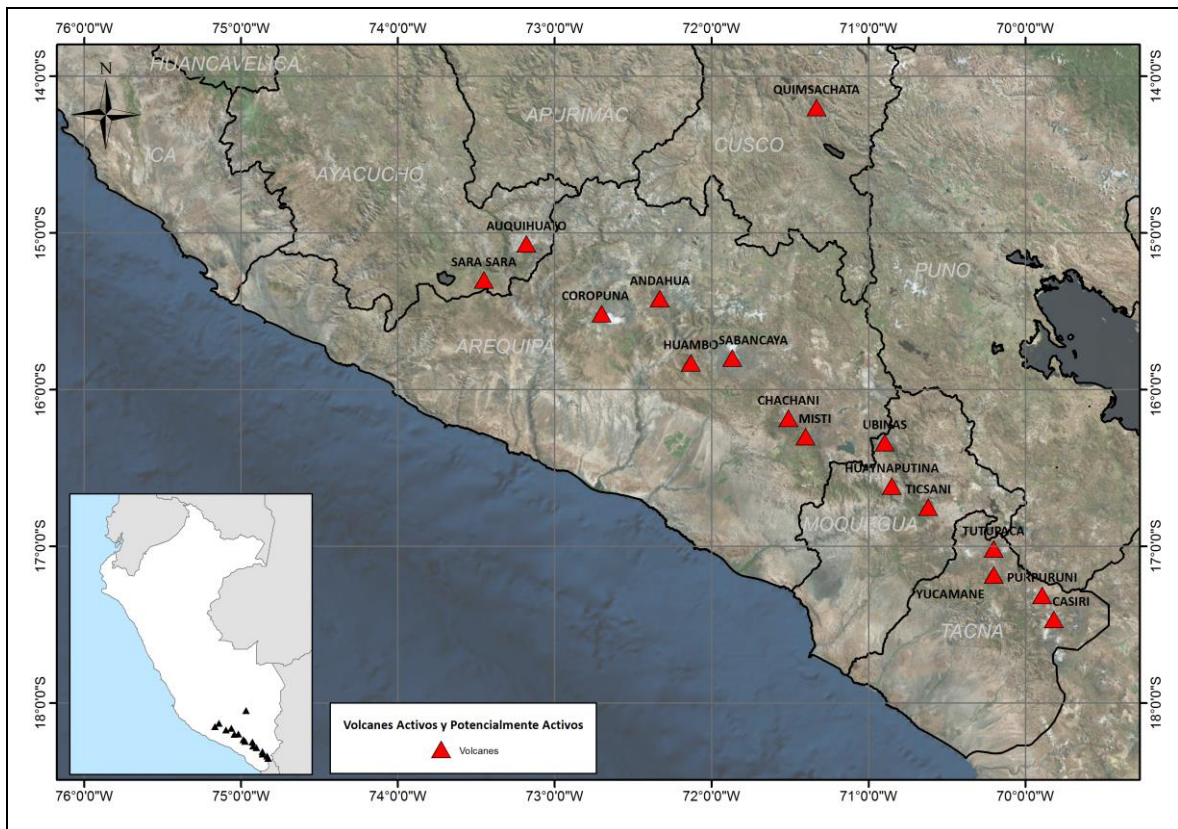


Figura 1.- Volcanes activos y potencialmente activos del sur del Perú.

Los 16 volcanes identificados son, actualmente, objeto de estudios y monitoreo por parte de instituciones especializadas. El Observatorio Vulcanológico del Sur (OVS) del Instituto Geofísico del Perú (IGP) y el Observatorio Vulcanológico del Ingemmet (OVI) han instalado redes de instrumentos geofísicos y geoquímicos, para el monitoreo permanente y en tiempo real de los volcanes Misti, Sabancaya, Ubinas y Ticsani. También, en los últimos diez años ha realizado algunas campañas de monitoreo temporal con equipos sísmicos en los volcanes Coropuna, Tutupaca, Huaynaputina y Auquihuato. Sin embargo, aunque se realizan denodados esfuerzos en la vigilancia volcánica, no ha sido posible ampliar las redes de monitoreo permanente para cubrir los 16 volcanes identificados.

A continuación se detallan las características geológicas y la historia eruptiva de los denominados volcanes activos y potencialmente activos del sur peruano.

1.1 VOLCÁN SABANCAYA

El volcán Sabancaya ($15^{\circ}47'S$; $71^{\circ}51'W$; con altitud de 5976 m.s.n.m.) se encuentra a 19 km del pueblo de Maca (valle del río Colca) y a 76 km al noroeste de la ciudad de Arequipa. Es un estratovolcán activo de edad Holocénica (Thouret et al. 1994; Gerbe & Thouret 2004) perteneciente al complejo volcánico Ampato–Sabancaya. Está constituido por una sucesión de flujos y coladas de lavas en bloques de composición andesítica que cubren una superficie aproximada de 70 km² (Huamán et al., 1993). En la cumbre del edificio, con hielo y nieve la mayor parte del tiempo, se encuentra un cráter activo de aproximadamente 350 m. de diámetro. La historia eruptiva del Sabancaya muestra tanto periodos efusivos como violentos periodos explosivos, pero en los tiempos más recientes su comportamiento ha sido sobre todo efusivo, tal como se puede apreciar en las amplias coladas de lava en bloques que se distribuyen por varios kilómetros alrededor del cráter. La actividad volcánica data desde el pleistoceno tardío al holoceno, presentando varias etapas de erupciones explosivas de tipo vulcaniano durante el holoceno (Gerbe and Thouret, 2004). Erupciones de este volcán han sido datadas desde los 6600 años AC (Global Volcanism Program, 2013; Jay et al., 2015), con índices de explosividad volcánica (IEV) de entre 1-3. En los últimos 4-5 Ka (Samaniego et al., 2016) se han registrado al menos 6 erupciones. Recientemente, con ocasión de revisión de crónicas históricas, se conoció que el volcán tuvo actividad explosiva en 1752 y 1784.

El último proceso eruptivo se desarrolló entre 1990 a 1998 (Siebert et al., 2010), registro explosiones de tipo vulcaniana y freatomagmáticas que produjeron columnas de ceniza entre 5 y 7 km de altura y alcanzo un IEV igual a 2 y 3 (Siebert 2010, Gerbe & Thouret 2004). En la actualidad, el Sabancaya inicio un periodo de intranquilidad volcánica en el 2013, y desde entonces se ha registrado alta sismicidad y emisiones de vapor de agua y gases de manera intermitente. En agosto de 2016 se registró la primera explosión de este nuevo proceso eruptivo.

Dentro del área de influencia del complejo Ampato-Sabancaya existen más de 20 centros poblados. Por el adyacente valle del Colca considerado uno de los principales lugares turísticos del país, pasa el principal canal de irrigación del sur del Perú (canal Majes), y en las inmediaciones esta también una línea de transmisión eléctrica importante, la línea Socabaya-Mantaro del sistema eléctrico interconectado del sur del Perú. Las principales actividades económicas de la zona son la agricultura, la ganadería y el turismo; este último desarrollado en torno al cañón del Colca, viene experimentando un crecimiento acelerado.



Figura 2.- Vista del complejo volcánico Ampato (izquierda) – Sabancaya (derecha) desde el flanco sur.

1.2 MISTI

El volcán Misti, se emplaza en el borde oeste de la Cordillera Occidental de los Andes del Sur del Perú, colinda al noroeste con el volcán Chachani y al sureste con el Pichu Pichu. Y por el sector suroeste tiene a sus pies a la ciudad de Arequipa que aparece con un impresionante desnivel de 3500 metros en relación a la cima del volcán. Al pie del flanco norte y noroeste discurre el río Chili seccionando un profundo cañón en donde se han construido las centrales hidroeléctricas de Charcani; asimismo, algunos kilómetros aguas arriba se ubican importantes reservorios (Aguada Blanca y El Frayle) que constituyen la principal fuente de agua para los habitantes de la ciudad de Arequipa y para la agricultura local. También, a proximidades del volcán Misti, a una veintena de kilómetros hacia el sureste, se encuentra la Laguna de Salinas que forma parte de la Reserva Nacional Aguada Blanca – Salinas.

En los últimos 50,000 años, fortísimas erupciones dieron lugar hasta 12 caídas de pómez, que se sucedieron con intervalos de 2000-4000 años (Suni, 1999; Thouret et al, 1995a, Thouret et al, 1994; Hantke y Parodi, 1966).

La última de las grandes erupciones, una erupción pliniana de este volcán, tuvo lugar hace 2050 años (Thouret et al., 1994; Harpel, 2011) y es probablemente la responsable de la apertura y/o reapertura del cráter exterior del volcán. Esta erupción se habría iniciado con la emisión de materiales volcánicos hasta alturas de 20 a 25 km, para luego caer sobre la ciudad de Arequipa formando capas de ceniza de algunos centímetros de espesor. Al término de la erupción, la columna se habría desplomado sobre sí misma dando origen a los flujos piroclásticos que quedaron canalizados en las quebradas de la parte sur del volcán hasta llegar al perímetro de la ciudad. Finalmente, importantes volúmenes de lodo discurrieron en flujos viscosos que arrasaron las zonas próximas a las quebradas y al río Chili.

Reportes de la actividad eruptiva histórica dan cuenta de erupciones ocurridas durante el reinado del Inca Pachacutec, entre 1438-1471 D.C., que provocaron algunos daños en el distrito de Cayma, además depositó una capa de ceniza negra menor o igual a 10 cm de espesor en Arequipa. Otras manifestaciones de actividad histórica habrían ocurrido en: 1542?, 1599?, 1826?, 1830, 1831?, 1869 y 1870?, aunque al parecer la mayoría estaría relacionada a una fuerte actividad fumarólica y/o leve emisión de cenizas. En mayo de 1677 se registró un evento explosivo moderado,

y dos eventos freáticos (Ventura Travada y Córdoba 1752) en julio de 1784, y entre julio-octubre de 1787, que alcanzaron un IEV igual a 2 (Thouret, 1999; Simkin y Siebert 1994). La actividad actual se manifiesta por continuas emisiones de fumarolas desde el “domo tapón” del cráter interno, así como desde fisuras situadas hacia el sector noreste de la cima.



Figura 3.- Vista del volcán Misti desde la ciudad de Arequipa.

1.3 UBINAS

El volcán Ubinas ($16^{\circ}21'S$ y $70^{\circ}54'W$, 5672 m.s.n.m.), se ubica en la Región Moquegua, provincia de General Sánchez Cerro, a 6 km al noreste del distrito de Ubinas y a 70 km al este de la ciudad de Arequipa. En la zona valle abajo del volcán habitan alrededor de 5000 habitantes distribuidos entre los pueblos de Querapi, Ubinas, Sacohaya, Anascapa, Tonohaya, San Miguel, Huatagua, Huarina, Matalaque, Yalagua, etc. Dichos poblados están ubicados dentro del radio de influencia del volcán Ubinas, cuya actividad socio-económica principal es la ganadería y agricultura. La actividad volcánica del Ubinas ocurrió desde el pleistoceno superior prolongándose hasta el holoceno. Desde 1550 ha presentado 26 eventos volcánicos (Thouret et al. 2005; Rivera, 2010) con una recurrencia de 2 a 6 erupciones por siglo, los episodios eruptivos fueron de tipo vulcanianas y plinianas, dichos registros eruptivos datan desde los 980 ± 60 años (Rivera M., Thouret J.-C., Samaniego P., Le Pennec J. 2013). A lo largo de su historia eruptiva, el volcán Ubinas ha presentado flujos piroclásticos, colapsos de caldera y flujos de lava datados en los últimos 370 ka. Así también, se han encontrado indicios de erupciones plinianas de hace 14 Ka y 7.5 Ka AC (Rivera, 2000). Se tiene registro de avalanchas de escombros de 1.6 km^3 por parte de un segundo colapso

del flanco sur del volcán, producida por una erupción explosiva de poco volumen, ocurrida alrededor de 3800 años AC (Thouret, 2004). Los últimos procesos eruptivos de este siglo ocurrieron entre el 2006 al 2009 y entre el 2013 al 2016, índices de explosividad volcánica de entre 2 y 3 los cuales generaron columnas eruptivas de hasta 6 km de altura sobre el cráter y grandes volúmenes de ceniza emitida.



Figura 4.- Vista del volcán Ubinas desde el sector sureste.

1.4 COROPUNA

El volcán Nevado Coropuna ($15^{\circ} 31'S$, $72^{\circ} 39'W$; 6,377 m.s.n.m.) es el volcán más voluminoso y el más elevado de los volcanes potencialmente activos del sur del Perú (De Silva and Francis, 1990). Se encuentra situado a 150 km al NW de la ciudad de Arequipa, en jurisdicción de las provincias de Castilla y Condesuyos, región de Arequipa. Es un estratovolcán que se presenta como una cadena de orientación Este-Oeste de 20 kilómetros de longitud y 12 de ancho, y está formado por seis conos volcánicos y domos de edad neógena (Venturelli et al., 1978; Forget et al, 2008). La base del volcán está a los 4400 m de altura, su cima más alta está situada en su sector NW y alcanza los 6377 m. de altura. Gran parte de la cima puede llegar a estar cubierta por nieve y hielo que desciende hasta los 5400 m, con área aproximada de 65 km²; sin embargo, las estimaciones hechas en el año 2000 muestran tan solo una superficie de 53,9 km² para el casquete glaciar permanente (Forget et al, 2008), mientras que más recientes cálculos efectuados observando imágenes ASTER indican que en 2007 la superficie total del sistema glaciar se habría reducido a

solo 46,5 km² (Ubeda, 2011). Los flancos de este enorme volcán son surcados por quebradas y valles relativamente profundos en cuyos lechos yacen depósitos aluviales y/o lahares.

En el volcán Coropuna, se observa la existencia de flujos de lava en bloques andesíticos frescos, que yacen sobre los flancos NE, SE y Oeste, y que ocupan valles, glaciares y morrenas de aproximadamente inicios del Holoceno. No se ha encontrado muchos sites donde se haya logrado obtener depósitos de productos volcánicos, sin embargo Lamadon (1999) y Thouret et al (2002a; 2008) refieren de dataciones efectuadas en capas de cenizas que dieron una edad C14 de 37,37 ± 1,16 ka, y en una capa superior otra muestra dio una edad de 27,2 ± 0,3 ka. Ellos deducen que dichas cenizas provendrían probablemente de una erupción fisural que generó tres coladas de lavas recientes en los flancos Oeste, Sureste y Noreste de los domos del Coropuna. Asimismo, Thouret et al (2010) señalan posible actividad eruptiva del Coropuna a inicios del Holoceno por observación de depósitos de caída de pómez.

No se conoce de actividad eruptiva histórica de este volcán. Sin embargo, considerando que se trata del más grande y elevado de los volcanes potencialmente activos y aquel que tiene la mayor masa glaciaria que le recubre, el volcán Coropuna presenta un elevado potencial de peligro. Es muy probable que las erupciones recientes de este volcán hayan estado asociadas a flujos de lava y acompañadas de lahares.



Figura 5.- Vista del volcán Coropuna desde el flanco suroeste.

1.5 TUTUPACA

El volcán Tutupaca (17° 01'S, 70° 12'W; 5790 m.s.n.m.) es un estrato-volcán ubicado al norte del departamento de Tacna, a 28 km al noroeste de la ciudad de Candarave, región Moquegua. La actividad volcánica del complejo Tutupaca se data desde el pleistoceno tardío al holoceno, presentando varias etapas de erupciones explosivas (Parodi 1966), los episodios eruptivos fueron de tipo plinianas, sub-plinianas y vulcanianas (Global Volcanism Program, 2013), con índices de explosividad (IEV) de entre 2 a 4. El Tutupaca consiste al menos de 7 domos dacíticos colapsados, que crecieron en el holoceno (Manrique, 2013). En su historia eruptiva reciente, en el Tutupaca se emplazan una serie de nuevos domos al interior de la cicatriz de colapso de la etapa anterior. Estos domos colapsaron y dieron lugar a extensos afloramientos de depósitos de flujos piroclásticos de ceniza y oleadas piroclásticas, que han sido datados indirectamente en 220 ± 30 años por C14 en

materia orgánica; a su vez, estos depósitos son cubiertos por un flujo de cenizas datado en 180+-30 años también por C14. Estas dataciones coinciden bastante bien con los recuentos históricos que señalan ocurrencia de erupciones de este volcán en 1789 y en 1802 (Zamácola y Jáuregui, 1804; Morche y De La Cruz, 1994).

Actualmente se observa frecuentes emisiones de fumarolas de coloración blanquecina en las zonas de la cumbre Sur del edificio Tutupaca Reciente. También, en las inmediaciones de este complejo volcánico se puede observar hasta 49 fuentes termales, siendo las más notorias aquellas que se emplazan en las quebradas de Azufre Grande, Azufre Chico Tacalaya, Callazas y Pampas de Turun Turun (Fidel & Zavala, 2001).

En caso de una reactivación del volcán, los principales peligros estarían asociados a la dispersión de tefras (lluvias de ceniza), ocurrencia de flujos piroclásticos, avalancha de escombros, lahares y flujos de lavas. Estos fenómenos podrían afectar a poblados en un radio de 30 km alrededor del volcán como la capital de provincia, Candarave, así como a los centros poblados de Cairani, Camilaca, Suches, Huaitire, Curibaya, Huanuara y Quilahuani. Por otro lado, la erupción puede afectar también los canales de irrigación y bocatomas que funcionan en la zona para el riego de numerosos terrenos agrícolas. Existen también obras civiles e infraestructuras mayores como tuberías de agua y estaciones de bombeo de agua que usan las minas de Toquepala y Cuajone, y obras viales importantes como la Carretera binacional Ilo-Desaguadero, carretera Tacna-Candarave-Puno, etc. Por último, hay que considerar también que una eventual reactivación de este volcán puede afectar las lagunas de Aricota y Suches que son reservas de agua de suma importancia para la región.



Figura 6.- Vista del volcán Tutupaca desde el flanco norte.

1.6 HUAYNAPUTINA

El volcán Huaynaputina (16°36'S; 70°51'W), localizado a 76 km al Sureste de la ciudad de Arequipa, en la provincia de General Sánchez Cerro, Región Moquegua, es un volcán cuya morfología no presenta la típica forma de estrato-volcán. En el lugar, solo se observa una extensa altiplanicie (4500 m.s.n.m) que presenta tres aberturas o cráteres colindantes con los bordes de un profundo valle. El Huaynaputina se presenta tallado en la cima y el flanco de un antiguo edificio probablemente perteneciente a la formación Barroso de edad miocena a pleistocena (De Silva et al.,

1996). Sus tres cráteres están sobre el borde occidental del valle del río Tambo (Moquegua), dentro de un anfiteatro de 2.5 km de diámetro en forma de herradura abierto hacia el cañón de dicho río que se encuentra 2 km más abajo. Los cráteres tienen entre 70 y 150 m de diámetro, con profundidades de hasta 100 m. Este anfiteatro sería parte de un cráter antiguo modificado en un circo glacial antes de la gran erupción que ocurrió en 1600 (De Silva & Zielinski, 1998).

En un radio de influencia de 32 km se asientan importantes pueblos como Ubinas, Quinistaquillas, Calacoa, Matalaque, Coalaque, pueblos en las que la actividad socioeconómica más importante es la agricultura y la ganadería. El volcán Huaynaputina está constituido por una sucesión de flujos de lava e ignimbritas, cuyo emplazamiento ocurrió en el Pleistoceno. Consta de una compleja caldera de avalancha en forma de herradura de 2.5 x 1.5 km de diámetro, formada anterior a la erupción de 1600 D.C. (Thouret et. al., 1999). La erupción pliniana del año 1600 DC, del volcán Huaynaputina, originó el más extenso y voluminoso (12 km³) depósito de caída de pómez en los Andes en épocas históricas. Esta erupción fue catalogada con un IEV =6 y produjo flujos piroclásticos y lahares (Dávila 1998; Thouret, 1999; Lavallée et al, 2009). Los lahares se produjeron represando 2 veces el río Tambo días después de la gran erupción (Dávila, 1998; Thouret et al., 2002; Adams, 2001). Entre las consecuencias de la erupción en relación a la ciudad de Arequipa, situada a 75 km al noroeste del volcán, los reportes históricos de la época refieren que en los días siguientes al 19 de Febrero, la ciudad soportó una intensa lluvia de cenizas blancas causando oscuridad en pleno día. El techo de muchas viviendas colapsó bajo el peso de gruesos depósitos de cenizas. En lugares próximos al volcán, la gran erupción pliniana e ignimbrítica ocasionó la muerte de más de 1500 personas (Navarro, 1994). Repetidas caídas de tefras, flujos piroclásticos y oleadas sepultaron ocho poblados y trastornaron la vida y el paisaje dentro de un área aproximada de 90 x 60 km, donde se perdió todo; el hambre, miseria y enfermedades hicieron estragos. Las crónicas de la época y las últimas investigaciones dicen que su impacto se dejó sentir en Lima, Arequipa, Arica, La Paz y Potosí. Asimismo, la erupción ocasionó efectos climáticos globales principalmente en la disminución en la temperatura de verano en el hemisferio norte (De Silva & Zielinski, 1998).



Figura 7.- Vista del cráter del volcán Huaynaputina.

1.7 TICSANI

El volcán Ticsani ($16^{\circ} 45'S$, $70^{\circ} 37'W$; 5408 m.s.n.m.) situado a 60 km al noreste de la ciudad de Moquegua, es un estrato-volcán cuya característica principal es de haber presentado muy grandes avalanchas. Este volcán muestra 2 etapas evolutivas, "Ticsani Antiguo" y "Ticsani Moderno". La primera etapa se inició en el Pleistoceno inferior con la formación del estratocono "Ticsani Antiguo", con un vulcanismo efusivo. Esta etapa culmina en el Pleistoceno medio, con el colapso del edificio volcánico y el emplazamiento de depósitos de avalanchas de escombros con un volumen de alrededor de 15 km^3 , siendo las más voluminosas del Pleistoceno en el Sur del Perú.

La segunda etapa empieza con el emplazamiento de lava en bloques, crecimiento y colapso de domos (que originan depósitos de flujos piroclásticos de bloques y cenizas) y caídas de tefras. En esta etapa se produjo la erupción sub-pliniana más importante, que originó el depósito de caída de lapilli de pómez dacítico "Ticsani Gris". Esta erupción se produjo en $10\,600 \pm 80$ años (Holoceno Inferior), con una columna eruptiva que alcanzó los 17 km de altura y un VEI = 4 (Mariño 2002).

Sobreyaciendo a la ceniza del año 1600 del volcán Huaynaputina, en la zona del Ticsani se observa depósitos dispersos de caída de bloques de pómez (hasta 40 cm) y bombas en "costra de pan" de coloración parduzca. Mariño & Thouret (2003) se refieren a ellos como "Ticsani Pardusco" e indican que resultó de una erupción freatomagmática, con eje de dispersión orientado hacia el SE, ocurrida previa al emplazamiento del tercer domo, hace menos de 400 años (Mariño y Thouret, 2003). El espesor de estos depósitos es de 2 a 4 cm y se estima que la columna eruptiva que los produjo alcanzó 16 km de altura, lo que demuestra que la erupción fue muy violenta.

Hoy en día, una eventual erupción del volcán Ticsani constituye un riesgo potencial para los poblados aledaños como Calacoa (8 km del cráter reciente), Carumas (11 km), y otros como Quebaya, Cuchumbaya, Soquezane y numerosos caseríos, localizados al Oeste y SE dentro de un radio de 12 km alrededor del volcán, donde habitan más de 5,000 personas. Estas zonas y poblados serían afectados principalmente por caídas de tefras, lahares, etc. y eventualmente por flujos piroclásticos y coladas de lava.

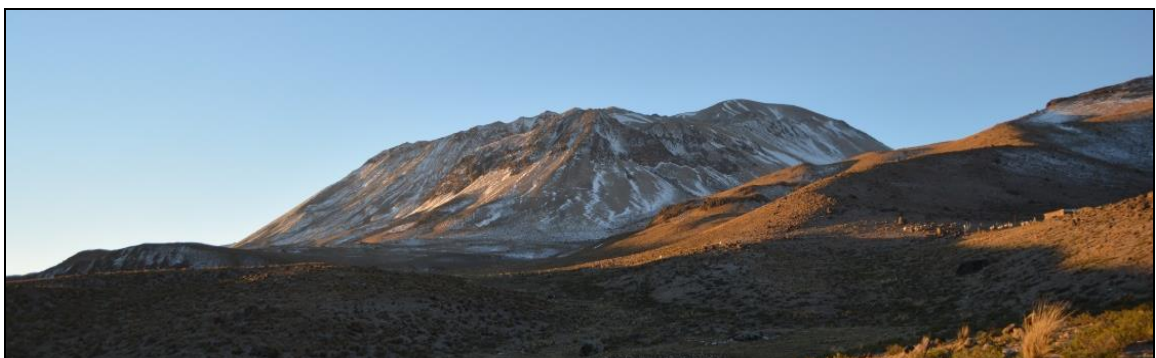


Figura 8.- Vista del volcán Ticsani desde el flanco suroeste.

1.8 CHACHANI

El volcán Chachani (16.19°S, 71.53°W; 6,070 m.s.n.m.) es un complejo o sucesión de edificios volcánicos que muestran características morfológicas relativamente recientes y que ocupan un área aproximada de 360 km² (De Silva & Francis, 1991). Este complejo colinda, en su sector SW con el distrito de Cerro Colorado de la ciudad de Arequipa.

Reconocimientos por imágenes satelitales (García et al, 1997), así como estudios geológicos (Suaña, 2009) muestran que este complejo ha tenido tres periodos de evolución volcánica que va del Pleistoceno Inferior (volcanes Chingana, Nocarane y Estribo, así como el domo y colada El Colorado), Pleistoceno medio-superior (volcanes El Angel y Chachani, y domos Horqueta, El Rodado y Cruzado) y Pleistoceno Superior (domos colada Aeropuerto y Volcancillo, así como flujos de lava Uyupampa. Estas últimas lavas han sido datadas en 0,280 +-10 Ma (Kaneoka & Guevara, 1984). Las estructuras volcano-tectónicas de este complejo tienen direcciones NNE-SSO, NE-SO y NO-SE. Suaña (2009) determina que los análisis petrográficos y químicos de los productos del complejo Chachani pertenecen a la serie calco-alkalina moderada a altamente potásica y son, en general de naturaleza porfírica. Este complejo se encuentra emplazado por sobre una serie de al menos cuatro secuencias de ignimbritas y posibles calderas de edad Mio-Pleistoceno cuyos afloramientos se extienden ampliamente hacia el Sur, SO y SE del complejo.

No se conoce de actividad eruptiva histórica de este volcán. Sin embargo, considerando que se trata de un volcán situado al lado de la ciudad de Arequipa con cerca de un millón de habitantes, y está a proximidad de importantes obras de infraestructura como son la hidroeléctrica de Charcani, las represas de Aguada Blanca y El Frayle, así como a una distancia mínima del aeropuerto internacional Rodríguez Ballón de Arequipa, el volcán Chachani representa un importante riesgo. Los principales peligros volcánicos en caso de erupción de este volcán serían los flujos de lava, caída de tefras (ceniza, bombas, etc.) así como lahares; eventualmente, si la erupción es de magnitud mayor, pueden ocurrir flujos piroclásticos.



Figura 9.- Vista del volcán Chachani desde la ciudad de Arequipa.

1.9 YUCAMANE

El volcán Yucamane (17°11'S; 70° 12'W, 5550 m.s.n.m.) se encuentra en el sector NE del departamento de Tacna, a solo 11 km al noreste de la ciudad de Candarave. En realidad este volcán es parte de un complejo volcánico formado por tres conos volcánicos poligenéticos: el Yucamane Chico, que es el más antiguo y está situado hacia el norte; el Calientes, de edad intermedia y situado al centro; y el volcán Yucamane, que es el más joven y está situado hacia el sur. Políticamente, el volcán está situado en la provincia de Candarave, región Moquegua. La actividad volcánica del complejo volcánico de Yucamane ocurrió desde el pleistoceno superior prolongándose al holoceno, presentando una variedad de episodios explosivos (Rivera M., Mariño J., 2004), la historia eruptiva del volcán es escasa y se datan erupciones desde 1320 años AC (Global Volcanism Program, 2013). Se han datado depósitos de caídas entre 49 200 y 44 000 años en C14, productos de erupciones subplinianas (Thouret, 2003), además de caídas de escoria entre 10 000 y 3 000 años. Uno de los depósitos más recientes de caída de lapilli de pómez producto de una erupción sub-pliniana, con un volumen menor a 0.1 Km³ fue emplazado en 3 270 +/- 50 años AC con VEI = 3, producto de una actividad freatomagmática del Yucamane (Rivera, 2004), y una última actividad eruptiva reportada en 1787 con IEV de 3 (Zamácola y Jáuregui, 1804; Morche y De La Cruz, 1994).

Este volcán presenta amenazas volcánicas tales como flujos piroclásticos, caídas de tefras, flujos de lavas y lahares que pueden afectar los poblados de Candarave, Cairani, Camilaca, Huanuara, Susapaya y Ticaco, dedicados principalmente a la agricultura y ganadería. También se ubican canales y pequeñas bocatomas, obras viales como un tramo de la Carretera Binacional Ilo – Desaguadero, carretera Tacna-Candarave-Puno. Asimismo, se encuentran por la zona reservas de agua como son las lagunas de Aricota y Vilacota.



Figura 10.- Vista del volcán Yucamane desde el flanco suroeste.

1.10 SARA SARA

El volcán Sara Sara ($15^{\circ} 18'S$, $73^{\circ} 27'W$; 5522 m.s.n.m.) está situado en la provincia de Parinacochas, región de Ayacucho. Emplazado entre la Laguna Parinacochas (Ayacucho) y el río Ocoña (Arequipa) es un volcán joven que está situado al extremo norte de la cadena volcánica CVZ, y que ha presentado actividad explosiva intermitente desde hace menos de 2 Ma. Se trata de un macizo compuesto, de forma alargada en dirección $N150^{\circ}$, y que presenta una cobertura de nieve y hielo en su cumbre con una superficie aproximada de 20 km². En su flanco oriental se observa una amplia colada de lava reciente que se extiende por más de quince kilómetros hasta el valle del río Marañón.

El volcán Sara Sara está constituido de depósitos de varias fases efusivas, explosivas y extrusivas, entre ellos varios depósitos de flujos piroclásticos ligados al crecimiento y colapso de domos dacíticos jóvenes (Morche and Núñez, 1998). Hay muy pocas dataciones realizadas en los productos volcánicos asociados a erupciones de este volcán. Thouret et al (2012) han observado y datado depósitos de flujos piroclásticos de 44,500 a 49,200 años AC, e igualmente señala la existencia de caídas de tefras y flujos piroclásticos de edad estimada a inicios del Holoceno. No se conoce de erupciones recientes, históricas, ocurridas en este volcán, pero hay algunos comentarios periodísticos que indican que habría sido observada una actividad fumarólica incipiente en 1963.

En las proximidades del volcán, se observa algunas fuentes termales, tales como en las proximidades del río Mirmaca, cerca del poblado de Pacapausa, así como por el río Pararca, poblado de Chacaraya. Los estudios de peligro volcánico realizado por Morche y Nuñez, (1998), consideran que una eventual erupción del volcán Sara Sara representa un riesgo potencial para cerca de 8000 habitantes de poblados situados cerca de los flancos de este volcán, tales como Incuyo, Pausa, Lampa, Pararca, Quilcata, Marcabamba, así como numerosos caseríos, localizados dentro de un radio de 25-30 km alrededor del volcán. Los peligros volcánicos principales están principalmente asociados a caída de tefras (lluvia de cenizas, lapilli y bombas), flujos y oleadas piroclásticas, así como lahares.



Figura 11.- Vista del volcán Sara Sara desde el flanco oeste.

1.11 QUIMSACHATA

Volcán que se encuentra al pie de la Cordillera Oriental, en Cusco (3923 m.s.n.m.). Consiste de dos fuentes de emisión: (1) Quimsachata, un cono de escoria andesítico, rodeado por una capa de lavas a lo largo del río Vilcanota datadas en 11.500 años; y (2) un domo de lava riolítico Oroscocha, datado en 6400 años, que produjo un delgado flujo de lava (Parodi, 1975; Gonzales, 1995; Siebe, 2006). En la actividad volcánica contemporánea, representa el vulcanismo más oriental del plioceno-cuaternario (Marocco R., 1974). Kaneoka y Guevara (1984) analizaron una muestra en el volcán Quimsachata mediante K-Ar datandola en 0.0260 Ma.



Figura 12.- Vista del volcán Quimsachata.

1.12 AUQUIHUATO

Volcán Cerro Auqui huato (17.07°S; 73.18°W; 4980 m.s.n.m.) es un cono de escoria de 380 m de altura, ubicado a unos 30 km al NE del volcán Sara Sara y Este del Río Ocoña. Probablemente corresponde al Pleistoceno – Holoceno. Las imágenes satelitales muestran un flujo de lava joven con estructuras de leveés y cuerdas de lava. El flujo de lava se extiende hasta 9 km al sur del volcán. No se conoce actividad eruptiva reciente del Auqui huato.

Recientemente, mediante imágenes InSAR adquiridas entre 2007-2011 el laboratorio Earth and Atmospheric Sciences de Cornell University ha detectado deformación notable, de hasta 1.8 cm/año, centrada a 7 km al SE del volcán. La proximidad de tal deformación al Cerro Auqui huato sugiere que la señal es de origen volcánico y ha sido atribuida a presurización de una fuente magmática, aunque también podría ser de origen hidrotermal (M. Pritchard, com. pers.).



Figura 13. Vista del volcán Auqui huato desde el flanco oeste.

1.13 CAMPOS VOLCÁNICOS DE ANDAHUA Y HUAMBO

El campo de volcanes monogenéticos de Andahua, Orcopampa y Huambo se encuentra situado entre 80-160 km al Noroeste de la ciudad de Arequipa, a lo largo de los márgenes de un profundo valle de dirección NNO-SSE, es decir oblicuo a la dirección “andina” NO-SE de la CVZ. Se trata de hasta 60 volcanes de diámetros entre 300 y 1200 m, y alturas que pueden alcanzar los 300 metros; estos conos se encuentran distribuidos en una amplia área, entre 15°10'S - 16° 00'S, y 72°30'W - 72°W.

Por criterios morfométricos y por dataciones radiométricas (Delacour et al, 2007; Thouret et al, 2007), se han determinado que ocurrieron cuatro periodos de actividad que emplazaron a los conos que se observan: (a) Pleistoceno tardío, esencialmente para el grupo de volcanes de Orcopampa, (b) Holoceno temprano a medio, para volcanes del grupo Huambo (8770 +/-30 años), (c) Holoceno tardío, para volcanes Tichsho (4060 +/-50 años), y Puca Mauras (2810-2970 +/-50 años), así como Keyoc (2650 +/-50 años), (d) Histórico, para el volcán Chilcayoc (años 1451-1523) del grupo de Andahua. Estos conos tienen amplio rango en la composición de sus lavas (de 52,1 a 68,1% de SiO₂) así como la ocurrencia inusual de lavas máficas.

Actualmente no se observa ningún tipo de actividad volcánica, aunque hay reportes de una posible actividad ocurrida el 3 junio 1913 en el volcán Chilcayoc Grande (Siebert et al, 2010). En el terreno, los conos monogenéticos están distribuidos de la siguiente manera:

a. MONOGENÉTICOS ORCOPAMPA

Este sector se ubica al norte del valle de Andahua, algunas dataciones de conos monogenéticos en esta área son las siguientes:

- Flujo de lava al norte del cono monogenético Tichsó, la cual está datada en 0.27 +/- 0.02 Ma (Kaneoka y Guevara, 1984).
- Cono monogenético Mauras I datado en 2 810 – 2 970 +/- 50 años BP (Delacour, 2007).

b. MONOGENÉTICOS ANDAHUA

- Volcanes monogenéticos como Los Mellizos datados en el Holoceno tardío e histórico (Delacour 2007).
- Cono monogenético Tichsó datado en 4 050 +/- 50 años BP (Cabrera y Thouret, 2000).
- El cono Chilcayoc Grande de 1 451 a 1 523 años BP (Delacour, 2007).
- Se dato el Chilcayoc Chico 1 en 370 +/- 50 años BP (Cabrera y Thouret, 2000).

c. MONOGENÉTICOS HUAMBO

- Localizado en Huambo, en la margen izquierda de río Colca cerca al volcán Sabancaya. Se tiene un cono monogenético denominado Keyocc con 2 650 +/- 50 años BP.

Una eventual reactivación en las cercanías o en esta zona de volcanes monogenéticos, representaría un potencial riesgo para los numerosos poblados situados en las proximidades. Los peligros volcánicos más característicos están principalmente asociados a caída de tefras (lluvia de cenizas, lapilli y bombas), así como flujos de lavas que podrían causar daños tanto a viviendas como a terrenos de cultivo en las zonas de Andahua, Ayo, Orcopampa, Chachas, etc.



Figura 14. Vista de los monogenéticos de Andahua.

1.14 CASIRI

El volcán Casiri (17°28'S; 69°48'W, 5650 m.s.n.m.) se encuentra a 25 km del volcán Tacora situado en territorio chileno, justo en la frontera con Perú. Es de composición traquítica y traquiandesítica, también se conoce como Paugarani. El Casiri consta de cuatro edificios que probablemente refleja la migración de la fuente magmática, siendo tres de ellos antiguos y uno joven; los tres antiguos definen una cadena orientada N105°, de 5 km de largo, mientras que el cono más joven está situado hacia el SE de esta cadena. El cono más joven presenta un cráter en cuyo interior se emplaza un domo bien conservado. Asimismo, dos amplias coladas de lava bien conservadas pero con signos de actividad post-glacial (De Silva et al., 1991) descienden a partir de este cráter y alcanzan distancias de hasta dos kilómetros en dirección Sur y Oeste; esta morfología muestra que el volcán ha estado activo durante el Holoceno. Hay también un domo probablemente dacítico mucho más antiguo situado al oeste del cono joven. Hacia el sureste de las coladas de lava hay antiguas explotaciones mineras de azufre denominadas Gloria y San Luis.

No existe más información ni se tiene reportes de actividad histórica de este volcán, pero por los depósitos que presenta es bastante probable que si haya tenido una actividad histórica.



Figura 15. Vista del volcán Casiri.

1.15 PURPURUNI

El volcán Cerros Purpuruni localizado en los 17.32°S; 69.9°W (Global Volcanism Program <https://volcano.si.edu/volcano.cfm?vn=354804>), se ubica en la Región Tacna, a 48 km al noroeste de la frontera con Chile. No se tiene mayor información sobre este volcán, pero por su aspecto morfológico es probablemente de edad pleistocénica (De Silva, 2007). Este macizo está conformado por un grupo de domos de lava que alcanzan una elevación de 5315 m.s.n.m.



Figura 16. Vista del volcán Cerro Purpuruni.

CAPITULO II

METODOLOGÍA EN LA EVALUACIÓN DEL RIESGO VOLCÁNICO

Para evaluar el riesgo volcánico que representa cada volcán, es necesario contar con información basada en estudios geológicos, geofísicos y/o geoquímicos. Aparte de los estudios generales o de base, de los volcanes del sur del Perú, en el pasado estudio sistemático y profundizado de los volcanes activos y potencialmente activos del Perú ha sido efectuado dando prioridad a aquellos volcanes donde se observaban actividad evidente. Así por ejemplo, los volcanes Sabancaya y Ubinas, que han presentado erupciones desde la década del 80, fueron los primeros en ser estudiados.

Posteriormente prosiguieron los estudios de otros volcanes con notables peligros volcánicos que se ciernen sobre poblaciones y/o infraestructura como el Misti, Huaynaputina, Ticsani, Chachani, Coropuna, Tutupaca, Yucamane, Sara Sara, prosiguieron. Finalmente, los demás volcanes (Casiri, Quimsachata, Auquihuato, Purpuruni y campos de Andahua y Huambo) han sido o vienen siendo estudiados en menor grado ya sea por su menor actividad y/o por estar situados en lugares remotos sin representar gran riesgo a las poblaciones o propiedades.

La evaluación del riesgo volcánico aplicada en este estudio está basada en la metodología expuesta en el trabajo de Ewert et al. (2005) del USGS quienes realizaron un estudio similar para el caso de los volcanes activos de Estados Unidos. El trabajo de Ewert et al. (2005) representa un análisis semicuantitativo del peligro volcánico y de la exposición a éste.

Al aplicar la metodología mencionada al caso de los volcanes peruanos se ha tenido cuidado de compilar toda la información hasta ahora existente relativa a los peligros volcánicos. En la evaluación de los factores de peligro, el Cuadro 1 resume los factores que se han tomado en cuenta y que son de gran importancia, tales como las características geológicas, geofísicas y geoquímicas. Por otro lado, el Cuadro 2 muestra factores de exposición que se dan por la distribución de la población y la infraestructura en la zona.

Aunque hay algunos volcanes que no cuentan con estudios necesarios para una descripción completa pero que, tal como se ha explicado anteriormente, son afortunadamente los de menor actividad y/o representan un menor nivel de riesgo en relación a los poblados o infraestructura, la gran mayoría de los volcanes del Perú ya cuentan con estudios geológicos, geoquímicos y/o geofísicos que permiten arribar a su caracterización de los mencionados factores. Por lo anterior, el presente estudio es considerado como adecuado para los fines de establecimiento de un plan de vigilancia de la actividad volcánica en el Perú.

A continuación se detalla cada ítem correspondiente a los factores de peligro y de exposición antes mencionado. También se explica cómo determinar los niveles de riesgo según una escala de puntuación.

2.1 FACTORES DE PELIGRO

Según la metodología de Ewert et al (2005), el esquema de ranking de peligro se basa principalmente en las referencias del GVP (Global Volcanism Program, del Smithsonian Institution). Nosotros hemos considerado conveniente de incluir la información contenida en estudios volcanológicos importantes realizados por el IGP e INGEMMET, así como los estudios publicados en revistas indizadas nacionales e internacionales.

La evaluación y puntuación de cada uno de los factores de peligro, se muestra y detalla en el Cuadro 1 (Ewert et al., 2005) descrita a continuación.

| FACTOR DE PELIGRO | RANGO | DESCRIPCIÓN |
|--|-------|--|
| Tipo de Volcán | 0 - 1 | 0 → Conos de escoria, campo volcánico basáltico, volcanes escudo pequeños, volcanes de fisura. 1 → Estratovolcán, domos, volcanes compuestos, maar o caldera. |
| Máximo IEV (Índice de Explosividad Volcánica) | 0 - 3 | 0 → IEV ≤ 2 Si la información es desconocida. 0 → si el volcán es del tipo 0. 1 → si el volcán es del tipo 1. 1 → IEV 3 o 4 2 → IEV 5 o 6 |
| Actividad explosiva en <500a. | 0 - 1 | 1 → Actividad explosiva dentro de los últimos 500 años (IEV ≥ 3) |
| Actividad explosiva en <5000a. | 0 - 1 | 1 → Actividad explosiva dentro de los últimos 5000 años (IEV ≥ 4) |
| Recurrencia eruptiva | 0 - 4 | 4 → intervalo de erupciones 1 – 99 años 3 → intervalo de erupciones 100 – 1000 años 2 → intervalo de erupciones 1000 a varios miles de años. 1 → 5000 – 10000 años. |
| Flujos piroclásticos Holocenos | 0 - 1 | 0 → No existieron o no se conocen. 1 → si existieron flujos piroclásticos holocenos. |
| Flujos de lava Holocenos | 0 - 1 | 1 → si existieron flujos de lava holocenos. |
| Lahares Holocenos | 0 - 1 | 1 → si existieron lahares holocenos. |
| Tsunamis Holocenos | 0 - 1 | 1 → si existieron tsunamis holocenos. |
| Potenciales explosiones hidrotermales | 0-1 | 1 → si ha tenido explosiones freáticas o si el volcán presenta características termales que son suficientemente extensas para poseer una actividad explosiva. |
| Potencial Sector de Colapso | 0 - 1 | 1 → si ha tenido algún sector de colapso en el Cuaternario – Holoceno y se ha reconstruido su edificio o si presenta un alto relieve o laderas escarpadas con alteración. |
| Fuente primaria de Lahar | 0 - 1 | 1 → si el volcán tiene cursos permanentes de agua o hielo en el edificio (volumen > 10 ⁶ m ³). |

| | | |
|--|-------|--|
| Actividad sísmica observada | 0 - 1 | 1 → desde la última erupción, en ausencia de actividad eruptiva, dentro de 20 km del edificio volcánico. |
| Deformación observable de la superficie | 0 - 1 | 1 → desde la última erupción, en ausencia de actividad eruptiva, presenta hinchamiento u otra evidencia de inyección de magma. |
| Fumarola o desgasificación | 0 - 1 | 1 → desde la última erupción, en ausencia de actividad eruptiva, presenta fuente de calor o gases magmáticos. |

Cuadro 1.- Factores de peligro.

El ejercicio de evaluación y puntuación referente al peligro volcánico es, por tanto, realizada para cada volcán considerado y, finalmente se obtiene un solo valor representativo según la fórmula siguiente:

$$\text{Peligro Volcánico} = Vt + IEV + Ae + MAe + Re + Fp + Fl + Lh + Ts + Eh + Cp + Flh + As + Ds + F \quad (i)$$

Donde:

- Vt: Tipo de volcán
- IEV: Índice de Explosividad Volcánica
- Ae: Actividad explosiva en <500a
- MAe: Actividad explosiva en <5000a
- Re: Recurrencia eruptiva
- Fp: Flujos piroclásticos holocenos
- Fl: Flujos de lava holocenos
- Lh: Lahares holocenos
- Ts: Tsunami holocenos
- Eh: Potenciales explosiones hidrotermales
- Cp: Potencial sector de colapso
- Flh: Fuente primaria de lahar
- As: Actividad sísmica observada
- Ds: Deformación observable de la superficie
- F: Fumarola o desgasificación magmática

2.2 FACTORES DE EXPOSICIÓN O VULNERABILIDAD

Los factores que determinan el nivel de exposición (o vulnerabilidad) al peligro volcánico se evalúan de manera similar a los factores de peligro. En el Cuadro 2 se puede observar que tal evaluación integra a las siguientes variables: Población contenida en un radio de 30 km; Población contenida en la envolvente de peligro volcánico; víctimas fatales históricas; evacuaciones históricas; exposición aeronáutica local y regional; infraestructura energética; infraestructura de transporte; desarrollos urbanos mayores o áreas ecológicamente sensibles; y si es que fuera el caso población

insular. Los detalles para evaluar cada uno de estos factores se muestra en el cuadro 2 (Ewert et al., 2005) descrita a continuación.

| FACTORES DE EXPOSICIÓN | RANGO | DESCRIPCIÓN |
|--|----------|--|
| Población contenida en un radio de 30 Km (VPI) | 0 - 5.4 | \log_{10} de la población cercana al volcán en un radio de 30km. |
| Población cercana a cursos de agua o valles fluviales | 0 - 5.1 | Se refiere a la población que habita de los 30 km de radio que se encuentre sobre depósitos de flujos holocenos, o en zonas inundables, tales como lechos de ríos, valles y abanicos fluviales. Al valor obtenido se le extrae el \log_{10} . |
| Muertes históricas. | 0 - 1 | Si existen en la historia nacional registros de muertes producto de la erupción del volcán en estudio, si es SI el valor correspondiente es 1 y 0 si NO hay antecedentes o no existen fatalidades. |
| Evacuaciones históricas. | 0 - 1 | Si existen en la historia nacional registro de evacuaciones de los centros poblados cercanos al volcán, debido a la potencial amenaza que representa la erupción. Si es SI el valor asignado es 1. Si NO hay antecedentes o NO han existido evacuaciones, entonces el valor es 0. |
| Exposición de la Aviación local | 0 - 2 | 1 → Si el aeropuerto se encuentra dentro de 50 km con respecto al centro eruptivo. También el valor es 1 si el volcán es de tipo 1 (Estratoconos, domos, etc.) y existe algún aeropuerto dentro de 300 km de radio desde el volcán. 2 → Si el volcán es de tipo 1 y dentro de 300 km de radio se encuentra algún aeropuerto internacional. 0 → Si en la relación entre aeropuerto y volcán no se presenta ninguno de los anteriores criterios. |
| Exposición de la Aviación regional | 0 - 5.15 | Este puntaje está basado en el \log_{10} del número de pasajeros que transitan dentro de un radio de 300 km del volcán. Este ítem es aplicado solo si el tipo de volcán es 1. Los volcanes de tipo 0 no producen erupciones explosivas. |
| Infraestructura energética. | 0 - 1 | Se refiere a las infraestructuras de generación, transmisión o distribución de electricidad, gas o petróleo. Estas instalaciones deben encontrarse dentro de una aérea de 30 km. En este caso los valores asignados son 0 - 1 de acuerdo a si existe o no este tipo de infraestructura dentro de los 30 km. |
| Infraestructura de transporte. | 0 - 1 | Referida a todas aquellas zonas, dentro de los 30 km en donde se encuentre el desarrollo de las infraestructuras de transporte, por ejemplo, instalaciones portuarias, líneas ferroviarias o carreteras principales. Se asigna 0 si no existen dentro de ese radio o 1 si es que las hay. |
| Desarrollos urbanos mayores o áreas ecológicamente sensibles. | 0 - 1 | Se refiere a todas aquellas zonas que presentan una mayor sensibilidad y vulnerabilidad frente a una erupción volcánica. Ejemplo: parques nacionales, áreas de desarrollo indígena, reservas naturales, etc. Valor 0 si no hay, y valor 1 si las hay. |

Cuadro 2.- Factores de Exposición (vulnerabilidad).

En la evaluación de la vulnerabilidad, se considera la intervención de todas las variables descritas. Se realiza mediante la siguiente fórmula (ii):

$$\text{Vulnerabilidad} = P_v + P_f + M_h + E_h + A_l + A_r + I_p + I_t + Z_d \quad (\text{ii})$$

Donde:

- P_v: log₁₀ de la población cercana al volcán en un radio de 30km.
- P_f: log₁₀ de la población cercana a cursos de agua o valles fluviales.
- M_h: Muertes históricas.
- E_h: Evacuaciones históricas.
- A_l: Exposición de la Aviación local.
- A_r: Exposición de la aviación regional.
- I_p: Infraestructura energética.
- I_t: Infraestructura de transporte.
- Z_d: Zonas de mayor desarrollo o áreas sensibles.

2.3 DETERMINACIÓN DE NIVELES DE RIESGO

El nivel de riesgo volcánico viene determinado por el producto de los dos puntajes hallados en (i) y (ii). Este ejercicio nos proporciona como resultado un valor relativo que representa el “**Riesgo Volcánico Relativo**” (RVR). Tal valor ofrece un diagnóstico previo que puede ser muy útil para planificar y decidir la intervención de la política pública.

$$\text{RIESGO VOLCANICO RELATIVO} = \text{PELIGRO VOLCANICO} \times \text{EXPOSICIÓN} \quad (\text{iii})$$

En el caso de nuestro estudio, en primer lugar se efectuó la evaluación de cada una de las variables del factor peligro y del factor exposición, para cada volcán. La calificación y sustento científico con el que fueron evaluados los volcanes individualmente se encuentra compilado en el Anexo 1.

Enseguida, se ha aplicado la expresión (i) para determinar el factor Peligro Volcánico, y la expresión (ii) para obtener el factor Exposición o vulnerabilidad. Finalmente, se utilizó la expresión (iii) obteniéndose la RVR para cada uno de los 16 volcanes peruanos.

| VOLCÁN | FACTOR DE PELIGRO VOLCANICO | FACTOR DE EXPOSICION | RIESGO VOLCANICO RELATIVO (RVR) |
|---------------|------------------------------------|-----------------------------|--|
| Sabancaya | 14.0 | 17.6 | 246.0 |
| Ubinas | 15.0 | 14.7 | 220.2 |
| Misti | 13.0 | 15.2 | 197.4 |
| Coropuna | 11.0 | 17.3 | 190.8 |
| Yucamane | 12.0 | 13.5 | 162.6 |
| Tutupaca | 12.0 | 13.5 | 162.5 |
| Huaynaputina | 11.0 | 14.7 | 161.8 |
| Ticsani | 10.0 | 13.5 | 135.3 |
| Chachani | 8.0 | 15.2 | 121.6 |
| Sara Sara | 6.0 | 11.2 | 67.5 |
| Casiri | 4.0 | 13.4 | 53.7 |
| Quimsachata | 3.0 | 14.3 | 42.8 |
| Purpuruni | 2.0 | 13.7 | 27.3 |
| Andahua | 4.0 | 6.1 | 24.6 |
| Huambo | 3.0 | 5.5 | 16.4 |
| Auquihuato | 2.0 | 5.2 | 10.5 |

Cuadro 3.- Resultados finales por volcán del factor de peligro (i), factor de exposición (ii) y Riesgo Volcánico Relativo (iii).

Con los valores de la puntuación (RVR), para cada volcán, se confecciona un gráfico, a partir del cual se observa y se determina si resaltan agrupamientos (clasificación) de volcanes. Así por ejemplo, como se verá más adelante, para nuestro estudio de los 16 volcanes peruanos se llegó a la conclusión de que era factible clasificarlos en 4 categorías o niveles de riesgo relativo que fueron: muy alto, alto, moderado y bajo.

En el gráfico mencionado están representados, mediante barras, los valores de RVR ordenados en orden descendente. En este gráfico, la manera de tratar de delimitar grupos o categorías es identificando las inflexiones de la envolvente de dichas barras.

Tales valores han sido luego representados en el gráfico de barras tal como aparece en la siguiente figura:

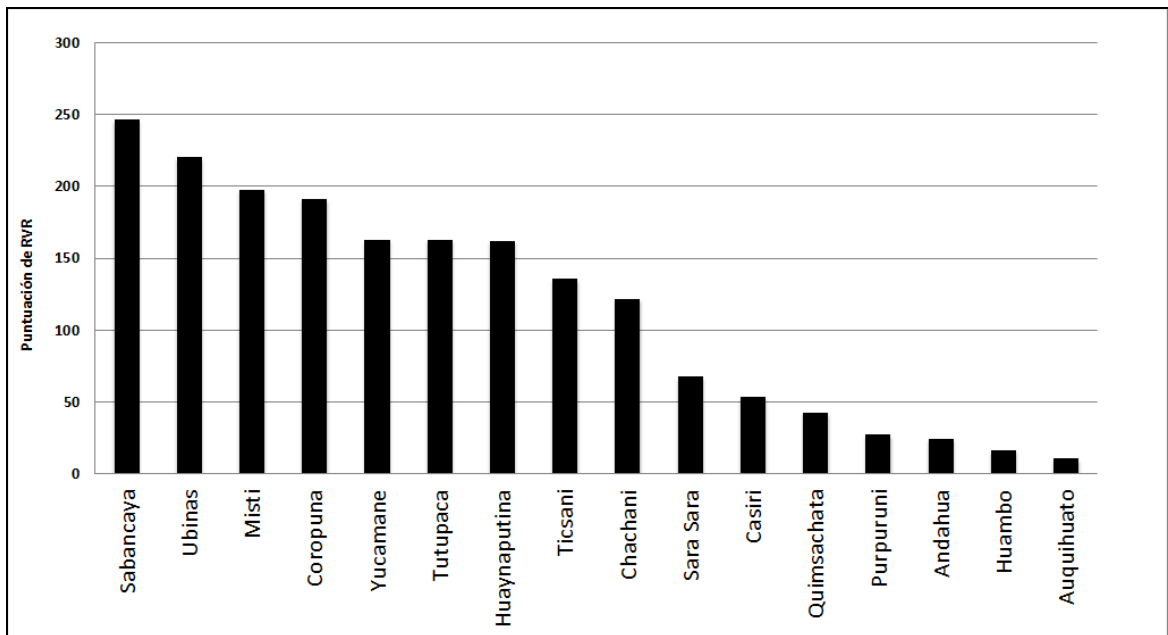


Figura 17.- Valores de RVR para cada volcán peruano analizado.

En la representación del RVR por el gráfico de barras a veces es posible que las inflexiones esperadas de la envolvente no logren ser lo suficientemente claras como para poder separar de manera evidente grupos o categorías de valores diferentes. Entonces, hay un procedimiento que ayuda a separar las categorías. Se trata de calcular también el “Riesgo Aeronáutico” que tiene un impacto importante en caso de erupción. Entonces, se procede a utilizar un gráfico adicional: la puntuación del riesgo aeronáutico. Esta puntuación se calcula multiplicando: la sumatoria del Índice de Explosividad Volcánica (IEV), Actividad explosiva en <500a, actividad explosiva en <5000a, Recurrencia eruptiva y la suma de la Exposición de la Aviación local y regional (ver la expresión iv).

$$\text{RIESGO AERONAUTICO} = (\text{IEV} + \text{Ae} + \text{MAe} + \text{Re}) \times (\text{Al} + \text{Ar}) \quad (\text{iv})$$

Para el caso de nuestro estudio de los volcanes peruanos, los valores de RVR no permitieron una clara delimitación de las categorías, de manera que se ha tenido también que efectuar el segundo gráfico (Riesgo Aeronáutico). Y el gráfico correspondiente es:

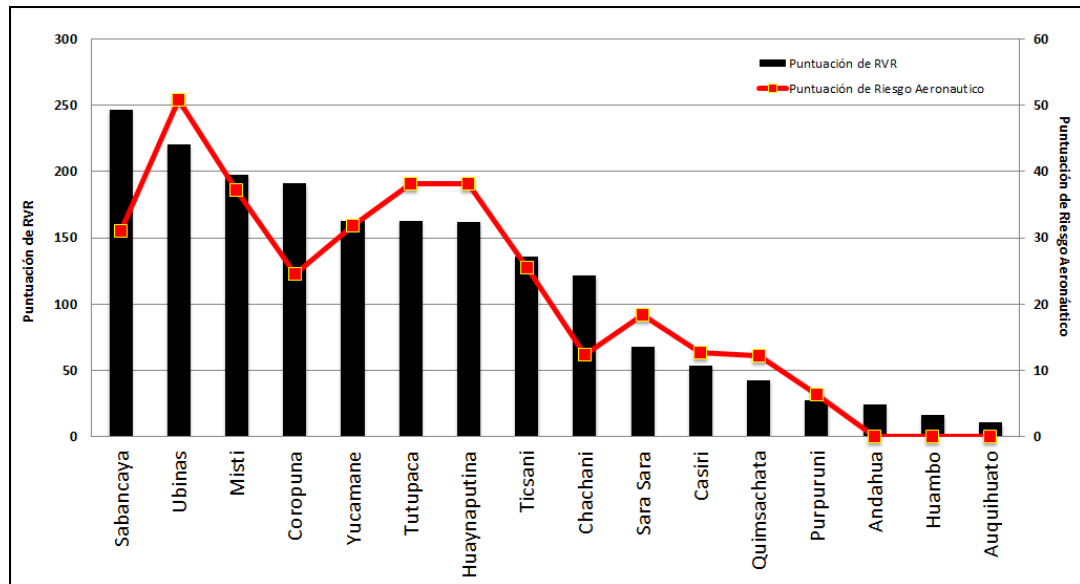


Figura 18.- Curva de la puntuación del Riesgo Aeronáutico (línea roja con cubo rojo). Gracias a las evidencias de inflexiones de esta curva, se ha podido delimitar grupos de volcanes que presentan valores semejantes de RVR.

Por tanto, con ayuda de esta nueva curva se ha logrado determinar cuatro categorías que corresponden al Riesgo Volcánico Relativo (RVR) de los volcanes del Perú. Estas son:

MUY ALTO – ALTO – MODERADO – BAJO

2.4 CATEGORIZACIÓN DE LOS VOLCANES ACTIVOS DEL PERÚ SEGÚN SU RVR

Las figuras 17 y 18 que contienen valores del RVR obtenido para los volcanes peruanos han servido para, finalmente, delimitar 4 grupos de volcanes que pertenecen a sendas categorías de RVR: Muy alto, Alto, Moderado y Bajo, tal como se observa en la figura 19 y el cuadro 4.

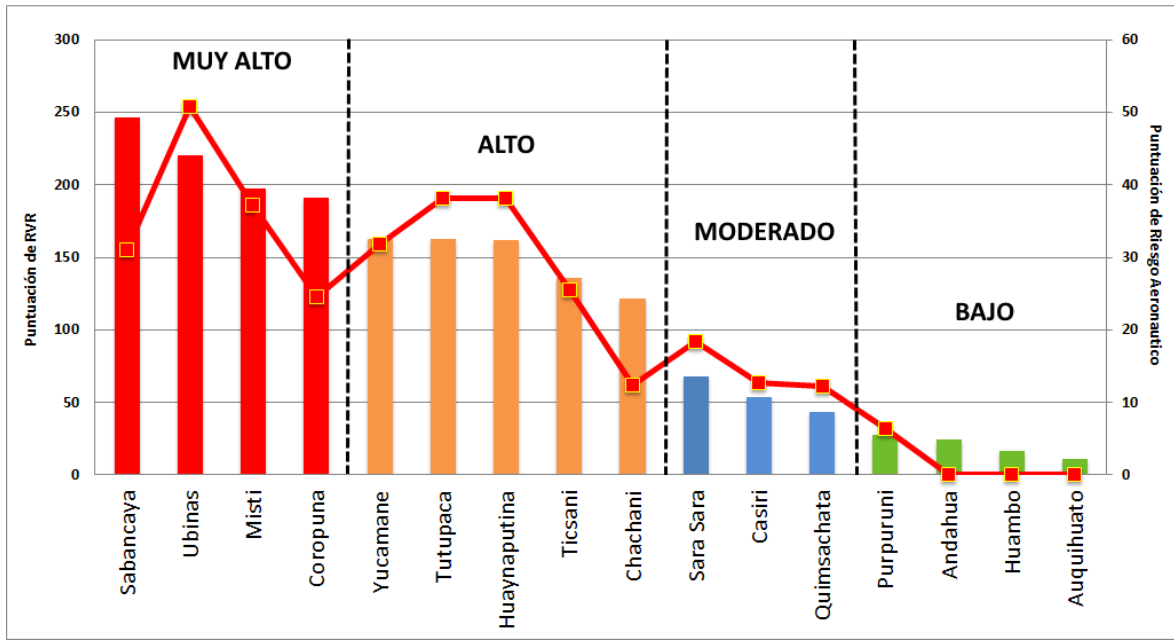


Figura 19.- Categorización de los volcanes según el RVR. Los grupos (Muy alto, Alto, Moderado y Bajo) son determinados observando el agrupamiento de las barras. El gráfico muestra al Sabancaya, Ubinas, Misti y Coropuna como los volcanes de mayor riesgo (Muy Alto).

| VOLCAN | NIVEL DE RIESGO VOLCANICO RELATIVO |
|--------------|------------------------------------|
| Sabancaya | MUY ALTO |
| Ubinas | MUY ALTO |
| Misti | MUY ALTO |
| Coropuna | MUY ALTO |
| Yucamane | ALTO |
| Tutupaca | ALTO |
| Huaynaputina | ALTO |
| Ticsani | ALTO |
| Chachani | ALTO |
| Sara Sara | MODERADO |
| Casiri | MODERADO |
| Quimsachata | MODERADO |
| Purpuruni | BAJO |
| Andahua | BAJO |
| Huambo | BAJO |
| Auquihuato | BAJO |

Cuadro 4.- Niveles de RVR para cada uno de los volcanes activos del Perú.

De esta manera ha sido posible clasificar a los volcanes del Perú en cuatro categorías por su nivel de riesgo. Se puede notar que el nivel “Muy Alto” les corresponde a tres volcanes situados en Arequipa y uno situado en Moquegua:

- Volcán Sabancaya (Arequipa): Que erupcionó recientemente entre 1990-98 y que su potencial destructor podría alcanzar al Canal de Majes y por tanto con consecuencias para la Irrigación Majes que se encuentra aguas abajo. Además, este volcán está actualmente en etapa pre-eruptiva.
- Volcán Ubinas (Moquegua): Que es el más activo del Perú, que erupcionó entre 2006-2009 y que actualmente nuevamente se encuentra en erupción desde 2013. La actividad notable de este volcán ha incluso generado la evacuación de poblaciones que se habían asentado en el valle de Ubinas.
- Volcán Misti (Arequipa): Cuya última erupción data de los tiempos del Inca Pachacutec, y tiene actualmente a sus faldas a la segunda ciudad del país con cerca de un millón de habitantes y mucha importante infraestructura en su cercanía.
- Volcán Coropuna (Arequipa): es el más grande y elevado de los volcanes potencialmente activos y aquel que tiene la mayor masa glaciaria que le recubre con una superficie de más de 50km². Este volcán presenta un elevado potencial de peligro y en caso de erupción sus productos volcánicos invadirían hasta 2 cuencas importantes como son la cuenca del río Ocoña, así como la del río Majes-Camaná.

Es importante mencionar que los resultados mostrados en la figura 19 no están asociados a pronóstico de erupción alguna, sino que solo nos están indicando, mediante el nivel de RVR, cuales volcanes podrían tener mayor/menor nivel de impacto en caso de una erupción volcánica. En ese sentido, la figura 20 ilustra el nivel de riesgo volcánico para un territorio circular de 30 km de radio, centrado en un volcán. Considerando los distritos involucrados en todas las áreas o territorios, el número total de distritos afectados por los diferentes niveles de RVR es de 127. Tales distritos albergan una población total de 1, 342,714 habitantes (Censo INEI de 2007, proyectado al 2015).

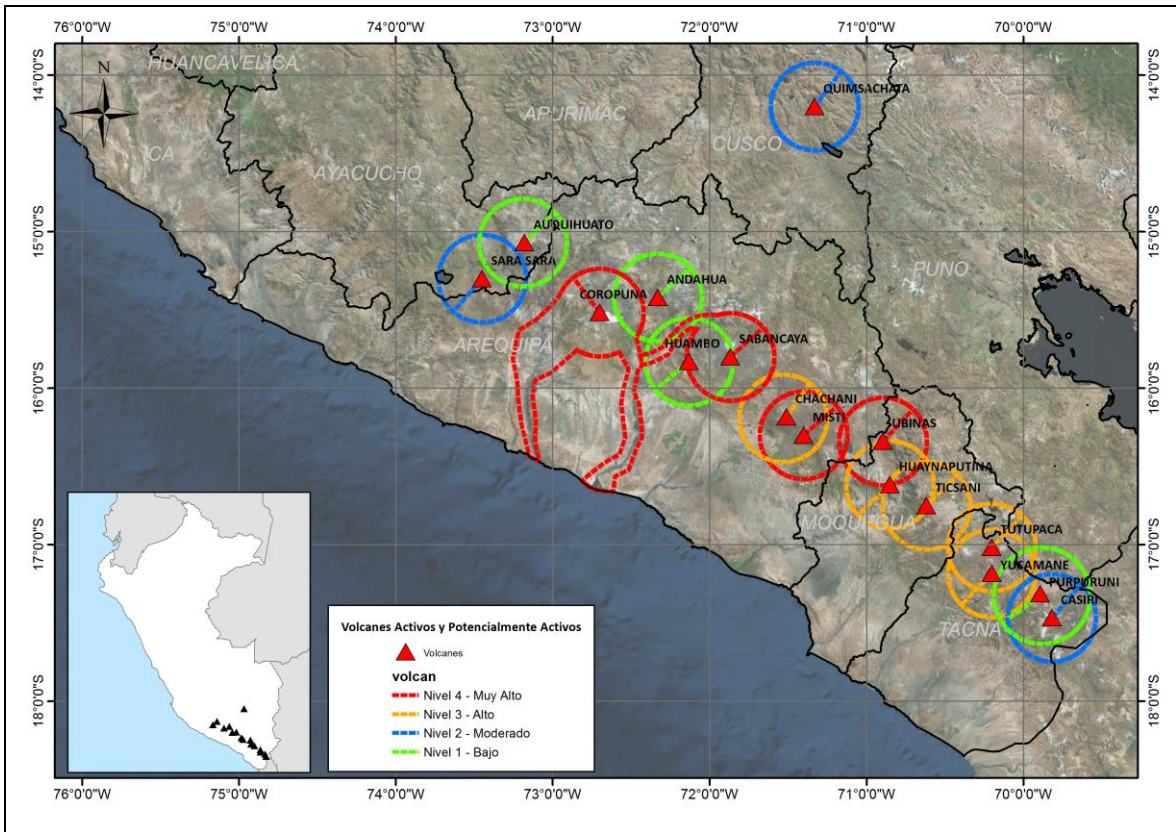


Figura 20.- Niveles de Riesgo Volcánico Relativo que representa cada volcán. Los círculos indican el área comprendida en un radio de 30 km a su alrededor.

CAPITULO III

INSTRUMENTACIÓN NECESARIA PARA EL MONITOREO Y PARA EL ESTUDIO E INTERVENCIÓN

En el Perú, hay principalmente tres instituciones que realizan los estudios y la vigilancia de los volcanes, el Instituto Geofísico del Perú (IGP) a través del Observatorio Vulcanológico del Sur (OVS), el Instituto Geológico Minero y Metalúrgico (INGEMMET) a través del Observatorio Vulcanológico del Ingemmet (OVI), y el Observatorio Geofísico de la Universidad Nacional de San Agustín (IG-UNSA). Dichas instituciones han acumulado una experiencia valiosa en la aplicación de los diversos métodos de vigilancia de volcanes activos y actualmente están trabajando coordinadamente para alcanzar una capacidad de monitoreo óptima para cada volcán. La experiencia en los estudios y trabajos efectuados hasta el presente por el OVS, el OVI y el IG-UNSA, así como la revisión de información de otros observatorios en el mundo, nos han permitido determinar el tipo y número de instrumentos necesarios para efectuar un buen monitoreo. Estas ideas serán expuestas a continuación en el presente capítulo.

Por otro lado, cabe anotar que el presente trabajo, que es también producto de coordinaciones efectuadas entre el OVS y el OVI, apunta a orientar la planificación y las prioridades asociadas al monitoreo y vigilancia de los volcanes en el Perú.

3.1 REQUERIMIENTOS DE MONITOREO SEGÚN LOS NIVELES DE RVR DETERMINADOS PARA CADA VOLCÁN.

Una vez que se ha determinado los niveles de RVR mediante la metodología expuesta en el capítulo anterior, el siguiente paso es determinar el grado de instrumentación de vigilancia que necesita un volcán, el que dependerá de la puntuación de RVR obtenido. De esta manera la vigilancia volcánica se efectuará adecuadamente y permitirá el manejo de recursos (instrumentos, personal, presupuestos) con eficiencia.

De lo anterior se desprende que un volcán con alto valor de RVR necesita ser vigilado en prioridad y con especial atención pues en caso de producirse una erupción se sabe que su impacto destructor sería elevado. En nuestro caso, para los volcanes peruanos, a fin de determinar el grado de instrumentación que se requiere para cada nivel de RVR se ha considerado todo el trabajo y experiencia acumulados desde 1990 en que se hicieron los primeros monitoreos instrumentales en el volcán Sabancaya, volcán que inesperadamente entró en erupción, así como la atención de las erupciones de 2006-2009, y 2013-2016 del volcán Ubinas. Asimismo, se ha tenido en cuenta las experiencias y recomendaciones de los investigadores del US Geological Survey que aparecen en Ewert et al. (2005) y Moran et al. (2008).

De esta manera, se ha establecido los siguientes puntos:

a) Todos los instrumentos deben operar en las inmediaciones del volcán. Aquellos que son necesarios para realizar una vigilancia en tiempo real, evidentemente deberán transmitir sus señales en tiempo real (ver dichos aparatos en los cuadros 5 al 8) al observatorio vulcanológico.

b) Los equipos o instrumentos a utilizarse deben ser capaces de medir los principales parámetros físicos y químicos que proporcionan información de la evolución en una crisis eruptiva. Las disciplinas (y sus respectivos instrumentos de medición) involucradas son las siguientes:

- La sismología se ocupa de analizar la sismicidad generada en los ambientes volcánicos. Puede detectar pequeños sismos a grandes profundidades. Es uno de los pilares para lograr el pronóstico de la evolución de la erupción al identificar el tipo de magnitud y recurrencia de la sismicidad que es dominante.
- La geodesia, se ocupa de medir la deformación en la superficie del volcán o proximidades. Puede indicar con precisión si un edificio volcánico presenta inflación o deflación y establecer modelos que concuerden o no con la presencia de cuerpos magmáticos en ascenso bajo el volcán.
- Hidrología y Gases, analizan las características físicas y químicas de los fluidos volcánicos y no volcánicos. Los fluidos sufren perturbaciones en etapas pre-eruptivas y eruptivas y dan información sobre las características del cuerpo magmático presente en las inmediaciones.
- Sensoramiento remoto, conformado por instrumentos que registran a parámetros físicos y químicos (temperatura, acidez, SO₂, H₂S, deformación, etc.) medibles desde la superficie o desde el espacio. Son muy necesarios para evaluar, en superficie, el grado de la manifestación de la actividad volcánica.

c) Los niveles o grados de instrumentación deben ir en concordancia con los respectivos niveles de RVR encontrados, es decir aquellos volcanes que denotan un mayor riesgo volcánico (RVR) deben ser vigilados con mayor diversidad de métodos y mayor número de instrumentos.

Por tanto, para el grupo de volcanes cuyo RVR es “MUY ALTO”, se requiere implementar un “monitoreo máximo” o llamado también Nivel 4 de monitoreo. Para el grupo de volcanes con RVR “ALTO”, se requiere un “monitoreo regular” o llamado también Nivel 3 de monitoreo. Para el grupo de volcanes con RVR “MODERADO”, se requiere un “monitoreo básico” o llamado también Nivel 2 de monitoreo. Finalmente, para el grupo de volcanes con RVR “BAJO”, se requiere un “monitoreo mínimo” o llamado también Nivel 1 de monitoreo.

Al decidir el número de equipos que se requieren para vigilar a un volcán, según el método de monitoreo, se ha considerado la experiencia acumulada y trabajos realizados tanto por el OVS como por el OVI desde hace más de 25 años, así como el resumen efectuado por Morán et al. (2008):

- Sismología.- Una única estación sísmica puede ser usada para seguir la tasa de sismos y calcular la energía liberada; dos estaciones son requeridas para distinguir entre las señales producidas por fenómenos volcánicos y no volcánicos; al menos cuatro estaciones sísmicas son requeridas para localizar sismos de fractura, para mejorar la calidad de localización se necesita de al menos seis sismómetros (la calidad se incrementa con el número de estaciones sísmicas); de 12 a 20 estaciones son necesarias para detectar y localizar eventos de muy bajo periodo y sismos de muy baja frecuencia; sensor de infrasonidos para la identificación rápida de explosiones volcánicas; acelerógrafo para continuar el monitoreo evitando la saturación en el registro sísmico.
- Geodesia.- La adquisición de una medida INSAR o GPS para establecer una línea para futuro monitoreo de deformación; INSAR o estudio de GPS o GPS para medir patrones de desplazamiento de fondo (background); 2 o 3 estaciones de GPS para detectar cambios en deformación con latencia de pocos días; 8 GPS o al menos 5 para detectar cambios en deformación con latencia de pocas horas; 7 a 8 GPS para localizar y estimar cambios de volumen dentro de una fuente de deformación subsuperficial; 16 a 20 GPS para proporcionar información más consistente para localizar y estimar cambios de volumen.
- Hidrología y Gases.- Estaciones en continuo para caracterizar emisiones de gas, fumarolas, temperatura y obtener una línea base (background).
- Sensores Remotos.- Imágenes GOES, ASTER, cámaras visuales y térmicas para estimar la altura de la pluma y realizar seguimiento de la nube volcánica. Un ejemplo de uso de imágenes obtenidas desde el espacio es el sistema MIROVA, que detecta periódicamente puntos calientes en las proximidades del cráter de los volcanes.

Basados en las características descritas en los párrafos a), b) y c) anteriores, se ha elaborado los Cuadros N° 5, 6, 7 y 8, que describen, según el nivel de monitoreo que se requiere (es decir "máximo", "regular", "básico" o "mínimo"), el tipo, el número y la disposición o configuración de los instrumentos necesarios para efectuar un adecuado monitoreo del volcán. Asimismo, las figuras N°21, N°22, N°23 y N°24 ilustran la disposición geométrica de los instrumentos que deben operar en tiempo real (ver en los Cuadros 5, 6 7 y 8).

| NIVEL DE MONITOREO REQUERIDO | VOLCANES | DESCRIPCIÓN DE LOS INSTRUMENTOS NECESARIOS PARA MONITOREAR AL VOLCAN |
|--|--------------------------------|---|
| <p>Nivel 4:</p> <p>Monitoreo</p> <p>Máximo</p> | | <p>Sismología:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Total sismómetros: 20 <ul style="list-style-type: none"> • 14 sismómetros BA, 5-25 Km., tiempo real. • 4sismómetros BA, 2-5 Km., tiempo real. • 2 sismómetro BA, < 2Km., tiempo real. • 3infrasonidos, < 2 Km, 2-4 Km, 4-25 Km., tiempo real. |
| | <p>Sabancaya</p> <p>Ubinas</p> | <p>Deformación:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Total GPS: 16 <ul style="list-style-type: none"> • 3 GPS CORS en tiempo real, a 1 Km. • 3 GPS CORS en tiempo real, a ~3Km. • 4 GPS CORS en tiempo real, a ~6Km. • 4 GPS CORS en tiempo real, a ~10Km. • 2 GPS CORS en tiempo real, a ~20Km. • 4 Inclínómetros en tiempo real, 3-5Km. • 1 Interferograma InSAR por mes. • 1 Gravímetro en continuo en tiempo real < 4Km. |
| | <p>Misti</p> <p>Coropuna</p> | <p>Hidrología:</p> <ul style="list-style-type: none"> • 2 muestreos general por año de más de 6 fuentes termales y/o frías. • 2 Estación de medición continua de Temperatura y CE en 1-2 fuentes, tiempo real. • 8 muestras por mes de 1-2 fuentes. • 1 Estación de detección de Lahar. • 2 Estaciones geo-eléctricas. |
| | | <p>Sensores remotos:</p> <ul style="list-style-type: none"> • 1 Imagen satelital GOES y/o ASTER por día. • 1 Imagen térmica MIROVA por día. • 3 cámaras de video-vigilancia con imágenes continuo, en tiempo real. 0-15 Km. • 2 cámaras infrarrojas en tiempo real, imágenes continuas, 0-15 Km. <p>Gas:</p> <ul style="list-style-type: none"> • 1 estación de medición continua de Temperatura de fumarolas, en tiempo real. • 4 DOAS, tiempo real. • 1 estación multigas en continuo y en tiempo real. • 1 FTIR en tiempo real, 2-6 Km del cráter. |

Cuadro 5.- Monitoreo volcánico óptimo para el grupo de volcanes con Nivel 5.

| NIVEL DE MONITOREO REQUERIDO | VOLCANES | DESCRIPCION DE LOS INSTRUMENTOS NECESARIOS PARA MONITOREAR AL VOLCAN |
|--|--|--|
| <p>Nivel 3:</p> <p>Monitoreo Regular</p> | | <p>Sismología:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Total sismómetros: 6 <ul style="list-style-type: none"> • 3 sismómetros BA, < 4Km., tiempo real. • 3 sismómetros BA, < 25 Km., tiempo real. |
| | <p>Yucamane</p> <p>Tutupaca</p> <p>Huaynaputina</p> <p>Ticsani</p> <p>Chachani</p> | <p>Deformación:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Total GPS: 8 <ul style="list-style-type: none"> • 2 GPS CORS en tiempo real, a >3Km. • 3 GPS CORS en tiempo real, a ~6Km. • 2 GPS CORS en tiempo real, a ~10Km. • 1 GPS CORS en tiempo real, a ~20Km. • 4 Inclínómetros en tiempo real, 3-5Km. • 1 Interferograma InSAR cada 2 meses. |
| | | <p>Hidrología:</p> <ul style="list-style-type: none"> • 2 muestreo general por año de más de 6 fuentes termales y/o frías. • 2 Estación de medición continua de Temperatura y CE, tiempo real. • Muestreo cada mes de una fuente. • 1 Estación geo-eléctrica |
| | | <p>Sensores remotos:</p> <ul style="list-style-type: none"> • 1 Imagen satelital GOES y/o ASTER por día. • 1 Imagen térmica MIROVA por día. • 2 cámaras de video-vigilancia con imágenes cada 30 segundos, en tiempo real. 0-15 Km. • 1 cámara infrarroja. • 1 DEM de alta resolución (1-5 m). |
| | | <p>Gas:</p> <ul style="list-style-type: none"> • 1 estación de medición continua de Temperatura de fumarolas, tiempo real. • 2 DOAS, en tiempo real. • 1 estación multigas en continuo y en tiempo real. • Composición química de las fumarolas 2 veces al año con medición directa o FTIR.. |

Cuadro 6- Monitoreo volcánico óptimo para el grupo de volcanes con Nivel 4.

| NIVEL DE MONITOREO REQUERIDO | VOLCANES | DESCRIPCION DE LOS INSTRUMENTOS NECESARIOS PARA MONITOREAR AL VOLCAN |
|---|---|--|
| <p>Nivel 2:</p> <p>Monitoreo Básico</p> | <p>Sara Sara</p> <p>Casiri</p> | <p>Sismología:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Total sismómetros: 4 <ul style="list-style-type: none"> • 1 sismómetro BA, < 5Km., tiempo real. • 3 sismómetros BA, 5 - 30 Km., tiempo real. |
| | | <p>Deformación:</p> <ul style="list-style-type: none"> • 3 GPS en continuo, entre 3 – 6 Km alrededor del volcán. • 1 Interferograma InSAR cada 6 meses. • 1 inclinómetro. • 2 perfiles de EDM en campañas cada 3 meses. |
| | <p>Quimsachata</p> | <p>Hidrología:</p> <ul style="list-style-type: none"> • 2 muestreos generales por año de más de 6 fuentes termales y/o frías. • 1 Estación de medición continua de Temperatura y CE, tiempo real. |
| | <p>Sensores remotos:</p> <ul style="list-style-type: none"> • 1 Imagen satelital GOES y/o ASTER por día. • 1 Imagen térmica MIROVA por día. • 1 cámara de video-vigilancia con imágenes cada 30 segundos, en tiempo real. 0-6 Km. • 1 DEM, resolución < 30 m. | |
| | <p>Gas:</p> <ul style="list-style-type: none"> • 1 estación de medición continua de Temperatura de fumarolas. • 6 mediciones de SO2 por año de la pluma volcánica con DOAS móvil. • 4 medidas de gases difusos por año. | |

Cuadro 7:- Monitoreo volcánico óptimo para el grupo de volcanes de Nivel 3.

| NIVEL DE MONITOREO REQUERIDO | VOLCANES | DESCRIPCION DE LOS INSTRUMENTOS NECESARIOS PARA MONITOREAR AL VOLCAN |
|---|---|--|
| <p>Nivel 1:</p> <p>Monitoreo mínimo</p> | <p>Purpuruni</p> <p>Andahua</p> <p>Huambo</p> <p>Auquihuato</p> | <p>Sismología:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Total sismómetros: 2 <ul style="list-style-type: none"> • 1 sismómetro BA, < 5Km., tiempo real. • 1 sismómetro BA, 5-30 Km., tiempo real. |
| | | <p>Deformación:</p> <ul style="list-style-type: none"> • 1 campaña GPS por año de 3 hitos 1-8 Km. • 1 Interferograma InSAR al año. • 1 perfil de EDM dos mediciones por año. • 1 inclinómetro en tiempo real. |
| | | <p>Hidrología:</p> <ul style="list-style-type: none"> • 1 muestreo general por año de más de 6 fuentes termales y/o frías. • 1 estación de medición continua de Temperatura en una fuente. |
| | | <p>Sensores remotos:</p> <ul style="list-style-type: none"> • 1 Imagen satelital GOES y/o ASTER por día. • 1 Imagen térmica MIROVA por día. • 1 DEM, resolución < 30 m. • 1 estación de medición continua de Temperatura de fumarolas. |

Cuadro 8- Monitoreo volcánico óptimo para el grupo de volcanes con Nivel 2.

La configuración desarrollada para los volcanes de nivel 4 contempla la instalación de 61 instrumentos (Cuadro 5 y Figura 21), para el nivel 3 se necesitan 28 (Cuadro 6 y Figura 22), nivel 2 requiere de 10 equipos (Cuadro 7 y Figura 23) y finalmente el nivel 1 sería implementado con 3 instrumentos (Cuadro 8 y Figura 24).

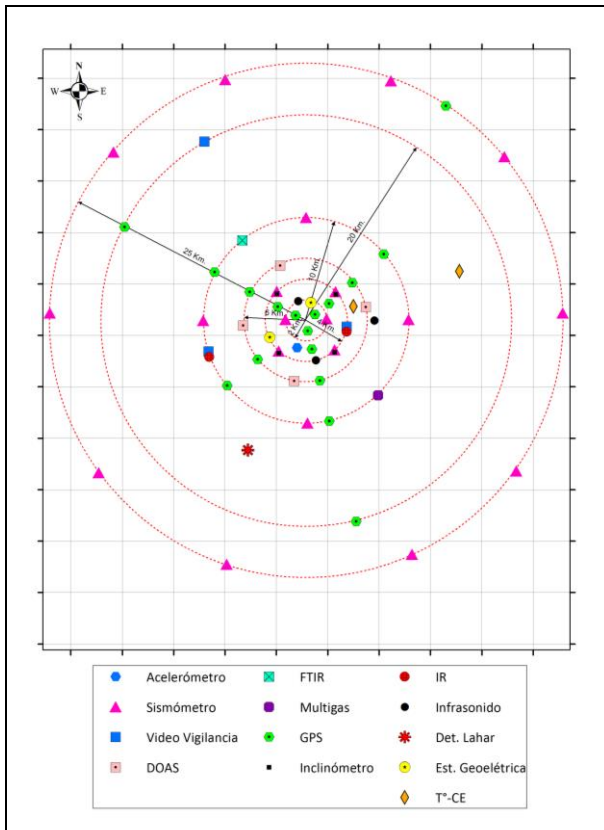


Figura 21.- Configuración ideal de los instrumentos de vigilancia Nivel 4 (nivel de "monitoreo máximo").

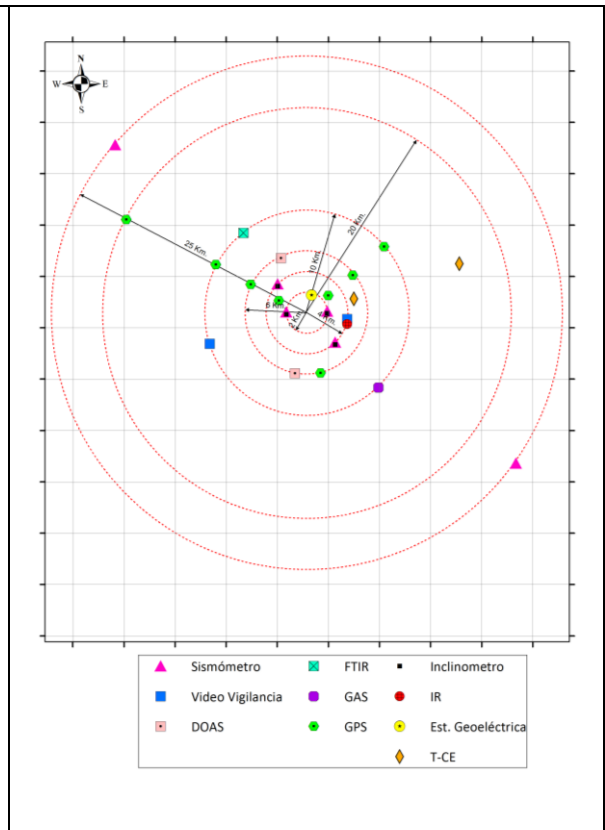


Figura 22.- Configuración ideal de los instrumentos de vigilancia Nivel 3 (nivel de "monitoreo regular").

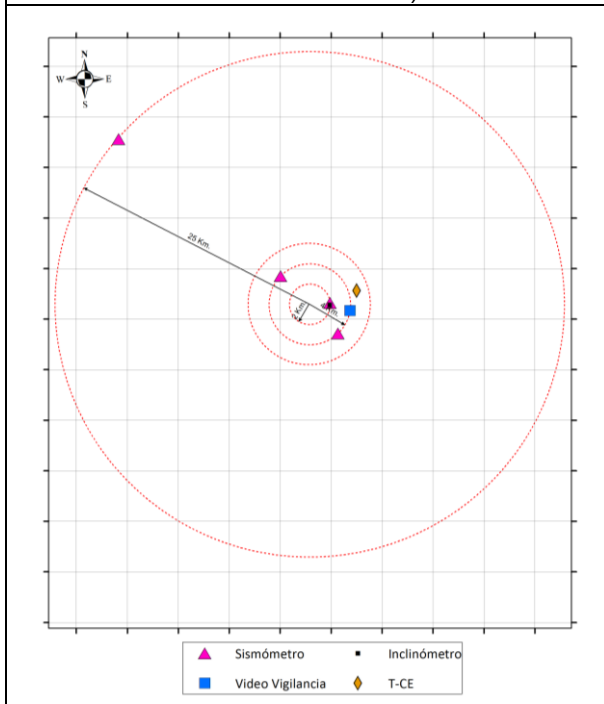


Figura 23.- Configuración ideal de los instrumentos de vigilancia Nivel 2 (nivel de "monitoreo básico").

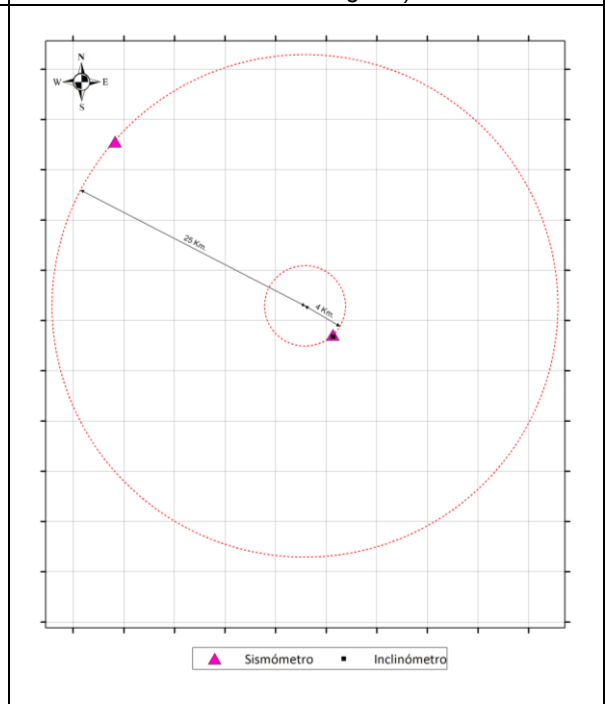


Figura 24.- Configuración ideal de los instrumentos de vigilancia Nivel 1 (nivel de "monitoreo mínimo").

3.2 EQUIPOS DE INTERVENCIÓN Y ESTUDIO

Como en todo fenómeno natural que es monitoreado, si bien puede estimarse una evolución previa cada erupción tiene sus particularidades que hay que estudiar y comprender rápidamente a fin de integrarlas a los conocimientos previamente adquiridos y mejorar así el pronóstico de su evolución. Por tanto, para lograr dichos nuevos datos complementarios, durante una erupción volcánica es necesario desplegar equipos geofísicos y geoquímicos de intervención. Las misiones de estudio que se realicen con estos instrumentos portátiles van a permitir obtener datos en lugares específicos o en etapas de interés de modo que se llegue a comprender posibles detalles que hayan quedado pendientes por dilucidar. Tales equipos son de gran importancia en el manejo de crisis.

Los equipos de intervención son los siguientes:

| NIVEL | VOLCANES | MÉTODOS DE MONITOREO VOLCÁNICO |
|--|--|--|
| EQUIPOS GEOFÍSICOS Y GEOQUÍMICOS DE INTERVENCIÓN | CUALQUIER VOLCÁN QUE MANIFIESTE PROCESO ERUPTIVO | Sismología: <ul style="list-style-type: none"> • 24 estaciones sísmicas portátiles BA. • 3 Infrasonidos |
| | | Deformación: <ul style="list-style-type: none"> • 10 GPS CORS portátiles, registro continuo. • 4 inclinómetros portátil, registro continuo. • 1 gravímetro portátil. |
| | | Hidrología: <ul style="list-style-type: none"> • 6 termómetros de medición continua. • 2 cámaras video vigilancia, registro continuo. • 2 cámaras infrarrojas. |
| | | Gas: <ul style="list-style-type: none"> • 1 DOAS portátil. • 1 cámara UV portátil. • 1 estación multigas portátil. • 1 FTIR portátil. |

Cuadro 9.- Instrumentación para intervención en caso un volcán manifieste proceso eruptivo.

CAPITULO IV

COMPARACIÓN DEL MONITOREO ACTUAL VS. MONITOREO IDEAL POR NIVELES, DE ACUERDO AL RVR DE CADA VOLCÁN

La finalidad de comparar el nivel actual de monitoreo con los niveles ideales establecidos en el capítulo anterior, es de evaluar las deficiencias y, si fuera el caso, señalar las ventajas que existen a la fecha para cada volcán, considerando las redes telemétricas instaladas por el OVS-IGP y por el OVI-INGEMMET. El Cuadro 10 es un resumen de los instrumentos que actualmente están en operación transmitiendo en tiempo real.

| VOLCANES | NIVEL DE RIESGO VOLCANICO RELATIVO | N° TOTAL DE INSTRUMENTOS INSTALADOS (Hasta 2016). | N° TOTAL DE INSTRUMENTOS NECESARIOS |
|--------------|------------------------------------|---|-------------------------------------|
| Sabancaya | MUY ALTO | 36 | 244 |
| Ubinas | | | |
| Misti | | | |
| Coropuna | | | |
| Yucamane | ALTO | 5 | 140 |
| Tutupaca | | | |
| Huaynaputina | | | |
| Ticsani | | | |
| Chachani | MODERADO | 0 | 30 |
| Sara Sara | | | |
| Casiri | | | |
| Quimsachata | BAJO | 0 | 12 |
| Purpuruni | | | |
| Andahua | | | |
| Huambo | | | |
| Auqui huato | | | |

Cuadro 10.- Instrumentación operativa de transmisión en tiempo real e instrumentación requerida por niveles de RVR.

Si se compara la información de los Cuadros 5 a 8 con la información del Cuadro 10, se puede observar que los volcanes Misti, Sabancaya, Ubinas y Coropuna, presentan importantes deficiencias o vacíos de instrumental (Gap) en su sistema de vigilancia, pues todos ellos deberían tener un “monitoreo máximo” es decir Nivel 4. Sin embargo, en el caso del Ubinas solo se llega a un nivel comparable al Nivel 3. En caso del Sabancaya y Misti solo se llega al Nivel 2. En el caso del volcán Coropuna éste no cuenta con ningún tipo de vigilancia, es decir que su nivel de monitoreo sería de Nivel 1. Y en el caso de los 12 volcanes activos restantes de la lista, la situación es aún más álgida, pues ellos no tienen ningún tipo de instrumentación en tiempo real.

| RIESGO VOLCANICO RELATIVO (RVR) | VOLCAN | Nivel de Instrumentación en: | | | | | Nivel de monitoreo ACTUAL | Nivel de monitoreo IDEAL | Gap | Nivel de Instrumentación en: | | | | | PRIORIDAD | |
|---------------------------------|--------------|------------------------------|-------------|-----|------------|------------------|---------------------------|--------------------------|-----|---|-------------|-----|------------|------------------|-----------|----|
| | | Sismología | Deformación | Gas | Hidrología | Sensores remotos | | | | Sismología | Deformación | Gas | Hidrología | Sensores remotos | | |
| MUY ALTO | Coropuna | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 4 | 3 | Necesidad de implementación de instrumentos para alcanzar el nivel requerido. | 4 | 4 | 3 | 3 | 3 | 1 |
| | Sabancaya | 3 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 4 | 2 | | 1 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 |
| | Misti | 3 | 1 | 2 | 2 | 3 | 2 | 4 | 2 | | 1 | 3 | 2 | 2 | 1 | 3 |
| | Ubinas | 3 | 2 | 3 | 3 | 2 | 3 | 4 | 1 | | 1 | 2 | 1 | 1 | 2 | 4 |
| ALTO | Yucamane | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 3 | 3 | | 3 | 3 | 3 | 2 | 2 | 5 |
| | Chachani | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 3 | 3 | | 3 | 3 | 3 | 2 | 2 | 6 |
| | Tutupaca | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 3 | 2 | | 3 | 3 | 2 | 2 | 2 | 7 |
| | Huaynaputina | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 3 | 2 | | 3 | 3 | 2 | 2 | 2 | 8 |
| | Ticsani | 2 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 3 | 2 | | 1 | 2 | 2 | 2 | 2 | 9 |
| MODERADO | Sara Sara | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 2 | 2 | | 2 | 2 | 2 | 2 | 1 | 10 |
| | Casiri | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 2 | 2 | | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 11 |
| | Quimsachata | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 2 | 2 | | 2 | 2 | 2 | 2 | 1 | 12 |
| BAJO | Purpuruni | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 13 |
| | Andahua | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 14 |
| | Huambo | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 15 |
| | Auquihuato | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 16 |

Cuadro 11- Estimación, por niveles, del Gap de monitoreo para los volcanes activos del sur peruano.

En el caso de los volcanes de alto RVR como el Yucamane, Tutupaca, Huaynaputina, Ticsani y Chachani, que deberían tener redes funcionando en tiempo real, tan solo el volcán Ticsani cuenta con algunos instrumentos (equipos de tipo sísmico únicamente) en tiempo real. Los demás volcanes carecen de todo instrumento y solo han sido monitoreados de manera eventual hasta la fecha. En estos casos el Gap es mayor, pues requieren de la instrumentación completa señalada en el cuadro 6.

El análisis indica similar panorama para los volcanes identificados con RVR moderado y Bajo, los cuales tampoco alcanzan a tener un monitoreo volcánico acorde para su nivel de RVR establecido. En el Cuadro 11, donde se presenta un resumen del Gap de monitoreo, nótese que mientras mayor sea el valor del "Gap", la prioridad de monitoreo será mayor. Es evidente, entonces, que se necesita mejorar sustancialmente la instrumentación instalada de estos volcanes para alcanzar el nivel adecuado que requiere su vigilancia de acuerdo a su respectivo RVR.

AGRADECIMIENTOS

Este estudio ha sido realizado como resultado de un Taller sobre Evaluación del Riesgo Volcánico para el Perú, llevado a cabo del 24 al 26 de Mayo 2016, entre especialistas del Observatorio Vulcanológico del Sur (OVS) del Instituto Geofísico del Perú, del Instituto Geológico Minero y Metalúrgico, del Instituto Geofísico de la Univ. Nac. San Agustín de Arequipa (IG-UNSA), y con la importante participación de Angie Diefenbach del Volcano Disaster Assistance Program (VDAP) del US Geological Survey.

Este trabajo se ha realizado en el marco del programa de cooperación internacional VDAP-IGP-INGEMMET-IGUNSA.

BIBLIOGRAFÍA

- Adams N., de Silva S., Self S., Salas G., Schubring S., Permenter J., Arbesman K. (2001). "The physical volcanology of the 1600 eruption of Huaynaputina, southern Peru". *Bull volcanol* (2001) 62: 493-518.
- Brack A. (2010). "Estudio Línea Base Ambiental De La Cuenca Del Río Vilcanota". Informe final elaborado por el Ministerio del Ambiente. 294p.
- Bustamante A., Scorzelli R., Mattievich E. (1987). "Mossbauer Studies in Volcanic Material of the Peruvian Volcano Quimsachata" .11p.
- 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". (P. Shearer, Éd.) *Earth and Planetary Science Letters*, 152-164.
- Bromley G., Schaefer J., Winckler G. (2009). "Relative timing of last glacial maximum and late-glacial events in the central tropical Andes". *Quaternary Science Reviews* 28: 2514–2526.
- Cabrera M., Thouret J.-C. (2000). "Volcanismo monogenético en el sur del Perú: Andahua y Huambo". X Congreso Peruano de Geología.
- Caldas J. (1993). "Geología de los cuadrángulos de Huambo y Orcopampa". Boletín N° 46, Serie A, INGEMMET, Lima, Perú, 82p.
- Christine M., Thouret J.-C. (2004). "Role of magma mixing in the petrogenesis of tephra erupted during the 1990–98 explosive activity of Nevado Sabancaya, southern Peru".
- Cobeñas M., Thouret J.-C. (2012). "The c.2030 yr BP Plinian eruption of El Misti volcano, Peru: Eruption dynamics and hazard implications".
- Cobeñas M., Thouret J.-C. (2013). (Reply to comment on: "Cobeñas G., Thouret J.-C., Bonadonna C., Boivin 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* 241–242, 105–120." by Harpel et al., *JVGR* 2013.
- Dávila J. (1998). "Volcán Huaynaputina (sur del Perú): Estudio estratigráfico y sedimentológico de las tefras y efectos de la erupción de 1600 D.C.". Tesis, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Lima, 180 p.
- De Silva S., Francis P. (1990). "Potentially active volcanoes of Peru - observations using Landsat Thematic Mapper and Space Shuttle imagery". *Bull Volc*, 52: 286-301.
- De Silva S., Francis P. (1991). "Volcanoes of the central Andes". Springer-Verlag, New York.
- De Silva S., Zielinski G. (1998). "Global influence of the AD1600 eruption of Huaynaputina, Peru".
- De Silva S., Gosnold W. (2007). "Episodic construction of batholiths: Insights from the spatiotemporal development of an ignimbrite flareup". *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, v. 167, no. 1–4, p. 320–335.
- Delacour A., Gerbe M.-C., Thouret J.-C., Wörner G., Paquereau-Lebti P. (2007). "Magma evolution of quaternary minor volcanic centres in southern Peru, Central Andes". *Bull Volcanol* (2007), 69:581-608.
- Elissondo M., Villegas D. (2011). "Evaluación de Peligrosidad Volcánica en Argentina".

- Ewert J.W., Guffanti M. and Murray T.L. (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 US Geological Survey.
- Fidel L., Morche W., Nuñez S. (1997). "Inventario de volcanes del Perú".
- Fidel L., Zavala B. (2001). (Mapa preliminar de amenaza volcánica del volcán Tutupaca". Boletín 24, Serie C: Geodinámica e Ingeniería Geológica, INGEMMET, 109 p.
- Forget M., Thouret J.-C. Kuentz A., Fontugne M. (2008). "Inherited glacial and periglacial landforms, and recent evolution of the Nevado Coropuna in the Central Andes of southern Peru".
- Garcia F., Chorowicz J., Legros F. (1997b). "La Caldera Chachani, gran centroexplosivo Plioceno-holoceno del sur del Perú, Identificación y evolución en imágenes de satélite LANDSAT y radar ERS". Bol. Soc. Geol. Perú, 1,449-454.
- Gerbe M.-C. y Thouret J.-C. (2004). "Role of magma mixing in the petrogenesis of tephra erupted during the 1990-98 explosive activity of Nevado Sabancaya, southern Peru". Bull Volcanol, 66:541-561.
- Hantke G., Parodi A. (1966). "Catalogue of the active volcanoes of the world; Part XIX, Colombia, Ecuador and Perú". IAVCEI Naples, Italy, 73p.
- 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. Vol. 484. 2011; p. 1-72.
- Huaman D., Chorowicz J., Deffontaines B., Guillande R. & Rudant J. (1993). "Cadre structural et risques géologiques étudiés à l'imagerie spatiale: la région du Colca (Andes du Sud Perú): Bull. Soc. Géol. France, t. 164, N°6, 807-818.
- Instituto Nacional de Estadística e Información INEI. (2015). "Directorio nacional de municipalidades provinciales, distritales y de centros poblados 2015".
- Jay J., Delgado F., Torres J., Pritchard M., Macedo O., Aguilar V. (2015). "Deformation and seismicity near Sabancaya volcano, southern Peru, from 2002 to 2015". Geophysical Research Letters 42.
- Kaneoka I. & Guevara C. (1984). "K/Ar age determinations of late Tertiary and Quaternary Andean volcanic rocks, southern Peru". Geochemical Journ. 18, 233-239.
- Lamadon S. (1999). "Fluctuations glaciaires et téphrostratigraphie dans les montagnes intertropicales : une revue et application dans les Andes du Sud du Pérou (massifs des Nevados Ampato et Coropuna)". Mémoire de DEA, université Blaise-Pascal, Clermont-Ferrand, 180 p.
- Lavallée Y., de Silva S., Salas G., Byrnes J. (2009). "Structural control on volcanism at the Ubinas, Huaynaputina, and Ticsani Volcanic Group (UHTVG), southern Peru". JVGR 186 (2009) 253-264p.
- Lavallée Y., de Silva S., Salas G., Byrnes, J. (2006). "Explosive volcanism (VEI 6) without caldera formation: insight from Huaynaputina volcano, southern Peru". Bull of Volcanology 68 (4), 333-348.
- Manrique N. (2013). "Evolución Vulcanológica Y Magmática Del Edificio Reciente Del Complejo Volcánico Tutupaca (Tacna)".
- Mariño, J. (2002). "Estudio geológico vulcanológico y evaluación de peligros del volcán Ticsani (sur del Perú)". 160p.
- Mariño J., Thouret J.-C. (2003). "Geología, historia eruptiva y evaluación de peligros del volcán Ticsani (sur del Perú)". Boletín de la Sociedad Geológica del Perú, Lima.
- Marocco R., García Zabaleta F. (1974). "Estudio geológico de la región entre Cuzco y Machu Picchu". Bull. Inst. Fr. Et. And.

- Miller C. (2011). "Threat assessment of New Zealand's volcanoes and their current and future monitoring requirements".
- Miller C., Jolly A. (2013). "A model for developing best practice volcano monitoring: a combined threat assessment, consultation and network effectiveness approach".
- Morales A., Amelung F. (2016). "Volcano deformation survey over the Northern and Central Andes with ALOS InSAR time series". *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 17, 2869-2883.
- Moran S. (2008). "Instrumentation recommendations for volcano monitoring at U.S. volcanoes under the national volcano early warning system".
- Morche W., De La Cruz N. (1994).- "Geología y Petrografía de los Volcanes Pleistocénicos Yucamane y Tutupaca (Tacna)". *Resúmenes Extendidos, VIII Congreso Peruano de Geología*, p. 209-213.
- Morche W., Nuñez S. (1998). "Estudio del riesgo volcánico e hidrotermalismo en el sur del Perú". Instituto geológico minero metalúrgico.
- Navarro R. (1994). "Antología del valle de Omate". Arequipa-Perú.
- Paquereau M., Thouret J.-C. (2006). "Neogene and Quaternary ignimbrites in the area of Arequipa, Southern Peru: Stratigraphical and petrological correlations".
- Paquereau P., Fornari M. (2007). "Paleomagnetism, magnetic fabric, and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating of Pliocene and Quaternary ignimbrites in the Arequipa area, southern Peru".
- Parodi I. (1975). "Volcanes del Perú. Boletín de la Sociedad Geológica de Lima. 94, 20 – 23.
- Pritchard, Simons. (2002). "A satellite geodetic survey of large scale deformation of volcanic centres in the central Andes". *Letters to Nature*, Vol. 418.
- Rivera M. (2000). "Genèse et évolution de magma émit au cours de la histoire éruptive récent du volcan Ubinas (sud du Pérou)". *Mémoire de DEA, Université Blaise Pascal, Francia*.
- Rivera M., Mariño J. (2004). "Volcán Yucamane (Sur Del Perú): Geología, Petrología Y Evaluación Preliminar De Las Amenazas Volcánicas".
- Rivera M., Mariño J. (2006). "Síntesis Geocientífica de los Principales Volcanes Activos del Sur Peruano". Informe INGEMMET, Dirección de Geología Ambiental.
- Rivera M. (2010). "Genèse et évolution des magmas andésitiques à rhyodacitiques récents des volcans Misti et Ubinas (Sud du Pérou)". Tesis de doctorado, Univ. Blaise Pascal.
- Rivera M., Thouret J.-C., Samaniego, P., Le Pennec J.-L. (2014). "The 2006-2009 activity of the Ubinas volcano (Peru): petrology of the 2006 eruptive products and insights into genesis of andesite magmas, magma recharge and plumbing system". *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 270, 122–141.
- Samaniego P, Rivera M, Liorzou C. (2014). "Geología Y Evolución Del Complejo Volcánico Yucamane Calientes (Tacna)".
- 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)". *Bull Volc* 77:51.
- Samaniego P., Rivera M. (2014). "Estudio Tefro-Estratigráfico Preliminar Del Depósito De Caída De La Última Erupción Del Volcán Yucamane (Tacna)".
- Samaniego P., Rivera M., Mariño J., Guillou H., Liorzoud C., Zerathe S., Delgado R., Valderrama P., Scao V. (2016). "The eruptive chronology of the Ampato–Sabancaya volcanic complex (Southern Peru)". *JVGR* 323, pag 110 – 128.
- Siebert L., Skim T., Kimberly P. (2010). "Volcanoes of the world. Third edition." Smithsonian Institution, University of California Press.
- Silva C. (2011). "Evaluación Objetiva de la Amenaza Volcánica del Territorio Nacional".

- Simkin T., Siebert L. (1994). "Volcanoes of the World, 2nd ed". xi + 349 pp. Tucson: Geoscience Press for the Smithsonian Institution.
- Smithsonian Institution, Global Volcanism Program http://volcano.si.edu/data_criteria.cfm)
- Suaña E. (2009). "Estudio geológico del complejo volcánico Chachani". Tesis de Ingeniero Geólogo, Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa, Arequipa, 128 p.
- Suni J. (1999). "Estudio geológico y vulcanológico del volcán Misti y sus alrededores ". Arequipa, Universidad Nacional San Agustín, Facultad Geología y Minas.
- Thouret J.-C., 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". Bulletin de la Société Géologique de France, 1, 165, 49-63.
- Thouret J.-C., Gourgaud A., Guillaude R., Salas G. (1995a). "La actividad eruptiva del volcán nevado Sabancaya (Sur de Perú): geología, sensores remotos, evaluación y mapeo de zonas de riesgo". Resúmenes Extendidos. Seminario Taller: Evaluación de la Litósfera en los Andes Peruanos y sus márgenes. Programa PICG, 188. Lima Perú.
- Thouret J.-C., Gourgaud A., Uribe M., Rodriguez A., Guillaude R., Salas G. (1995b). "Geomorphological and geological survey and remote sensing of the current activity of Nevado Sabancaya strato volcano (South Peru): assessment for hazard-zone mapping. Z. Geomorph". N-E., 39, 4, 515-535.
- Thouret J.-C., Davila J., Eissen J.-P. (1999). "Largest explosive eruption in historical times in the Andes at Huaynaputina volcano, A.D. 1600, southern Peru."
- Thouret J.-C., Finizola A. (2001). "Geology of El Misti volcano near the city of Arequipa, Peru."
- Thouret J.-C., 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.-C., Juvigné E., Mariño J., Moscol M., Loutsch I., Dávila J., Legeley-Padovani A., Lamadon S., Rivera M. (2002a). "Late Pleistocene and Holocene tephro-stratigraphy and chronology in Southern Peru". Boletín de la Sociedad geológica del Perú, 93, 45-61.
- Thouret J.-C., Rivera M. (2004). "Ubinas: the evolution of the historically most active volcano in southern Peru".
- Thouret J.-C., 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 pp.
- Thouret J.-C., Wörner G., Gunnell Y., Singer B., Zhang X., Souriot T. (2007). "GEOchronologic and stratigraphic constraints on canyon incision and Miocene uplift of the central Andes in Peru". Earth and Planetary Science Letters 263 (2007) 151-166.
- Thouret J.-C., Mariño J., Davila J., Rivera M., Fuvigne E., Loutsch I. (2008). "Erupciones explosivas durante el Pleistoceno tardío y Holoceno en el sur del Perú, Proyecto Tefro -estratigráfico del sur del Perú TESSOPE".
- Thouret J.-C., Jicha B., Paquette J.-L., Cubukcu E. (2016). "A 25myr chronostratigraphy of ignimbrites in south Peru: implications for the volcanic history of the Central Andes." Journal of the Geological Society.
- Úbeda J. (2011). "El impacto del cambio climático en los glaciares del complejo volcánico Nevado Coropuna (cordillera occidental de los Andes, Sur del Perú)". Universidad Complutense de Madrid, 558 pp.
- Úbeda J. (2012). "El cambio climático y los glaciares del Nevado Coropuna (Sur de Perú)". Editorial Académica Española, 576 pp.

- Valderrama P., Samaniego P., Mariño J., Manrique N., Van Wyk De Vries B., Fidel L. (2013). "Una gran erupción del volcán Tutupaca (Tacna) ocurrida hace aproximadamente 200 años AP : implicaciones para la evaluación de la amenaza." Foro Internacional de Peligros Geológicos, Arequipa, 14-16 Octubre 2013, 61-64 pp.
- Vela J. (2015). "Estudio Tefro-Estratigráfico De Los Depósitos Asociados Con Las Erupciones Recientes Del Volcán Yucamane (Tacna)". Tesis Profesional Ingeniero Geólogo.
- Ventura, Travada & Cordova. (1958). "El suelo de Arequipa convertido en cielo: historia general de Arequipa, año de 1752". Primer festival del libro arequipeño.
- Venturelli G., Frangipane M., Weibel M., Antiga D. (1978). "Trace element distribution in the Cenozoic lavas of Nevado Coropuna and the Andagua Valley, Central Andes of Southern Peru". Bull. Volcanol. 41(3): 213-228.
- Volcano Global Risk Identification & Analysis Project (VOGRIPA)-Large Magnitude Explosive Volcanic Eruptions (LaMEVE). Recuperado de: <http://www.bgs.ac.uk/vogripa/>
- Weibel M., Frangipane-Gysel M., Hunziker J.-C. (1978). "Ein Beitrag zur Vulkanologie Süd-Perus". Geologische Rundschau, 67: 243-252.
- Wolfgang M., Nuñez S. (1998). "Estudio del riesgo Geológico del Volcán Sara Sara." Boletín N° 21, Serie C, INGEMMET, Lima, Perú, 64p.
- Zamacola y Jauregui J.D. (1804). "Apuntes para la historia de Arequipa". Primer festival del libro arequipeño, Arequipa. Edición 1958, 15 p.

Anexo N°1

**FICHAS DE EVALUACION DEL FACTOR DE PELIGRO Y DEL FACTOR DE
EXPOSICION PARA LOS 16 VOLCANES EVALUADOS**

| VOLCÁN SABANCAYA | | |
|---|--------------|---|
| Factores de Peligro | Calificación | Breve Explicación |
| Tipo de Volcán | 1 | Estratovolcán (De Silva y Francis, 1991). |
| Máximo IEV (Índice de Explosividad Volcánica) | 1 | En 1990-1998 la erupción alcanzo un VEI=3 (Siebert et al, 2010). |
| Actividad explosiva en <500 a. | 1 | VEI=3 (Siebert et al, 2010). |
| Actividad explosiva mayor en <5000 a. | 0 | No |
| Recurrencia eruptiva | 3 | 100-1000 años (Siebert et al, 2010). |
| Flujos piroclásticos Holocenos | 1 | Sí (Thouret et al.2008). |
| Flujos de lava Holocenos | 1 | Sí (Thouret et al., 2008) |
| Lahares Holocenos | 1 | Sí (Thouret et al 2008) |
| Tsunamis Holocenos | 0 | No |
| Potenciales explosiones hidrotermales | 1 | Cuenta con un sistema hidrotermal. |
| Potencial Sector de Colapso | 0 | No cuenta con un sector de colapso. |
| Fuente primaria de Lahar | 1 | Sí. No hay información. |
| Actividad sísmica observada | 1 | Sí (IGP). |
| Deformación observable de la superficie | 1 | Sí (Pritchard & Simons 2002). |
| Fumarola o desgasificación magmática | 1 | Sí (IGP, INGEMMET). |
| Factores De Exposición | Calificación | Breve Explicación |
| Población contenida en un radio de 30 Km (VPI) | 4.1 | 12 745 personas (INEI proyección a 2015 basada según el censo del año 2007). $\text{Log}_{10}(12745)=4.1$ |
| Población cercana a cursos de agua o valles fluviales | 3.3 | Si 1 847 (INEI proyección a 2015 basada según el censo del año 2007). $\text{Log}_{10}(1847)=3.3$ |
| Muertes históricas. | 0 | No hay antecedentes o no existen fatalidades. |
| Evacuaciones históricas. | 1 | Si existen evacuaciones históricas (INGEMMET). |
| Exposición de la Aviación local | 2 | Aeropuerto internacional de Cuzco (300 km.). |
| Exposición de la Aviación regional | 4.2 | Aeropuertos de Cuzco, Arequipa, Juliaca y Tacna, aproximadamente 14 242 personas (CORPAC). $\text{Log}_{10}(14242)=4.2$ |
| Infraestructura energética. | 1 | Sí. (SEAL) |
| Infraestructura de transporte. | 1 | Sí. Pista a la zona de Chivay (Colca) |
| Desarrollos urbanos mayores o áreas ecológicamente sensibles. | 1 | Sí. Atractivo Cañón del Colca. |

RVR = Factor de Peligro x Factor de Exposición

RVR=14 x 17.6

RVR = 246

| VOLCÁN UBINAS | | |
|---|--------------|---|
| Factores de Peligro | Calificación | Breve Explicación |
| Tipo de Volcán | 1 | Estratovolcán (Thouret et al., 2005). |
| Máximo IEV (Índice de Explosividad Volcánica) | 2 | En el año 1080, registro una erupción con un VEI = 5 (Siebert et al. 2010). |
| Actividad explosiva en <500 a. | 1 | Erupción del año 1667 de VEI=3 (Siebert et al. 2010) |
| Actividad explosiva mayor en <5000 a. | 1 | Por la erupción del año 1080, con un VEI > 4 (Siebert et al. 2010). |
| Recurrencia eruptiva | 4 | Cada 13 años (Siebert et al. 2010). |
| Flujos piroclásticos Holocenos | 1 | Sí. (Thouret et al., 2005). |
| Flujos de lava Holocenos | 0 | No existieron flujos de lava en el holocenos (Thouret et al., 2005). |
| Lahares Holocenos | 1 | Si (Thouret et al., 2005). |
| Tsunamis Holocenos | 0 | No. |
| Potenciales explosiones hidrotermales | 1 | Debido a que cuenta con un sistema hidrotermal. |
| Potencial Sector de Colapso | 1 | Potencial sector de colapso en el flanco sur. Ya ha ocurrido en el Holoceno (Thouret et al., 2005). |
| Fuente primaria de Lahar | 0 | No tiene casquete glaciar que supere el millón de metros cúbicos de hielo. |
| Actividad sísmica observada | 1 | Si (OVS-IGP). |
| Deformación observable de la superficie | 0 | No tiene. |
| Fumarola o desgasificación magmática | 1 | Si muestra fumarolas y gases (IGP). |
| Factores De Exposición | Calificación | Breve Explicación |
| Población contenida en un radio de 30 Km (VPI) | 4.3 | 20922 personas (INEI proyección basada según el censo del año 2007). $\log_{10}(20922)=4.3$ |
| Población cercana a cursos de agua o valles fluviales | 0 | No, porque no tiene fuente primario de Lahar. |
| Muertes históricas. | 0 | No hay antecedentes de fatalidades. |
| Evacuaciones históricas. | 1 | Existió una evacuación en el año 2006 (De Querapi a la zona de Chacchagén). |
| Exposición de la Aviación local | 2 | Aeropuerto intern. De la Paz, Bolivia (290 km). |
| Exposición de la Aviación regional | 4.4 | La Paz, Arequipa, Juliaca, Tacna, Arica (22831 personas) (CORPAC). $\log_{10}(22831)=4.4$ |
| Infraestructura energética. | 1 | Sí. (SEAL) |
| Infraestructura de transporte. | 1 | Sí. Carretera al pueblo de Ubinas. |
| Desarrollos urbanos mayores o áreas ecológicamente sensibles. | 1 | Sí. La laguna de Salinas-Moche. |

RVR = Factor de Peligro x Factor de Exposición

RVR=15 x 14.7

RVR = 220.2

| VOLCÁN MISTI | | |
|---|--------------|---|
| Factores de Peligro | Calificación | Breve Explicación |
| Tipo de Volcán | 1 | Estratovolcán (Siebert et al, 2010). |
| Máximo IEV (Índice de Explosividad Volcánica) | 2 | En 2300-2050 AP, con VEI = 5 (Harpel 2011). |
| Actividad explosiva en <500 a. | 0 | No se tiene erupción en los últimos 500 años (Harpel et. al. 2011). |
| Actividad explosiva mayor en <5000 a. | 1 | Por la erupción en 2300-2050 AP, con un VEI > 4. (Harpel et. al. 2011). |
| Recurrencia eruptiva | 3 | 500 años (Thouret et al., 2001). |
| Flujos piroclásticos Holocenos | 1 | Se tiene depósitos de flujos piroclásticos (Thouret et al., 2001). |
| Flujos de lava Holocenos | 0 | No existieron flujos de lava en el holocenos (Thouret et al., 2001) |
| Lahares Holocenos | 1 | Se tienen depósitos de tipo Lahar en los últimos 10 mil años (Cobeñas et al 2012) |
| Tsunamis Holocenos | 0 | No. |
| Potenciales explosiones hidrotermales | 1 | Cuenta con un sistema hidrotermal. |
| Potencial Sector de Colapso | 1 | Cuenta con un sector de colapso en el flanco Norte. (Thouret et al., 2001). |
| Fuente primaria de Lahar | 0 | No tiene casquete glaciar. |
| Actividad sísmica observada | 1 | SI. (IGP). |
| Deformación observable de la superficie | 0 | No tiene. |
| Fumarola o desgasificación magmática | 1 | Si muestra fumarolas y gases. |
| Factores de Exposición | Calificación | Breve Explicación |
| Población contenida en un radio de 30 Km (VPI) | 6.0 | 973266 personas (INEI proyección basada según el censo del año 2007). $\log_{10}(973266)=6.0$ |
| Población cercana a cursos de agua o valles fluviales | 0 | No, porque no tiene fuente primario de Lahar. |
| Muertes históricas. | 0 | No hay antecedentes de fatalidades. |
| Evacuaciones históricas. | 0 | No existen evacuaciones históricas. |
| Exposición de la Aviación local | 2 | Aeropuerto Internacional de Cuzco (318 km). |
| Exposición de la Aviación regional | 4.2 | Arequipa, Cuzco, Juliaca, Tacna y Arica; 15868 personas (CORPAC). $\log_{10}(15868)=4.2$ |
| Infraestructura energética. | 1 | Sí. (SEAL) |
| Infraestructura de transporte. | 1 | Sí. Principales vías de la ciudad de Arequipa. |
| Desarrollos urbanos mayores o áreas ecológicamente sensibles. | 1 | Sí. La ciudad de Arequipa. |

RVR = Factor de Peligro x Factor de Exposición

RVR=13 x 15.2

RVR = 197.4

| VOLCAN COROPUNA | | |
|---|---------------------|--|
| Factores de Peligro | Calificación | Breve Explicación |
| Tipo de Volcán | 1 | Estratovolcán (Siebert et al. 2010). |
| Máximo IEV (Índice de Explosividad Volcánica) | 1 | No se tiene Información, le corresponde 1 por ser volcán de tipo 1 (estratovolcán). |
| Actividad explosiva en <500 a. | 0 | No se tiene Información |
| Actividad explosiva mayor en <5000 a. | 1 | Actividad explosiva (Weibel 1978). |
| Recurrencia eruptiva | 2 | Entre 5000-10000 (Úbeda et al , 2011) |
| Flujos piroclásticos Holocenos | 1 | No se tiene Información |
| Flujos de lava Holocenos | 1 | Se conocen flujos de lavas de 200 Ka, 600 Ka y 700 Ka AC (Úbeda et al , 2011) |
| Lahares Holocenos | 1 | No se tiene Información |
| Tsunamis Holocenos | 0 | No. |
| Potenciales explosiones hidrotermales | 1 | Cuenta con un sistema hidrotermal. |
| Potencial Sector de Colapso | 1 | Cuenta con sector de colapso al SE. |
| Fuente primaria de Lahar | 1 | Casquete glacial que en 2007 sumaba una superficie de 47 km ² (Úbeda, 2011; Úbeda, 2012). |
| Actividad sísmica observada | 0 | Si ha mostrado actividad (IGP). |
| Deformación observable de la superficie | 0 | No tiene. |
| Fumarola o desgasificación magmática | 0 | No muestra fumarolas y gases (IGP). |
| Factores de Exposición | Calificación | Breve Explicación |
| Población contenida en un radio de 30 Km (VPI) | 4.4 | 92094 personas (Fuente: INEI proyección basada según el censo del año 2007). $\log_{10}(23597)=4.4$ |
| Población cercana a cursos de agua o valles fluviales | 4.9 | Si (INEI proyección a 2015 basada según el censo del año 2007). $\log_{10}(71248)=4.9$ |
| Muertes históricas. | 0 | No hay antecedentes de fatalidades. |
| Evacuaciones históricas. | 0 | No hay evacuaciones históricas. |
| Exposición de la Aviación local | 2 | En un radio de 300 km, está ubicado el aeropuerto internacional de la Cuzco. |
| Exposición de la Aviación regional | 4.1 | Tráfico de pasajeros diarios del Aeropuerto de la Paz, es de aproximadamente 13653 personas (CORPAC). $\log_{10}(13653)=4.1$ |
| Infraestructura energética. | 1 | Sí. (SEAL) |
| Infraestructura de transporte. | 0 | No existen carreteras principales (Radio 30km). |
| Desarrollos urbanos mayores o áreas ecológicamente sensibles. | 1 | Si presenta (Radio de 30km). |

RVR = Factor de Peligro x Factor de Exposición

RVR=11 x 17.3

RVR = 190.8

| VOLCAN TUTUPACA | | |
|---|--------------|---|
| Factores de Peligro | Calificación | Breve Explicación |
| Tipo de Volcán | 1 | Es un volcán de tipo Estratovolcán (Siebert et al. 2010). |
| Máximo IEV (Índice de Explosividad Volcánica) | 1 | Máximo VEI: 4 (Smithsonian Institution). |
| Actividad explosiva en <500 a. | 1 | Registra una erupción entre 1787 y 1802 AD; VEI:4 (Samaniego et al. 2015) |
| Actividad explosiva mayor en <5000 a. | 1 | Sí. (Samaniego et al. 2015) |
| Recurrencia eruptiva | 3 | La última erupción 200 aprox. (Samaniego et al. 2015) |
| Flujos piroclásticos Holocenos | 1 | Si Hay depósitos (Valderrama et al. 2013). |
| Flujos de lava Holocenos | 0 | Existieron flujos de lavas pero no se detalla si se asentaron en centros poblados. |
| Lahares Holocenos | 0 | No |
| Tsunamis Holocenos | 0 | No. |
| Potenciales explosiones hidrotermales | 1 | Cuenta con un sistema hidrotermal. |
| Potencial Sector de Colapso | 1 | Sector de colapso en el flanco NE del volcán de edad holocenica (Valderrama et al. 2013). |
| Fuente primaria de Lahar | 0 | No tiene casquete glaciar que supere el millón de metros cúbicos de hielo. |
| Actividad sísmica observada | 1 | Sí. (IGP) |
| Deformación observable de la superficie | 0 | No tiene. |
| Fumarola o desgasificación magmática | 1 | Si muestra pequeñas fumarolas y gases. (IGP) |
| Factores de Exposición | Calificación | Breve Explicación |
| Población contenida en un radio de 30 Km (VPI) | 4.2 | 15217 personas (Fuente: INEI proyección basada según el censo del año 2007). $\log_{10}(15217)=4.2$ |
| Población cercana a cursos de agua o valles fluviales | 0 | No corresponde. No tiene fuente primario de Lahar. |
| Muertes históricas. | 0 | No hay antecedentes de fatalidades. |
| Evacuaciones históricas. | 0 | No hay antecedentes o no existen fatalidades. |
| Exposición de la Aviación local | 2 | Aeropuerto Inter. de la Paz, Bolivia (a 240 km). |
| Exposición de la Aviación regional | 4.4 | Arequipa, Tacna, La Paz, Juliaca y Arica, con 22831 personas (CORPAC). $\log_{10}(22831)=4.4$ |
| Infraestructura energética. | 1 | Sí. (SEAL) |
| Infraestructura de transporte. | 1 | Carretera Binacional 16km. |
| Desarrollos urbanos mayores o áreas ecológicamente sensibles. | 1 | Centro poblado Candarave. |

RVR = Factor de Peligro x Factor de Exposición

RVR=12 x 13.5

RVR = 162.5

| VOLCÁN HUAYNAPUTINA | | |
|---|---------------------|---|
| Factores de Peligro | Calificación | Breve Explicación |
| Tipo de Volcán | 1 | Estratovolcán (Thouret et al, 1999). |
| Máximo IEV (Índice de Explosividad Volcánica) | 2 | Máximo VEI = 6 (Thouret et al, 1999). |
| Actividad explosiva en <500 a. | 1 | Máximo VEI=6 (Thouret et al, 1999). |
| Actividad explosiva mayor en <5000 a. | 1 | Si tuvo una actividad eruptiva de VEI>4 |
| Recurrencia eruptiva | 2 | Intervalo es 1000-5000 (Siebert et al, 2010). |
| Flujos piroclásticos Holocenos | 1 | Si hay depósitos (Siebert et al, 2010) |
| Flujos de lava Holocenos | 0 | No tiene flujos de lava en el holoceno. |
| Lahares Holocenos | 1 | Se tienen depósitos de tipo Lahar en los últimos 10 mil años (Thouret et al., 2002) |
| Tsunamis Holocenos | 0 | No. |
| Potenciales explosiones hidrotermales | 1 | Debido a que cuenta con un sistema hidrotermal. |
| Potencial Sector de Colapso | 0 | No cuenta con un sector de colapso. |
| Fuente primaria de Lahar | 0 | No tiene casquete glaciar que supere el millón de metros cúbicos de hielo. |
| Actividad sísmica observada | 0 | No ha mostrado sismicidad bajo el volcán (IGP). |
| Deformación observable de la superficie | 0 | No hay deformación. |
| Fumarola o desgasificación magmática | 1 | Si muestra fumarolas y gases (Fuente IGP, INGEMMET). |
| Factores de Exposición | Calificación | Breve Explicación |
| Población contenida en un radio de 30 Km (VPI) | 4.4 | 22579 personas (INEI proyección basada según el censo del año 2007). $\log_{10}(22579)=4.4$ |
| Población cercana a cursos de agua o valles fluviales | 0 | No corresponde. No tiene fuente primaria de Lahar. |
| Muertes históricas. | 0 | Si existen muertes (Navarro R., 1994). |
| Evacuaciones históricas. | 0 | Si existen evacuaciones históricas (R. Navarro, 1994). |
| Exposición de la Aviación local | 2 | En un radio de 300 km, está ubicado el aeropuerto internacional de la Paz, Bolivia. |
| Exposición de la Aviación regional | 4.4 | Arequipa, Juliaca, Tacna, Arica y La paz, es de aproximadamente 22832 personas (CORPAC). $\log_{10}(22832)=4.4$ |
| Infraestructura energética. | 1 | Sí. (SEAL) |
| Infraestructura de transporte. | 1 | Si tiene a 14km carretera al valle de Omate. |
| Desarrollos urbanos mayores o áreas ecológicamente sensibles. | 0 | No hay centros urbanos de mayor desarrollo. |

RVR = Factor de Peligro x Factor de Exposición

RVR=11 x 14.7

RVR = 161.8

| VOLCAN TICSANI | | |
|---|--------------|--|
| Factores de Peligro | Calificación | Breve Explicación |
| Tipo de Volcán | 1 | Es un volcán de tipo Lava domo (Siebert et al. 2010). |
| Máximo IEV (Índice de Explosividad Volcánica) | 1 | 11600 BP -+ 80, VEI = 4 (LAMEVE-VOGRIPA). |
| Actividad explosiva en <500 a. | 1 | VEI de 2-3 (Siebert et al. 2010; Mariño 2002). |
| Actividad explosiva mayor en <5000 a. | 0 | La explosión de 1800 solo alcanzo de 2-3 VEI. (Mariño 2002). |
| Recurrencia eruptiva | 2 | En los últimos 11 000 se produjeron tres erupciones explosivas (Mariño & Thouret 2003). |
| Flujos piroclásticos Holocenos | 1 | 2 flujos piroclásticos de bloques y cenizas, asociados al colapso de domos (Mariño & Thouret 2003). |
| Flujos de lava Holocenos | 0 | No (Mariño & Thouret 2003). |
| Lahares Holocenos | 0 | No hay registro. |
| Tsunamis Holocenos | 0 | No. |
| Potenciales explosiones hidrotermales | 1 | Si (Byrdina et al., 2013). Erupción freatomagmática, posterior al año 1600 D.C (Mariño & Thouret 2003). |
| Potencial Sector de Colapso | 0 | Colapso de domos durante el Holoceno (Mariño 2002). |
| Fuente primaria de Lahar | 0 | No tiene casquete glaciar que supere el 1Mm ³ de hielo. |
| Actividad sísmica observada | 1 | Sí (IGP). |
| Deformación observable de la superficie | 1 | 2005 deformación a 7 km al NO y 17 km al SE del Ticsani (Jay et al, 2013; Gonzales, 2006). |
| Fumarola o desgasificación magmática | 1 | Si muestra fumarolas y gases (IGP). |
| Factores De Exposición | Calificación | Breve Explicación |
| Población contenida en un radio de 30 Km (VPI) | 4.2 | 14838 personas (INEI proyección a 2015 basada según el censo del año 2007). $\log_{10}(14838)=4.2$ |
| Población cercana a cursos de agua o valles fluviales | 0 | No corresponde. |
| Muertes históricas. | 0 | No hay antecedentes o no existen fatalidades. |
| Evacuaciones históricas. | 0 | No hay antecedentes. |
| Exposición de la Aviación local | 2 | Aeropuerto internacional de la Paz, Bolivia (275km). |
| Exposición de la Aviación regional | 4.4 | Aeropuertos de la Paz, Arica, Tacna, Arequipa y Juliaca es aprox. 22831 personas. $\log_{10}(22831)=4.4$ |
| Infraestructura energética. | 1 | 12Km al SW línea eléctrica (SEAL, IGP). |
| Infraestructura de transporte. | 1 | Carretera binacional a 11.6km al S del volcán. |
| Desarrollos urbanos mayores o áreas ecológicamente sensibles. | 1 | Calacoa 8 Km al W del volcán. |

RVR = Factor de Peligro x Factor de Exposición

RVR=10 x 13.5

RVR = 135.3

| VOLCÁN YUCAMANE | | |
|---|---------------------|---|
| Factores de Peligro | Calificació | Breve Explicación |
| Tipo de Volcán | 1 | Es un volcán de tipo Estratovolcán (Samaniego et al.,2014). |
| Máximo IEV (Índice de Explosividad Volcánica) | 1 | Durante la última glaciación, registro una erupción con un VEI = 3 (Samaniego et al. 2014). |
| Actividad explosiva en <500 a. | 1 | 4 eventos eruptivos 1787, 1802, 1862, 1902 (Valderrama & Samaniego, 2013). |
| Actividad explosiva mayor en <5000 a. | 1 | VEI=3 (Samaniego, 2014). |
| Recurrencia eruptiva | 2 | Presenta una recurrencia eruptiva de 1000 a 5000 años. (Samaniego et al. 2014). |
| Flujos piroclásticos Holocenos | 1 | Se tiene depósitos de flujos piroclásticos (Rivera & Mariño, 2004). |
| Flujos de lava Holocenos | 1 | Si (Samaniego, Rivera et al., 2014). |
| Lahares Holocenos | 1 | Si existen (Rivera & Mariño ,2004). |
| Tsunamis Holocenos | 0 | No. |
| Potenciales explosiones hidrotermales | 1 | Cuenta con sistema hidrotermal (Rivera & Mariño, 2004). |
| Potencial Sector de Colapso | 1 | Sector de colapso en el flanco sur del volcán ocurrido en el Holoceno (Thouret et al., 2005). |
| Fuente primaria de Lahar | 0 | No tiene casquete glaciar que supere 1 Mm ³ . |
| Actividad sísmica observada | 0 | No se registra. |
| Deformación observable de la superficie | 0 | No presenta deformación. |
| Fumarola o desgasificación magmática | 1 | Si muestra fumarolas y gases.(IGP) |
| Factores De Exposición | Calificación | Breve Explicación |
| Población contenida en un radio de 30 Km (VPI) | 3.9 | 15536 personas (INEI proyección a 2015 basada según el censo del año 2007), Log ₁₀ (15536)=4.2 |
| Población cercana a cursos de agua o valles fluviales | 0 | No registra. |
| Muertes históricas. | 0 | No hay antecedentes o no existen fatalidades. |
| Evacuaciones históricas. | 0 | No hay antecedentes. |
| Exposición de la Aviación local | 2 | Aeropuerto internacional de la Paz, Bolivia (230Km). |
| Exposición de la Aviación regional | 4.2 | Aeropuerto de Tacna, Arica, Arequipa, Juliaca, es de aproximadamente 22831 personas. Log ₁₀ (22831)=4.4. |
| Infraestructura energética. | 1 | Central Hidroeléctrica Aricota. |
| Infraestructura de transporte. | 1 | Carretera binacional Ilo-Moquegua-Desaguadero. |
| Desarrollos urbanos mayores o áreas ecológicamente sensibles. | 1 | Área de conservación Regional Vilacota Maure. (Gobierno Regional Tacna) |

RVR = Factor de Peligro x Factor de Exposición

RVR=12 x 13.6

RVR = 163.1

| VOLCÁN CHACHANI | | |
|---|--------------|--|
| Factores de Peligro | Calificación | Breve Explicación |
| Tipo de Volcán | 1 | Complejo volcánico (Paquereau et al, 2006). |
| Máximo IEV (Índice de Explosividad Volcánica) | 1 | No hay registro. |
| Actividad explosiva en <500 a. | 0 | No se tiene registro. |
| Actividad explosiva mayor en <5000 a. | 0 | No se tiene registro. |
| Recurrencia eruptiva | 1 | En los últimos 100000 años (Siebert et al, 2010). |
| Flujos piroclásticos Holocenos | 0 | No. |
| Flujos de lava Holocenos | 1 | No se tiene registro. |
| Lahares Holocenos | 1 | No se tiene registro. |
| Tsunamis Holocenos | 0 | No. |
| Potenciales explosiones hidrotermales | 0 | Debido a que cuenta con un sistema hidrotermal. |
| Potencial Sector de Colapso | 1 | Si cuenta con sector de colapso (INGEMMET). |
| Fuente primaria de Lahar | 1 | Si tiene casquete glaciar que supere el millón de metros cúbicos de hielo. |
| Actividad sísmica observada | 1 | Si ha mostrado sismicidad bajo el volcán (IGP). |
| Deformación observable de la superficie | 0 | No hay deformación. |
| Fumarola o desgasificación magmática | 0 | Si muestra fumarolas y gases (IGP, INGEMMET). |
| Factores de Exposición | Calificación | Breve Explicación |
| Población contenida en un radio de 30 Km (VPI) | 6.0 | 992867 personas (INEI proyección basada según el censo del año 2007). $\log_{10}(992867)=6.0$ |
| Población cercana a cursos de agua o valles fluviales | 0 | No tiene población que podría ser afectada por un Lahar. |
| Muertes históricas. | 0 | No existe muertes |
| Evacuaciones históricas. | 0 | No hay registro de evacuaciones. |
| Exposición de la Aviación local | 2 | Aeropuerto internacional de Cuzco. |
| Exposición de la Aviación regional | 4.2 | Aeropuerto, Arequipa, Juliaca, Tacna, Arica y Cuzco, es de aproximadamente 15868 personas (CORPAC). $\log_{10}(15868)=4.2$ |
| Infraestructura energética. | 1 | Sí. (SEAL). |
| Infraestructura de transporte. | 1 | Principales vías de la ciudad de Arequipa. |
| Desarrollos urbanos mayores o áreas ecológicamente sensibles. | 1 | Si presenta de mayor desarrollo, se ubica la ciudad de Arequipa. |

RVR = Factor de Peligro x Factor de Exposición

RVR=8 x 15.2

RVR = 121.6

| VOLCAN SARASARA | | |
|---|--------------|--|
| Factores de Peligro | Calificación | Breve Explicación |
| Tipo de Volcán | 1 | Es un volcán de tipo Estratovolcán (Siebert et al. 2010). |
| Máximo IEV (Índice de Explosividad Volcánica) | 1 | Actividad en 1504 (Siebert et al. 2010). |
| Actividad explosiva en <500 a. | 0 | No hay registro. |
| Actividad explosiva mayor en <5000 a. | 1 | Erupciones Subplinianas correspondientes al Pleistoceno Superior (Thouret 2003). |
| Recurrencia eruptiva | 1 | 10 000 años (Kaneoka y Guevara 1984). |
| Flujos piroclásticos Holocenos | 0 | Corresponden al pleistoceno (Fidel et al., 1997; Morche, 1998). |
| Flujos de lava Holocenos | 0 | No en el holoceno. Las lavas existentes corresponden al pleistoceno (Morche 1998). |
| Lahares Holocenos | 0 | No. Ocurrieron en el pleistoceno. (Boletín N°21-Ingemmet y Morche 1998.) |
| Tsunamis Holocenos | 0 | No. |
| Potenciales explosiones hidrotermales | 1 | Existe leve actividad hidrotermal (Morche, 1998). |
| Potencial Sector de Colapso | 1 | Los centros domicos muestran huellas de múltiples colapsos (Fidel et al. 1997). |
| Fuente primaria de Lahar | 0 | Aunque se reconoce círculos glaciares en sus flancos oeste y este (Morche 1998) |
| Actividad sísmica observada | 0 | No presenta. |
| Deformación observable de la superficie | 0 | No tiene. |
| Fumarola o desgasificación magmática | 0 | No presenta. |
| Factores De Exposición | Calificación | Breve Explicación |
| Población contenida en un radio de 30 Km (VPI) | 4.1 | 13673 personas (INEI proyección a 2015 basada según el censo del año 2007). $\log_{10}(13673)=4.1$ |
| Población cercana a cursos de agua o valles fluviales | 0 | No corresponde debido a que no tiene fuente primaria de Lahar. |
| Muertes históricas. | 0 | No hay antecedentes o no existen fatalidades. |
| Evacuaciones históricas. | 0 | No hay registro. |
| Exposición de la Aviación local | 2 | Aeropuerto internacional de la Paz, Bolivia (275 km). |
| Exposición de la Aviación regional | 4.1 | 12855 personas. $\log_{10}(12855)=4.1$ |
| Infraestructura energética. | 1 | Si existen redes eléctricas. |
| Infraestructura de transporte. | 1 | Si existen carreteras. |
| Desarrollos urbanos mayores o áreas ecológicamente sensibles. | 0 | No presenta. |

RVR = Factor de Peligro x Factor de Exposición

RVR=6 x 11.2

RVR = 67.5

| VOLCAN NEVADOS CASIRI | | |
|---|---------------------|---|
| Factores de Peligro | Calificación | Breve Explicación |
| Tipo de Volcán | 1 | Estratovolcanes. (Siebert et al. 2010). |
| Máximo IEV (Índice de Explosividad Volcánica) | 1 | No se tiene información. La última erupción en 1504 (Siebert et al. 2010). |
| Actividad explosiva en <500 a. | 0 | No. La última erupción en 1504 (Siebert et al. 2010) |
| Actividad explosiva mayor en <5000 a. | 0 | No. La última erupción en 1504 (Siebert et al. 2010) |
| Recurrencia eruptiva | 1 | Actividad post glacial < 10 000 años (de Silva et al. 1990) |
| Flujos piroclásticos Holocenos | 1 | Si tiene flujos. De la erupción de 1504 (Siebert et al. 2010). |
| Flujos de lava Holocenos | 0 | No se ha registrado. |
| Lahares Holocenos | 0 | No existen registros de lahares. |
| Tsunamis Holocenos | 0 | No. |
| Potenciales explosiones hidrotermales | 0 | No se cuenta con estudios. |
| Potencial Sector de Colapso | 0 | No cuenta con sector de colapso. |
| Fuente primaria de Lahar | 0 | No cuenta con casquete glaciar. |
| Actividad sísmica observada | 0 | No se cuentan con registros sísmicos |
| Deformación observable de la superficie | 0 | No se ha observado (INGEMMET) |
| Fumarola o desgasificación magmática | 0 | No se han observado fumarolas (IGP) |
| Factores de Exposición | Calificación | Breve Explicación |
| Población contenida en un radio de 30 Km (VPI) | 4.1 | 11461 personas (INEI proyección basada según el censo del año 2007). $\log_{10}(11461)=4.1$ |
| Población cercana a cursos de agua o valles fluviales | 0 | No corresponde debido a que no tiene fuente primario de Lahar. |
| Muertes históricas. | 0 | No hay antecedentes o no existen fatalidades. |
| Evacuaciones históricas. | 0 | No hay antecedentes de evacuaciones. |
| Exposición de la Aviación local | 2 | Aeropuerto internacional de la Paz, Bolivia. |
| Exposición de la Aviación regional | 4.4 | Arequipa, Tacna, La Paz, Juliaca y Arica es de aprox. 22831 personas (CORPAC). $\log_{10}(22831)=4.4$ |
| Infraestructura energética. | 1 | Sí. (SEAL) |
| Infraestructura de transporte. | 1 | Si existe Tacna – La Paz. |
| Desarrollos urbanos mayores o áreas ecológicamente sensibles. | 1 | A 23 km se encuentra la ciudad de Tarata. |

RVR = Factor de Peligro x Factor de Exposición

RVR=4 x 13.4

RVR = 53.7

| VOLCANES DE ANDAHUA | | |
|---|--------------|---|
| Factores de Peligro | Calificación | Breve Explicación |
| Tipo de Volcán | 0 | Volcanes monogenéticos (Delacour, et al., 2007). |
| Máximo IEV (Índice de Explosividad Volcánica) | 0 | Por ser un volcán de tipo monogenético. |
| Actividad explosiva en <500 a. | 0 | No se tiene registro. |
| Actividad explosiva mayor en <5000 a. | 0 | No se tiene registro. |
| Recurrencia eruptiva | 3 | Intervalo de recurrencia esta entre 100-1000 años. (Smithsonian Institution). |
| Flujos piroclásticos Holocenos | 0 | No se tiene registro |
| Flujos de lava Holocenos | 1 | Si tiene flujos de lava (Smithsonian Institution). |
| Lahares Holocenos | 0 | No se tiene registro |
| Tsunamis Holocenos | 0 | No. |
| Potenciales explosiones hidrotermales | 0 | No. No cuenta con sistema hidrotermal. |
| Potencial Sector de Colapso | 0 | No cuenta con un sector de colapso. |
| Fuente primaria de Lahar | 0 | No tiene hielo que supere el millón m3. |
| Actividad sísmica observada | 0 | No tiene actividad sísmica porque son volcanes monogenéticos. |
| Deformación observable de la superficie | 0 | No hay deformación. |
| Fumarola o desgasificación magmática | 0 | Si muestra fumarolas y gases. |
| Factores de Exposición | Calificación | Breve Explicación |
| Población contenida en un radio de 30 Km (VPI) | 4.1 | 13776 personas (INEI proyección basada según el censo del año 2007). $\log_{10}(13776)=4.1$ |
| Población cercana a cursos de agua o valles fluviales | 0 | No tiene población que podría ser afectada por un Lahar. |
| Muertes históricas. | 0 | No existe muertes |
| Evacuaciones históricas. | 0 | Si existen evacuaciones históricas. |
| Exposición de la Aviación local | 0 | Son volcanes monogenéticos, sus erupciones no son explosivas. |
| Exposición de la Aviación regional | 0 | Son volcanes monogenéticos, sus erupciones no son explosivas. |
| Infraestructura energética. | 1 | Sí. (SEAL). |
| Infraestructura de transporte. | 0 | Sí. Carretera Andahua y Chachas. |
| Desarrollos urbanos mayores o áreas ecológicamente sensibles. | 1 | Si presenta. Mina de Orcopampa |

RVR = Factor de Peligro x Factor de Exposición

RVR=4 x 6.1

RVR = 24.6

| VOLCANES DE HUAMBO | | |
|---|--------------|---|
| Factores de Peligro | Calificación | Breve Explicación |
| Tipo de Volcán | 0 | Campo volcánico (Siebert et al. 2010). Monogenético |
| Máximo IEV (Índice de Explosividad Volcánica) | 0 | No registra |
| Actividad explosiva en <500 a. | 0 | No registra |
| Actividad explosiva mayor en <5000 a. | 0 | No registra |
| Recurrencia eruptiva | 3 | No hay información |
| Flujos piroclásticos Holocenos | 0 | No registra |
| Flujos de lava Holocenos | 0 | No registra |
| Lahares Holocenos | 0 | No registra |
| Tsunamis Holocenos | 0 | No. |
| Potenciales explosiones hidrotermales | 0 | No registra |
| Potencial Sector de Colapso | 0 | No registra |
| Fuente primaria de Lahar | 0 | No registra |
| Actividad sísmica observada | 0 | No registra actividad sísmica dentro 20 km del edificio volcánico. |
| Deformación observable de la superficie | 0 | No registra |
| Fumarola o desgasificación magmática | 0 | No muestra fumarolas y gases. |
| Factores De Exposición | Calificación | Breve Explicación |
| Población contenida en un radio de 30 Km (VPI) | 3.5 | 3020 personas (INEI proyección a 2015 basada según el censo del año 2007). $\log_{10}(3020)=3.5$ |
| Población cercana a cursos de agua o valles fluviales | 0 | No corresponde debido a que no tiene fuente primario de Lahar. |
| Muertes históricas. | 0 | No hay antecedentes o no existen fatalidades. |
| Evacuaciones históricas. | 0 | No se registra |
| Exposición de la Aviación local | 0 | Aeropuerto internacional de la Paz, Bolivia (275 km). |
| Exposición de la Aviación regional | 0 | No presenta actividad explosiva |
| Infraestructura energética. | 1 | Si existen infraestructuras de generación, transmisión o distribución de electricidad, gas o petróleo en los 30km del volcán. |
| Infraestructura de transporte. | 0 | no existen carreteras principales en un radio de 30km. |
| Desarrollos urbanos mayores o áreas ecológicamente sensibles. | 1 | Si presenta de mayor desarrollo económico en un radio de 30km. |

RVR = Factor de Peligro x Factor de Exposición

RVR=3 x 5.5

RVR = 16.4

| VOLCAN AUQUIHUATO | | |
|--|---------------------|---|
| Factores de Peligro | Calificació | Breve Explicación |
| Tipo de Volcán | 0 | Es cono de escoria (Siebert et al. 2010). |
| Máximo IEV (Índice de Explosividad Volcánica) | 0 | No se realizó datación radiométrica, por tanto la fecha de la última erupción es desconocida. |
| Actividad explosiva en <500 a. | 0 | No presenta. |
| Actividad explosiva mayor en <5000 a. | 0 | No presenta |
| Recurrencia eruptiva | 0 | No presenta |
| Flujos piroclásticos Holocenos | 0 | No presenta |
| Flujos de lava Holocenos | 1 | Si presenta flujos de lava (Morales. et al. 2016) |
| Lahares Holocenos | 0 | No presenta |
| Tsunamis Holocenos | 0 | No. |
| Potenciales explosiones hidrotermales | 0 | No presenta |
| Potencial Sector de Colapso | 0 | No presenta |
| Fuente primaria de Laahr | 0 | No presenta |
| Actividad sísmica observada | 0 | No presenta |
| Deformación observable de la superficie | 1 | Si existe deformación (Morales A. et al. 2016) |
| Fumarola o desgasificación magmática | 0 | No muestra fumarolas y gases. |
| Factores de Exposición | Calificación | Breve Explicación |
| Población contenida en un radio de 30 Km (VPI) | 4.2 | 92094 personas (INEI proyección basada según el censo del año 2007). $\log_{10}17728=4.2$ |
| Población cercana a cursos de agua o valles fluviales | 0 | No presenta |
| Muertes históricas. | 0 | No hay antecedentes o no existen fatalidades. |
| Evacuaciones históricas. | 0 | No presenta |
| Exposición de la Aviación local | 0 | No presenta, es volcán tipo cono de escoria |
| Exposición de la Aviación regional | 0 | No presenta |
| Infraestructura energética. | 0 | No presenta |
| Infraestructura de transporte. | 0 | No presenta |
| Desarrollos urbanos mayores o áreas eclógicamente sensibles. | 0 | No presenta |

RVR = Factor de Peligro x Factor de Exposición

RVR=2 x 5.2

RVR = 10.5

| VOLCAN PURPURUNI | | |
|---|---------------------|---|
| Factores de Peligro | Calificación | Breve Explicación |
| Tipo de Volcán | 1 | Es un volcán de tipo domo lava (Fuente: De Silva 2007; Siebert et al. 2010). |
| Máximo IEV (Índice de Explosividad Volcánica) | 1 | No hay información. Le corresponde 1 por ser volcán de tipo 1 (estratovolcán). |
| Actividad explosiva en <500 a. | | No hay información |
| Actividad explosiva mayor en <5000 a. | | No hay información |
| Recurrencia eruptiva | | No hay información |
| Flujos piroclásticos Holocenos | | No hay información |
| Flujos de lava Holocenos | | No hay información |
| Lahares Holocenos | | No hay información |
| Tsunamis Holocenos | | No. |
| Potenciales explosiones hidrotermales | | No hay información |
| Potencial Sector de Colapso | | No hay información |
| Fuente primaria de Lahar | | No hay información |
| Actividad sísmica observada | | No hay información |
| Deformación observable de la superficie | | No hay información |
| Fumarola o desgasificación magmática | | No hay información |
| Factores De Exposición | Calificación | Breve Explicación |
| Población contenida en un radio de 30 Km (VPI) | 4.3 | 18031 personas (INEI proyección a 2015 basada según el censo del año 2007). $\log_{10}(18031)=4.3$ |
| Población cercana a cursos de agua o valles fluviales | 0 | No corresponde debido a que no tiene fuente primario de Lahar. |
| Muertes históricas. | 0 | No hay antecedentes o no existen fatalidades. |
| Evacuaciones históricas. | 0 | No hay antecedentes o no existen fatalidades. |
| Exposición de la Aviación local | 2 | Aeropuerto internacional de la Paz, Bolivia. |
| Exposición de la Aviación regional | 4.4 | Aeropuertos de Arequipa, Tacna, La Paz, Juliaca y Arica es de aprox. 22831 personas. $\log_{10}(22831)=4.4$ |
| Infraestructura energética. | 1 | Red eléctrica |
| Infraestructura de transporte. | 1 | Si existe. |
| Desarrollos urbanos mayores o áreas ecológicamente sensibles. | 1 | Área de conservación Vilcanota Maure. |

RVR = Factor de Peligro x Factor de Exposición

RVR=2 x 13.7

RVR = 27.3

| VOLCAN QUIMSACHATA | | |
|---|--------------|--|
| Factores de Peligro | Calificación | Breve Explicación |
| Tipo de Volcán | 1 | Domo de lava (Siebert et al. 2010). |
| Máximo IEV (Índice de Explosividad Volcánica) | 0 | No registra |
| Actividad explosiva en <500 a. | 0 | No registra |
| Actividad explosiva mayor en <5000 a. | 0 | No registra |
| Recurrencia eruptiva | 2 | Intervalo de recurrencia esta entre 1000-5000 años. (Bustamante, Scorzelli y Mattievich, 1987). |
| Flujos piroclásticos Holocenos | 0 | No registra |
| Flujos de lava Holocenos | 0 | No registra |
| Lahares Holocenos | 0 | No registra |
| Tsunamis Holocenos | 0 | No. |
| Potenciales explosiones hidrotermales | 0 | No registra |
| Potencial Sector de Colapso | 0 | No registra |
| Fuente primaria de Lahar | 0 | No tiene casquera de hielo (>1 millón m3). |
| Actividad sísmica observada | 0 | No registra (IGP) |
| Deformación observable de la superficie | 0 | No tiene. |
| Fumarola o desgasificación magmática | 0 | No muestra fumarolas y gases (IGP). |
| Factores de Exposición | Calificación | Breve Explicación |
| Población contenida en un radio de 30 Km (VPI) | 5.1 | 127741 personas (INEI proyección basada según el censo del año 2007). $\log_{10}(127741)=5.1$ |
| Población cercana a cursos de agua o valles fluviales | 0 | No corresponde debido a que no tiene fuente primaria de Lahar. |
| Muertes históricas. | 0 | No hay antecedentes o no existen fatalidades. |
| Evacuaciones históricas. | 0 | No existe evacuación. |
| Exposición de la Aviación local | 2 | Aeropuerto inter. de la Cuzco y Arequipa. |
| Exposición de la Aviación regional | 4.1 | Aeropuerto Arequipa, Cuzco, Juliaca y Puerto Maldonado, población aprox. 13653 personas (CORPAC). $\log_{10}(13984)=4.1$ |
| Infraestructura energética. | 1 | Sí. Torres de alta tensión (IGP) |
| Infraestructura de transporte. | 1 | Sí. Carretera Sicuani Cusco. |
| Desarrollos urbanos mayores o áreas ecológicamente sensibles. | 1 | Sí. Ruinas de Raqchi y Sicuani. |

RVR = Factor de Peligro x Factor de Exposición

RVR=3 x 14.3

RVR = 42.8

Anexo N°2

VOLCANES ACTIVOS DE PERÚ Y SU UBICACIÓN GEOGRÁFICA

| VOLCAN | REGION | LATITUD | LONGITUD | ELEVACION |
|-------------------|---------------|----------------|-----------------|------------------|
| Quimsachata | Cusco | -14.2 | -71.33 | 3923 |
| Cerro Auqui huato | Ayacucho | -15.07 | -73.18 | 4980 |
| Sara Sara | Ayacucho | -15.33 | -73.45 | 5522 |
| Coropuna | Arequipa | -15.52 | -72.65 | 6377 |
| Andahua-Orcopampa | Arequipa | -15.42 | -72.33 | 4713 |
| Huambo | Arequipa | -15.83 | -72.13 | 4550 |
| Sabancaya | Arequipa | -15.78 | -71.85 | 5967 |
| Nevado Chachani | Arequipa | -16.191 | -71.53 | 6057 |
| Purpuruni | Tacna | -17.32 | -69.90 | 5315 |
| El Misti | Arequipa | -16.294 | -71.409 | 5822 |
| Ubinas | Moquegua | -16.355 | -70.903 | 5672 |
| Huaynaputina | Moquegua | -16.608 | -70.85 | 4850 |
| Ticsani | Moquegua | -16.755 | -70.595 | 5408 |
| Tutupaca | Tacna | -17.026 | -70.372 | 5801 |
| Yucamane | Tacna | -17.184 | -70.196 | 5495 |
| Nevados Casiri | Tacna | -17.47 | -69.813 | 5650 |

Anexo N°3

RANKING DE PUNTAJE TOTAL DE FACTORES DE PELIGRO, FACTORES DE EXPOSICIÓN Y RIESGO VOLCANICO RELATIVO

| VOLCÁN | Tipo de Volcán | Máximo IEV | Actividad Explosiva en <500a. | Actividad Explosiva en <5000a. | Recurrencia Eruptiva | Flujo Piroclastico Holoceno | Lahares Holoceno | Flujo de Lava Holoceno | Pot. Explosión Hidrotermal | Potencial Sector de Colapso | Fuente primaria de Lahar | Actividad Sísmica observada | Deformación observada | Fumarola o desgasificación magmática | N° Habitantes contenida en un radio de 30 Km. (Distritos) | Logaritmo 10 de Población contenida en 30km | Logaritmo 10 de Población cercana a cursos de agua o | Muertes históricas | Evacuaciones históricas | Exposición de la aviación local | Logaritmo de la exposición a la aviación regional | Infraestructura Energética | Infraestructura de transporte | Desarrollo Urbano o áreas ecológicamente sensibles | FACTOR DE PELIGRO | FACTOR DE EXPOSICION | RIESGO VOLCANICO RELATIVO (RVR) | PUNTAJE TOTAL DE RIESGO AERONAUTICO |
|--------------|----------------|------------|-------------------------------|--------------------------------|----------------------|-----------------------------|------------------|------------------------|----------------------------|-----------------------------|--------------------------|-----------------------------|-----------------------|--------------------------------------|---|---|--|--------------------|-------------------------|---------------------------------|---|----------------------------|-------------------------------|--|-------------------|----------------------|---------------------------------|-------------------------------------|
| Sabancaya | 1 | 1 | 1 | 0 | 3 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 12,745 | 4.1 | 3.3 | 0 | 1 | 2 | 4.2 | 1 | 1 | 1 | 14.0 | 17.6 | 246.0 | 31.0 |
| Ubinas | 1 | 2 | 1 | 1 | 4 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 20,922 | 4.3 | 0.0 | 0 | 1 | 2 | 4.4 | 1 | 1 | 1 | 15.0 | 14.7 | 220.2 | 50.9 |
| Misti | 1 | 2 | 0 | 1 | 3 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 973,266 | 6.0 | 0.0 | 0 | 0 | 2 | 4.2 | 1 | 1 | 1 | 13.0 | 15.2 | 197.4 | 37.2 |
| Coropuna | 1 | 1 | 0 | 1 | 2 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 23,597 | 4.4 | 4.8 | 0 | 0 | 2 | 4.1 | 1 | 0 | 1 | 11.0 | 17.3 | 190.8 | 24.5 |
| Yucamane | 1 | 1 | 1 | 1 | 2 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 15,536 | 4.2 | 0.0 | 0 | 0 | 2 | 4.4 | 1 | 1 | 1 | 12.0 | 13.6 | 163.1 | 32.0 |
| Tutupaca | 1 | 1 | 1 | 1 | 3 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 15,217 | 4.2 | 0.0 | 0 | 0 | 2 | 4.4 | 1 | 1 | 1 | 12.0 | 13.5 | 162.5 | 38.2 |
| Huaynaputina | 1 | 2 | 1 | 1 | 2 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 22,579 | 4.4 | 0.0 | 1 | 1 | 2 | 4.4 | 1 | 1 | 0 | 11.0 | 14.7 | 161.8 | 38.2 |
| Ticsani | 1 | 1 | 1 | 0 | 2 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 14,838 | 4.2 | 0.0 | 0 | 0 | 2 | 4.4 | 1 | 1 | 1 | 10.0 | 13.5 | 135.3 | 25.4 |
| Chachani | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 992,867 | 6.0 | 0.0 | 0 | 0 | 2 | 4.2 | 1 | 1 | 1 | 8.0 | 15.2 | 121.6 | 12.4 |
| Sara Sara | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 13,673 | 4.1 | 0.0 | 0 | 0 | 2 | 4.1 | 1 | 0 | 0 | 6.0 | 11.2 | 67.5 | 18.3 |
| Casiri | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 11,461 | 4.1 | 0.0 | 0 | 0 | 2 | 4.4 | 1 | 1 | 1 | 4.0 | 13.4 | 53.7 | 12.7 |
| Quimsachata | 1 | 0 | 0 | 0 | 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 127,741 | 5.1 | 0.0 | 0 | 0 | 2 | 4.1 | 1 | 1 | 1 | 3.0 | 14.3 | 42.8 | 12.3 |
| Purpuruni | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 18,031 | 4.3 | 0.0 | 0 | 0 | 2 | 4.4 | 1 | 1 | 1 | 2.0 | 13.7 | 27.3 | 6.4 |
| Andahua | 0 | 0 | 0 | 0 | 3 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 13,776 | 4.1 | 0.0 | 0 | 0 | 0 | 0.0 | 1 | 0 | 1 | 4.0 | 6.1 | 24.6 | 0.0 |
| Huambo | 0 | 0 | 0 | 0 | 3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 3,020 | 3.5 | 0.0 | 0 | 0 | 0 | 0.0 | 1 | 0 | 1 | 3.0 | 5.5 | 16.4 | 0.0 |
| Auquihuato | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 17,728 | 4.2 | 0.0 | 0 | 0 | 0 | 0.0 | 1 | 0 | 0 | 2.0 | 5.2 | 10.5 | 0.0 |

Anexo N°4
POBLACIONES POR DISTRITO AFECTADAS POR EL RIESGO VOLCÁNICO

| N° | Región | Provincia | Distrito | Población (Inei2007 Proyecc. 2015) | Volcán | Otro Fenómeno |
|----|----------|-----------|-------------------------------|------------------------------------|--------------------|---------------|
| 1 | Arequipa | Arequipa | Alto Selva Alegre | 82,412 | Misti y Chachani | |
| 2 | Arequipa | Arequipa | Arequipa | 54,095 | Misti y Chachani | |
| 3 | Arequipa | Arequipa | Cayma | 91,802 | Misti y Chachani | |
| 4 | Arequipa | Arequipa | Cerro Colorado | 148,164 | Misti y Chachani | |
| 5 | Arequipa | Arequipa | Characato | 9,288 | Misti | |
| 6 | Arequipa | Arequipa | Chiguata | 2,940 | Misti y Chachani | |
| 7 | Arequipa | Arequipa | Jacobo Hunter | 48,326 | Misti y Chachani | |
| 8 | Arequipa | Arequipa | Jose Luis Bustamante Y Rivero | 76,711 | Misti y Chachani | |
| 9 | Arequipa | Arequipa | Mariano Melgar | 52,667 | Misti y Chachani | |
| 10 | Arequipa | Arequipa | Miraflores | 48,677 | Misti y Chachani | |
| 11 | Arequipa | Arequipa | Mollebaya | 1,868 | Misti | |
| 12 | Arequipa | Arequipa | Paucarpata | 124,755 | Misti y Chachani | |
| 13 | Arequipa | Arequipa | Pocsi | 547 | Misti | |
| 14 | Arequipa | Arequipa | Polobaya | 1,477 | Misti | |
| 15 | Arequipa | Arequipa | Quequeña | 1,376 | Misti | |
| 16 | Arequipa | Arequipa | Sabandia | 4,136 | Misti y Chachani | |
| 17 | Arequipa | Arequipa | Sachaca | 19,581 | Misti y Chachani | |
| 18 | Arequipa | Arequipa | San Juan De Tarucani | 2179 | Ubinas | |
| 19 | Arequipa | Arequipa | Selva Alegre | 82412 | Misti y Chachani | |
| 20 | Arequipa | Arequipa | Socabaya | 78,135 | Misti y Chachani | |
| 21 | Arequipa | Arequipa | Tiabaya | 14,768 | Misti y Chachani | |
| 22 | Arequipa | Arequipa | Uchumayo | 12,436 | Chachani | |
| 23 | Arequipa | Arequipa | Yanahuara | 25,483 | Misti y Chachani | |
| 24 | Arequipa | Arequipa | Yarabamba | 1,125 | Misti | |
| 25 | Arequipa | Arequipa | Yura | 25367 | Chachani | |
| 26 | Arequipa | Camana | Camana | 14477 | Coropuna | Lahar |
| 27 | Arequipa | Camaná | José Maria Quimper | 4134 | Coropuna | Lahar |
| 28 | Arequipa | Camana | Mariano Nicolás Valcarcel | 6890 | Coropuna | Lahar |
| 29 | Arequipa | Camana | Nicolas De Pierola | 6310 | Coropuna | Lahar |
| 30 | Arequipa | Camana | Ocoña | 4810 | Coropuna | Lahar |
| 31 | Arequipa | Camana | Samuel Pastor | 15294 | Coropuna | Lahar |
| 32 | Arequipa | Caraveli | Cahuacho | 906 | Sara Sara | |
| 33 | Arequipa | Castilla | Andahua | 1152 | Coropuna y Andahua | |
| 34 | Arequipa | Castilla | Aplao | 8844 | Coropuna | Lahar |
| 35 | Arequipa | Castilla | Ayo | 396 | Sabancaya | Lahar |
| 36 | Arequipa | Castilla | Chachas | 1720 | Andahua | |

| N° | Región | Provincia | Distrito | Población (Inei2007 Proyección 2015) | Volcán 1 | Otro Fenómeno |
|----|----------|----------------------|----------------------------|---|------------------------|------------------|
| 37 | Arequipa | Castilla | Chilcaymarca | 1243 | Andahua | |
| 38 | Arequipa | Castilla | Choco | 1009 | Sabancaya | |
| 39 | Arequipa | Castilla | Machahuay | 723 | Coropuna | |
| 40 | Arequipa | Castilla | Orcopampa | 9661 | Andahua | |
| 41 | Arequipa | Castilla | Pampacolca | 2713 | Coropuna | |
| 42 | Arequipa | Castilla | Tipan | 522 | Coropuna | Lahar |
| 43 | Arequipa | Castilla | Uñon | 442 | Sabancaya | Lahar |
| 44 | Arequipa | Castilla | Uraca | 7216 | Coropuna | Lahar |
| 45 | Arequipa | Castilla | Viraco | 1712 | Coropuna | |
| 46 | Arequipa | Caylloma | Achoma | 908 | Sabancaya | |
| 47 | Arequipa | Caylloma | Cabanaconde | 2406 | Sabancaya y Huambo | |
| 48 | Arequipa | Caylloma | Huambo | 614 | Sabancaya y Huambo | |
| 49 | Arequipa | Caylloma | Huanca | 1450 | Sabancaya | |
| 50 | Arequipa | Caylloma | Ichupampa | 663 | Sabancaya | |
| 51 | Arequipa | Caylloma | Lari | 1526 | Sabancaya | |
| 52 | Arequipa | Caylloma | Lluta | 1275 | Sabancaya | |
| 53 | Arequipa | Caylloma | Maca | 723 | Sabancaya | |
| 54 | Arequipa | Caylloma | Madrigal | 498 | Sabancaya | |
| 55 | Arequipa | Caylloma | Tapay | 545 | Sabancaya | |
| 56 | Arequipa | Caylloma | Yanque | 2137 | Sabancaya | |
| 57 | Arequipa | Condesuyos | Andaray | 670 | Coropuna | |
| 58 | Arequipa | Condesuyos | Cayarani | 3159 | Coropuna | |
| 59 | Arequipa | Condesuyos | Chichas | 672 | Coropuna | |
| 60 | Arequipa | Condesuyos | Chuquibamba | 3346 | Coropuna | |
| 61 | Arequipa | Condesuyos | Rio Grande | 2751 | Coropuna | Lahar |
| 62 | Arequipa | Condesuyos | Salamanca | 879 | Coropuna | |
| 63 | Arequipa | Condesuyos | Yanaquihua | 5820 | Coropuna | |
| 64 | Arequipa | La Union | Charcana | 556 | AuquiHuato | |
| 65 | Arequipa | La Union | Pampamarca | 1,265 | AuquiHuato | |
| 66 | Arequipa | La Union | Quechualla | 236 | AuquiHuato | |
| 67 | Arequipa | La Union | Sayla | 574 | Sara Sara y AuquiHuato | |
| 68 | Arequipa | La Union | Tauria | 323 | Sara Sara | |
| 69 | Ayacucho | Parinacochas | Coronel Castañeda | 1,872 | AuquiHuato | |
| 70 | Ayacucho | Parinacochas | Pacapausa | 2,874 | AuquiHuato | |
| 71 | Ayacucho | Parinacochas | Puyusca | 2,076 | Sara Sara | |
| 72 | Ayacucho | Parinacochas | San Francisco De Ravacayco | 753 | AuquiHuato | |
| 73 | Ayacucho | Paucar Del Sara Sara | Colta | 1,140 | Sara Sara y AuquiHuato | |
| 74 | Ayacucho | Paucar Del Sara Sara | Corculla | 455 | Sara Sara y AuquiHuato | |
| 75 | Ayacucho | Paucar Del Sara Sara | Lampa | 2,528 | Sara Sara y AuquiHuato | |
| 76 | Ayacucho | Paucar Del Sara Sara | Marcabamba | 773 | Sara Sara y AuquiHuato | |
| 77 | Ayacucho | Paucar Del Sara Sara | Oyolo | 1,195 | AuquiHuato | |
| 78 | Ayacucho | Paucar Del Sara Sara | Pararca | 660 | Sara Sara | |
| 79 | Ayacucho | Paucar Del Sara Sara | Pausa | 2,792 | Sara Sara y AuquiHuato | |
| 80 | Ayacucho | Paucar Del Sara Sara | San Javier De Alpabamba | 538 | Sara Sara y AuquiHuato | |
| 81 | Ayacucho | Paucar Del Sara Sara | San Jose De Ushua | 177 | Sara Sara y AuquiHuato | |

| N° | Región | Provincia | Distrito | Población (Inei2007 Proyección 2015) | Volcán 1 | Otro Fenómeno |
|-----|----------|----------------------|-------------------|--------------------------------------|--------------------------------|---------------|
| 82 | Ayacucho | Paucar Del Sara Sara | Sara Sara | 731 | Sara Sara | |
| 83 | Moquegua | Mariscal Nieto | Carumas | 5602 | Huaynaputina y Ticsani | |
| 84 | Moquegua | Mariscal Nieto | Cuchumbaya | 2177 | Huaynaputina y Ticsani | |
| 85 | Moquegua | Mariscal Nieto | San Cristobal | 4058 | Huaynaputina y Ticsani | |
| 86 | Moquegua | Sanchez Cerro | Chojata | 2573 | Ubinas y Huaynaputina | |
| 87 | Moquegua | Sanchez Cerro | Coalaque | 1125 | Ubinas y Huaynaputina | |
| 88 | Moquegua | Sanchez Cerro | Lloque | 1975 | Ubinas | |
| 89 | Moquegua | Sanchez Cerro | Matalaque | 1187 | Ubinas y Huaynaputina | |
| 90 | Moquegua | Sanchez Cerro | Omate | 4447 | Ubinas y Huaynaputina | |
| 91 | Moquegua | Sanchez Cerro | Puquina | 2521 | Misti | |
| 92 | Moquegua | Sanchez Cerro | Quinistaquillas | 1410 | Ubinas y Huaynaputina | |
| 93 | Moquegua | Sanchez Cerro | Ubinas | 3649 | Ubinas | |
| 94 | Moquegua | Sanchez Cerro | Yunga | 2377 | Ubinas | |
| 95 | Puno | El Collao | Capazo | 2203 | Casiri y Purpuruni | |
| 96 | Puno | El Collao | Santa Rosa | 7735 | Tutupaca, Yucamane y Purpuruni | |
| 97 | Tacna | Candarave | Cairani | 1301 | Tutupaca y Yucamane | |
| 98 | Tacna | Candarave | Camilaca | 1514 | Tutupaca y Yucamane | |
| 99 | Tacna | Candarave | Candarave | 3001 | Tutupaca y Ticsani | |
| 100 | Tacna | Candarave | Curibaya | 180 | Yucamane | |
| 101 | Tacna | Candarave | Huanuara | 898 | Tutupaca y Yucamane | |
| 102 | Tacna | Candarave | Quilahuani | 1201 | Yucamane | |
| 103 | Tacna | Tacna | Pachia | 1964 | Casiri | |
| 104 | Tacna | Tacna | Palca | 1669 | Casiri y Purpuruni | |
| 105 | Tacna | Tarata | Estique | 710 | Casiri y Purpuruni | |
| 106 | Tacna | Tarata | Estique-Pampa | 666 | Casiri | |
| 107 | Tacna | Tarata | Heroes Albarracin | 655 | Yucamane | |
| 108 | Tacna | Tarata | Sitajara | 697 | Yucamane y Purpuruni | |
| 109 | Tacna | Tarata | Susapaya | 768 | Tutupaca, Yucamane y Purpuruni | |
| 110 | Tacna | Tarata | Tarata | 3252 | Casiri y Purpuruni | |
| 111 | Tacna | Tarata | Tarucachi | 410 | Casiri y Purpuruni | |
| 112 | Tacna | Tarata | Ticaco | 587 | Yucamane, Casiri y Purpuruni | |
| 113 | Cusco | Canchis | Pitumarca | 7506 | Quimsachata | |
| 114 | Cusco | Canchis | Checacupe | 5000 | Quimsachata | |
| 115 | Cusco | Acomayo | Acopia | 2379 | Quimsachata | |
| 116 | Cusco | Acomayo | Mosoc Llacta | 2287 | Quimsachata | |
| 117 | Cusco | Canchis | Combapata | 5394 | Quimsachata | |
| 118 | Cusco | Canchis | San Pablo | 4684 | Quimsachata | |
| 119 | Cusco | Canas | Pampamarca | 2003 | Quimsachata | |
| 120 | Cusco | Canchis | Tinta | 5626 | Quimsachata | |
| 121 | Cusco | Canchis | San Pedro | 2804 | Quimsachata | |
| 122 | Cusco | Canchis | Sicuani | 59894 | Quimsachata | |
| 123 | Cusco | Canas | Tupac Amaru | 2868 | Quimsachata | |
| 124 | Cusco | Canas | Yanaoca | 9976 | Quimsachata | |
| 125 | Cusco | Canas | Langui | 2467 | Quimsachata | |

| N° | Región | Provincia | Distrito | Población (Inei2007 Proyección 2015) | Volcán 1 | Otro Fenóme no |
|-----|--------|-----------|-----------|---|-------------|----------------------|
| 126 | Cusco | Canas | Quehue | 3606 | Quimsachata | |
| 127 | Cusco | Canchis | Marangani | 11247 | Quimsachata | |