

DIRECCIÓN DE GEOLOGÍA AMBIENTAL Y RIESGO GEOLÓGICO

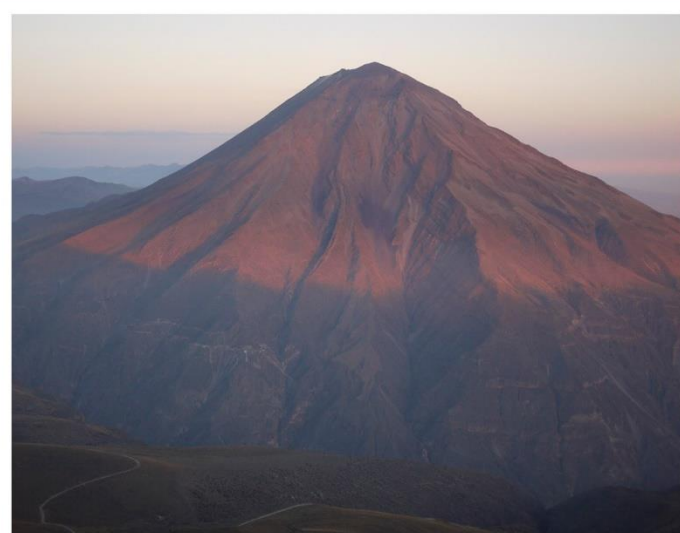
Informe Técnico N° A6950

EVALUACIÓN DE LA ACTIVIDAD DE LOS VOLCANES MISTI Y COROPUNA

Región Arequipa

Provincia Arequipa y Castilla

Distrito Miraflores, Mariano melgar, Chiguata y Viraco



OCTUBRE
2019

INDICE DE CONTENIDOS

RESUMEN

1. INTRODUCCIÓN	2
1.1. Redes de Monitoreo volcánico en el volcán Misti y Coropuna	2
2. SISMOLOGIA VOLCANICA EN EL VOLCÁN MISTI	3
2.1. Operatividad de las Estaciones de Sismología Volcánica	4
2.2. Actividad Sísmica Observada.....	5
2.3. Análisis Estadístico	6
2.4. Energía Sísmica Liberada	7
2.5. Monitoreo de Cambios de Velocidad y Cambios Estructurales	8
2.5.1. Método del Ruido Sísmico.....	8
2.5.2. Calculo de las Funciones de Cross-correlación del Volcán Misti.....	8
2.5.3. Cambios de Velocidad y Estructurales del Volcán Misti.....	9
3. OBSERVACIONES VISUALES DEL VOLCAN MISTI	10
3.1. Características de las Emisiones.....	10
4. OBSERVACIONES VISUALES EN EL VOLCAN COROPUNA	12
5. DEFORMACION VOLCANICA EN LOS VOLCANES MISTI Y COROPUNA	14
5.1. Implementación de Redes de Monitoreo y Procesamiento de Datos	15
5.2. Adquisición, Procesamiento y Evaluación Primaria de Datos	15
5.3. Resultados del Monitoreo GNSS en el Volcán Misti.....	16
5.4. Series Temporales y Deformaciones Asociados	16
5.5. Mapa de Vectores de Desplazamiento de los Volcanes Misti y Coropuna	17
6. EVALUACION DE FUENTES TERMALES EN LOS VOLCANES MISTI Y COROPUNA	18
6.1. Monitoreo de Fuentes Termales del Misti	18
6.2. Monitoreo de Fuentes Termales del Coropuna	20
7. CONCLUSIONES	22
8. RECOMENDACIONES	23
9. BIBLIOGRAFIAS	24

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Distribución de la red para una vigilancia permanente y continua a). Red de monitoreo volcán Misti y b). Red de vigilancia volcán Coropuna	3
Figura 2.1. Estaciones sísmicas con transmisión en tiempo real, a). Estación de sismología volcánica MST01, ubicado en el flanco sur y b). Estación de sismología volcánica MST02, ubicado en el flanco norte.	4
Figura 2.2. Periodo de funcionamiento de las estaciones de sismología volcánica MST01 y MST02 del volcán Misti, durante el 2018.	5
Figura 2.3. Evento Volcano-tectónico VT, registrado el 14 de agosto de 2018, componente Vertical.	5
Figura 2.4. Evento Largo Periodo (LP), registrado el 24 de julio de 2018, componente Vertical.	6
Figura 2.5. Evento Tornillo TOR, registrado el 28 de febrero de 2018, componente Vertical.	6
Figura 2.6. Histogramas mostrando la actividad sísmica del volcán Misti, registrado durante el 2018. VT: evento Volcano-Tectónico, asociado al fracturamiento de rocas. LP: evento de Largo Periodo, asociado a la circulación de fluidos. TOR: evento Tornillo, asociado a la resonancia de fluidos.	7
Figura 2.7. Energía sísmica liberada del volcán Misti para el 2018. VT: sismo Volcano-tectónico, asociado al fracturamiento de rocas y LP: sismo de largo periodo.	8
Figura 2.8. Funciones de cross-correlación (FCC) diarias calculadas en la banda de frecuencias 0.1 - 1 Hz, entre los componentes Z-E de la estación MST01 durante el 2018 y su respectiva forma de onda promedio (lado izquierdo).	9
Figura 2.9. a) Cambios de velocidad (dv/v) calculados para las FCC de las componentes Z-E de la estación MST01 [0.1- 1 Hz]. b) Serie temporal de los coeficientes de correlación (CC) con su respectivo código de color.	10
Figura 3.1. Monitoreo visual de las emisiones fumarólicas durante el 2018.	11
Figura 3.2. Diagrama de rosas mostrando las direcciones predominantes de las emisiones fumarólicas del Misti, durante el año 2018.	11
Figura 3.3. Fotos de las emisiones de gases y vapor de agua, (izquierda) de 700 msc, 26 de enero del 2018. (derecha) de 350 msc, el 09 de febrero del 2018.	12
Figura 3.4. Foto de las emisiones de gases y vapor de agua, (izquierda) de 500 msc, 18 de junio del 2018. (derecha) de 350 msc, el 19 de junio del 2018.	12
Figura 3.5. Foto de las emisiones de gases y vapor de agua, de 500 msc, 18 de junio del 2018.	12
Figura 4.1. Vista del flanco norte del volcán Coropuna, desde el sector Alcco Llacta. Vista del instante en que el fenómeno manifiesta cambios visibles en la superficie de una columna de humo blanco que se eleva por encima de la superficie.	13
Figura 4.2. Vista del flanco Norte, a la altura de la zona SUPAURA, durante julio del 2017 no se han observado ninguna emisión de gases o vapor de agua.	134
Figura 4.3. Vista del flanco norte, vista desde la zona de SUPAURA, durante noviembre del 2018, no se visualizado ninguna anomalía en este flanco.	134
Figura 4.4. Vista del flanco oeste, durante la campaña de julio del 2017, en este sector no se han visualizado anomalías en el volcán, altura de 5320 m.s.n.m.	134
Figura 5.1. Periodos de registro y operación de la estación GNSS MTAB durante el año 2018.	16
Figura 5.2. Series de temporales de deformación observado en la estación GNSS MTAB ubicado en el flanco Norte del volcán, la línea roja es la línea de tendencia de la serie.	16
Figura 5.3. Mapa de vectores de desplazamiento, los vectores indican el desplazamiento de cada punto, a). Vector de desplazamiento del punto GNSS MTAB, volcán Misti, b). Vector de desplazamiento de puntos temporales GNSS en el volcán Coropuna.	17
Figura 6.1. Resultado de los análisis químicos de las aguas de las fuentes CHV, JES, BED, TIN, UMA, TUX, AGS, en el volcán Misti.	19
Figura 6.2. Resultado de los análisis químicos de las aguas de las fuentes CR1, CR2, CR3, CR4, CR5, CR6 y CR8, en el volcán Coropuna.	219

ÍNDICE DE CUADROS

Tabla 2.1. Equipos de monitoreo sísmico, distribuidos en diferentes sectores del volcán..	219
--	-----

RESUMEN

Los cambios en la morfología y la dinámica interna de los volcanes Misti y Coropuna, durante el periodo de evaluación 2018, fue observado por el Observatorio Vulcanológico del INGEMMET (OVI) temporalmente (Volcán Coropuna), permanente y continuamente a través de las técnicas de la sismología volcánica, geoquímica de gases volcánicos, deformación volcánica, y observaciones visuales del volcán y de manera interrumpida, a fin de entender los procesos internos de estos dos sistemas volcánicos, así como los movimientos de los magmas. La naturaleza de cada sistema volcánico es muy diferente y variable en cada región, por esas consideraciones un cambio en la dinámica interna del volcán no es signo inequívoco de una erupción en el corto plazo, ya que se existen sistemas volcánicos que han mostrado una nula o muy pequeños cambios en su morfología y variaciones internas que han terminado en una erupción, caso del volcán Calbuco (Chile). Es de importancia contar con más técnicas de monitoreo que permitan mejorar al entendimiento de un volcán, no basta una técnica para determinar el estado de un volcán. En general durante el 2018 el volcán Misti presento una actividad sísmica baja, con una tasa de ocurrencia de 22 sismos por día (siendo esta la más alta durante el año), mientras las alturas observadas normalmente por las mañanas de algunas emisiones no superaron los 500 msc (metros sobre el cráter del volcán), así como la deformación volcánica no ha observado cambios en la morfología en ambos volcanes (Misti y Coropuna), el análisis de las fuentes termales en el Misti y Coropuna no han mostrado cambios significativos en su actividad, las mediciones de temperatura en la fumarolas del Misti han mostrado variaciones entre 24.5°C a 33.8°C. Actualmente ambos volcanes se encuentran con una baja actividad, evaluados desde el punto de vista de su peligrosidad que representan y que se espera ampliar la red de monitoreo para ajustar mejor las tendencias y las variaciones anuales.

1. INTRODUCCIÓN

El objetivo del Observatorio Vulcanológico del INGEMMET será siempre el de evaluar los volcanes más activos del Perú, siendo esta una de las herramientas más importante para estudiar los cambios en la actividad volcánica, que permite entender con anterioridad cuando y como ocurrirá una erupción. En el sur del Perú los volcanes se clasifican de acuerdo a un ranking, el cual fue adaptado al modelo empleado por el Servicio geológico de los Estados Unidos (USGS) que es denominado como National Volcano Early Warning System (NVEWS, Ewert et al., 2005), que determina el grado de peligrosidad que representa un volcán, este ranking clasifica a los volcanes Misti y Coropuna entre los potencialmente de MUY ALTO peligro, el Misti porque en sus valles y zonas bajas se sitúa la ciudad de Arequipa, con una población de alrededor de 3 millones de habitantes, y el Coropuna porque presenta un casquete glaciar de gran volumen que cubre hasta la parte media del volcán. Debido a esta caracterización el OVI ha ratificado una evaluación continua a través de las diferentes técnicas (sismología volcánica, geoquímica de gases volcánicos, deformación volcánica, y observaciones visuales del volcán) a fin de identificar los patrones de cambios en la dinámica interna y la morfología del volcán. Actualmente la evaluación de ambos volcanes se realiza con un monitoreo básico, según el ranking, donde el Misti cuenta con 02 equipos sísmicos y 01 estación GNSS, así como 01 cámara de vigilancia y 02 puntos de monitoreo del gradiente térmico, mientras en el Coropuna, únicamente se realizan campañas temporales de mediciones tanto para GNSS y mediciones de fuentes termales. Actualmente se tiene un equipo para medición del gradiente térmico de las aguas termales ubicado en lado sur del volcán Coropuna.

1.1. Redes de Monitoreo volcánico en el volcán Misti y Coropuna

La información disponible de cada volcán y su grado de peligrosidad, determina el nivel de monitoreo a realizarse. Actualmente el OVI realiza el monitoreo básico en el volcán Misti en base a 02 estaciones sísmicas y 01 una estación GNSS distribuidos en el flanco norte MTS02 y MTAB y en el flanco sur MST01 (sísmica), ambas de registro continuo, así mismo se tiene 06 puntos GNSS temporales distribuidos en el flanco sur y 05 bases de medición EDM, las cuales este año no fueron programadas. Además, se tiene 02 estaciones de registro de temperatura para las fumarolas ubicado en cráter del Misti denominados MSt-F1 y MSt-F2 y una cámara de video vigilancia ubicado en el Observatorio Pedro Paulet de la NASA (Figura 1.1a). El Coropuna es vigilado en base a 6 puntos GNSS de registro temporal distribuidos en diferentes sectores del volcán (Figura 1.1b) y una estación de registro de temperatura (CR5) ubicado en el sector de UNRO flanco sur del volcán, así como 06 puntos de muestreo de aguas termales distribuidos en diferentes sectores del volcán.

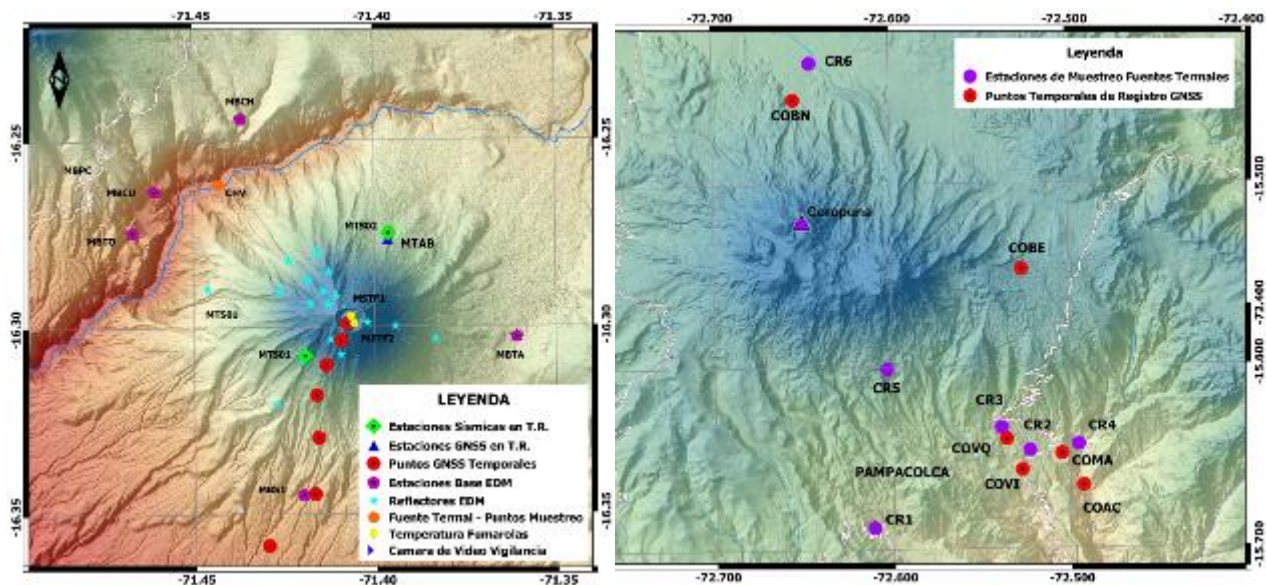


Figura 1.1. Distribución de la red para una vigilancia permanente y continua a). Red de monitoreo volcán Misti y b). Red de vigilancia volcán Coropuna

Se posee data GNSS para el Coropuna desde el 2012, 2013, 2015, 2016, 2017 y 2018, obteniendo una data anualmente. Para el procesamiento, análisis e interpretación se emplea el software TBC (Trimble Business Center) de la marca TRIMBLE, que permite obtener soluciones de las posiciones de las tres componentes.

2. SISMOLOGIA VOLCANICA EN EL VOLCÁN MISTI

El monitoreo sísmico en el volcán Misti durante el 2018, se desarrolló con dos estaciones sísmicas en tiempo real MST01 y MST02, la primera se tomó como estación de referencia, estas estaciones cuentan con un sensor sísmico de banda ancha, marca GURALP, modelo CMG-6TD. Las especificaciones de dicha estación se muestran en la tabla 2.1, los datos son registrados a 100 muestras por segundo por canal, en un rango de frecuencias de 30s a 100Hz

Tabla 2.1. Equipos de monitoreo sísmico, distribuidos en diferentes sectores del volcán.

Estación	Fecha de instalación	Lugar	Sector	Componente
MST01	15/03/2013	Flanco sur	Campamento Pirámide	3C
MST02	10/11/2017	Flanco norte	Aguada Blanca	3C

Cada estación sísmica en tiempo real está conformada por 01 sensor sísmico y 01 digitalizador, integrados, 01 antena GPS para la calibración del tiempo, 01 batería de 12 V, 01 panel solar, un regulador de voltaje, y 01 set de telemetría para la transmisión de la información (Figura 2.1a y 2.1b). Estos instrumentos están debidamente protegidos de las inclemencias del tiempo y están instalados dentro de casetas metálicas, para la prevención ante posibles actos vandálicos.



Figura 2.1. Estaciones sísmicas con transmisión en tiempo real, a). Estación de sismología volcánica MST01, ubicada en el flanco sur y b). Estación de sismología volcánica MST02, ubicada en el flanco norte.

2.1. Operatividad de las Estaciones de Sismología Volcánica

La figura 2.2 muestra la operatividad de las estaciones (MST01 Y MST02) del volcán Misti para el 2018. Las barras verticales en color rojo indican periodos en los cuales, no se registró información, debido a la falta de alimentación eléctrica; sobre todo, en los meses de lluvia (noviembre-marzo), en los cuales, el cielo permaneció nublado, por lo que el panel solar no recargó la batería.

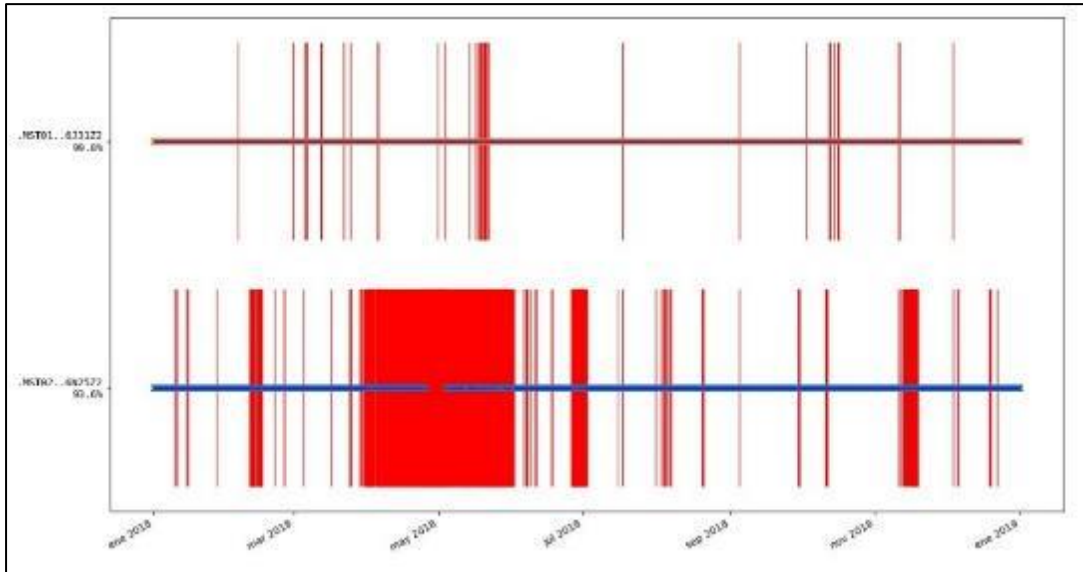


Figura 2.2. Periodo de funcionamiento de las estaciones de sismología volcánica MST01 y MST02 del volcán Misti, durante el 2018.

2.2. Actividad Sísmica Observada

En general, la actividad sísmica del volcán Misti observada durante el año 2018, ha sido baja, con una ocurrencia de 22 sismos volcánicos por día en promedio. Sin embargo, también se han observado incrementos puntuales de varias decenas de sismos volcánicos. No obstante, esta sismicidad es propia a la de un volcán ACTIVO. Por ejemplo, en la figura 2.7, se observa la ocurrencia esporádica de eventos tipo **TORNILLO** durante el 2018, señal típica de un volcán activo.

- **Sismo volcano-tectónico (VT).** Son eventos provocados por las fracturas de rocas, asociados al ascenso de magma desde el interior de la tierra hacia el volcán, posiblemente debido a la presión por introducción de magma, interacción de fluidos magmáticos con el medio encajante, desgasificación de gases y cambios bruscos de temperatura (contracción y/o dilatación). Los eventos VT (Figura 2.3), Se caracterizan por tener claras llegadas de las ondas P y S y por el contenido de altas frecuencias (> 5Hz).

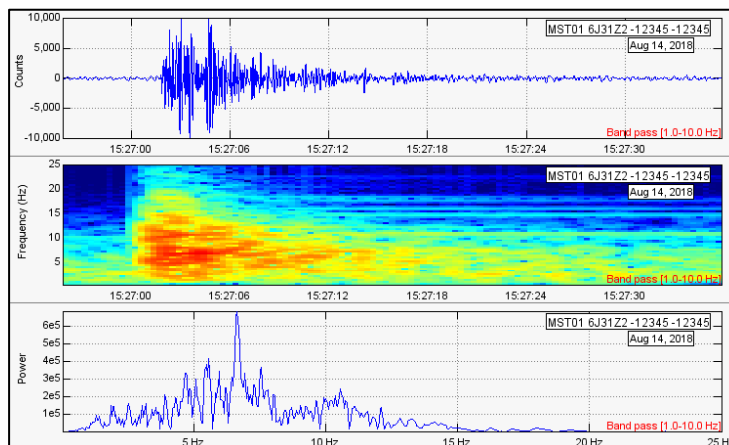


Figura 2.3. Evento Volcano-tectónico VT, registrado el 14 de agosto de 2018, componente Vertical.

- **Sismos de periodo largo (LP).** Son eventos asociados a procesos de la dinámica de fluidos en el sistema hidrotermal del volcán. Los eventos LP (Figura 2.4), se caracterizan por qué no presentan llegadas legibles de la fase S y el contenido espectral principal, es bajo (entre 1-4 Hz).

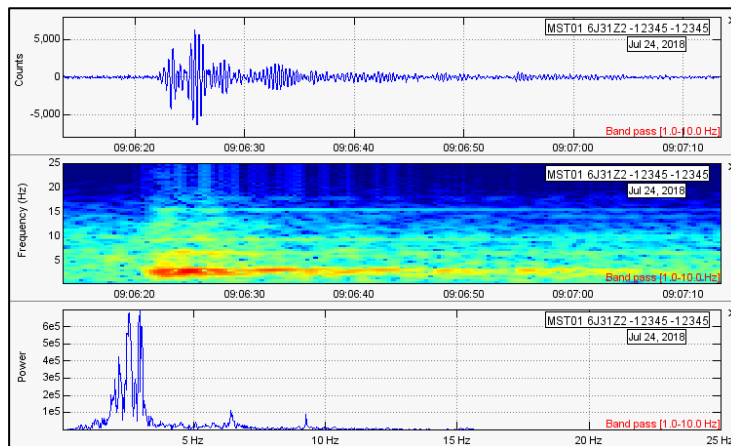


Figura 2.4. Evento Largo Periodo (LP), registrado el 24 de julio de 2018, componente Vertical.

- **Sismos tipo tornillo (TOR).** Se caracterizan por su forma armónica, la cual ha sido interpretada como la oscilación de un resonador excitado por la interacción de mezclas de líquidos y gases en forma de burbujas a grandes presiones. La manera en que decae la amplitud del sismograma a lo largo del tiempo es lenta, lo que implica que la tasa de pérdida de energía en la cavidad resonante es lenta también. Su espectro muestra uno o pocos picos en las frecuencias de los armónicos que aportan la energía del sismo (Figura 2.5).

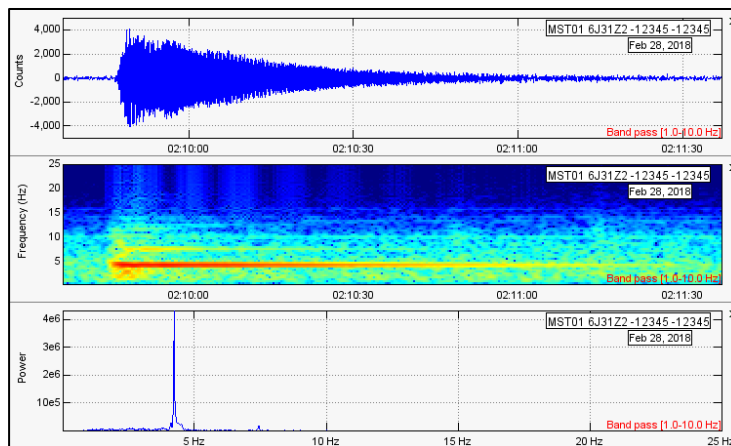


Figura 2.5. Evento Tornillo TOR, registrado el 28 de febrero de 2018, componente Vertical.

2.3. Análisis Estadístico

La actividad sísmica del volcán Misti estuvo dominada principalmente por sismos tipo VT, con una tasa de ocurrencia promedio casi constante, de 22 eventos por día, llegando a registrarse un máximo de 66 eventos el 11 de enero de 2018 (figura 2.6). Seguidamente, a una tasa esporádica, tenemos a los LP. Durante el 2018 se registraron eventos tipo Tornillo en menor proporción. Finalmente, se observa el registro de eventos de muy baja energía diaria, registrándose un máximo de 0.005 MJ el 10 de julio de 2018, ver figura 2.6.

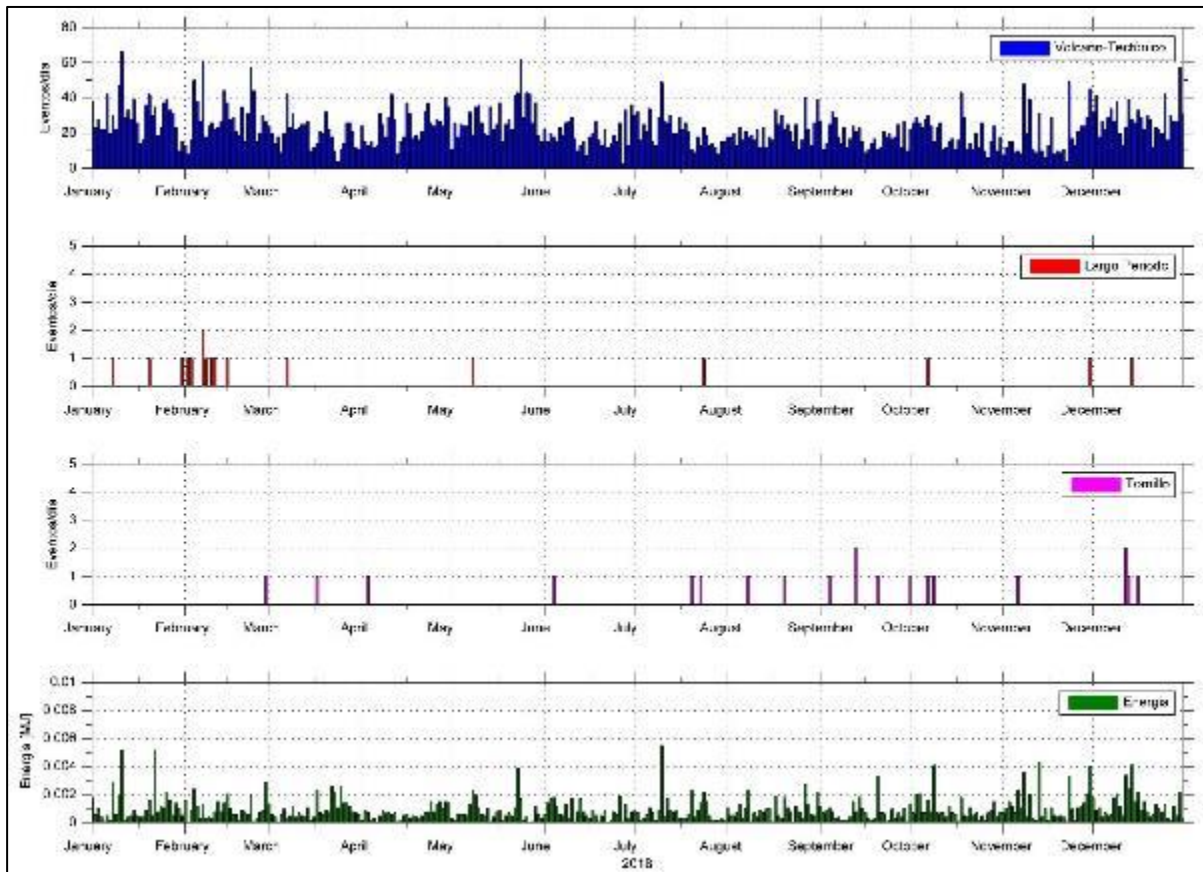


Figura 2.6. Histogramas mostrando la actividad sísmica del volcán Misti, registrado durante el 2018. VT: evento Volcano-Tectónico, asociado al fracturamiento de rocas. LP: evento de Largo Periodo, asociado a la circulación de fluidos. TOR: evento Tornillo, asociado a la resonancia de fluidos.

2.4. Energía Sísmica Liberada

La leve actividad sísmica del volcán Misti registrada durante el 2018, también puede ser cuantificada en función de la energía sísmica liberada por los eventos sismo-volcánicos (sismos tipo VT, LP, TOR y actividad tremorica). Así, estos eventos han liberado una energía total de 0.35 MJ de energía (figura 2.7). Siendo esta energía, mínima, en comparación con volcanes Ubinas y Sabancaya (en alerta naranja).

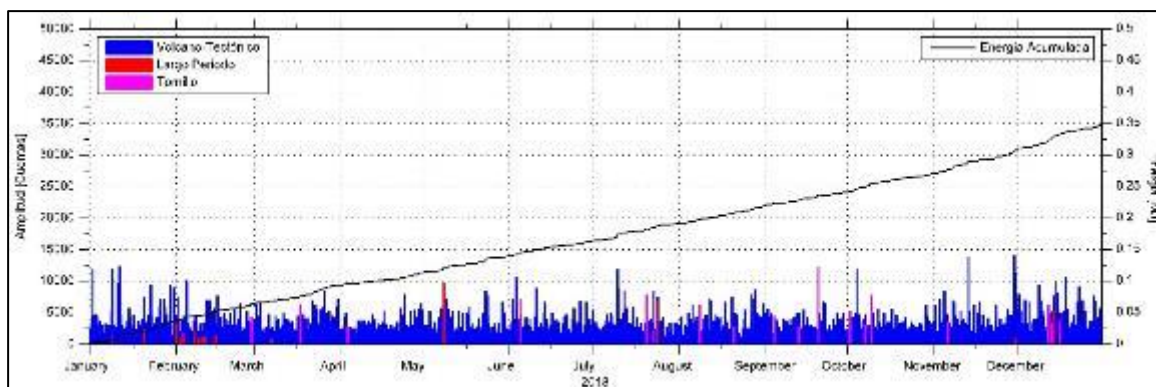


Figura 2.7. Energía sísmica liberada del volcán Misti para el 2018. VT: sismo Volcano-tectónico, asociado al fracturamiento de rocas y LP: sismo de largo periodo.

2.5. Monitoreo de Cambios de Velocidad y Cambios Estructurales

2.5.1. Método del Ruido Sísmico

En los últimos años, se ha demostrado que las funciones de cross-correlación (FCC) del ruido sísmico ambiental convergen en las funciones de Green entre dos estaciones sísmicas. La idea principal es que, usando la correlación en tiempo $C(\tau)$ de dos señales $\phi(t)$ registradas en dos estaciones A y B en el mismo tiempo, tenemos acceso a la respuesta de impulso $G(t)$ entre A y B como si uno de los receptores fuera una fuente. Este enfoque ofrece la oportunidad de usar fuentes artificiales en casi todas las partes en las que podemos colocar un sensor sísmico y convertir el ruido sísmico ambiental en señal.

$$\partial_{\tau} C_{AB}(\tau) = \partial_{\tau} \int \varphi_A(t) \varphi_B(t + \tau) dt \propto G^+(A, B, \tau) - G^-(A, B, -\tau) \quad (\text{Eq. 1})$$

En sismología volcánica, el ruido sísmico se utiliza principalmente con dos objetivos: realizar estudios de tomografía y monitorear cambios de velocidad (dv/v). Los cambios de velocidad observados en ambientes volcánicos son debidos principalmente a intrusión magmática, siendo estos cálculos útiles a la hora de pronosticar erupciones volcánicas.

2.5.2. Calculo de las Funciones de Cross-correlación del Volcán Misti

Para estimar los cambios de velocidad, primero se calculan las funciones de correlación (FCC) y revisan que estos sean continuos en el tiempo y no haya un efecto de estacionalidad. En la Figura 2.8, se muestra el resultado de las FCC de la estación MST01 en el rango de frecuencias de 0.1-1Hz (10s-1s) durante el 2018, se ha utilizado este rango de frecuencias ya que permite detectar cambios de velocidad en el medio debido principalmente a la interacción del medio con procesos magmáticos. En esta misma figura se puede observar que las FCC del volcán Misti son simétricas (amplitudes similares en la parte negativa y positivas respecto al tiempo de desfase 0) y continuas en el tiempo, es decir, sin ningún cambio importante debido a estacionalidad, lo cual indica una buena reconstrucción de las funciones de Green y valores confiables de cambios de velocidad y decorrelación de formas de onda (Cambios estructurales).

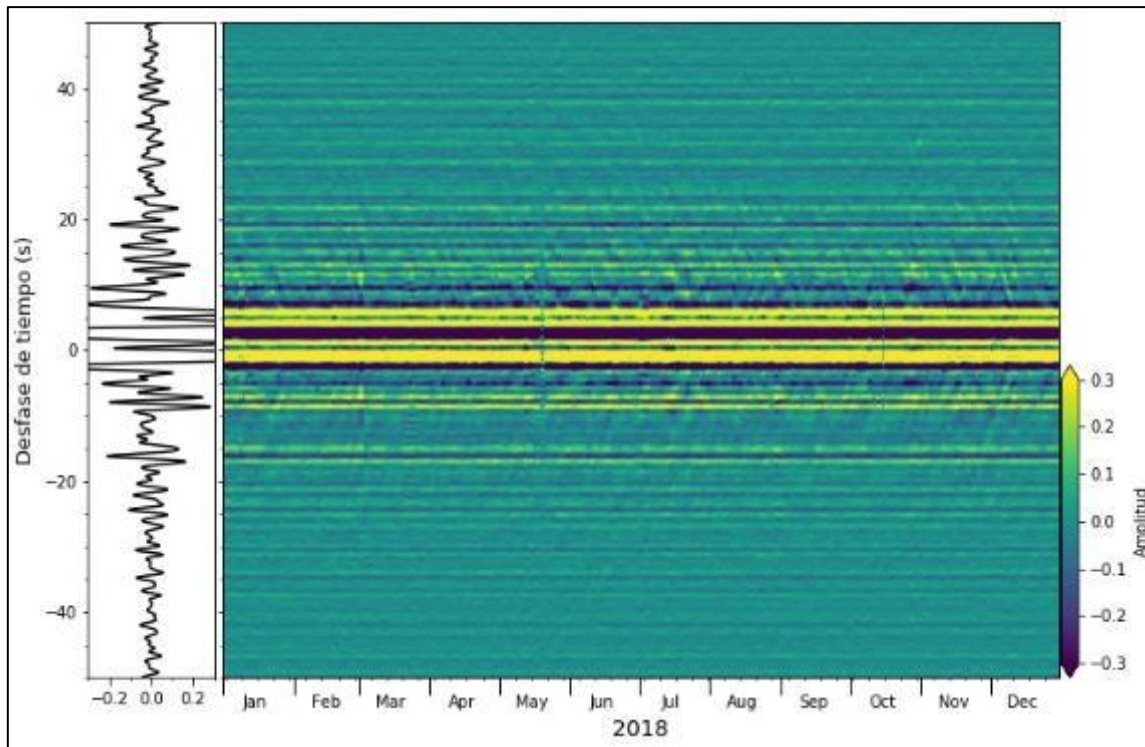


Figura 2.8. Funciones de cross-correlación (FCC) diarias calculadas en la banda de frecuencias 0.1 - 1 Hz, entre los componentes Z-E de la estación MST01 durante el 2018 y su respectiva forma de onda promedio (lado izquierdo).

2.5.3. Cambios de Velocidad y Estructurales del Volcán Misti

Para estimar los cambios de velocidad sísmica, usamos las FCC empleando el método Stretching que opera en el dominio del tiempo (Lobkis and Weaver, 2003). Los cambios de velocidad aparentes y los coeficientes de correlación (CC) se estiman comparando dos formas de onda: la señal de referencia y las funciones de correlación actual. En nuestro caso, la traza de referencia es la forma de onda resultado de promediar la FCC.

Durante el presente año, se ha continuado con el monitoreo de cambios de velocidad (dv/v) y de decorrelación de la forma de onda ($1-CC$; cambios estructurales). La figura 2.9, muestra que durante este año las velocidades sísmicas en el interior del volcán han variado entre el -0.1% y +0.15 %, sin embargo, no se han identificado cambios significativos relacionados a procesos magmáticos en el interior del volcán. Por su parte, la actividad tectónica ha perturbado las propiedades físicas del volcán, ya que, los dos sismos importantes de $M_w > 7.0$ ocurridos durante este año (14-01-2018 a 09:18:45 UTC y 24-08-2018 a 09:04:08 UTC), coinciden con disminuciones de la velocidad del orden -0.2%.

La serie temporal de los coeficientes de correlación (CC), muestra una serie muy estable a lo largo del año con valores constantes por encima de 0.95 (ver figura 2.9), lo que indica que las estructuras internas del volcán no han cambiado durante este año, es decir, ni las dimensiones y ni formas de las fracturas, fallas, cavidades, etc. del interior del volcán. Sin embargo, se pueden observar pequeñas variaciones del CC que disminuyen hasta cerca de 0.8 (a mediados de marzo y finales de junio), posiblemente estén asociados a cambios abruptos en las condiciones atmosféricas a nivel regional o a la activación temporal de algunas fuentes.

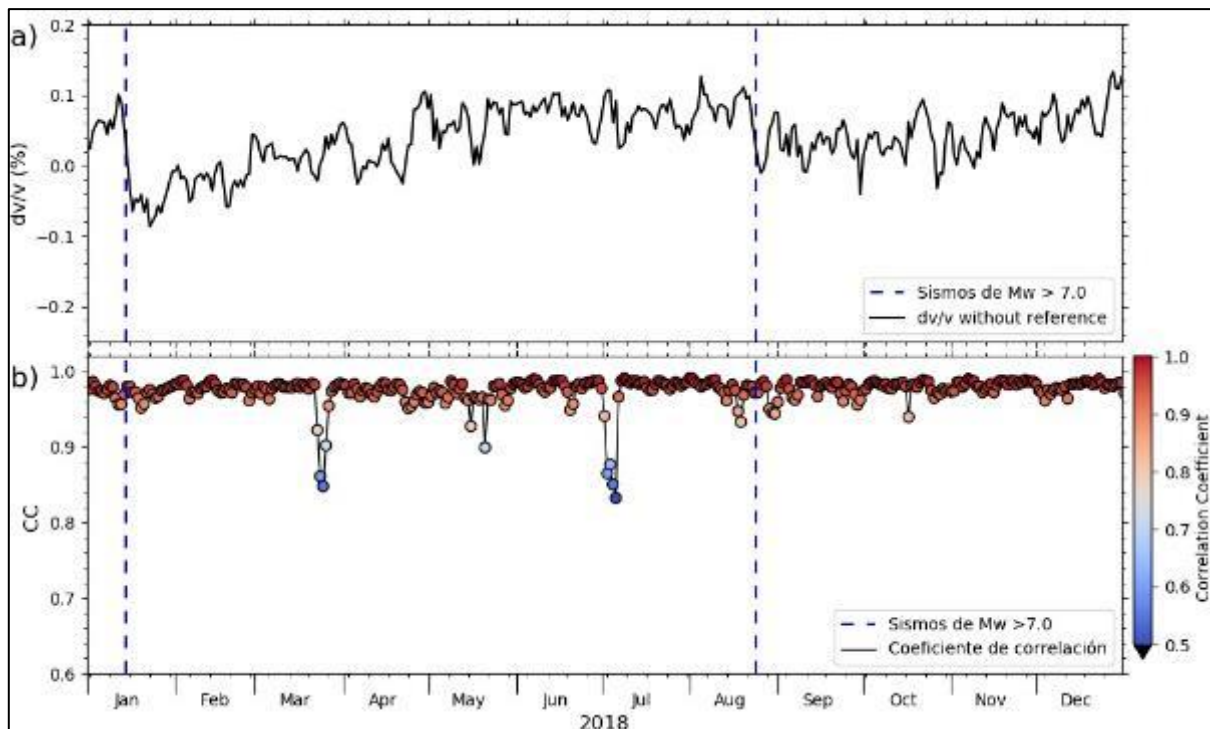


Figura 2.9. a) Cambios de velocidad (dv/v) calculados para las FCC de las componentes Z-E de la estación MST01 [0.1- 1 Hz]. b) Serie temporal de los coeficientes de correlación (CC) con su respectivo código de color.

3. OBSERVACIONES VISUALES DEL VOLCAN MISTI

Las observaciones visuales volcánicas se realizan con ayuda de una cámara de video domo que captura permanentemente las imágenes de la actividad del volcán Misti. Durante el año 2018, esta cámara estuvo ubicada en las instalaciones del Observatorio Geofísico de Characato de la Universidad Nacional de San Agustín (UNSA) en la ciudad de Arequipa, a aprox. 20 km al suroeste del cráter del volcán. Las imágenes son visibles sólo durante el día y pueden ser apreciadas en tiempo real en la página web institucional (ovi.ingemmet.gob.pe).

3.1. Características de las Emisiones

- **Forma y Ocurrencia**

En el 2018, se han observado pequeñas emisiones, que no superan los 800 m de altura sobre el cráter del volcán, estas emisiones, en su mayoría fueron de coloración blanquecina, lo que indicaría presencia de gases y vapor de agua, principalmente (figura 3.1).

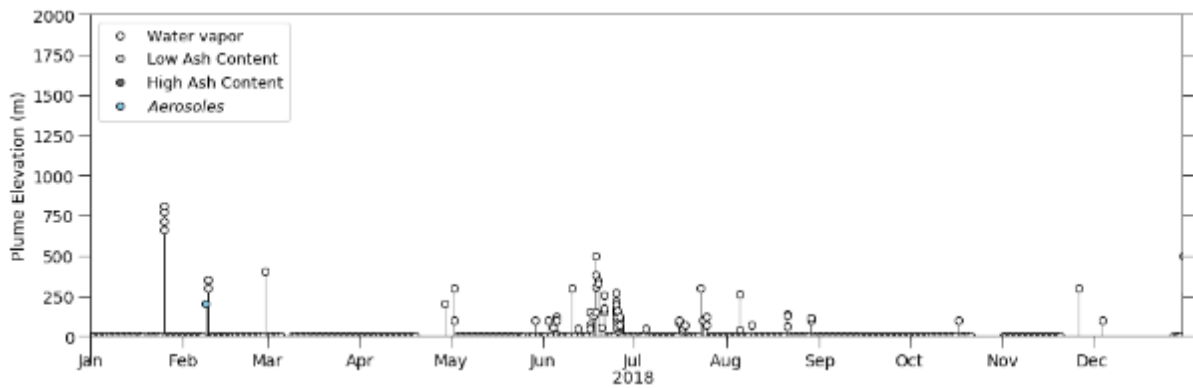


Figura 3.1. Monitoreo visual de las emisiones fumarólicas durante el 2018.

- **Dirección Predominante**

En la figura 3.2 podemos observar que las direcciones predominantes que tomaron las emisiones fumarólicas del volcán Misti durante el 2018 han sido hacia el Noroeste-Noreste.

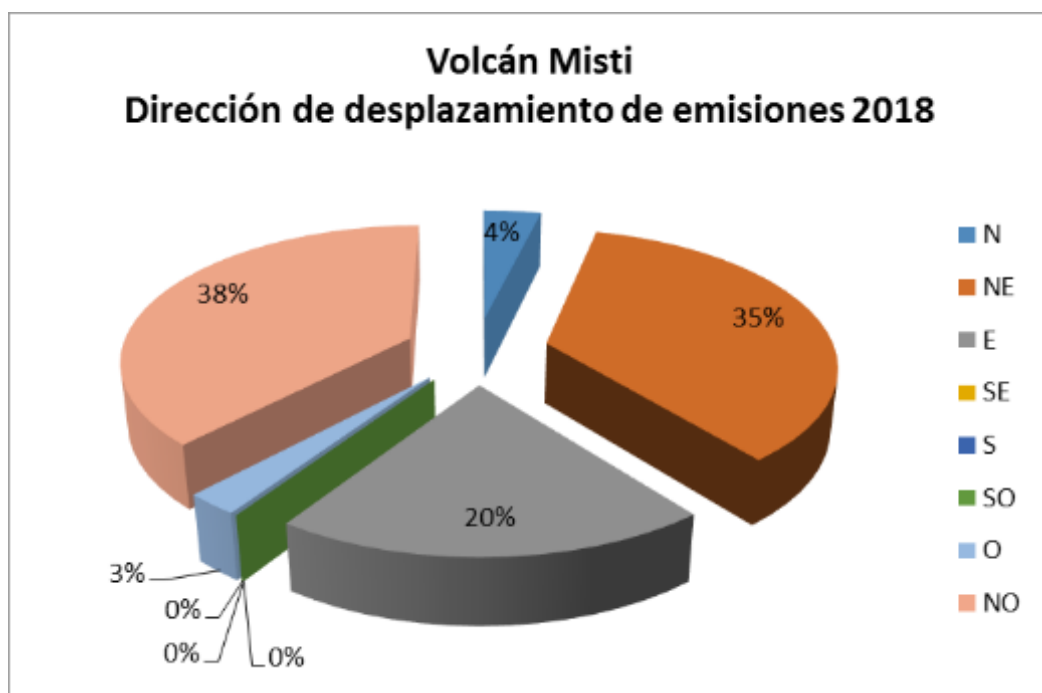


Figura 3.2. Diagrama de rosas mostrando las direcciones predominantes de las emisiones fumarólicas del Misti, durante el año 2018.

- **Imágenes relevantes de las Emisiones**

Las figuras 3.3, 3.4, 3.5, muestran algunas imágenes representativas, captadas durante el 2018 en el volcán Misti.

La figura 3.3, muestra algunas imágenes representativas, captadas durante el 2018 en el volcán Misti.



Figura 3.3. Fotos de emisiones de gases y vapor de agua, (izquierda) de 700 msc, 26 de enero del 2018. (derecha) de 350 msc, el 09 de febrero del 2018.



Figura 3.4. Fotos de emisiones de gases y vapor de agua, (izquierda) de 500 msc, 18 de junio del 2018. (derecha) de 350 msc, el 19 de junio del 2018.



Figura 3.5. Foto de las emisiones de gases y vapor de agua, de 500 msc, 18 de junio del 2018.

4. OBSERVACIONES VISUALES EN EL VOLCAN COROPUNA

El volcán Coropuna, es considerado uno de los volcanes potencialmente activo por presentar un casquete glaciar, está constituido por un conjunto de domos volcánicos, al que se le denomina como el complejo volcánico Coropuna.

El INGEMMET realiza actualmente un monitoreo básico, esta técnica se desarrolla con visitas en situ en comisiones de monitoreo temporal a través de una cámara fotográfica profesional, de las posibles fuentes de emisiones de gases volcánicos y/o vapor de aguas debido a presencia de fuentes termales o fuente volcánica. Esta tarea de seguimiento visual de cualquier cambio en el volcán y/o posibles emisiones durante los últimos años no se había observado ninguna anomalía o cambio físico o visual en ningún frente del volcán (Fotografías 4.2, 4.3 y 4.5). Es así que las comisiones de campo tienen la tarea de observar visualmente el volcán, a fin de visualizar cualquiera presencia de fumarolas, sin embargo, esta no tuvo muchos éxitos. Con el avance del retroceso glaciar del Coropuna, se esperaba visualizar cualquiera aparición de algún campo fumarolico.

Finalmente, durante la comisión de monitoreo del volcán Coropuna, el 24 de noviembre del año 2018, al realizarse el recorrido por el flanco norte del mismo, a la altura de la zona de Alcco Llacta, se visualiza una columna elevada de humo blanco o polvo debido a cambios en el ciclo del viento, lo que hizo dudar la presencia del fenómeno (Fotografías 4.1). La comisión se detuvo en dicho lugar para visualizar mejor el fenómeno, para descartar este hecho, la comisión estuvo provisto de cámara profesional marca LUNIX con un zoom óptico de 60x full HD, se realizó el seguimiento por un lapso de aproximadamente de 40 minutos, en la que la columna de vapor se elevaba de manera repetitivamente en el mismo sector (Fotografías 4.1), las observaciones determinaron que la columna alcanzo alturas superiores a los 50 mts. Por encima del suelo, dispersando en dirección este, las características de esta columna de vapor de agua fueron de color blanco.

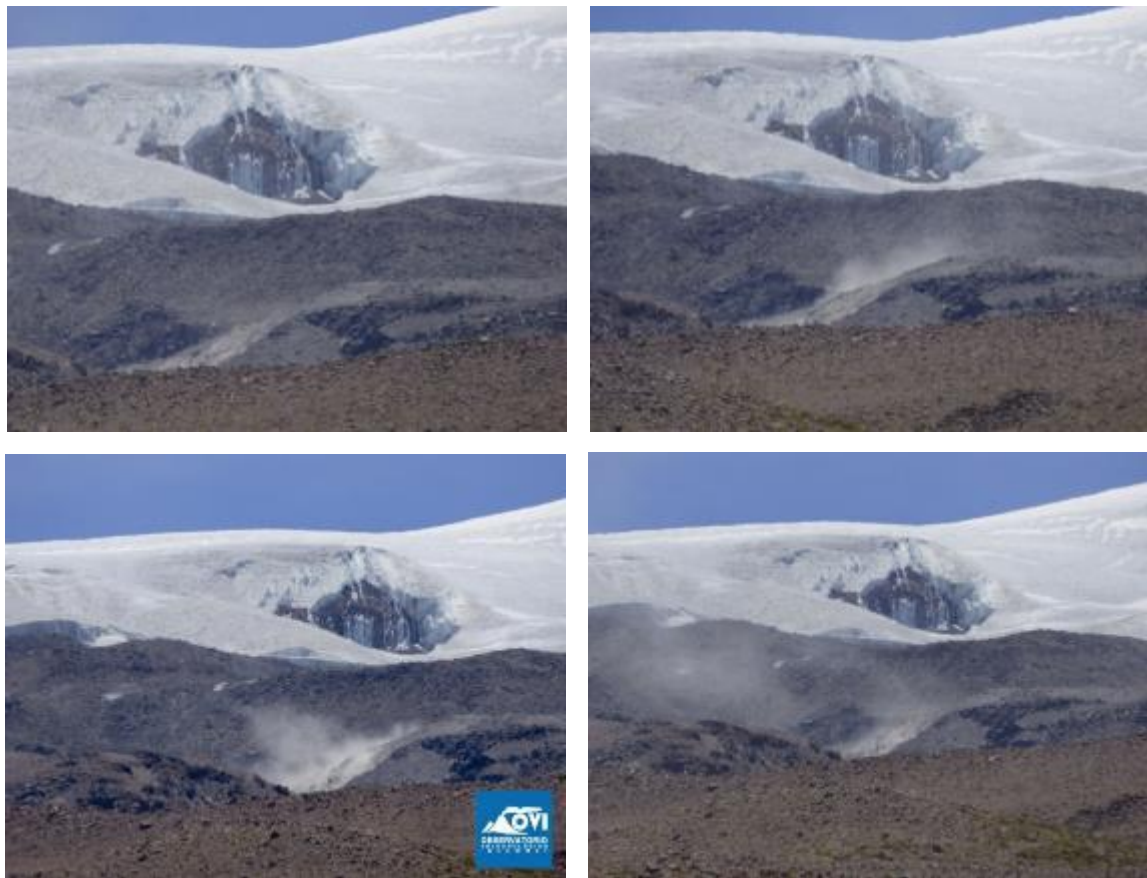


Figura 4.1. Vista del flanco norte del volcán Coropuna, desde el sector Alcco Llacta. Vista del instante en que el fenómeno manifiesta cambios visibles en la superficie de una columna de humo blanco que se eleva por encima de la superficie.



Fotografías 4.2. Vista del flanco Norte, a la altura de la zona SUPAURA, durante julio del 2017 no se han observado ninguna emisión de gases o vapor de agua.



Fotografías 4.3. Vista del flanco norte, vista desde la zona de SUPAURA, durante noviembre del 2018, no se visualizado ninguna anomalía en este flanco.



Fotografías 4.4. Vista del flanco oeste, durante la campaña de julio del 2017, en este sector no se han visualizado anomalías en el volcán, altura de 5320 m.s.n.m.

5. DEFORMACION VOLCANICA EN LOS VOLCANES MISTI Y COROPUNA

Recientemente se tienen registros continuos de mediciones con GNSS en el volcán Misti, inicialmente estas se realizaban mediante registros temporales en puntos específicos del volcán a razón de una hora por punto, en algunas ocasiones estas observaciones se apoyan con mediciones InSAR, la sismicidad, análisis de gases y entre otros técnicos. Por su parte el volcán Nevado de Coropuna entre todos los volcanes del sur del Perú es el más alto, ya que supera los 6420 m.s.n.m y está compuesto por un complejo de estratovolcanes de composición andesita, desde la altitud media del volcán está cubierto de hielo permanente.

Por ello el OVI (Observatorio volcánológico del Ingemmet) implementó la red de monitoreo para la observación de cambios en la dinámica interna del volcán (Figura 1.1), durante el 2018, se continuó monitoreando de forma temporal y permanente, a través de estaciones GNSS, sin mostrar mayores cambios en la morfología de cada volcán. El comportamiento volcánico es diferente en cada etapa eruptiva de un volcán, debido a la naturaleza de cada sistema volcánico, de las cuales no se tiene registros históricos. Donde un proceso de deformación no siempre significa un signo inequívoco de una erupción en el corto plazo.

Durante el año 2018 no se ha registrado datos de las mediciones de distancia electrónica (EDM) para el volcán Misti, debido a que estas no fueron programadas, así como las imágenes de satélite InSAR para el monitoreo de deformaciones en el Misti y Coropuna.

5.1. Implementación de Redes de Monitoreo y Procesamiento de Datos

El grado de peligrosidad determina el nivel de monitoreo a realizarse en cada volcán, actualmente el OVI realiza un monitoreo básico en ambos volcanes, los detalles se describen en el ítem 1.1. en base a mediciones temporales y continuas, para registros temporales a una frecuencia de un registro de data GNSS por año, y para las estaciones permanentes a una frecuencia cada 10 segundo por 24 horas, para entender los cambios en la morfología del volcán. La red de monitoreo data desde el año 2012 para el volcán Coropuna en base a 06 puntos distribuidos en el flanco N al punto COBN, en flanco E al punto COBE, los demás puntos COMA (Machaguay), COVI (Viraco), COAC (Acopalpa) y COVQ (Viques) se distribuyen en el flanco SE (Figura 1.1). Actualmente el Misti cuenta con 01 estación GNSS permanente que registra de manera continua desde el año 2016 con transmisión en tiempo real, ubicado en el flanco N denominado como MTAB (Aguada Blanca, Figura 1.1). La base de referencia para eliminar procesos tectónicos es la estación de referencia AREQ (estación IGS). El punto GNSS fue instalado sobre un pilar de concreto fundado sobre un afloramiento macizo de roca, con una altura de 1.2 mts.

5.2. Adquisición, Procesamiento y Evaluación Primaria de Datos

Para el volcán Misti la data de deformación corresponde a un archivo diario de 24 horas a intervalo de muestreo de 15 seg. procesados con el software GAMIT/GLOBK, que obtiene soluciones diarias para las posiciones de estación GNSS MTAB, la velocidad de la placa tectónica se elimina empleando la estación IGS AREQ, la data GNSS se procesa con las soluciones del MIT combinadas, incorporando efemérides precisas, correcciones atmosféricas, etc. Definido en el marco de referencia Sudamericano, el objetivo es el de mejorar la precisión de las soluciones.

Mientras la data GNSS para el volcán Coropuna del cual se tiene registro desde los años 2012, 2013, 2015, 2016, 2017 y 2018, obteniendo una data anualmente, se emplea en software TBC (Trimble Business Center) de la marca TRIMBLE para el procesamiento, análisis e interpretación, que permite obtener soluciones de las posesiones de las tres componentes, para los puntos temporales.

5.3. Resultados del Monitoreo GNSS en el Volcán Misti

La data GNSS de la estación MTAB del volcán Misti registro durante todo el periodo 2018, de manera ininterrumpidamente, tal como se observa en la Figura 5.1.

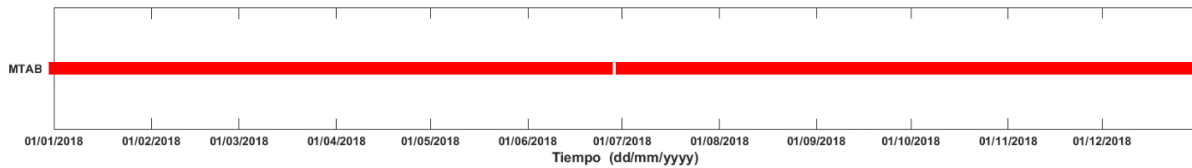


Figura 5.1. Periodos de registro y operación de la estación GNSS MTAB durante el año 2018.

5.4. Series Temporales y Deformaciones Asociados

Los resultados del procesamiento con el software GAMIT/GLOBK de la data GNSS de la estación MTAB, se han calculado con la efeméride finales, en el marco de referencia sudamericano, en la que se empleó hasta 18 estaciones de estabilización de la red del IGS, empleando las soluciones del MIT, para obtener la posición absoluta del punto de monitoreo para las tres componentes ESTE, NORTE y ALTITUD, los resultados se visualizan en la figura 5.2, donde las series temporales de deformación durante el año no han evidenciado cambios relevantes en la morfología del volcán Misti, la velocidad de desplazamiento de las componentes horizontales están representados por la línea de tendencia (línea color rojo), donde la componente ESTE se desplazó hacia ESTE a razón de 8 mm/año, mientras las componente NORTE se mantiene estable, lo cual sugiere una estabilidad en las tres componentes, lo que podemos decir que no se ha observado procesos deformativos durante el periodo de análisis para la estación GNSS MTAB, por lo que a la fecha el volcán Misti se mantiene estable aun sin mostrar cambios en su dinámica.

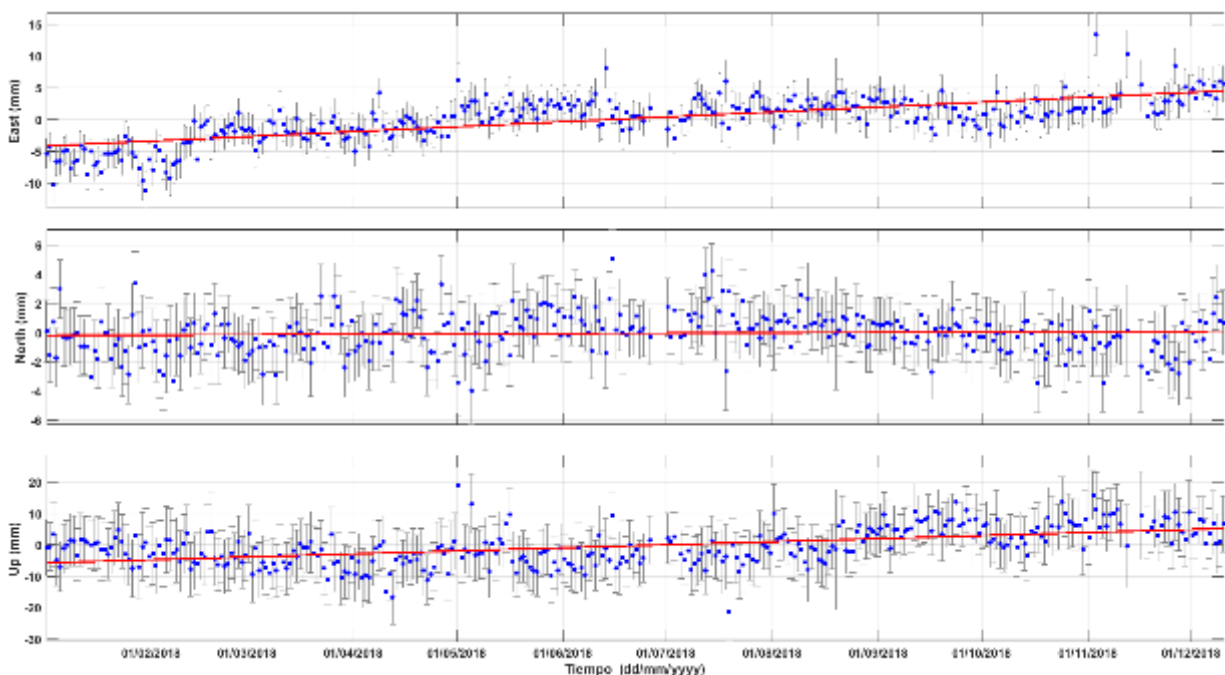


Figura 5.2. Series de temporales de deformación observado en la estación GNSS MTAB ubicado en el flanco Norte del volcán, la línea roja es la línea de tendencia de la serie.

5.5. Mapa de Vectores de Desplazamiento de los Volcanes Misti y Coropuna

Con los datos GNSS de volcán MISTI (2018) con registro permanente y del volcán COROPUNA (2018) que cuenta con registro de datos por campañas de campo (1 a 2 veces por año), se permitió obtener resultados en forma de vectores de desplazamiento para la componente horizontal, a fin de analizar del comportamiento dinámico de los volcanes. En las Figura 5.3a y b, se observan las magnitudes de desplazamiento horizontales de cada punto en evaluación en ambos volcanes, para el Misti corresponde a un periodo anual de registro, para el caso del volcán Coropuna corresponde al periodo de registro entre diciembre del 2017 a noviembre del 2018.

Caso Volcán Misti: la dirección de desplazamiento es en dirección E (Este), la velocidad del vector desplazamiento es de 9.8 mm/año (Figura 5.3a), la escala del vector es incrementado 5000 veces su tamaño, tal como se muestra en la parte inferior izquierdo de la figura 5.3a, evaluado para el periodo de 2018 (un año), donde la componente ESTE presenta mayor magnitud de desplazamiento como se observa en las series temporales (Figura 5.2).

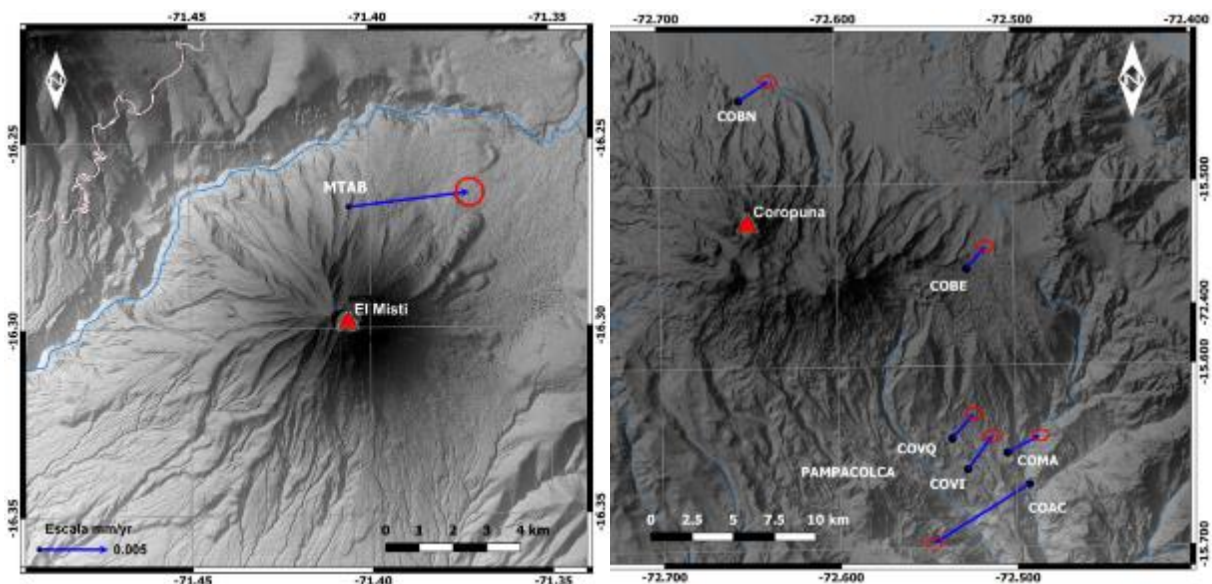


Figura 5.3. Mapa de vectores de desplazamiento, los vectores indican el desplazamiento de cada punto, a). Vector de desplazamiento del punto GNSS MTAB, volcán Misti, b). Vector de desplazamiento de puntos temporales GNSS en el volcán Coropuna.

El caso del volcán Coropuna: muestra un caso muy singular, en la que las estaciones ubicados en flanco norte (COBN) y este (COBE) muestran una velocidad de desplazamiento a razón de 7 y 11 mm por año para la componente ESTE, mientras la componente NORTE se mueve a razón de 7 mm por año (Figura 5.3b), por otro lado, observamos que las velocidades de desplazamiento de los puntos del flanco sureste (COMA, COVI, COVQ) presentan velocidades de desplazamiento entre 6 y 12 mm por año para ambas componentes.

El caso del punto COAC ubicado en la parte inferior del cono volcánico presenta una alta tasa de desplazamiento entre 35 y 21 mm por año, la dirección del desplazamiento es coherente con la pendiente de la ladera, este caso se ha venido mencionado en oportunos informes, estos desplazamientos corresponden a un deslizamiento de la ladera del pueblo de Acopalpa ya que esta se sitúa sobre depósitos coluviales con pendientes moderada que varían entre 25% y 28% (según modelo Digital de elevación, DEM), lo cual no es materia de discusión en el presente informe.

La dirección y la magnitud de los vectores de velocidad y desplazamiento presentan una dirección preferente en dirección NE, lo cual es concordante con los modelos de velocidad establecidos para Sudamérica por SIRGAS-VEMOS (Sanchez & Drewes, 2016), los vectores de desplazamiento de los 05 puntos en el Coropuna, corresponde al efecto del movimiento de la placa tectónica de Sudamérica, donde la magnitud de la velocidad de desplazamiento es entre 11 y 18 mm por año. Por lo tanto, durante el periodo de evaluación de los cambios en la superficie volcánica del volcán no se han observado procesos inflacionarios y deflacionarios asociados al volcán, la dinámica de los movimientos es netamente tectónico, lo cual es coherente con los modelos de velocidades, establecidos para cada región.

6. EVALUACION DE FUENTES TERMALES EN LOS VOLCANES MISTI Y COROPUNA

El monitoreo geoquímico de los volcanes Misti y Coropuna, consistió principalmente en un muestreo discreto en fuentes termales, los resultados nos ayudaran a encontrar posibles perturbaciones del sistema hidrotermal, causadas por un nuevo posible ascenso magmático.

6.1. Monitoreo de Fuentes Termales del Misti

El monitoreo de los cambios en la composición química del agua, durante el 2018, se dio únicamente en la fuente JES, se tomaron 2 muestras de agua, para el análisis de 44 analitos, siguiendo la metodología descrita por Masías et al, (2013) y fueron analizados en el laboratorio de Química de INGEMMET.

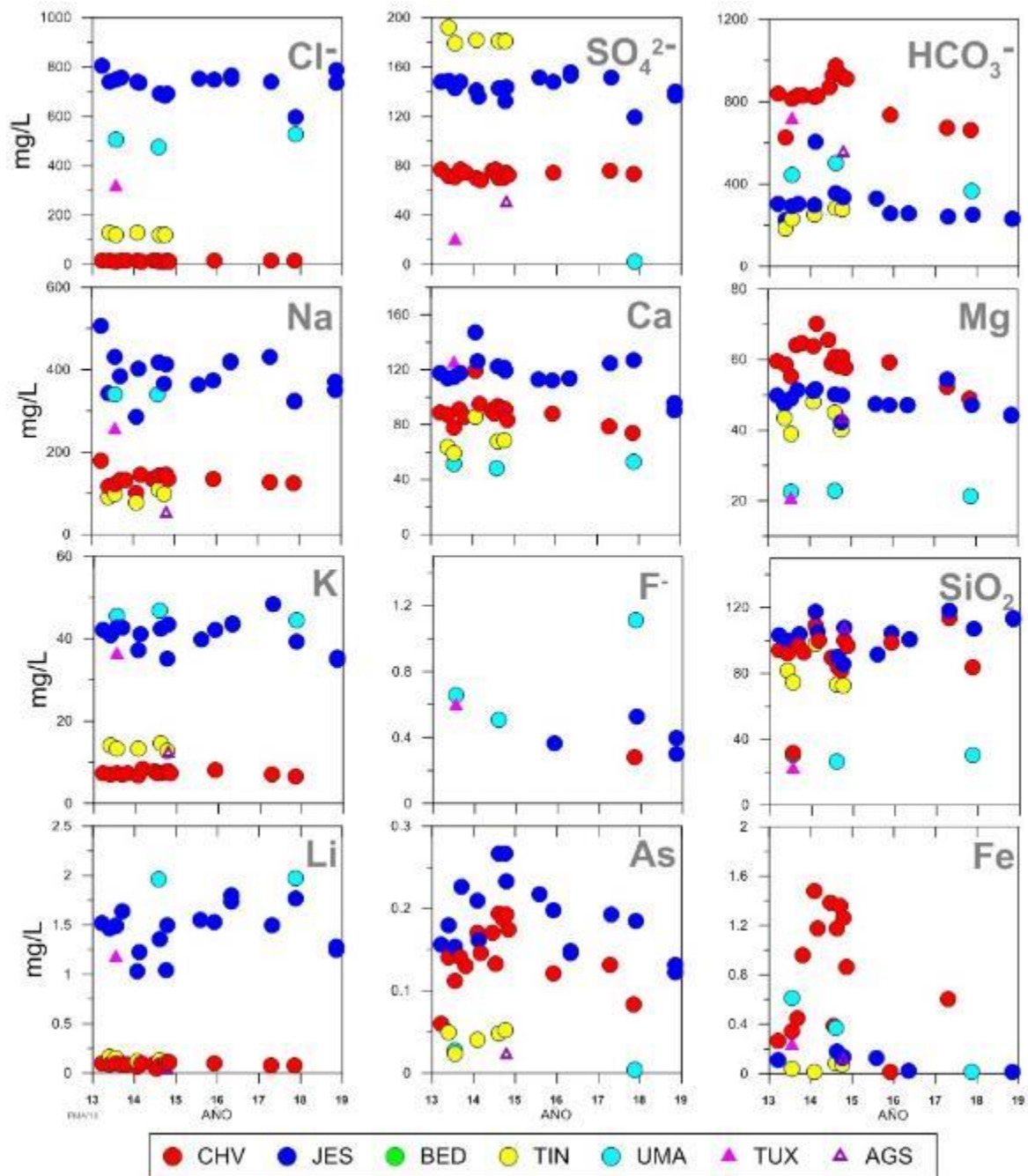


Figura 6.1. Resultado de los análisis químicos de las aguas de las fuentes CHV, JES, BED, TIN, UMA, TUX, AGS, en el volcán Misti.

Al comparar los resultados del 2018 con datos obtenidos entre el 2013 y 2017, de un total de 7 fuentes termales (Figura 1.1a), podemos observar que las variaciones son típicas de un volcán con baja actividad volcánica, no hay cambios significativos en los analitos (analito, es un componente, elemento, compuesto o ion) de origen magmáticos en el agua (Figura 6.1).

6.2. Monitoreo de Fuentes Termales del Coropuna

Para el monitoreo de los cambios en la composición química del agua, se realizó un muestreo de las fuentes CR1, CR2, CR3, CR4, CR5, CR6 y CR8 (Figura 1.1b), ubicadas en un radio de 18 km de la cumbre activa.

Se tomaron 15 muestras de agua para el análisis de 44 analitos (analito, es un componente, elemento, compuesto o ion), siguiendo la metodología descrita por Masías et al, (2013) y fueron analizados en el laboratorio de Química de INGEMMET.

Al comparar los resultados del 2018 con datos del último periodo eruptivo (2013-2017), podemos observar (Figura 6.4), que no se han presentado cambios significativos, que nos indiquen el inicio de un nuevo proceso eruptivo.

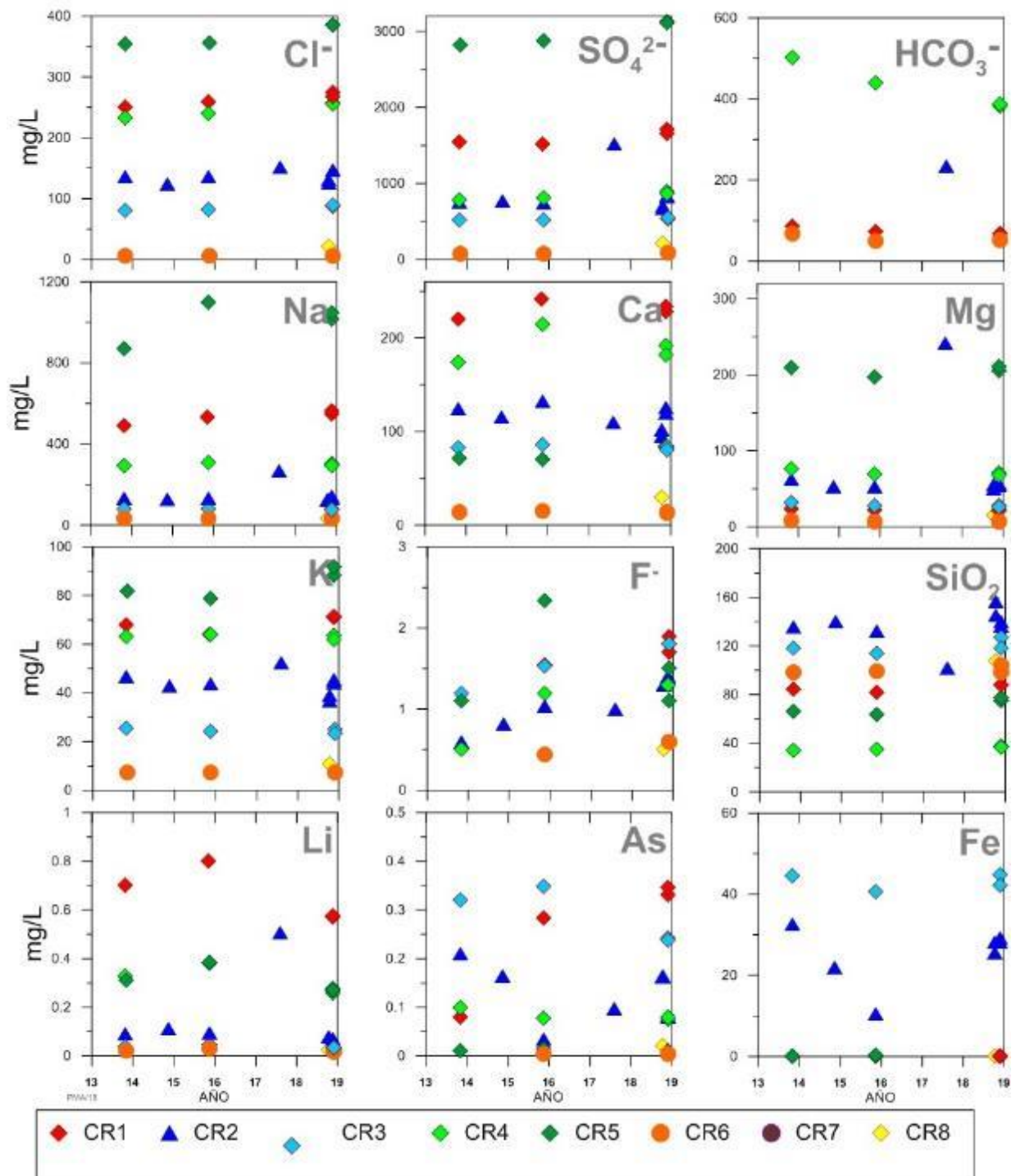


Figura 6.2. Resultado de los análisis químicos de las aguas de las fuentes CR1, CR2, CR3, CR4, CR5, CR6 y CR8, en el volcán Coropuna.

7. CONCLUSIONES

- La evaluación sismo volcánica para el volcán Misti, muestra que la principal actividad registrada durante el 2018, estuvo dominado por los sismos tipo Volcano Tectónicos – VT, seguidos de eventos Largo Periodo – LP y esporádicamente eventos tipo Tornillo (señal típica de un volcán activo). La energía sismo-volcánica total calculada para el Misti durante el 2018, es de 0.35 MJ. No obstante, esta sismicidad corresponde un volcán activo, los valores de la energía liberada demuestran que dicha actividad, es muy baja.
- El monitoreo permanente de los cambios de velocidad y de decorrelación del volcán Misti durante el año 2018, no ha presentado cambios significativos asociados a procesos magmáticos. Sin embargo, se ha podido observar pequeñas perturbaciones en el volcán asociados a dos grandes terremotos de $M_w > 7.0$ ocurridos en el país durante este año, lo que indicaría que el volcán mantiene un sistema hidrotermal activo, susceptible a ser perturbado por actividad tectónica.
- Durante la campaña de monitoreo en noviembre del 2018 en el flanco norte del volcán Coropuna se visualizó una columna de vapor de agua elevándose desde la superficie del suelo repetitivamente hasta superar los 50 mts, el color de este vapor de agua fue de color blanco, la cual se desplazó en dirección este. Este fenómeno se debe de corroborar con una visita en situ y evaluar los cambios físicos de la superficie.
- Podemos mencionar que existe una relación de los procesos de deformación y los cambios en la actividad volcánica, a través de observaciones continuas y mayor número de equipos mediante la técnica GNSS en cada volcán, pero esta es muy compleja de establecer con una única estación caso Misti y con estaciones temporales caso Coropuna.
- El monitoreo permanente de los cambios en la morfología del volcán Misti mediante equipos GNSS, deben de complementarse con un cierto número de equipos que permitan realizar un diagnóstico de la dinámica y del estado del volcán.
- La evaluación temporal de los cambios en la dinámica superficial del volcán Coropuna durante el 2018, muestran resultados que claramente no corresponde a cambios en la superficie del volcán, lo que significa que no hay efecto volcánico en los resultados GNSS, los desplazamientos corresponden al efecto del movimiento tectónico generado por la placa Sudamericana.
- Las emisiones fumarólicas del volcán Misti, observados durante el 2018, estuvieron constituidas principalmente por vapor de agua, alcanzaron alturas máximas de hasta 500 m sobre el cráter. La dirección predominante de estas emisiones fue hacia el sur.
- El monitoreo de fuentes termales no muestra cambios significativos en el sistema hidrotermal de los volcanes Misti y Coropuna. Un mayor muestreo mejoraría la resolución de esta información.

8. RECOMENDACIONES

- Considerando la peligrosidad del volcán Misti respecto de la ciudad de Arequipa, es necesario ampliar y mejorar la red de monitoreo multiparamétrico con nuevas estaciones de evaluación del volcán.
- Es conocido que el volcán Misti y Coropuna son volcanes activos, por lo tanto, es necesario implementar y practicar planes de contingencia ante una probable reactivación del volcán. Para ello se debe tener en cuenta el mapa de peligros de ambos volcanes.
- Mejorar las vías de acceso a cada volcán.
- Con la seguridad de contar con un monitoreo eficiente y adecuado de los volcanes Misti y Coropuna, es de necesidad intensificar los planes de turismo para el desarrollo de Arequipa.
- Implementar por lo menos con una estación de monitoreo GNSS permanente adicional.
- Es de importancia ampliar los puntos de evaluación sean de monitoreo temporal y/o continua, con el objetivo de evaluar las condiciones de cambio en la dinámica interna del volcán.

9. BIBLIOGRAFÍAS

1. Dvorak, J. J.; Dzurisin, D. (1997). Volcano geodesy: The search for magma reservoirs and the formation of eruptive vents. *Reviews of Geophysics*, 35(3), 343-384.
2. Lobkis, O.I., Weaver, R.L., 2003. Coda-wave interferometry in finite solids: Recovery of P-to-S conversion rates in an elastodynamic billiard. *Phys. Rev. Lett.*, 90(25): 254302.
3. Drewes, H., Heidbach O. (2012). The 2009 Horizontal Velocity Field for South America and the Caribbean. In: Kenyon S., M.C. Pacino, U. Marti (Eds.), "Geodesy for Planet Earth", IAG Symposia, 136: 657-664.
4. Masias, P., Taípe, E., Antayhua, Y. & Ramos, D. (2013) - Monitoreo de los Volcanes Misti y Ubinas, Periodo 2006 – 2012, INGEMMET. Boletín, Serie C: Geología Ambiental y Riesgo Geológico, 54, 104p.
5. Van der Laat, R. (1996). Ground-deformation methods and results. In *Monitoring and mitigation of volcano hazards* (pp. 147-168). Springer Berlin Heidelberg.
6. Sánchez, L.; Drewes H. (2016). Crustal deformation and surface kinematics after the 2010 earthquakes in Latin America. *Journal of Geodynamics*, doi: 10.1016/j.jog.2016.06.005.