



***INFORME ACTIVIDAD VOLCANES CHILES-CERRO NEGRO  
ENJAMBRE SÍSMICO MARZO-ABRIL DE 2018***

**San Juan de Pasto, febrero de 2019**



***INFORME ACTIVIDAD VOLCANES CHILES-CERRO NEGRO  
ENJAMBRE SÍSMICO MARZO-ABRIL DE 2018***

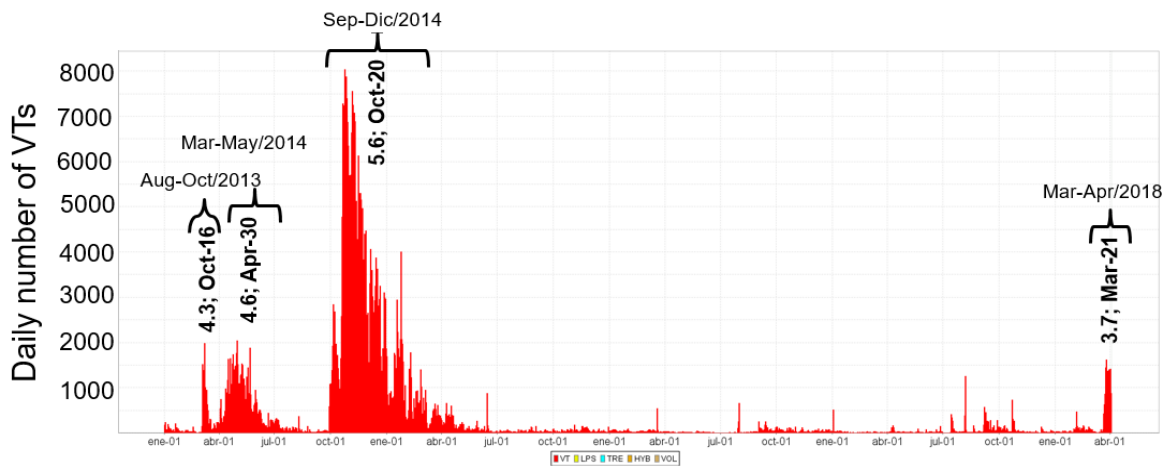
**Por:**

**ROBERTO AMANDO TORRES CORREDOR  
LOURDES NARVÁEZ MEDINA  
DARIO FERNANDO ARCOS GUERRERO  
CARLOS ANDRÉS LAVERDE CASTAÑO  
PATRCIA PONCE VILLARREAL**

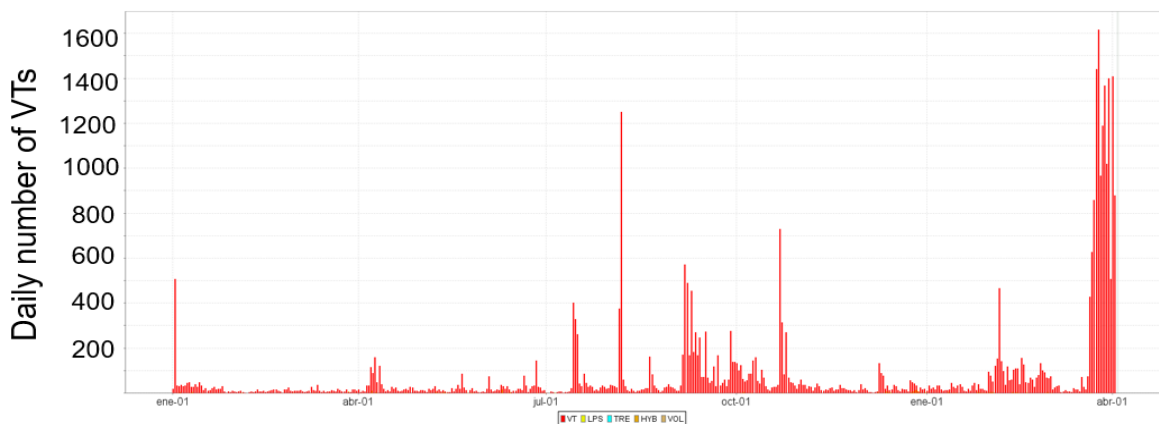
**San Juan de Pasto, febrero de 2019**

Con base en las manifestaciones de sismicidad de la región de los volcanes Chiles-Cerro Negro, se destaca que después de las tres secuencias de enjambres sísmicos ocurridos en Agosto-October de 2013, Marzo-Mayo de 2014 y Septiembre-Diciembre de 2014, se tiene nuevamente otro enjambre a partir del 21 de marzo de 2018 que hemos denominado “Marzo-Abril de 2018”. Este último resulta comparable en número diario con el acontecido a partir de noviembre de 2013 correspondiente al enjambre de Agosto-October de 2013 (Fig. 1). En general, desde 2015 la sismicidad se ha caracterizado por la ocurrencia de sismos VT con fluctuaciones derivadas de la ocurrencia de enjambre menores.

a)



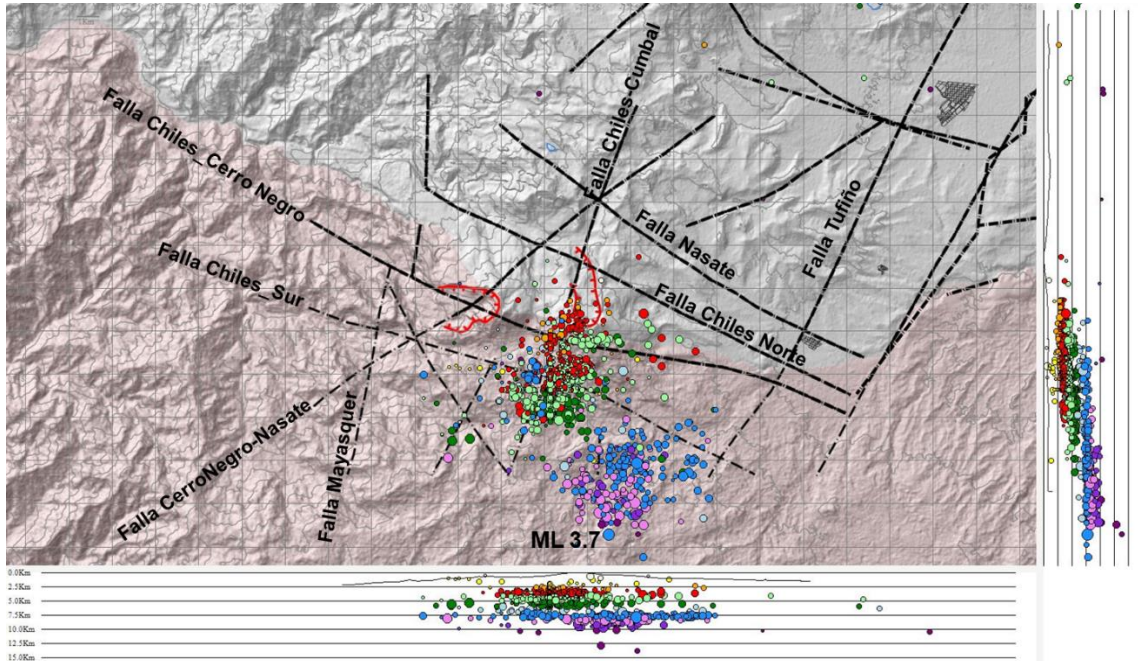
b)



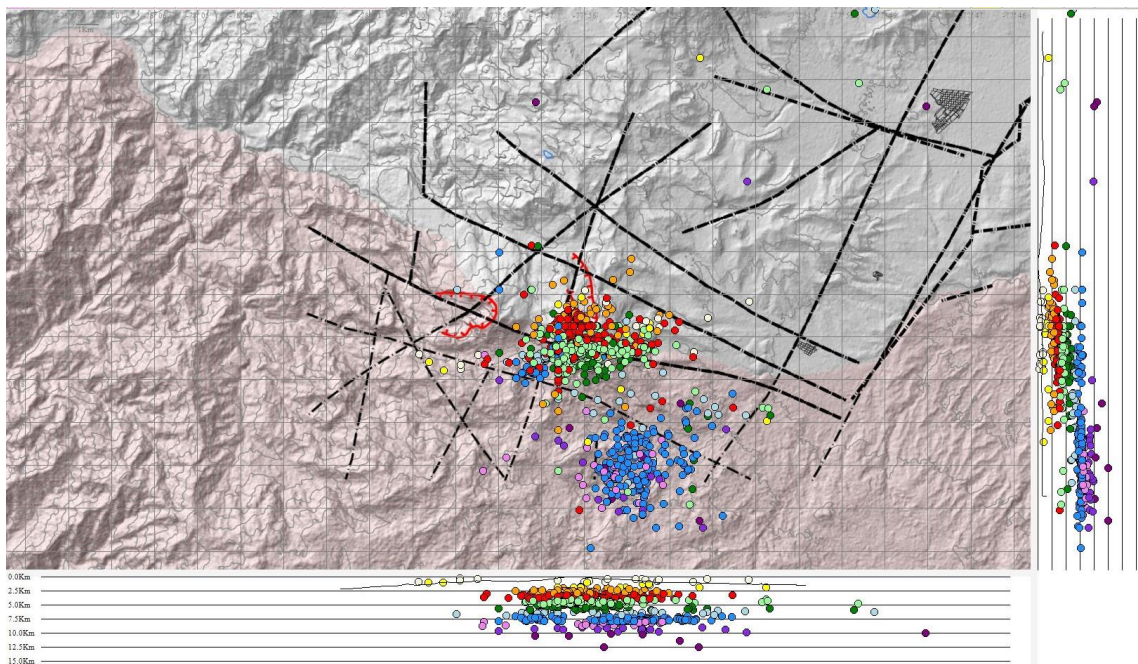
**Figura 1.** Histogramas de ocurrencia diaria a) Desde inicios del monitoreo continuo en Chiles-Cerro Negro (Noviembre de 2017), y b) Desde enero de 2018.

La gran mayoría de epicentros de la sismicidad VT se distribuyen especialmente al Sur y Suroccidente del Volcán Chiles a distancias entre 1 y 9 km con profundidades entre 1.5 y 10 km. Los hipocentros más superficiales se localizan en zonas más proximales a la cima del volcán Chiles. En el enjambre de Marzo-Abril de 2018 conservó esta distribución de hipocentros (Fig. 2).

a)



b)



**Figura 2.** Distribución hipocentral de VTs a) empleando la red conjunta de estaciones del SGC y el IG-EPN y b) utilizando solamente las estaciones de Colombia. En el panel a) la calidad de las localizaciones del grupo de sismos más cercanos es de mejor calidad que las del grupo distal.

Como se aprecia en la Fig. 2, la sismicidad ocurre en una región volcánica donde se tiene la confluencia de varios sistemas regionales de fallas activas, que de acuerdo con la cartografía de rasgos estructurales del ICEL (1983), tienen una tendencia NNE-SSW como son las fallas de Mayasquer al occidente, Chiles-Cumbal y Tufiño al oriente, y otras que se extienden en sentido transversal como son las fallas Nasate al norte, Chiles Norte, Chiles-Cerro Negro, y Chiles Sur. En la misma Fig 2, se aprecia el efecto en la distribución de hipocentros de acuerdo a las estaciones sísmicas utilizadas en las lecturas de tiempos de llegada de las ondas P y S. Esto en virtud de que en los días 26, 27 y 28 de marzo de 2018 (en plena evolución del enjambre) no se contó con los registros de las estaciones del Ecuador por problemas de telemetría. En general cuando solamente se utilizan las estaciones de Colombia, se aprecia una tendencia de desplazamiento hacia el nor-noreste, acercándose al edificio del volcán Chiles debido al incremento en los valores de GAP. No obstante, se evidencian dos agrupaciones de focos sísmicos, una distal con hipocentros más profundos y una proximal con dominio de focos más superficiales. Para tener mayor claridad de un posible vicio en las localizaciones de los sismos VT utilizando tiempos de llegada de P y S, se muestra un histograma de diferencias de S con P utilizando tomando como estación de referencia ICH que se ubica en cercanías a la cima del volcán Chiles (Fig. 3). En los días 26 al 28 de marzo (región coloreada en azul en la Fig. 3), se puede apreciar un dominio de sismos con la tendencia predominante de diferencias de tiempos de llegada durante el enjambre entre 0.8 a 1 segundos y adicionalmente a unas diferencias similares a las previas observadas antes del enjambre con valores entre 0.5 y 0.7 segundos (óvalo rojo) que corresponden a focos más cercanos a la estación ICH.

Como se puede observar en la Fig. 3, el enjambre de Marzo-Abril de 2018 tiene un predominio en sus primeros días, desde el 21 al 26 de marzo, exceptuando el día 24 de marzo, de sismos de fuente más distante (S-P entre 1.7 y 2.5 segundos), correspondiendo a los VTs más profundos y energéticos.

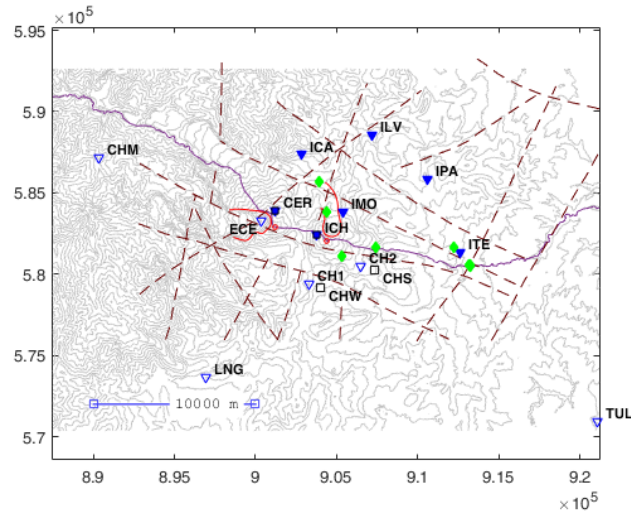
En la Fig. 4, se detalla la evolución temporal del enjambre de Marzo-Abril de 2018. Esta secuencia muestra un incremento progresivo de un poco más de 620 sismos el 21 de marzo hasta un valor de 1740 el 1 de abril, fecha a partir de la cual la ocurrencia diaria empieza a declinar gradualmente hasta obtener valores menores de 200. Las magnitudes, en su mayoría están entre 1.5 y -1.5. Se destacan los VT acontecidos el 21 de marzo con ML de 3.7 y el 4 de abril con ML de 3.5 que fueron sentidos en las poblaciones cercanas a los volcanes Chiles-Cerro Negro.

Otra característica en las manifestaciones sísmicas en lo transcurrido de 2018 ha sido la ocurrencia de sismos VLP con periodos entre 2.5 y 4 segundos. Estos sismos acontecieron especialmente a partir del 6 de marzo y se mantuvieron durante el tiempo del enjambre de Marzo-Abril de 2018 (Fig. 5). Algunos VLPs se observan en estaciones sísmicas ubicadas a unos 250 km (red del volcán Puracé en el Departamento del Cauca).

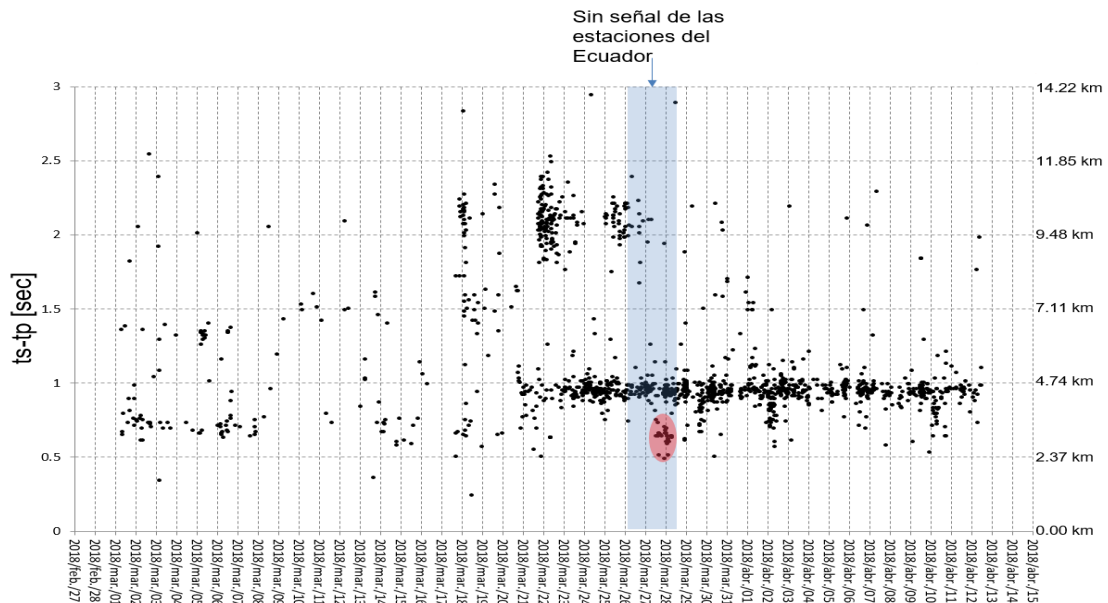
Se establecieron localizaciones preliminares con base en tiempos de llegada para algunos VLPs combinadas con polarización a partir del movimiento de partículas. En el análisis de polarización se establecieron los ángulos de acimut e incidencia aparente mediante la aplicación de ajuste de mínimos cuadrados al elipsoide de polarización. Se estableció el sistema de ejes principales definiendo los valores propios y los vectores propios de la matriz de covarianza a partir de las tres componentes del movimiento del terreno. La fuente de los VLPs se ubica en vecindades de las expresiones en superficie de los trazos de las fallas de Chiles-Cumbal y Chiles Sur (Fig. 6). No se tiene conocimiento del buzamiento de estas fallas. La localización de las fuentes de estos eventos resulta

similar a la ubicación de la fuente determinada por Lyons (2015) utilizando movimiento de partículas del VLP acontecido el 15 de octubre de 2014 durante el enjambre Septiembre-Diciembre de 2014 presidiendo la ocurrencia del sismo de ML 5.6 el 20 de octubre de 2014. Vale la pena mencionar que en 2015, con base en la localización realizada por Lyons para un VLP registrado el 14 de febrero, se sugiere un cambio en la localización de la fuente de los VLP, el cual se ubicó cerca a la cima del volcán Chiles (Figura 7).

a)



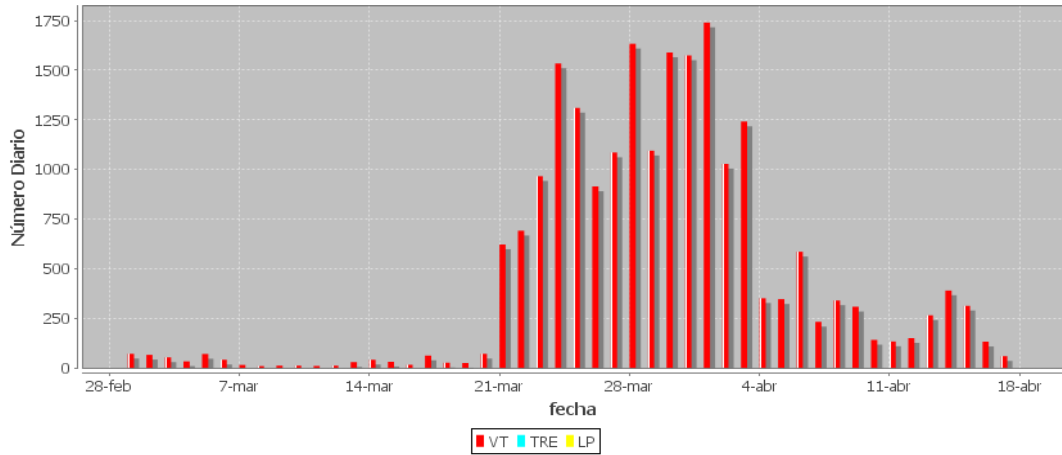
b)



**Figura 3.** a) Red sísmica, deformación y de muestreo de fuentes termales en la región de los volcanes Chiles-Cerro Negro; en triángulos con azul relleno se muestra la localización de las estaciones del SGC y en triángulos con contorno azul las estaciones de IG-EPN. Los cuadrados de contorno negro corresponden a las estaciones de GNSS del IG-EPN, y los rombos verdes a los sitios de las fuentes termales b) Evaluación temporal de las diferencias de los tiempos de llegada de P con S en la estación ICH.

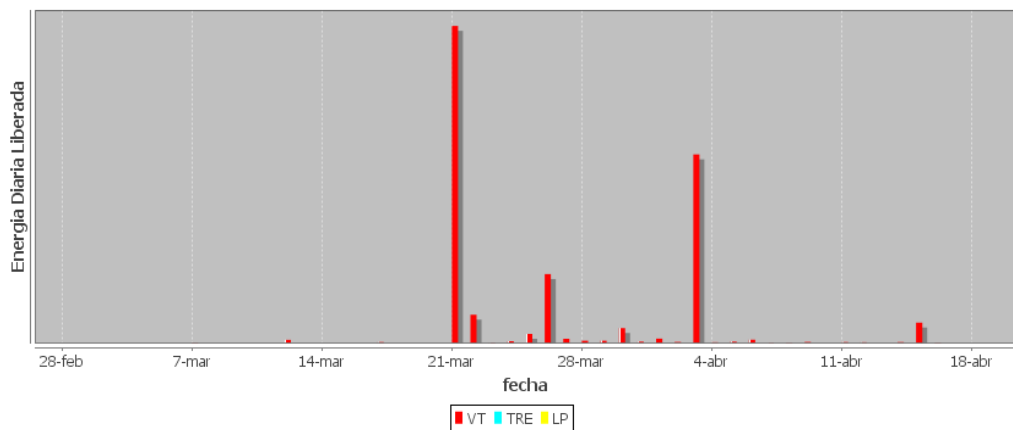
a)

**Número diario de eventos**



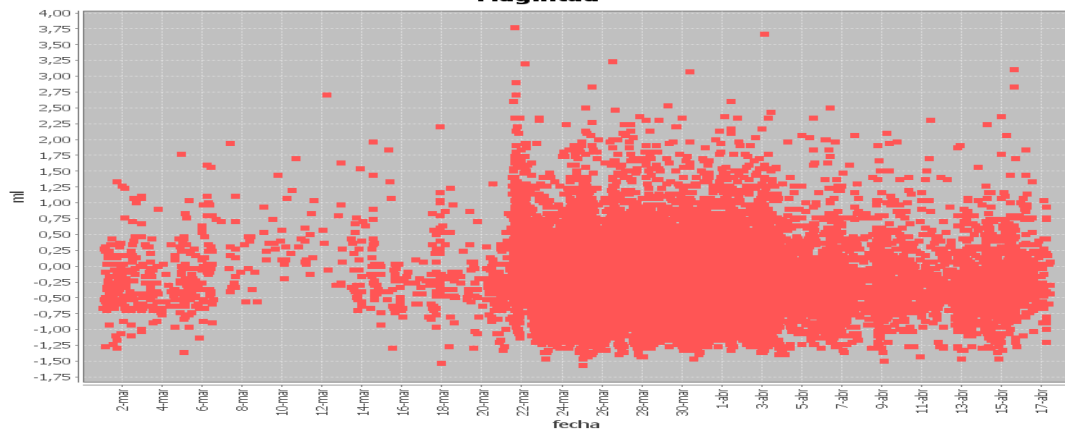
b)

**Energía diaria liberada**

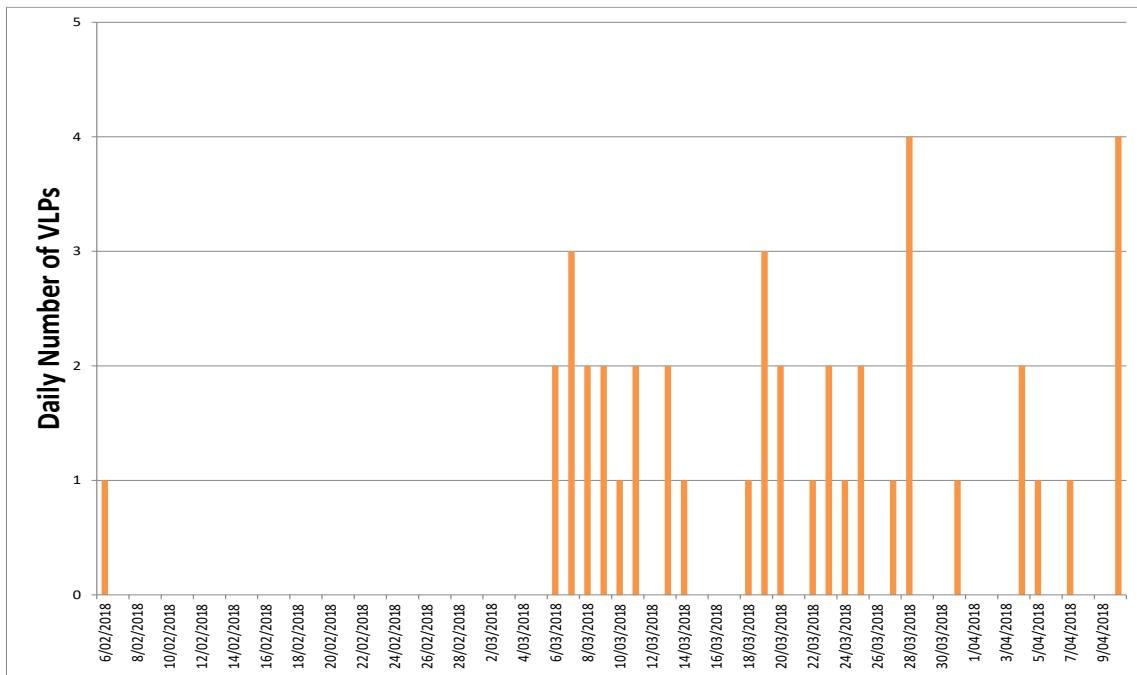


b)

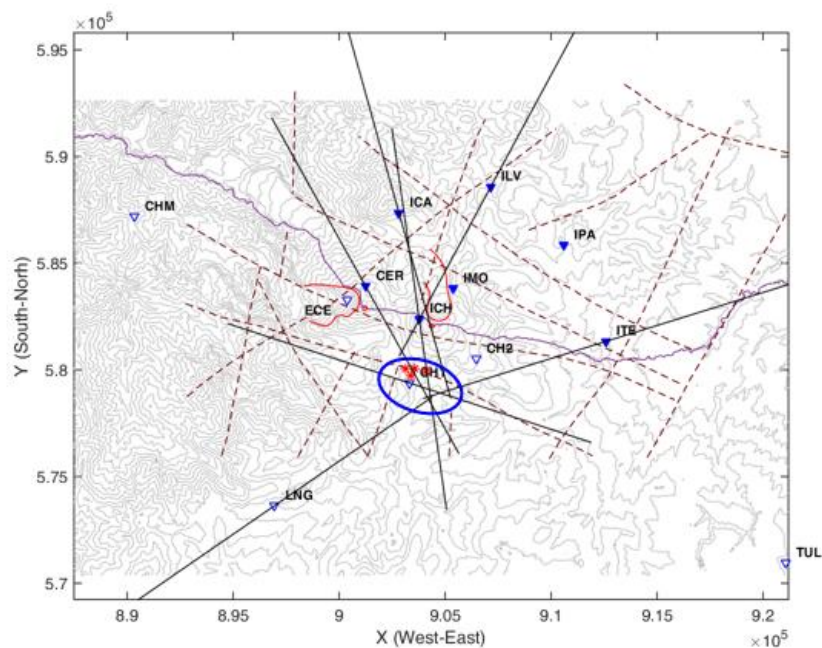
**Magnitud**



**Figura 4.** Histogramas correspondientes al enjambre de Marzo-Abril de 2018 considerando el periodo entre el 1 de marzo y 12 de abril de 2018 de a) ocurrencia diaria b) Energía liberada y c) magnitudes locales.



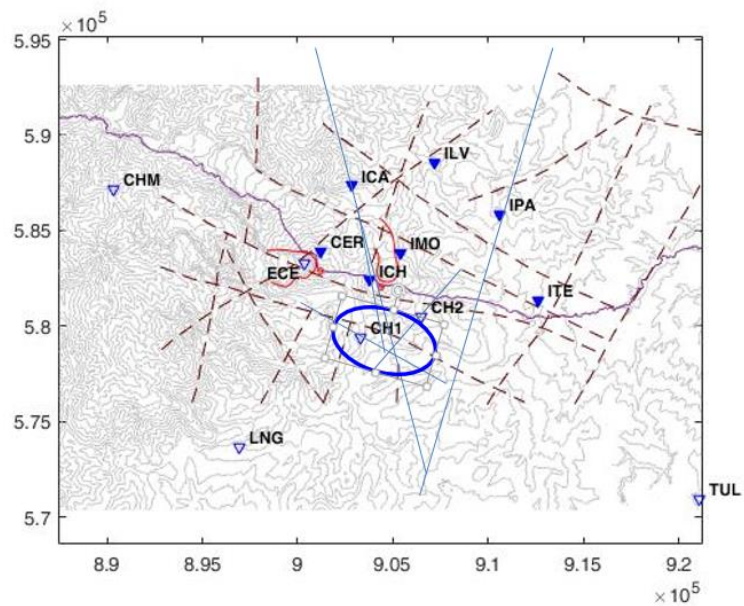
**Figura 5.** Histograma de eventos VLPs desde el 6 de febrero cuando se empezaron a notar en 2018 hasta el 10 de abril de 2018.



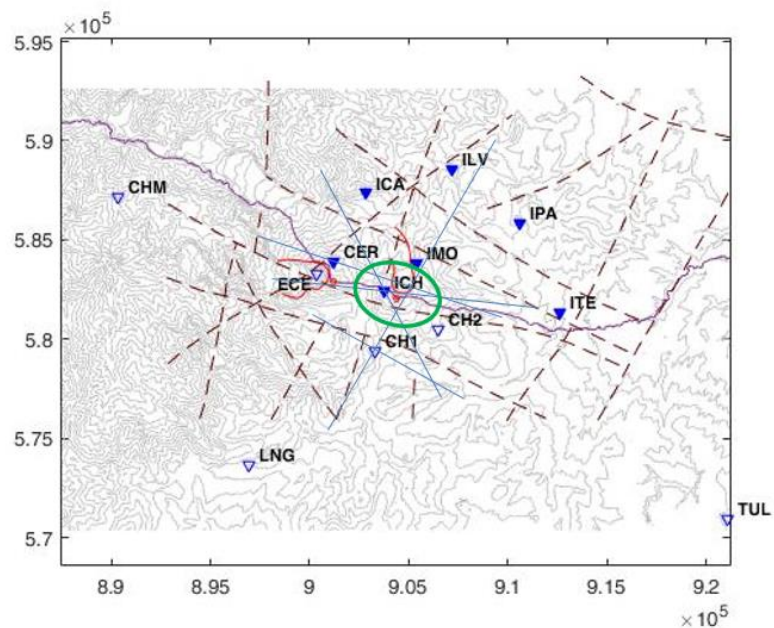
**Figura 6.** Zona epicentral de los sismos VLP (óvalo azul). Los asteriscos muestran algunas localizaciones empleando tiempos de llegada de primeros arribos y las líneas negras continuas corresponden a los vectores de polarización resultantes del movimiento de partículas que en este caso son del sismo del 20180320 a las 05:24.



a)



b)

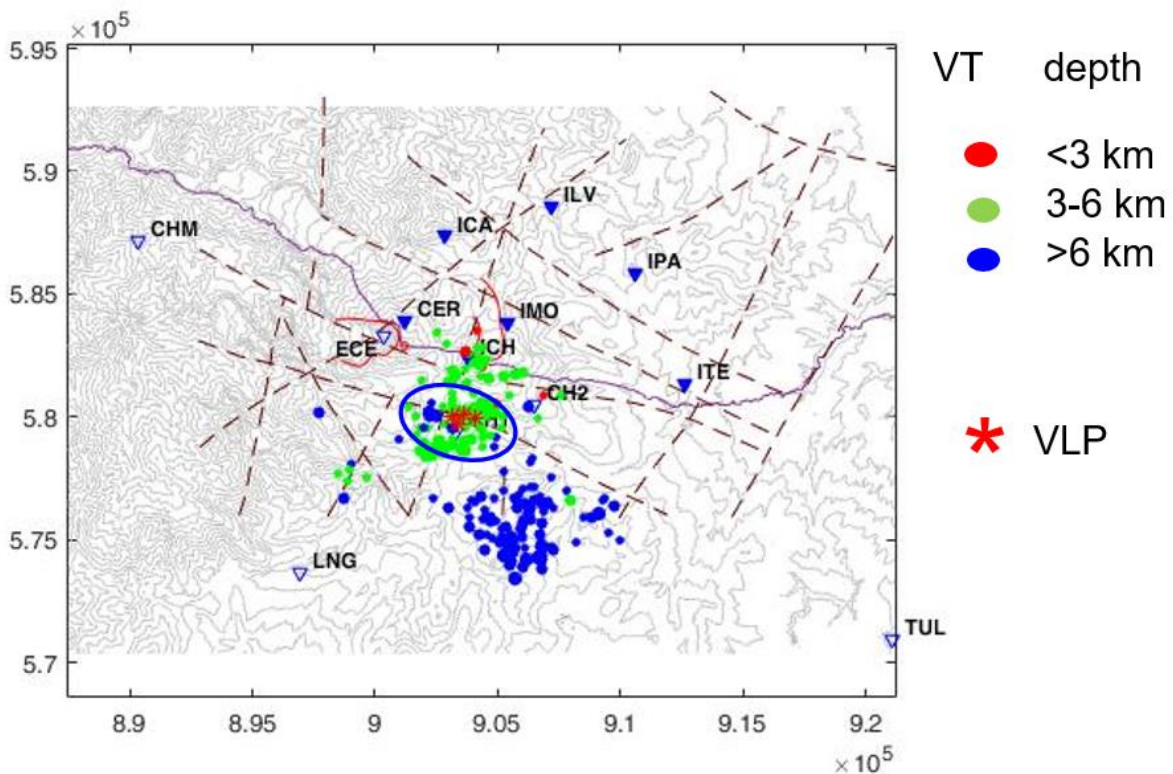


**Figura 7.** Movimiento de partículas de eventos VLP (~2-3 s) que ocurrieron a) 20141015 y b) 20150214 (Modificado de Lyons, 2015).

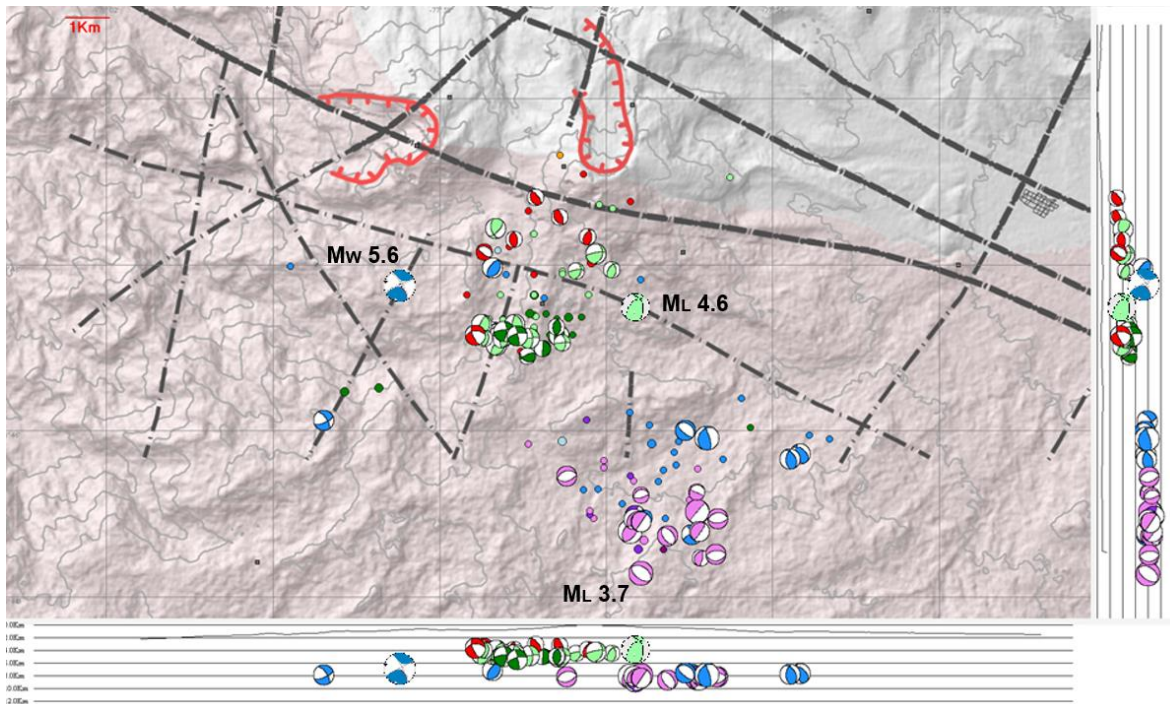
La zona de la localización de los VLPs de marzo-abril resulta ser similar a la de la fuente cercana de sismos VT que se agrupan en la zona proximal (Fig. 8).

Un análisis preliminar sobre mecanismos focales de algunos sismos VT del enjambre Marzo-Abril 2018, a partir de las polaridades de primeros arribos de la onda P, bajo la consideración de doble cupla, permiten tratar de caracterizar las fuentes sísmicas asociadas a algunas de las fallas, aunque

no todas están dibujadas (Fig. 9). En general, para el grupo de sismos VT más distante, se aprecia que los lineamientos con tendencia paralela al eje axial de los Andes (~NS) se corresponden con fallas inversas y dos de los mecanismos con fallas verticales. El grupo de sismos más próximo tiende a mostrar un patrón similar al del grupo distal; sin embargo, también se observan rasgos correspondientes a fallas transcurrentes. De acuerdo con Toro y Osorio (2005), estas fuentes sísmicas superficiales, asociadas con deformación cortical, están relacionadas con los principales sistemas de falla paralelos a la dirección axial de Los Andes, cuyo movimiento actual es resultado de la relación entre la geometría de cada segmento y la dirección del esfuerzo máximo dado por el estado de esfuerzos actual. Para la región, los esfuerzos principales mayores tienen una orientación ligeramente sesgada de la dirección EW. En el Ecuador esta relación favorece la reactivación de los sistemas de fallas inversas y transcurrentes de dirección NNE. Entonces, es posible sugerir que los VLPs, estén asociados a una zona de extensión en dirección casi NS que podrían vincular a rasgos estructurales paralelos al trazo de la falla Chiles-Sur.



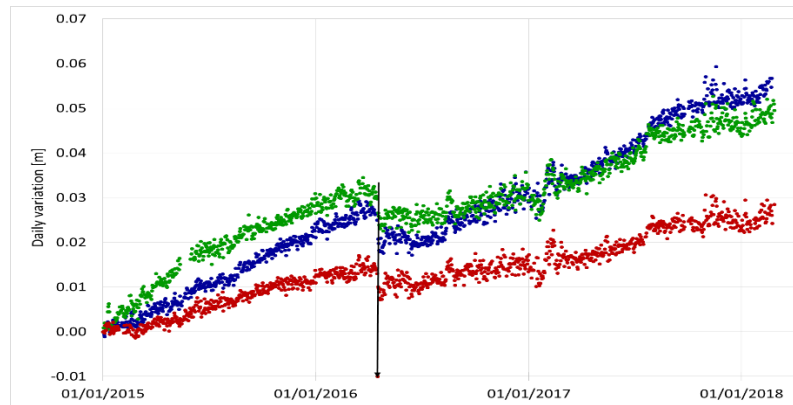
**Figura 8.** Localización de fuentes de sismos VLPs y VTs. El óvalo azul encierra la región de las fuentes de los VLPs que coincide con la zona epicentral de los sismos VTs proximales.



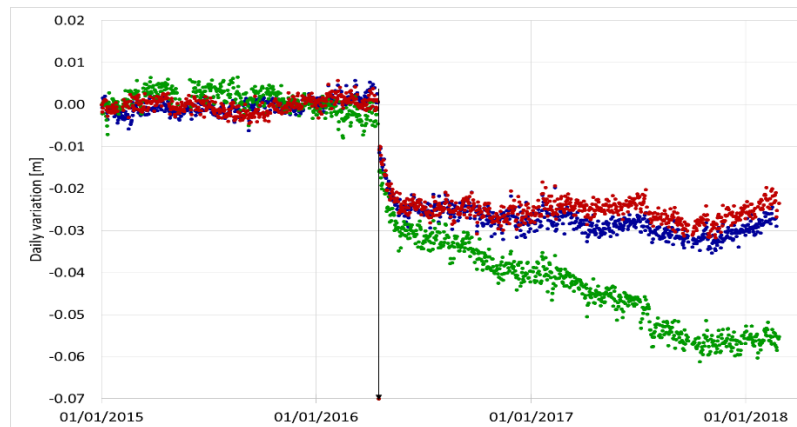
**Figura 9.** Mecanismos focales de algunos sismos VT correspondientes al enjambre Marzo-Abril 2018. Adicionalmente se muestran los mecanismos de los sismos más energéticos ocurridos en abril 30 de 2014 (ML 4.6) y octubre 20 de 2014 (Mw 5.6).

En la Fig. 10 se muestra los registros de los GNSS del IG-EPN: CHS y CHW (Fig. 7a) y COEC ubicado al SE de la cima del volcán Chiles a más de 20 km. El 16 de abril de 2016, en todas las componentes y especialmente en las horizontales, se observa un cambio brusco en la tendencia de los desplazamientos como respuesta a la ocurrencia del sismo de Pedernales. Aproximadamente un mes después, se recupera la tendencia previa al sismo excepto la componente E de CHW. En general se observa una tendencia de los desplazamientos hacia el N y justo después del sismo, el GNSS CHW muestra adicionalmente desplazamientos hacia el W que difieren de la tendencia de la deformación mostrada por COEC. Esto implica entonces que el cambio observado en CHW es de carácter local y no regional. Las componentes verticales de los GNSS CHS y CHW muestran una tendencia ascendente similar que difiere del comportamiento mostrado por COEC, lo que también sugiere que CHS y CHW están respondiendo a efectos más locales. Como se aprecia en la Fig. 7c, dos meses antes del sismo de Pedernal, hubo un descenso simultáneo en las tres componentes verticales de los GNSS del IG-EPN. Battaglia en abril de 2018, asumiendo la deformación de los GNSS entre el 13 de marzo de 2017 y 16 de febrero de 2018, anota que los vectores tienen una simetría radial muy clara, indicando una fuente presurizada, a una distancia de 4,2 km SE de la cima del Volcán Chiles a una profundidad de 5,1 km debajo del nivel de los 4700 msnm con un cambio de volumen de 0,003 km<sup>3</sup>. En la Fig. 11 se muestran la ubicación de tres posible geometrías de fuente: esférica, esferoide y dique, siendo la primera la que mejor ajuste presenta. Esta fuente se emplaza en inmediaciones del grupo de fuentes de sismos VT más superficiales y próximos al volcán Chiles y la más distante con focos más profundos, en un corredor donde no se observa una gran concentración de focos sísmicos.

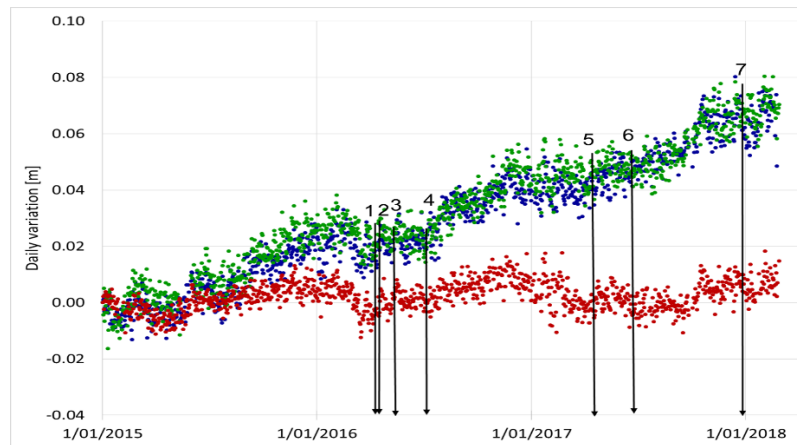
a)



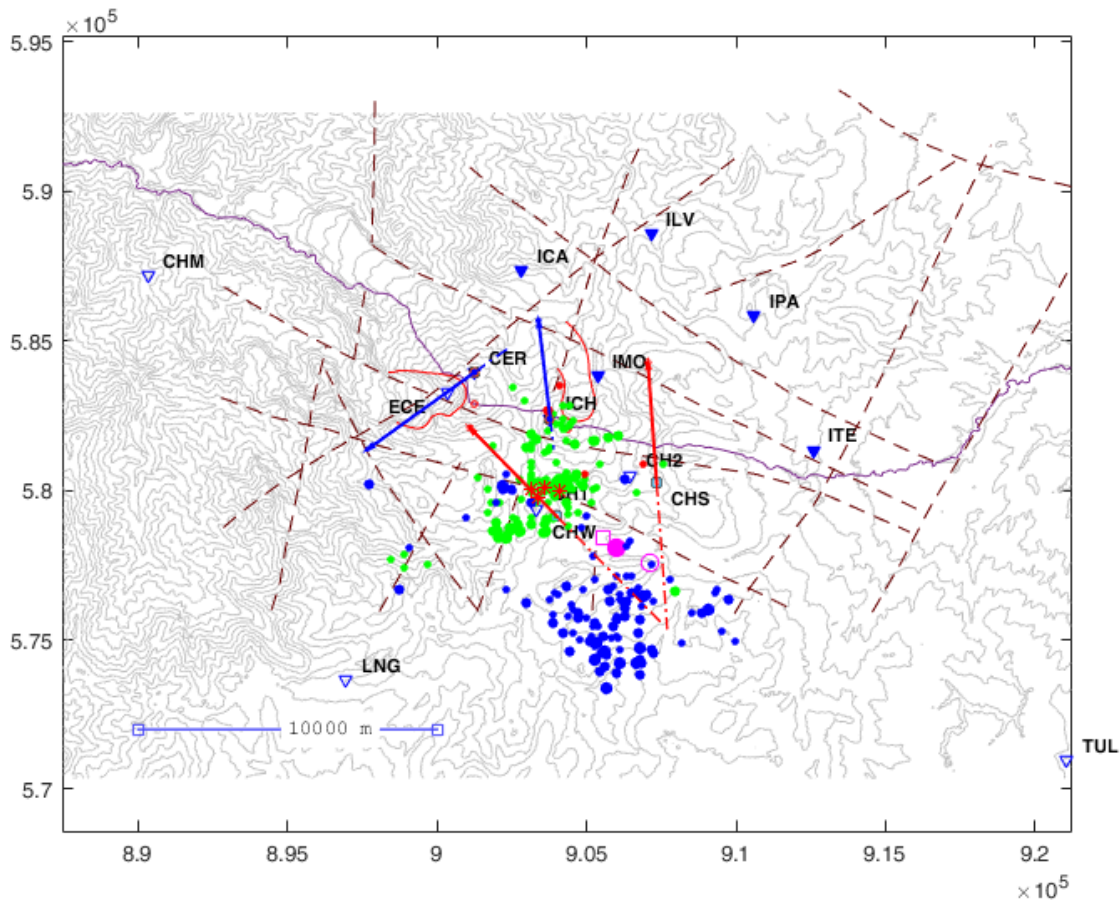
b)



c)



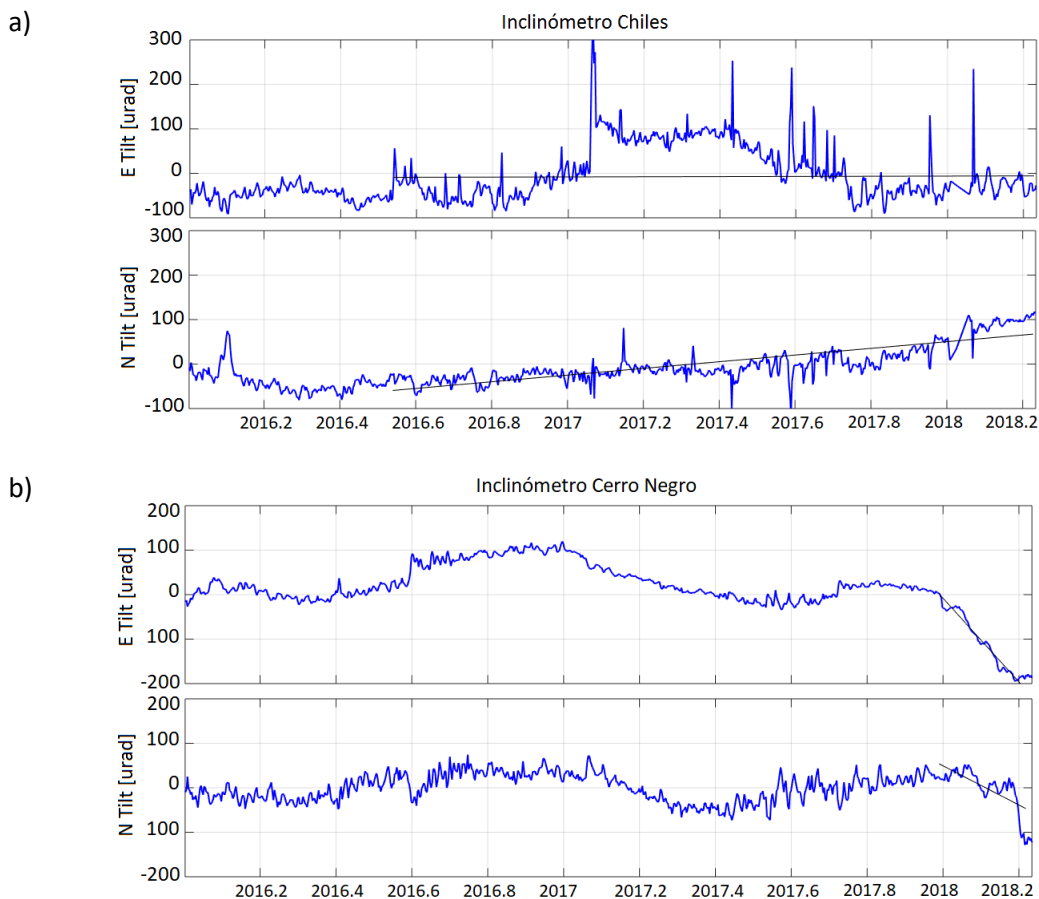
**Figura 10.** Desplazamientos de los GNSS CHS (azul), CHW (verde) y COEC (rojo) a) dirección N, b) dirección E y c) vertical. Las flechas indican la ocurrencia de algunos sismos que se enumeran así: 1 Muisnes-Pedernales el 16 de abril de 2016; 2 dos eventos (Muisnes) el 20 de abril de 2016 y uno (Bahía de Caraquez) el 22 de abril de 2016, 3 dos eventos (Muisne y Rosa Zárate) el 18 de mayo de 2016, 4 Bahía de Caraquez el 11 de julio de 2016, 5 Puyo el 28 de abril de 2017, 6 Bahía de Caraquez el 30 de junio de 2017, y 7 Bahía de Caraquez el 3 de diciembre de 2017. Estos sismos tuvieron magnitudes de 7.8, 6.2, 6.0, 6.0, 6.7, 6.9, 6.3, 6.1, 6.0 y 6.1 respectivamente.



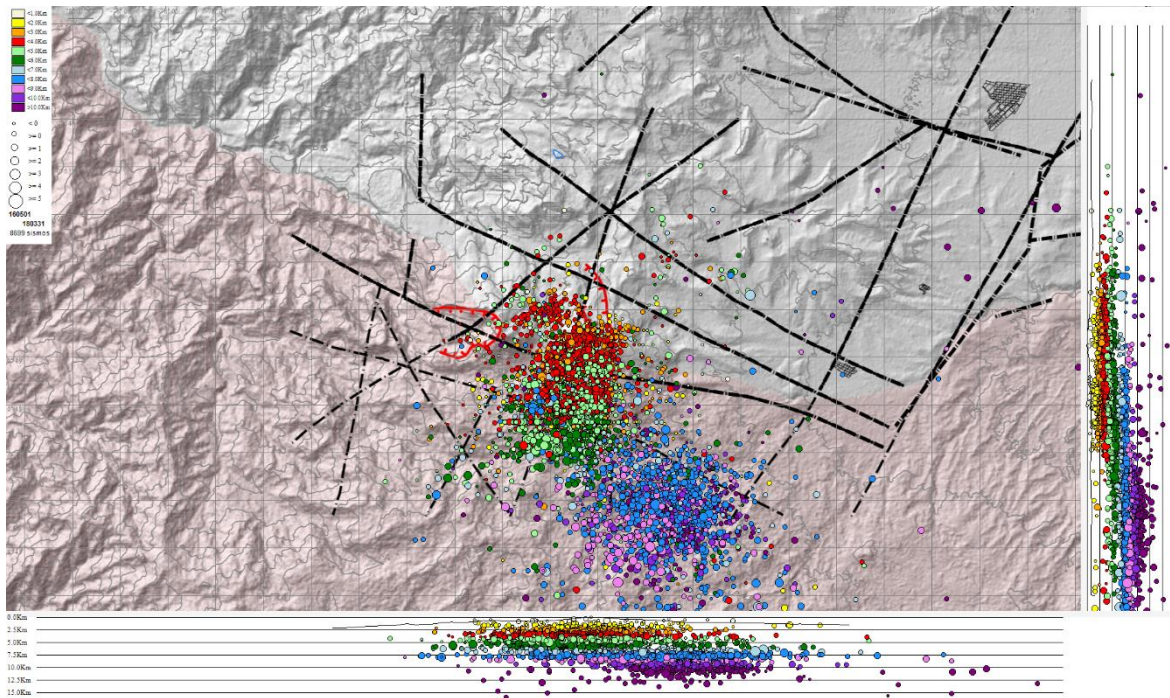
**Figura 11.** Localización de la fuente de deformación para una geometría de esfera (círculo magenta), dique (cuadrado magenta) y esferoide (circunferencia magenta). Las flechas rojas corresponden a los vectores de deformación de los GNSS que apunta a una fuente inflacionaria hacia el S de la cima del volcán Chiles, y las flechas azules son los vectores resultantes de los inclinómetros electrónicos. Adicionalmente se grafican las fuentes de sismos VLPs (asteriscos rojos) y VTs (círculos); un detalle de profundidades se muestra en la Fig. 8.

Con base en los datos de dos inclinómetros electrónicos, Cerro Negro –CER- y Chiles –ICH- (Fig. 7a), en la Fig. 12 se ilustra las series temporales de las componentes de inclinación en las direcciones N y E entre enero de 2016 y marzo de 2018. Estas series de datos fueron filtradas por efectos temperatura y deriva, aplicando el programa dMODELS (Bataglia, versión 2018). La componente E del inclinómetro ICH muestra una tendencia estable, con variación menor de  $20 \mu\text{rad}$ , mientras que la Norte, indica una tendencia ascendente que acumula cerca de  $170 \mu\text{rad}$  desde mayo de 2016. El inclinómetro Cerro Negro, muestra variaciones que no se asocian fácilmente con la actividad volcánica, sin embargo se destaca el cambio que se da desde enero de 2018 en la componente E con un acumulado de  $185 \mu\text{rad}$ ; y que en la componente N la tendencia cambia en los primeros días de marzo de 2018 con un valor acumulado de  $133 \mu\text{rad}$ .

El vector de deformación resultante del inclinómetro ICH desde mayo de 2016 a la fecha, muestra una inflación hacia el S de la cima del volcán Chiles en dirección a la fuente de los VLPs y a la fuente del grupo de sismos VT próximos (Figs.11 y 13). El vector resultante del inclinómetro CER, desde enero a marzo de 2018, muestra una dirección de una zona de inflación hacia el NE respecto a la cima del volcán Cerro Negro, paralela al trazo de la falla Cerro Negro-Nasate; aunque la orientación de este vector no muestra una concordancia con las fuentes sísmicas ubicadas al S del volcán Chiles, no se descarta que esta variación obedezca a la respuesta de movimientos en la falla Cerro Negro-Nasate que se encuentra vecina al sitio donde está ubicado el inclinómetro CER. No obstante, resulta interesante observar que esta tendencia se enmarca en una ventana de tiempo más cercana a la evolución de la ocurrencia de los VLPs y al enjambre de Marzo-Abril de 2018, que sin conocer el campo de esfuerzos en la zona, podría derivarse a la propagación de los mismos desde una posible fuente asociada con un proceso de intrusión magmática que podría estar localizada al S del volcán Chiles.

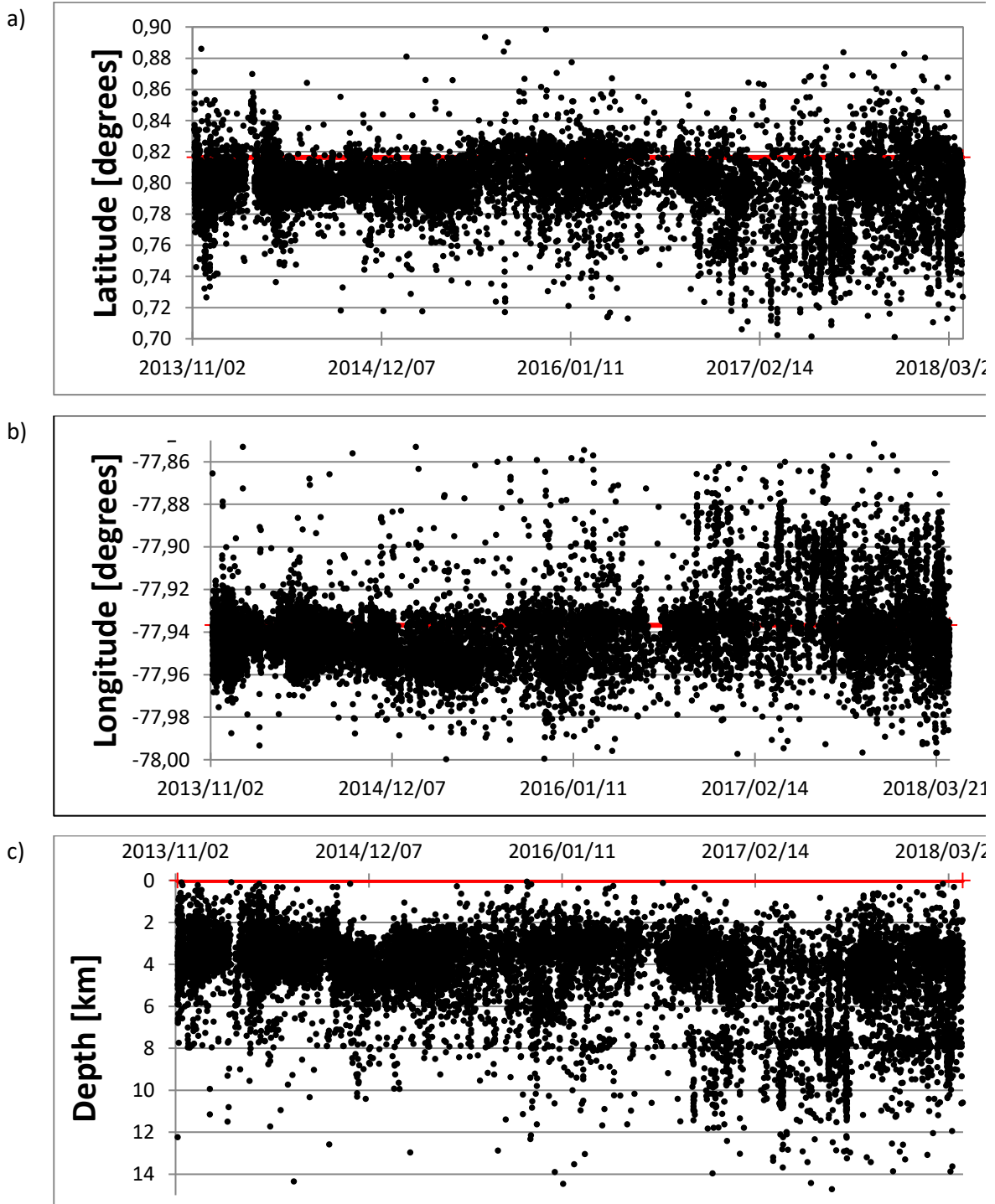


**Figura 12.** Series temporales de las componentes de inclinación en las direcciones N y E entre enero de 2016 y marzo de 2018 de inclinómetros electrónicos: a) Chiles –ICH y b) Cerro Negro –CER. Las líneas continuas en negro muestran los periodos que tienen una tendencia definida y sobre los que se calcula el vector de deformación resultante.



**Figura 13.** Distribución hipocentral de VTs empleando la red conjunta de estaciones del SGC y del IG-EPN desde mayo de 2016 tiempo similar al considerado en el análisis de la deformación de ICH. Nótese que se mantienen esencialmente los dos grupos de fuentes sísmicas.

Desde 2013, cuando se pone en evidencia la ocurrencia de una actividad sísmica en la región de los volcanes Chiles-Cerro Negro, se mantiene la concepción de que la gran mayoría de sismos, por su firma temporal y localización de sus fuentes, son eventos VTs. Adicionalmente, aunque con una baja ocurrencia, también se han podido identificar algunos eventos catalogados como LPs y VLPs, estos últimos con frecuencias menores a 0.5 Hz. A partir de marzo de 2016 empieza a densificarse el grupo de focos sísmicos más distantes que se caracteriza por mostrar VTs con mayores magnitudes y profundidades en general (Fig. 13 y 14). La fuente más permanente en el tiempo corresponde al grupo que se encuentra más próximo y sobre el edificio del volcán Chiles. Mediando estas dos fuentes hay un corredor con una baja densidad de sismos que coincide con la ubicación de la fuente presurizada descrita por Battaglia, responsable de la deformación observada en los GNSS y de la dinámica de fluidos que se ha manifestado con las fuentes de los VLPs observados en inmediaciones del grupo de sismos VT más cercanos al volcán Chiles y que resulta coincidente con la dirección del vector resultante del inclinómetro ICH. Mantenemos la idea de que esta sismicidad VT probablemente está controlada por una interacción de procesos magmáticos y tectónicos. Como se ha hecho referencia, inferimos que han ocurrido intrusiones de magma a profundidades mayores de 5 km y que la resultante exsolución de fluidos está desencadenando la sismicidad en la región de Chiles-Cerro Negro siguiendo patrones de mecanismos consistentes con la tectónica regional. Aunque hasta el momento no se ha detectado manifestaciones de actividad en superficie como procesos de desgasificación o cambios en fuentes termales, es posible retomar la idea de que el magma y los fluidos no pueden ascender fácilmente debido a que el campo de esfuerzos regional es altamente compresivo y a que estos volcanes han estado en reposo durante mucho tiempo.



**Figura 14.** Evolución espacio-temporal de los focos sísmicos de los sismos VTs a) latitud, b) longitud y c) profundidad. Las líneas rojas son referentes de latitud y longitud de la cima del volcán Chiles y la altitud de referencia (4700 msnm) tomada como nivel cero.



## Referencias

Toro, R.A. y Osorio, J.A., 2005. Determinación de los tensores de esfuerzos actuales para el segmento Norte de los Andes calculados a partir de mecanismos focales de sismos mayores. Boletín de Geología, Vol. 27, No. 44, 24 p. Bogotá, Colombia.