

# ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

## FACULTAD DE INGENIERÍA EN GEOLOGÍA Y PETRÓLEOS

DEFINICIÓN DE LA GEOMETRÍA DEL SEGMENTO NORTE (BELLAVISTA-  
CATEQUILLA) DEL SISTEMA DE FALLAS DE QUITO POR MEDIO DE  
RELOCALIZACIONES DE SISMOS OCURRIDOS EN AGOSTO 2014

TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE  
INGENIERO GEÓLOGO

OPCIÓN: PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

GUERRA TACO JHOSELIN ANDREA

[my.andy.1597@hotmail.com](mailto:my.andy.1597@hotmail.com)

[jhoselin.guerra@epn.edu.ec](mailto:jhoselin.guerra@epn.edu.ec)

DIRECTORA: Dra. MÓNICA DEL ROCÍO SEGOVIA REYES

[msegovia@igepn.edu.ec](mailto:msegovia@igepn.edu.ec)

QUITO, MAYO 2019

## DECLARACIÓN

Yo, Jhoselin Andrea Guerra Taco, declaro bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de mi autoría y que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración cedo mis derechos de propiedad intelectual correspondientes a este trabajo, a la Escuela Politécnica Nacional, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normatividad institucional vigente.

---

Jhoselin Andrea Guerra Taco

## **CERTIFICACIÓN**

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por Jhoselin Andrea Guerra Taco, bajo mi supervisión.

---

Dra. Mónica Segovia Reyes

DIRECTORA DEL PROYECTO

## AGRADECIMIENTOS

Agradecer primero a Dios por darme la fuerza y perseverancia necesarias para afrontar los momentos más difíciles de mi vida.

A mis padres, a mi padre Fernando por enseñarme a ver lo bueno y positivo de la vida, por darme valores y por el infinito amor hacia sus hijos, gracias papi por apoyarme cuando más lo necesite y hacer todo para que podamos salir adelante. Te amo muchísimo.

A mi hermanito-hijo que ha sido mi cómplice y que me hizo muy feliz desde el primer día que supe que vendría al mundo, te amo ñaño y sabes que daría todo por ti.

A mi amada hija Danna o como muchos le dicen Betina, gracias, hija mía por llegar a mi vida y ser la luz que me guió y dio fuerzas para salir de las adversidades. A ti Cris por habernos apoyado y estar al pendiente de nosotras, por los buenos y malos momentos que hemos pasado y tu amor incondicional.

A la Dra. Mónica Segovia por haberme dado la oportunidad de realizar este trabajo, por su incansable paciencia y por todas las sugerencias para la elaboración de este proyecto de titulación.

A mis abuelitos de parte de madre y a mi abuelita Teresita desde el cielo, quien fue como una segunda madre. A mi tía Teresa, mis tíos Segundo y Jorge y mis tíos “Los Pepes” que estuvieron en los momentos difíciles. Gracias de todo corazón.

A todo el personal de IG-EPN en especial a Andre que con su gran corazón me guió tanto en lo personal como en el desarrollo de este trabajo y al inge Sandrito por todas las correcciones. Muchas gracias por la oportunidad brindada.

A mi mejor amiga Meli, con quien he compartido gratos momentos y quien ha sido incondicional. A mi querida Veja que ha sido una gran amiga a lo largo de la carrera, a mis amigos Mafer, Dianita, Juanito Andrés, Sammy, Vale y Pao por haber sido tan buenos conmigo y estar incondicionales ayudándome en todo momento, estoy eternamente agradecida por haberlos conocido. Y a todos los amigos que hice en la Poli.

A los ingenieros del área de Vialidad del Consejo Provincial, a mi querida amiga Geovis, a mi tutor de pasantías Alex. En especial al Inge. Hugo Orbea quien fue un pilar fundamental para el desarrollo de mis pasantías y quien ha sido como un padre para mí, gracias inge Hugo por todo lo que me ha enseñado.

## DEDICATORIA

*A mi querido padre Fernando Guerra*

*A mi amada hija Danna*

*A mi hermanito Isaac*

## CONTENIDO

DECLARACIÓN.....	I
CERTIFICACIÓN.....	II
AGRADECIMIENTOS.....	III
DEDICATORIA.....	IV
CONTENIDO .....	V
INDICE DE FIGURAS.....	VII
INDICE DE TABLAS.....	XI
LISTA DE ANEXOS.....	XI
RESUMEN.....	XII
ABSTRACT.....	XIII
<b>1. INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>1</b>
1.1. Antecedentes y Justificación .....	1
1.2. Objetivo General .....	2
1.3. Objetivos Específicos .....	2
1.4. Plan de Trabajo.....	3
1.5. Ubicación de la Zona de Estudio .....	3
<b>2. MARCO TEÓRICO .....</b>	<b>5</b>
2.1. Marco Geodinámico .....	5
2.2. Marco Geológico .....	6
2.3. Tectónica Local .....	10
2.4. Geología Local .....	11
2.4.1. Relleno de la cuenca Quito – San Antonio de Pichincha– Guayllabamba.....	12
<b>3. SISMICIDAD DE QUITO.....</b>	<b>15</b>
3.1. Sismicidad Histórica de Quito .....	15
3.2. Sismicidad Instrumental de Quito .....	17
3.3. Características de la Red Sísmica de Quito para el Monitoreo .....	26
<b>4. LOCALIZACIÓN DE LOS EVENTOS TECTÓNICOS LOCALES.....</b>	<b>29</b>
4.1. Conceptos .....	29
4.1.1. Los sismos y la generación de ondas sísmicas.....	29
4.1.2. Métodos de Localización.....	30
4.1.3. Identificación y Caracterización de los Arribos de las Ondas P y S.....	31
4.2. Software utilizado.....	32
4.3. Base de Datos utilizada .....	33

4.4.	Caracterización del Medio en Base a Datos Sismológicos .....	35
<b>5.</b>	<b>RELOCALIZACIÓN DE LOS EVENTOS TECTÓNICOS LOCALES.....</b>	<b>37</b>
5.1.	Metodología.....	37
	Cálculo de un modelo de velocidades.....	37
5.2.	Aplicación de la metodología .....	39
5.3.	Relocalizaciones mediante HYPOELLIPSE.....	47
<b>6.</b>	<b>CARACTERIZACIÓN DE LA FUENTE DE LOS EVENTOS TECTÓNICOS LOCALES .....</b>	<b>54</b>
6.1.	Conceptos .....	54
	Mecanismos focales .....	54
6.2.	Metodología aplicada .....	59
6.2.1.	Software HASH.....	59
6.2.2.	Selección de eventos sísmicos.....	62
6.2.3.	Comparación de mecanismos focales resultado de dos métodos .....	62
6.2.4.	Discusión de los resultados de HASH e HYPOELLIPSE .....	67
<b>7.</b>	<b>DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES .....</b>	<b>68</b>
	<b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>73</b>
	<b>ANEXOS.....</b>	<b>80</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.1.</b> Ubicación de la zona de estudio: a) área de estudio señalada con el rectángulo rojo, b) ubicación en la provincia de Pichincha y c) ubicación de Pichincha en el Ecuador. ....	4
<b>Figura 2.1.</b> Carta batimétrica del NW de Sudamérica. Donde se observan las principales estructuras oceánicas y los movimientos relativos de las placas en base a datos de GPS. Modificado de Gailler (2005), en Pacheco (2013). ....	6
<b>Figura 2.2.</b> Principales regiones geológicas morfoestructurales del Ecuador. Tomado de Vallejo et al., (2009). ....	9
<b>Figura 2.3.</b> Vista tridimensional de la cuenca de Quito en la depresión de Interandina. Tomado de Alvarado et al. 2014. ....	11
<b>Figura 2.4.</b> Columnas litológicas de las principales cuencas de la Depresión Interandina. Modificado de Winkler et al (2005). ....	12
<b>Figura 3.1.</b> Mapa de localizaciones de los eventos sísmicos ocurridos entre los años 1990 y 1999 alrededor de la ciudad de Quito. Entre paréntesis se encuentra el número total de sismos con magnitud mayor 4.9, ocurridos en el respectivo año ....	18
<b>Figura 3.2.</b> Mapa de localizaciones de los eventos sísmicos ocurridos entre los años 2000 y 2010 en la ciudad de Quito. Entre paréntesis se encuentra el número total de sismos localizados en el respectivo año ....	18
<b>Figura 3.3.</b> Mapa de localizaciones de los eventos sísmicos ocurridos entre los años 2010 y 2018 en la ciudad de Quito. Entre paréntesis se encuentra el número total de sismos localizados en el respectivo año. ....	19
Figura 3.4. Mecanismo focal obtenido de CGMT, del 10 de agosto de 1990. ....	19
<b>Figura 3.5.</b> Mecanismos focales para los eventos del (a) 6 de julio y (b) 7 de noviembre del 2009, en Quito. Tomado de "INFORMES SÍSMICOS PARA EL ECUADOR". IGEPN. ....	23
<b>Figura 3.6.</b> Mecanismos focales para el evento principal y la réplica del 17 de febrero. Tomado de "INFORMES SÍSMICOS PARA EL ECUADOR". IGEPN. ....	24
<b>Figura 3.7.</b> Mecanismos focales para los eventos del 29 de octubre y del 26 de noviembre del 2011. Tomado de "INFORMES SÍSMICOS PARA EL ECUADOR". IGEPN. ....	24
Figura 3.8. Mecanismo focal obtenido de CGMT, para el evento principal del 12 de agosto del 2014. ....	25
<b>Figura 3.9.</b> Mecanismos focales obtenidos para los sismos del (a) 12 de enero y (b) el 15 de marzo. Tomado de "INFORMES SÍSMICOS PARA EL ECUADOR". IGEPN. ...	25



<b>Figura 3.10.</b> Mapa de distribución de las estaciones sísmicas utilizadas para este estudio.....	27
<b>Figura 3.11.</b> Mapa de distribución de las estaciones sísmicas temporales.....	28
<b>Figura 4.1.</b> Ondas P donde se observa la dilatación y compresión del material en la dirección de propagación. Tomado de Sáez, 2016 .....	29
<b>Figura 4.2.</b> Ondas de corte, se observa cómo se propagan con movimientos en un plano perpendicular a la dirección de propagación. Tomado de Sáez, 2016 .....	30
<b>Figura 4.3.</b> Polaridad del primer arribo de la onda P relacionado con su patrón de radiación a partir de la fuente que tiene un mecanismo determinado (cuadrantes negros: compresión, cuadrantes blancos: dilatación). Los triángulos amarillos son las estaciones. Tomado de Jean-Baptiste, 2016. ....	31
<b>Figura 4.4.</b> Arribo de las ondas P y S para el sismo principal ocurrido el 12 de agosto del 2014. Software: SeisComp3.....	32
<b>Figura 4.5.</b> Histograma de RMS de los eventos sísmicos de la crisis de agosto de 2014. En el eje horizontal se encuentran rangos de los RMS con valores desde 0 hasta 1. En el eje vertical se observa el número de eventos para cada rango del RMS.....	33
<b>Figura 4.6.</b> Gráfico del <i>travel time</i> , donde se observa la relación entre la distancia y el tiempo de arribo para un sismo en particular. Los puntos verdes corresponden a las fases P y los cuadrados verdes a las fases S. Tomado del SeisComP3. ....	34
<b>Figura 4.7.</b> Deformación de un testigo al aplicar una fuerza a lo largo del eje más largo para la definición del coeficiente de Poisson (Bormann, 2009). ....	35
<b>Figura 4.8.</b> Diagrama de Wadati modificado, con Vp/Vs para los sismos de la crisis de agosto de 2014. ....	36
<b>Figura 5.1.</b> Resumen del esquema de trabajo de VELEST. Modificado de Alvarado et al., 2014b.....	38
<b>Figura 5.2.</b> Modelos iniciales de velocidad el primero en azul de bajas velocidades y el segundo en naranja de velocidades altas. Usado para la inversión realizada con el programa VELEST.....	39
<b>Figura 5.3.</b> Histograma del RMS respectivo para los 2 modelos de velocidades iniciales. En el eje horizontal están los RMS y en el eje vertical el número de eventos para cada rango de RMS.....	40
<b>Figura 5.4.</b> Localizaciones de los epicentros para los dos modelos de velocidades iniciales.....	41
<b>Figura 5.5.</b> localizaciones de los hipocentros respecto a la longitud para los dos modelos de velocidades iniciales. ....	42
<b>Figura 5.6.</b> Modelo de velocidades después de realizar las inversiones. Vp1 es el modelo después de la primera inversión, Vp2 es el modelo después de la segunda	

inversión, Vp3 después de la tercera inversión, Vp4 después de la cuarta inversión, Vp5 después de la inversión 5, Vp6 después de la sexta inversión y el modelo final después de la séptima inversión. ....	43
<b>Figura 5.7.</b> Mapa de correcciones de estación, los tonos azules son utilizados para correcciones negativas mientras que los rojos son utilizados para correcciones positivas. El polígono negro es el área de estudio. ....	45
<b>Figura 5.8.</b> Estadísticas de acuerdo con los resultados de VELEST, incluyendo estaciones lejanas. NHYP es el número de hipocentros, NREF es el número de <i>headwaves</i> , %len2 es el porcentaje de km refractado con respecto a todos los km refractados, NHIT es el número de rayos que atravesaron cada capa. ....	46
<b>Figura 5.9.</b> Mapa con las relocalizaciones obtenidas en VELEST comparadas con las localizaciones iniciales (eventos de la crisis de agosto 2014). En azul las localizaciones iniciales (RENSIG – SC3), en rojo las localizaciones finales de VELEST. Al lado derecho se encuentran las proyecciones latitud vs profundidad y longitud vs profundidad, las líneas entrecortadas muestran la variación de localizaciones inicial. ....	47
<b>Figura 5.10.</b> Mapa de relocalizaciones obtenidas con HYPOELLIPSE (eventos de la crisis de agosto de 2014). Los puntos azules: localizaciones iniciales; puntos rojos: localizaciones finales. Al lado derecho se encuentran las proyecciones latitud vs profundidad y longitud vs profundidad, las líneas entrecortadas muestran la variación de localizaciones inicial y la final. El polígono representa el área de la proyección. ....	48
<b>Figura 5.11.</b> Histograma correspondiente al RMS de la crisis del 2014, determinado por HYPOELLIPSE. En el eje horizontal están los RMS y en el eje vertical el número de eventos para cada rango de RMS. ....	49
<b>Figura 5.12.</b> Histograma de calidad de localizaciones dadas por HYPOELLIPSE para la crisis del 2014. En el eje horizontal se encuentra la calidad de las localizaciones y en el eje vertical el número de eventos para cada rango de calidad. ....	49
<b>Figura 5.13.</b> Histogramas de los 3 ejes del elipsoide de error determinado por HYPOELLIPSE para los eventos del 2014. En el eje horizontal se encuentra el error en km y en el eje vertical está el número de eventos para cada rango de error. ....	50
<b>Figura 5.14.</b> Mapa de relocalizaciones obtenidas en HYPOELLIPSE para los 19 sismos ocurridos entre 2011-2018. Puntos azules: las localizaciones iniciales (RENSIG – SC3); puntos rojos: localizaciones finales. Los gráficos de la derecha son las proyecciones latitud vs la profundidad y longitud vs profundidad, las líneas entrecortadas muestran la variación de localizaciones inicial. El polígono representa el área de la proyección. ....	51
<b>Figura 5.15.</b> Histograma correspondiente al RMS determinado por HYPOELLIPSE para los otros eventos ocurridos entre 2011 y 2018. En el eje horizontal están los RMS y en el eje vertical el número de eventos para cada rango de RMS. ....	52

<b>Figura 5.16.</b> Histograma de calidad de localizaciones dadas por HYPOELLIPSE para los otros eventos. En el eje horizontal se encuentra la calidad de las localizaciones y en el eje vertical el número de eventos para cada rango de calidad .....	52
<b>Figura 5.17.</b> Histogramas de los 3 ejes del elipsoide de error determinados por HYPOELLIPSE para los otros eventos. En el eje horizontal se encuentra el error y en el eje vertical está el número de eventos para cada rango de error .....	53
<b>Figura 6.1.</b> a) representación del movimiento en una falla transcurrente dextral. b) patrones de radiación de las ondas P y S para una falla transcurrente dextral. Tomado de Gosar (2014).....	55
<b>Figura 6.2.</b> Patrón de radiación de fases P: en rojo los cuadrantes en compresión, en azul los cuadrantes en dilatación. Se observa el plano principal en rojo y el plano auxiliar en celeste. Los ejes de tensión T que atraviesa 2 cuadrantes de dilatación y el eje de compresión P que pasa por los 2 cuadrantes compresivos. Tomado del glosario de sismología del Centro Sismológico Nacional de la Universidad de Chile. ....	56
<b>Figura 6.3.</b> Ejemplos de fallas con su respectivo mecanismo focal. Sobre cada mecanismo existe un boceto de la geometría de la falla. (a) Falla de rumbo, (b) falla inversa y (c) falla normal. Los cuadrantes compresionales están sombreados y el signo de la dirección del primer movimiento se incluye en cada cuadrante. La línea discontinua representa el plano auxiliar. Modificado de Snoke (2009). ....	57
<b>Figura 6.4.</b> Esquema del plano de falla con los ángulos <i>strike</i> ( $\phi$ ), <i>dip</i> ( $\delta$ ) y <i>rake</i> ( $\lambda$ ). Tomado de Snoke (2009). ....	57
<b>Figura 6.5.</b> Diagrama de flujo para determinar los mecanismos focales mediante el método HASH. Tomado de Hardebeck y Shearer, 2002.....	60
<b>Figura 6.6.</b> Parámetros de entrada para el programa.....	61
<b>Figura 6.7.</b> mecanismos focales de los eventos ocurridos en la crisis del 2014. ....	65
<b>Figura 6.8.</b> Mecanismos focales de los eventos significativos ocurridos en otros años. ....	66
<b>Figura 7.1:</b> Sismicidad Quito(a) Corte NO-SE, las líneas rojas son la prolongación del plano de falla y un plano secundario. (b) Localizaciones finales de los eventos de la crisis de 2014 en relación a la sismicidad de la zona de Quito de acuerdo a Alvarado et al., (2014) (eventos relocalizados con el método MAXI, Alvarado et al. (2014)) y de acuerdo con este estudio (relocalizados con HYPOELLIPSE). Los puntos de color rosado representan los eventos relocalizados en este estudio. Los puntos de colores naranja, amarillo, celeste y azul son las localizaciones calculadas por Alvarado et al., (2014). Figura cortesía de Y. Font.....	69
<b>Figura 7.2.</b> Modelo de propagación de pliegues a lo largo de fallas inversas con buzamiento constante. Tomado de Chester y Chester (1990) .....	70

<b>Figura 7.3.</b> Mapa de los 9 eventos significativos ocurridos en otros años relocalizados en el presente estudio con sus respectivos mecanismos focales. ....	72
---	----

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 3.1.</b> Detalle de los principales eventos sísmicos históricos (pre -instrumentales) registros en Quito y alrededores entre 1560 y 1988. Tomado de Calahorrano, 2001 .....	16
<b>Tabla 3.2.</b> Principales eventos sentidos ocurridos en la ciudad de Quito desde el 2000 hasta el 2014, la información utilizada fue obtenida de la página del Instituto Geofísico. ....	21
<b>Tabla 3.3.</b> Ubicación de las estaciones temporales.....	27
<b>Tabla 5.1.</b> Correcciones de tiempo para cada estación sísmica utilizada. ....	44
Tabla 6.1. Tipos de falla en base al valor del <i>rake</i> , modificado de Cronin (2010) .....	58
<b>Tabla 6.2.</b> Resumen de la calidad de mecanismos focales obtenidos por Hash. Tomado de Hardebeck y Shearer (2008) .....	63
<b>Tabla 6.3.</b> Sismos seleccionados del 2014 para la obtención de los mecanismos focales utilizando el programa HASH, donde se observa la fecha, hora (GTM), magnitud, <i>strike</i> , <i>dip</i> , <i>rake</i> , probabilidad de que el mecanismo sea cercano a la solución y calidad del mecanismo. ....	64
<b>Tabla 6.4.</b> Sismos seleccionados de otros años para la obtención de los mecanismos focales utilizando el programa HASH, donde se observa la fecha, hora (GTM), magnitud, <i>strike</i> , <i>dip</i> , <i>rake</i> , probabilidad de que el mecanismo sea cercano a la solución y calidad del mecanismo. ....	64

## LISTA DE ANEXOS

<b>Anexo 1.</b> Sismos de Quito en el 2014 de donde se escogieron los sismos para realizar este proyecto. ....	80
<b>Anexo 2.</b> Sismos relocalizados con HYPOELLIPSE y Velest para la crisis del 2014 y para los eventos ocurridos entre el 2011 y 2018.....	88
<b>Anexo 3.</b> Mecanismos focales de los eventos ocurridos en el año 2014 .....	96
<b>Anexo 4.</b> Mecanismos focales de eventos significativos ocurridos en otros años.....	100

## RESUMEN

El Sistema de Fallas de Quito (SFQ) se encuentra debajo de la capital ecuatoriana de Quito y amenaza a más de 2 millones de habitantes en la zona. Estudios anteriores basados en la sismicidad y morfología del área caracterizan un régimen tectónico de fallas principalmente inversas, con fallas individuales orientadas N – S (Calahorrano, 2001; Alvarado et al., 2014). La sismicidad cerca del segmento Bellavista – Catequilla al norte del SFQ ha mostrado una intensa actividad sísmica con miles de sismos con magnitudes menores a 4.1 (Calahorrano, 2001) y secuencias tradicionales sismo principal- réplicas. El ejemplo reciente más importante es el sismo ocurrido el 12 de agosto del 2014 que tuvo una magnitud MLv 5.1. Una red temporal de cinco estaciones sísmicas capturó cientos de réplicas registradas dentro de los dos siguientes meses del evento principal.

En este estudio, se utilizaron datos tanto de la red temporal como de las estaciones permanentes y para determinar ubicaciones más precisas de las réplicas más grandes de la crisis del 2014. Los hipocentros relocalizados para esta crisis se ubican más hacia el Este, mayormente entre 0 y 16.79 km de profundidad y delinean un plano de falla buzando  $43.16^{\circ} \pm 12^{\circ}$  hacia el Oeste. Adicionalmente, se determinó mecanismos focales basados en polaridades de primer arribo. Para los 19 eventos más grandes, los mecanismos focales indican fallas inversas a lo largo de las fallas NNE. La geometría de la superficie y la cinemática de la falla determinadas a partir de este estudio son en gran medida consistentes con trabajos previos en esta zona como Alvarado et al., (2014)

## ABSTRACT

The Quito Fault System (QFS) lies beneath the Ecuadorean capital of Quito and threatens more than 2 million inhabitants in the area. Previous studies based on the seismicity and morphology of the area characterize a primarily reverse faulting tectonic regime, with individual faults oriented mostly N-S (Calahorrano, 2001; Alvarado et. al., 2014). Seismicity near the Bellavista-Catequilla segment along the northern QFS has shown both intense seismic activity with thousands of earthquakes with magnitudes less than 4.1 (Calahorrano, 2001) and traditional mainshock-aftershock sequences. The most important recent example of the latter is the 2014  $M_L$  5.1 earthquake. A temporary network of five seismic stations captured hundreds of aftershocks within two months of the main event.

In this study, we used data from both the temporary network and already existing background stations to determine precise locations for the largest aftershocks in the crisis of 2014. Relocated hypocenters are located further to the East, between 0 and 16.79 km depth and delineate a plane dipping  $43.16^\circ \pm 12^\circ$  to the West. Additionally, we determine focal mechanisms based on first arrival polarities. For the ~19 largest events, focal mechanisms show reverse faulting along a ~NNE striking fault. The shallow geometry and kinematics of the fault determined from this study are largely consistent with previous work from the area such as Alvarado et al., (2014).

# 1. INTRODUCCIÓN

El presente trabajo titulado “Definición de la geometría del segmento Norte (Bellavista-Catequilla) del Sistema de Fallas de Quito por medio de relocalizaciones de sismos ocurridos en agosto 2014” responde a una necesidad de caracterizar la falla de Quito, ya que se considera que el Sistema de Fallas Quito tiene la capacidad de generar terremotos que pueden afectar en gran manera a zonas pobladas, en este caso principalmente a la ciudad de Quito. Teniendo en cuenta que la capital del Ecuador consta de más de 2 millones de habitantes de acuerdo al INEC.

La cuenca de Quito está delimitada en la parte oriental por la expresión superficial del Sistema de Fallas Quito (SFQ) y una serie de colinas cuyos ejes se alinean N – S por el Sistema de Fallas Guayllabamba (SFG). Los dos sistemas se extienden a lo largo de la Depresión Interandina, con una longitud en conjunto de 60 km aproximadamente. Otras evidencias de los SFQ y SFG son la presencia de paleo-valles colgados, interrupción de redes de drenaje y estructuras que indican plegamiento, que son muestras de deformación y levantamiento de la cuenca de Quito (Alvarado et al., 2014).

En este estudio se pretende definir la geometría y caracterizar el tipo de movimiento de un segmento de la falla de Quito utilizando datos de la actividad sísmica ocurrida entre agosto y septiembre del 2014, además de la relocalización de eventos más grandes ocurridos en los últimos años.

## 1.1. Antecedentes y Justificación

La subducción oblicua de la placa oceánica de Nazca bajo la placa continental Sudamericana ocasiona una alta actividad sísmica, volcánica y la formación del Sliver Nor-andino que migra al NE respecto a la zona estable de Sudamérica (Nocquet et al., 2014). Los sistemas de fallas inversas de Quito y Latacunga se encuentran al interior del Sliver Nor-Andino, y registran anualmente un promedio de 290 eventos con magnitudes promedio entre 1.7 y 4.9 (Informes Sísmicos Anuales IGEPN 2010-2017). El Sistema de Fallas de Quito (SFQ) es una amenaza latente, capaz de producir daños de gran intensidad en caso de una ruptura súbita, haciendo que exista un alto riesgo para la ciudad (Pacheco, 2013). Tal es el caso del terremoto de 1587, que fue catalogado como uno de los más destructivos (Beauval, 2010).

Para la zona de Quito existe un análisis de la actividad sísmica y el mecanismo de la falla del sismo de 5.1 MLv del 12 de agosto de 2014 y las numerosas réplicas subsecuentes (Alvarado et al., 2014b). Sin embargo, es necesario retomar este análisis con la incorporación de los datos de las estaciones temporales que fueron instaladas para registrar y estudiar esta crisis. Por la distribución epicentral, este sismo y sus réplicas corresponden al segmento norte (Bellavista – Catequilla) del SFQ con una longitud aproximada de 16 km.

En este trabajo se utilizará un catálogo sísmico con todas las observaciones disponibles (estaciones temporales y permanentes), con un criterio unificado de lectura de tiempos de arribo de las ondas y sus respectivas polaridades. Luego se procederá a la búsqueda de un modelo de velocidad de propagación de las ondas sísmicas apropiado, que permitirá, a través de localizaciones más confiables, obtener una imagen más precisa del plano de la falla. Finalmente, los mecanismos focales complementarán la imagen y la cinemática de la falla.

## **1.2. Objetivo General**

Determinar la geometría superficial y cinemática del segmento norte del Sistema de Fallas de Quito mediante el análisis de la crisis sísmica registrada en agosto de 2014.

## **1.3. Objetivos Específicos**

- Construir una base de datos sísmicos (tiempos de llegada y características (polaridad) de las ondas P y de los tiempos de llegada de las ondas S) correspondientes a la crisis registrada en agosto de 2014 incluyendo las estaciones temporales.
- Determinar un modelo de velocidades 1D de las ondas sísmicas (P y S) y correcciones de tiempo necesarias dentro de este modelo, para las estaciones.
- Utilización del modelo de velocidades y las correcciones a las estaciones para una relocalización de los hipocentros.



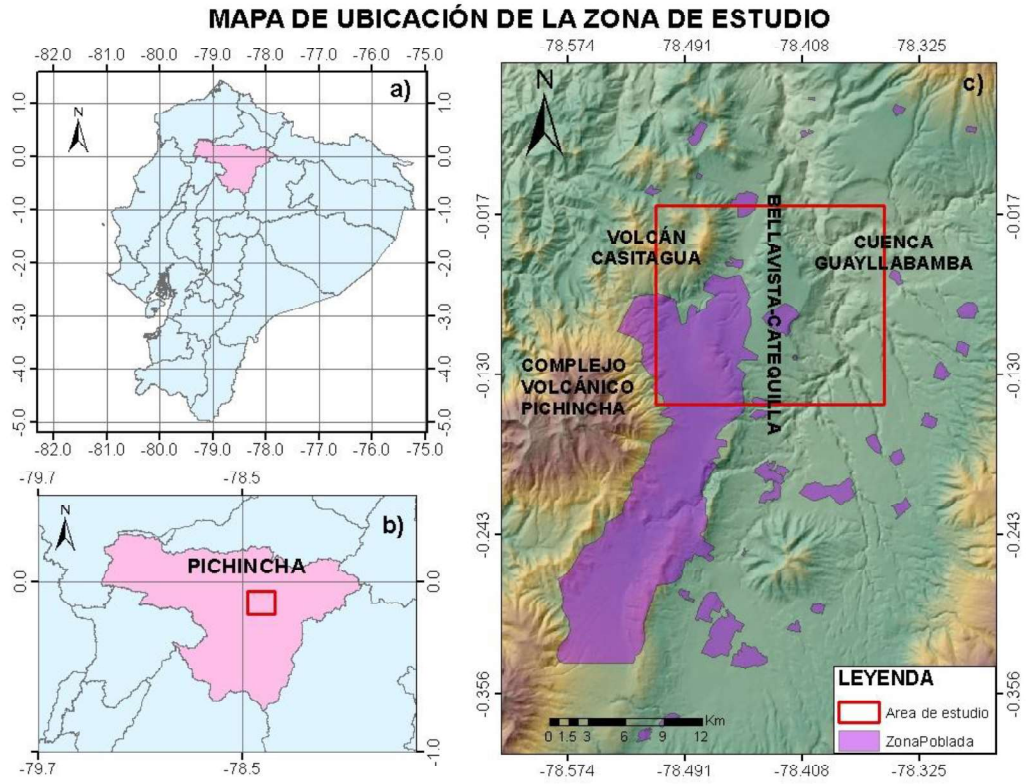
- Calcular mecanismos focales con primeros arribos para caracterizar el movimiento de la falla durante la crisis.
- Definir la geometría superficial del sistema de fallas de Quito en su segmento norte.

#### **1.4. Plan de Trabajo**

- Recopilación de la información teórica de diferentes fuentes para los primeros capítulos, la misma que será discriminada según el contenido.
- Elaboración del marco teórico referente a la tectónica de Quito.
- Elaboración de una base de datos de los sismos que se utilizarán para la caracterización del segmento norte del SFQ.
- Búsqueda de un modelo de velocidades para el segmento norte del SFQ a través de la relocalización iterativa de los sismos, el ajuste del modelo de velocidades y las correcciones de tiempo para las estaciones.
- Análisis e interpretaciones de resultados a partir de imágenes realizadas.
- Conclusiones en base a los objetivos planteados y resultados obtenidos.
- Revisión de la investigación y correcciones.

#### **1.5. Ubicación de la Zona de Estudio**

La zona de estudio se encuentra dentro de la Depresión Interandina Central (DIC), en la cuenca de Quito, provincia de Pichincha, cantón Quito. El área objetivo está definida por medio de un polígono con coordenadas 0.009°S, 0.15°S, 78.51°W, 78.35°W, limitando al Oeste con el complejo volcánico Pichincha y el volcán Casitagua y al Este con la cuenca Guayllabamba (Figura 1.1).



**Figura 1.1.** Ubicación de la zona de estudio: a) área de estudio señalada con el rectángulo rojo, b) ubicación en la provincia de Pichincha y c) ubicación de Pichincha en el Ecuador.

## 2. MARCO TEÓRICO

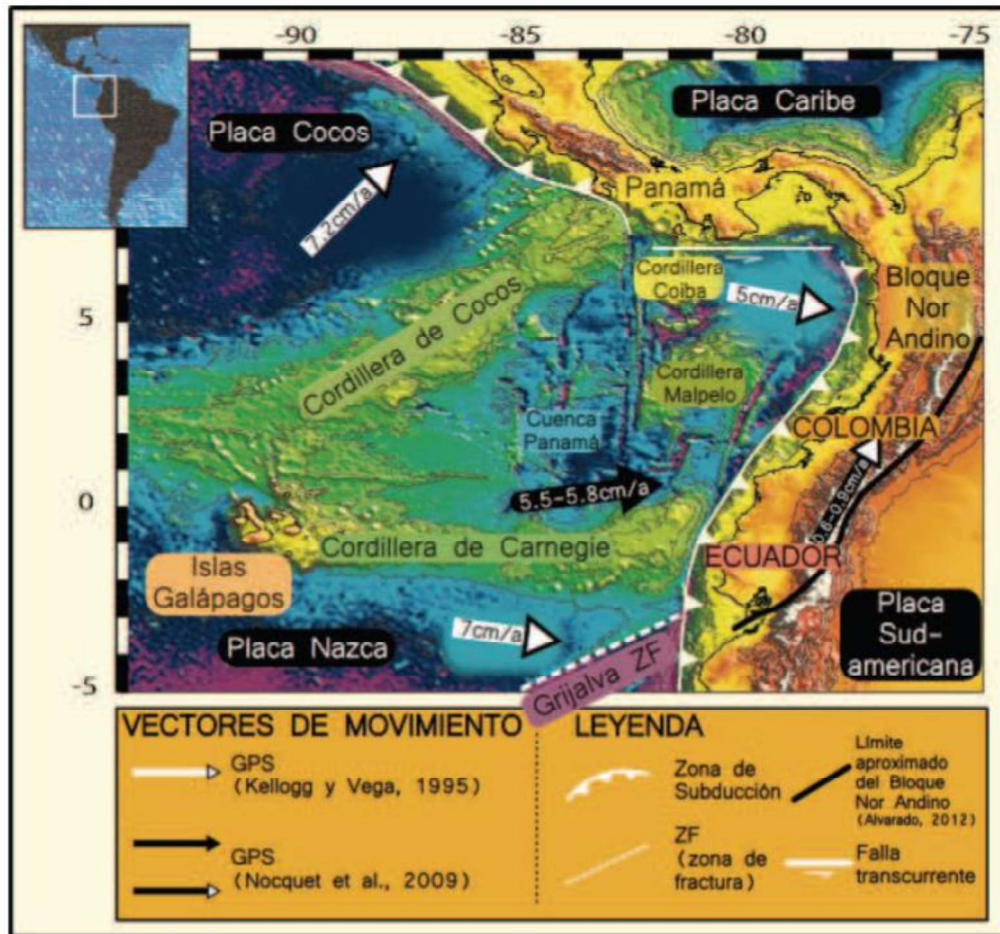
### 2.1. Marco Geodinámico

La subducción de la placa Oceánica de Nazca bajo la placa Continental Sudamericana genera un alta actividad sísmica y volcánica. Frente al Ecuador la placa Nazca se subduce a una velocidad entre 55 - 58mm/año (Figura 2.1), con una dirección N83°E (Trenkamp et al., 2002; Kendrick et al., 2003; Nocquet et al., 2009).

La oblicuidad de la subducción generó particionamiento de los esfuerzos: 1) en dirección perpendicular y 2) en dirección paralelo a la fosa; provocando un acortamiento y el escape del “Sliver Nor-Andino” en dirección NE a lo largo del sistema de fallas Puná – Pallatanga, Cosanga, Chingual que constituyen el límite entre este Sliver y la zona estable de Sudamérica (Nocquet et al., 2014; Alvarado et al., 2016).

Varias investigaciones afirman que en zonas de subducción la placa suprayacente sufre una intensa deformación dando lugar a la formación de áreas móviles y deformadas al borde de dominios continentales (Fitch, 1972). Estas áreas móviles son conocidas como: “microplacas” (Brooks et al., 2013), “bloques” (Pennington, 1981), “Sliver de antearco” (Beck, 1991; McCaffrey, 1992) y “Sliver continental” (Nocquet et al., 2014); nombradas de acuerdo con el contexto local (Alvarado et al., 2016).

Para el contexto ecuatoriano se toma en cuenta el término “Sliver Nor-andino (NAS)” puesto que el dominio móvil deformado no solo comprende la zona de antearco, sino también la zona del arco y trasarco.



**Figura 2.1.** Carta batimétrica del NW de Sudamérica. Donde se observan las principales estructuras oceánicas y los movimientos relativos de las placas en base a datos de GPS. Modificado de Gailler (2005), en Pacheco (2013).

## 2.2. Marco Geológico

El Ecuador continental consta de 5 regiones principales, las cuales se clasifican de acuerdo a características geológicas y morfológicas, de Oeste a Este en:

La región Costa posee como basamento a la formación de origen oceánico Piñón datado en el Aptiano – Albiano. Sobre esta yacen depósitos pelágicos, turbiditas volcanoclásticas y coladas volcánicas de arco insular. (Jaillard et al., 1995). La Cordillera Occidental con orientación NNE – SSW, conformada por un basamento máfico y ultramáfico sobreyacido por secuencias de arco de isla (material volcánico y sedimentos) y (Vallejo et al., 2009). Entre la cordillera Real y la Occidental se encuentra

La Depresión Interandina, con 20 – 30 km de ancho, orientada en dirección N – S a NNE – SSW está compuesta de secuencias volcano-sedimentarias (Hall et al., 2008). La Cordillera Real orientada en dirección NNE y conformada por rocas principalmente metamórficas (pe. Gneis, esquistos, cuarcitas entre otras) (Aspden y Litherland, 1992). La Zona Subandina y la Cuenca Oriente desarrolladas sobre el Cratón Guayanés a causa de la formación de la Cordillera Real (Pacheco, 2013) (Figura 2.2).

El área de estudio se localiza entre la Cordillera Occidental y la Depresión Interandina y se describen con mayor detalle a continuación.

#### Cordillera Occidental (CW)

Región comprendida por dos bloques oceánicos alóctonos, los cuales se acrecionaron contra el margen de la placa continental Sudamericana, durante el Cretácico Tardío (Spikings et al., 2005).

A lo largo del borde oriental de la Cordillera Occidental aflora La Unidad Pallatanga (Figura 2.2). Esta unidad está compuesta por rocas ultramáficas, basaltos y turbiditas de grano fino; los análisis químicos realizados para esta formación indican composiciones de plateau oceánico (Hughes y Pilatasig, 2002). Estructuralmente la formación se encuentra delimitada del margen continental por la sutura Calacalí – Pujilí – Pallatanga (Hughes y Pilatasig, 2002) (Figura 2. 2), la que es considera como parte del sistema de Fallas Cauca - Patía de Colombia (Litherland y Aspden, 1992). Finalmente, dataciones realizadas por Vallejo (2007) ubican a esta unidad en los 84 – 87 Ma.

En el límite occidental de la Cordillera aflora la Unidad Macuchi, que está conformada por rocas volcánicas y volcano-sedimentarias pertenecientes a un arco de islas (Égüez, 1986; Hughes y Pilatasig, 2002; Kerr et al., 2002) subyacidas por rocas con afinidad de plateau oceánico (Chiaradia y Fontboté, 2001) o tipo MORB (Boland et al., 2000). El límite oriental de esta unidad coincide con la falla regional Chimbo – Toachi (Hughes y Pilatasig, 2002) (Figura 2. 2). La edad de esta unidad aún es incierta, pero tomando en cuenta edades radiométricas y bioestratigráficas obtenidas por Egüez (1986), la ubica entre el Paleoceno y Eoceno Tardío. Sin embargo, Vallejo et al. (2007) propone que la formación Macuchi son terrenos alóctonos, y que no hay evidencias claras para sostener la hipótesis de estudios anteriores que proponen la acreción de Macuchi en el Eoceno Tardío.

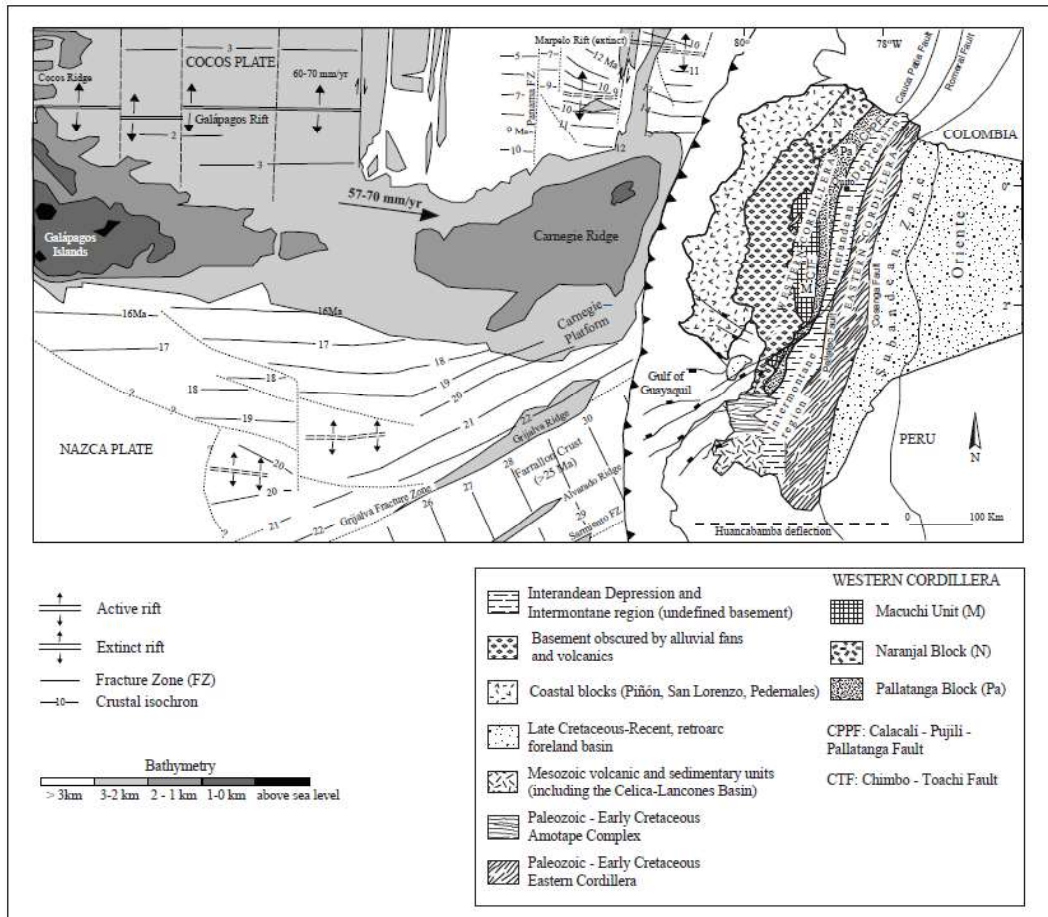
## Depresión Interandina (ID)

Esta región interandina es definida como una depresión topográfica de dirección Norte - Sur, que se encuentra delimitada al Este por la Cordillera Real y al Oeste por la Cordillera Occidental (Figura 2.2). Se extiende a lo largo de 300km y tiene un ancho entre 20y 30 km (Hall et al., 2008)

Estructuralmente, la región se encuentra delimitada por fallas generadas durante los procesos de acreción del margen continental (Winkler et al., 2005). El rasgo que se considera como límite oriental del ID es la Falla de Peltetec. Esta estructura según Litherland et al. (1994), es resultado de la acreción de los terrenos que conforman la Cordillera Real durante el Jurásico Tardío. Al contrario, Spikings et al. (2005) propone que la formación de la estructura es el resultado de la acreción del Bloque Pallatanga en el Cretácico Tardío. El límite occidental del ID está controlado por la zona de sutura Calacalí – Pujilí – Pallatanga (CPPF) (Hughes y Pilatasig, 2002). La CPPF se formó como resultado de la acreción del bloque Pallatanga en el Cretácico (Hughes y Pilatasig, 2002; Winkler et al., 2005) (Figura 2.2). Paralela a la falla el ID desaparece al Occidente en el área del Golfo Guayaquil, cortando así, la topografía de la Cordillera Occidental.

El basamento sobre el cuál yace la Depresión Interandina aún es motivo de discusión. Al respecto se consideran las siguientes hipótesis:

- 1) Aspen y Litherland (1992) proponen la presencia de un micro continente de rocas metamórficas (Chaucha – Arenillas) subyaciendo a la ID (Aspden y Litherland, 1992)
- 2) Por su parte Hughes y Pilatasig (2002) sugieren la prolongación de las rocas de la Cordillera Real bajo la ID.
- 3) Por otra parte, varios autores (Egüez y Aspden, 1993; Villagómez, 2003) proponen un basamento tectónicamente complejo que incluye una cuña de acreción de rocas de la Cordillera Real y la Cordillera Occidental que se produjo por el desmembramiento de una parte de la Cordillera Real durante el Jurásico Tardío y el Cretácico Temprano.
- 4) McCourt et al. (1997) y Jaillard et al., (2009) plantean que el basamento de la ID contiene material de un plateau oceánico del Cretácico Temprano que fue acrecionado en el Campaniano Tardío.



**Figura 2.2.** Principales regiones geológicas morfoestructurales del Ecuador. Tomado de Vallejo et al., (2009).

La formación de la Depresión Interandina es otro aspecto que se mantiene en debate. Las dos hipótesis más aceptadas se describen a continuación:

1) Tibaldi y Ferrari (1992) proponen que la ID es una cuenca tipo “piggy back” formada entre las cordilleras Oriental y Real, y su formación se da en 4 cuatro pulsos tectónicos extensivos (régimen transtensivo) y compresivos (régimen transpresivo), ocasionados por los movimientos relativos entre las dos cordilleras.

2) Por su parte, Ego y Sebrier (1996) plantean como motor para la formación de la ID un agresivo levantamiento de los Andes ecuatorianos, lo que generó un graben compresivo en el Mioceno; y en el Plioceno se comportó como un “*restraining bend*” generando pliegues con tendencia dominantes N – S a NNE, los cuales estarían asociados a una estructura “*flat and ramp*” en profundidad.

La interacción entre la actividad volcánica y tectónica ha generado cuencas individuales dentro de la Depresión Interandina, tal es el caso de las cuencas: Chota, Quito – San

Antonio – Guayllabamba, Ambato – Latacunga y Riobamba – Alausí. Sobre estas cuencas se han depositado sedimentos aluviales, fluvio-lacustres y volcánicos contemporáneos. (Lavenu et al., 1996; Ego et al., 1996; Villagómez, 2003; Winkler et al., 2005).

### **2.3. Tectónica Local**

Quito se encuentra dentro del Valle Interandino en el flanco Este de la Cordillera Occidental. La cuenca de Quito es alargada en dirección principal N – S que está delimitada en la parte oriental por la expresión morfológica del Sistema de Fallas Quito (SFQ) y por el Sistema de Fallas Guayllabamba (SFG). Los dos sistemas se extienden a lo largo de la ID, con una longitud de 60 km aproximadamente. Los SFQ y SFG son evidenciados por paleo-valles colgados, interrupción de redes de drenaje y estructuras típicas como plegamiento, que demuestran la deformación y levantamiento de la región (Alvarado et al., 2014).

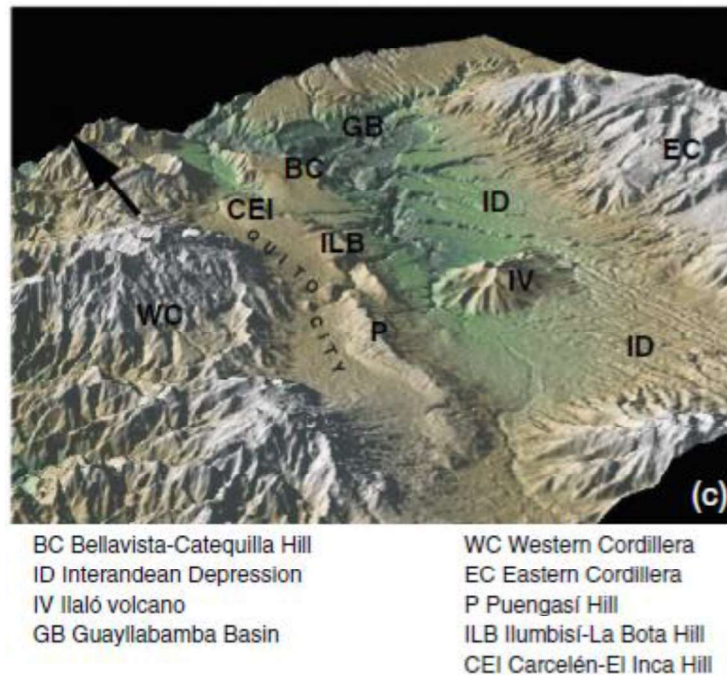
Según la sismicidad instrumental registrada, el SFQ es una estructura inversa que buza aproximadamente 45° hacia el Oeste, con una orientación de N-S a NE-SW (Alvarado, 2014). Este conjunto tectónico está asociado morfológicamente a estructuras superficiales como pliegues y flexuras que están distribuidos a lo largo del límite oriental de la ciudad (Calahorrano, 2001).

Respecto a las medidas de GPS, para el SFQ la tasa de acortamiento es inferior a 1mm/año al este mientras que al oeste la tasa de acortamiento es de 2 a 4mm/año, teniendo en cuenta un marco de referencia local. Este movimiento ha generado un desnivel de aproximadamente 500m entre la ciudad de Quito y los valles aledaños de la Depresión Interandina.

El SFQ fue descrito previamente por varios autores como un graben (Sauer, 1965; Tibaldi y Ferrari, 1992). Mientras que para Soulas et al. (1991) en base a escasas observaciones geomorfológicas propuso un sistema de empujes de inmersión al Oeste. Realizar un estudio más a detalle del sistema de fallas es complicado debido a la expansión geográfica masiva de la ciudad y a los cambios en la topografía a causa de las unidades volcánicas jóvenes (Alvarado et al., 2014).



En el estudio de Alvarado et al., (2014) se identifican segmentos tectónicos clasificados en base a sus características geomorfológicas y nombrados de acuerdo a al lugar donde se encuentran, cada segmento tiene una componente principal compresiva y otra componente secundaria transcurrente dextral. Estos segmentos son: Puengasí (P) incisado discretamente por corrientes secundarias; Ilumbisí - La Bota (ILB) que se encuentra fuertemente incisado por el río Machángara dando paso a la formación de un acantilado muy estrecho; el segmento Carcelén-El Inca (CEI) y finalmente Bellavista – Catequilla (BC) que es el único segmento donde se pueden observar afloramientos para reconocer marcadores tectónicos (Alvarado et al., 2014). (Figura 2.3)



**Figura 2.3.** Vista tridimensional de la cuenca de Quito en la depresión de Interandina. Tomado de Alvarado et al. 2014.

## 2.4. Geología Local

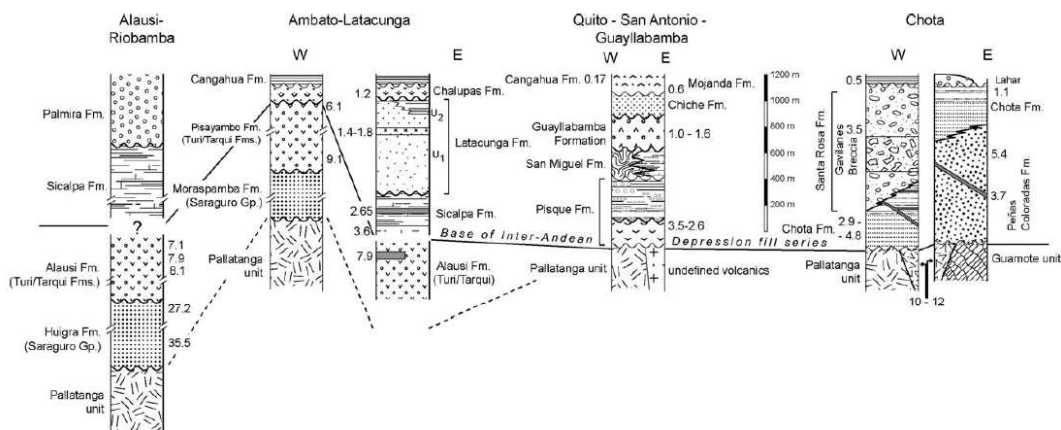
Dentro de la Depresión Interandina se ubican 4 cuencas, que se extienden de Norte a Sur, y son: la cuenca del Chota que consta de una secuencia sedimentaria 1400m de espesor que tienen edades desde 5 Ma hasta 0.5 Ma (Winkler et al., 2005). La cuenca Quito – San Antonio – Guayllabamba compuesta por rocas sedimentarias sobreyaciendo a rocas basálticas y volcánicas de 1000m de espesor y con edades

aproximadas entre 6 – 5 Ma (Lavenu et al., 1992; Villagómez, 2003; Winkler et al., 2005). La cuenca Ambato – Latacunga con depósitos de edades entre el Plioceno y el Holoceno (Lavenu et al., 1992). Y la cuenca Alausí – Riobamba que comprende depósitos que van desde el Mioceno hasta el Plioceno (Lavenu et al., 1992; Lavenu et al., 1996).

Quito se encuentra sobre la cuenca Quito – San Antonio – Guayllabamba y a su vez sobre tres subcuencas colgantes: Machángara, El Batán y San Antonio, rellenas por sedimentos volcanoclásticos cuaternarios (Alvarado et al., 2014).

A continuación, se describe la estratigrafía de la cuenca.

### 2.4.1. Relleno de la cuenca Quito – San Antonio de Pichincha– Guayllabamba



**Figura 2.4.** Columnas litológicas de las principales cuencas de la Depresión Interandina. Modificado de Winkler et al (2005)

La Fm. Pisque (miembros superiores) (Figura 2.4) se ubica a la base de la cuenca Quito-San Antonio - -Guayllabamba (DGGM, 1982; Ego y Sebrier, 1996; Lavenu et al., 1996; Villagómez, 2003; Winkler et al., 2005); consiste de depósitos laháricos estratificados intercalado con materia volcánico. Sobreyacidas por areniscas masivas, aluviales y concreciones esféricas (Villagómez, 2003).

La Fm. San Miguel está constituida por dos miembros:

- Miembro San Miguel definido por una alternancia de areniscas líticas verdosas poco compactadas e intercaladas con limolitas y tobas, estos sedimentos tienen un espesor de 80m y corresponden a depósitos deltaicos, fluviales y lacustres a

un ambiente lacustre de edad posiblemente Pleistocénica Inferior (Villagómez, 2003).

- El Miembro Lacustre San Miguel está compuesta por limolitas tobáceas con fracturas de yeso y areniscas finas con material volcánico hacia el Este. Esta formación se encuentra levemente deformada hacia los extremos y fuertemente deformada en el tope (Villagómez, 2003).

La Fm. Guayllabamba se asienta sobre la Fm. San Miguel y pertenece al Pleistoceno con 1.1 Ma (Alvarado, com. pers) y está constituida por los siguientes miembros:

- Miembro Lahar compuesto por flujos de lodo con clastos de areniscas, limolitas, volcánicos y pumíticos producto de la actividad tectónica y volcánica (Villagómez et al., 2002; Villagómez, 2003; Winkler et al., 2005). El espesor esta entre 30 y 100 metros de acuerdo a Villagómez (2003).
- ~~Miembro Domos conformado por andesitas y subintrusivos cuarzodioríticos a riolíticos con xenolitos de andesita (Villagómez, 2003).~~
- Miembro Volcánico presenta flujos de lava y piroclásticos con depósitos de avalancha. Un espesor aproximado de 200 m.
- Miembro Aluvial con sedimentos aluviales estratificados y meteorizados con un espesor aproximado de 100m.

De acuerdo a Alvarado (2012), el Miembro Domos sugerido por Villagómez (2003), no pertenecería a esta formación. Alvarado (com. pers), hace esta afirmación en función de edades preliminares de  $903 \pm 14$  Ka y  $836 \pm 24$  Ka (método K/Ar) para los domos Pacpo y Catequilla respectivamente, siendo estas más jóvenes que la formación.

La formación Chiche esta subdividida en los miembros:

- Miembro Fluvio – Lacustre I, compuesto por limolitas y tobas intercaladas con areniscas, depositados en un ambiente fluvio lacustre. El espesor es de 60m aproximadamente y pertenece al Pleistoceno Superior (Villagómez, 2003).
- Miembro Lahar (Pleistoceno Superior), constituido por flujos de lodo con clastos volcánicos y sedimentarios en una matriz lodosa. Tiene un espesor de 40m (Villagómez, 2003).

- Miembro Fluvio – lacustre II, caracterizado por limolitas tobáceas, diatomitas y areniscas con estratificación cruzada, depositadas en un ambiente fluvio – lacustre al Norte y eólico al Sur. El espesor llega hasta 40m y pertenecen al Plioceno Superior (Villagómez, 2003).
- Miembro Chiche, conformado por conglomerados con clastos (andesíticos, piroxeno olivínicos y riolíticos) y areniscas intercaladas con tobas. El espesor del Mb. Chiche llega a 100m y pertenece al Pleistoceno Superior (Villagómez, 2003).

La formación Machángara está conformada 2 unidades:

- Miembro Volcánicos Basales, consiste principalmente de rocas volcánicas con depósitos de avalancha, flujos piroclásticos, lavas andesíticas y caída de ceniza. El espesor llega hasta 100m y pertenecen al Pleistoceno Superior (Villagómez, 2003).
- Miembro Quito (Pleistoceno) que consta de flujos de lodo y lahares intercalados con cenizas, con espesores máximos de 100m (Villagómez, 2003).

La Fm. Cangahua (Pleistoceno Superior – Holoceno) se caracteriza por tobas alteradas intercaladas con ceniza, pómez, paleosuelos y a veces flujos de lodo. Tiene un espesor máximo 50m ((Villagómez, 2003). De acuerdo a Hall y Beate (1991) su alto contenido de CO<sub>2</sub> indica una fuente eruptiva de composición dacítica – riolítica.

Depósitos del Pululahua, constituido por depósitos volcánicos (flujos piroclásticos, lahares y productos detríticos) provenientes del Volcán Pululahua (Villagómez, 2003).

La Unidad Fluvio Lacustre “La Carolina” (Holoceno): son depósitos de ambiente fluvio lacustre – palustres caracterizados por limos, arcillas y arenas intercalados con ceniza y pómez. Esta unidad es muy superficial y en ella se ha logrado identificar rasgos tectónicos que pueden estar relacionados con movimientos de estabilización de la cuenca (Villagómez, 2003; Calahorrano, 2001).

Finalmente se pueden apreciar varios deslizamientos a lo largo de la cuenca, los cuales pudieron originarse por la actividad del SFQ, o fueron producidos por efectos gravitacionales.

### **3. SISMICIDAD DE QUITO**

#### **3.1. Sismicidad Histórica de Quito**

Quito se encuentra en una zona de alta actividad sísmica. Es poco lo que se sabe acerca de los eventos telúricos anteriores a la conquista española ya que las primeras descripciones están dadas por historiadores de la época colonial. Sin embargo, estudios paleosismológicos (encargados de estudiar deformaciones en los sedimentos causados por sismos) han permitido extender este conocimiento hasta un poco más de mil años atrás y conjuntamente con la sismicidad histórica se ha podido definir según Hibsche et al, (1996) una recurrencia promedio de 115 años para eventos con intensidades de VII.

Previo a la creación del Instituto Geofísico, la información sobre la localización de los eventos no es precisa, debido a que no había suficientes instrumentos de monitoreo y los procedimientos de localización hipocentral carecían de precisión. Por ello, la localización de los sismos históricos está basada principalmente en datos macrosísmicos (intensidades) (e.g., Beauval et al., 2010).

Los principales eventos ocurridos entre 1560 y 1986, cuyos epicentros están considerados dentro de la zona de la capital se describen en la Tabla 3.1.

**Tabla 3.1.** Detalle de los principales eventos sísmicos históricos (pre -instrumentales) registros en Quito y alrededores entre 1560 y 1988. Tomado de Calahorrano, 2001

Fecha	Ubicación	Probable Magnitud (mb)	Intensidad en Quito	Observaciones
1560-ene-22	Quito	4.3	V	
1575-sep-08	Quito	5.7	VII (?)	Asociado con actividad del volcán Pichincha. Poca información.
1587-sep-04	N - Quito, San Antonio Pichincha	6.3	VII+ - VIII	Probable relación con la actividad del pliegue Catequilla-Monjas.
1627-jun-26	Quito (?)	5.0	V+ - VII	Información de daños restringida a la ciudad de Quito, por lo que se le atribuye a la falla de Quito (?).
1660-1662	1660-oct-27	5.7	V+ - VII	Serie de eventos posteriores a la erupción del Pichincha del 27 de octubre de 1660. Solamente el último evento de 1662 presenta mayor certeza para atribuir su origen a una fuente en las inmediaciones de la ciudad.
	1660-dic	-	VI	
	1661-dic	-	V	
	1662-mar	-	IV	
	1662-nov-23	Quito	5.5	
1755	1755-abr-26	6.3	VIII-IX	Seguramente ubicado bajo la ciudad, generado por una estructura de la Falla de Quito
	1755-abr-27	-		
	1755-abr-28	-		
1787	Quito (?)	5.5	VI – VI+	Poco conocido. Atribuido al Sistema de Fallas de Quito.
1859-mar-22	N - Quito (?)	6.3	VIII - IX	Considerado el más fuerte. Graves daños en edificios, iglesias y casas de Quito. Sismo profundo.
1923-mayo-16	NE - Quito (?)	6.0	VI+ - VII	Fuerte sismo en Quito, único lugar donde ocasionó daños. Atribuido al Sistema de Fallas de Quito.
1938-ago-10	SE - Quito, Alangasí	5.0	V-VI	Su origen no ha podido ser atribuido a un rasgo geomorfológico.
1949-sep-12	N - Quito	-	V	Muy posiblemente relacionados con la actividad de estructuras del Sistema de Fallas de Quito.
1984-abr-22	Quito	4.5	-	
1986-nov-23	Quito	5.3	-	
1988-abr-12	S - Quito	4.0	VI	

El sismo de 1587 afectó áreas pertenecientes a las provincias de Pichincha e Imbabura siendo la ciudad de Quito la más afectada. Los registros históricos reportan destrucción de las estructuras arquitectónicas, dejando secuelas de daños de importancia en poblaciones como Pomasqui y Guayllabamba. Este evento tuvo una intensidad de VII u VIII. La intensidad máxima se registró al Norte de Quito, por lo que se sugiere que la ruptura se originó en el segmento norte del SFQ, la magnitud aproximada es de 6.3 – 6.5 con un nivel de confianza de 67% (Beauval, 2010).

El sismo de 1755 fue catalogado por Teodoro Wolf como el evento más destructivo para la capital de Ecuador. El sismo provocó graves daños en torres, cúpulas y muros de las iglesias de la Catedral, San Agustín, Santo Domingo entre otras. Además del colapso total de la iglesia de Santa Catalina (Del Pino y Yepes, 1990).

En marzo de 1859 un fuerte sismo sacudió Quito. Debido a que la capital fue la única población donde se produjeron daños, el sismo fue atribuido al SFQ. Los registros históricos describen varias pérdidas humanas debido al colapso estructural de torres y cúpulas de las iglesias. Por este motivo se le ha asignado una intensidad IX MSK (Del Pino y Yepes, 1990).

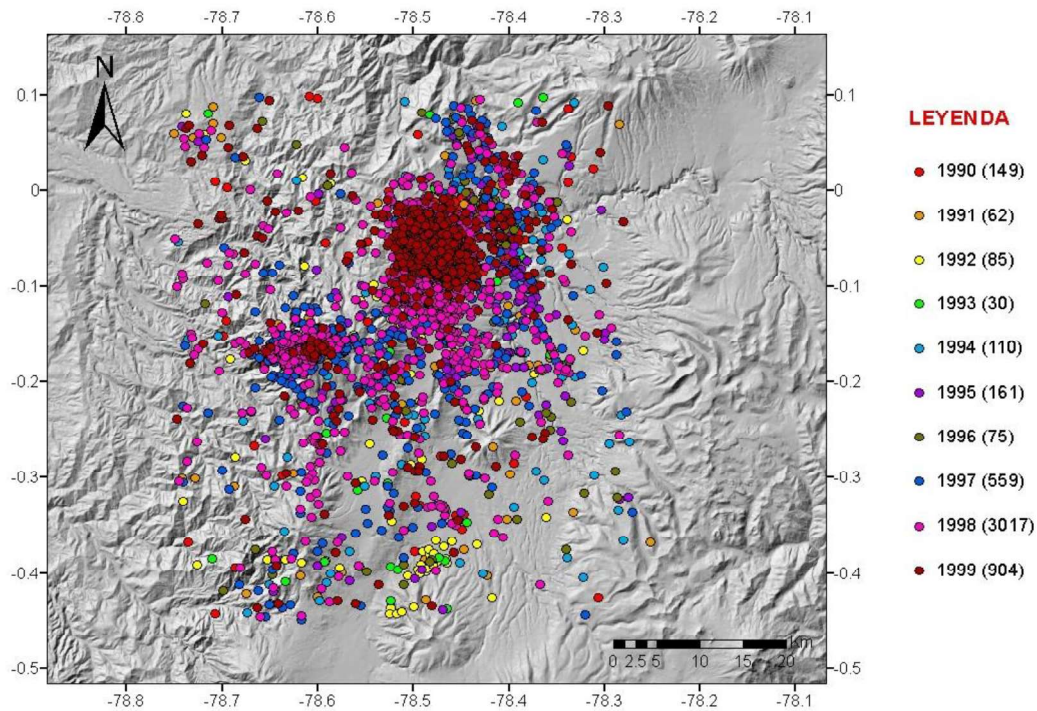
A partir 1981, se comenzó a generar información cuantitativa de sismos proporcionada por redes instrumentales del Instituto Geofísico de la EPN (Del Pino y Yepes, 1990).

### **3.2. Sismicidad Instrumental de Quito**

Los registros sísmicos de Quito empezaron a inicios de los años 80, cuando el Instituto Geofísico instaló su primera estación sísmica en el volcán Guagua Pichincha. Los primeros datos para localización de sismos en el callejón interandino se obtienen desde el año de 1988, año en el cual se instaló una red temporal dedicada al monitoreo y vigilancia de la actividad sísmica y volcánica (Calahorrano, 2001).

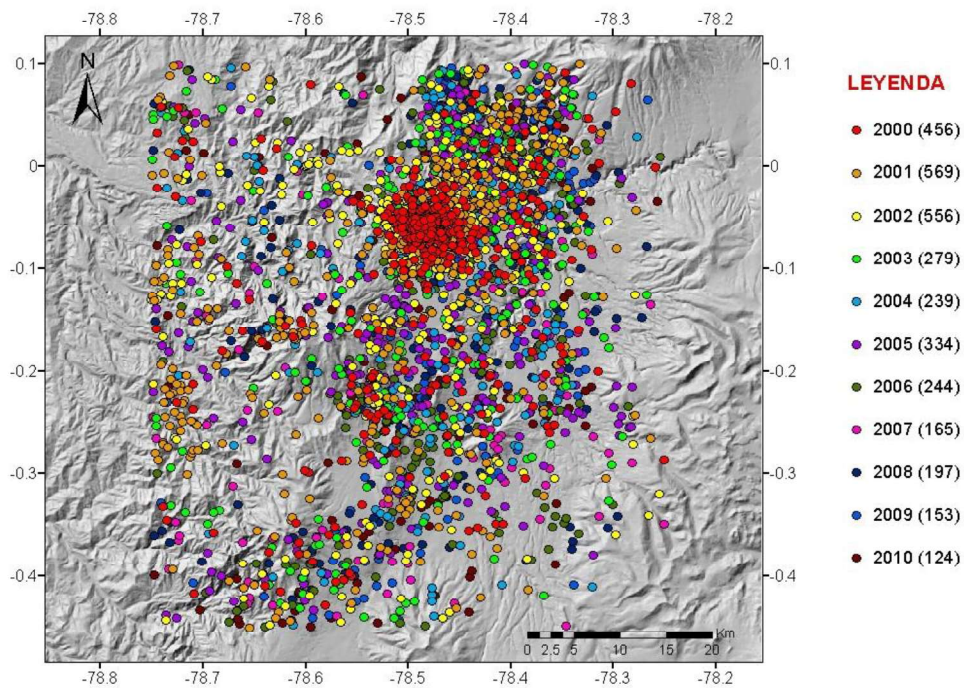
A continuación, se muestran los mapas de sismicidad a partir de 1990 hasta el 2018 (Figura 3.1, Figura 3.2 y Figura 3.3) (Fuente: IG-EPN, [www.igepn.edu.ec](http://www.igepn.edu.ec)).

### SISMICIDAD DE QUITO ENTRE 1990 Y 1999



**Figura 3.1.** Mapa de localizaciones de los eventos sísmicos ocurridos entre los años 1990 y 1999 alrededor de la ciudad de Quito. Entre paréntesis se encuentra el número total de sismos con magnitud mayor 4.9, ocurridos en el respectivo año

### SISMICIDAD DE QUITO ENTRE 2000 Y 2010



**Figura 3.2.** Mapa de localizaciones de los eventos sísmicos ocurridos entre los años 2000 y 2010 en la ciudad de Quito. Entre paréntesis se encuentra el número total de sismos localizados en el respectivo año



### SISMICIDAD DE QUITO ENTRE 2011 Y 2018

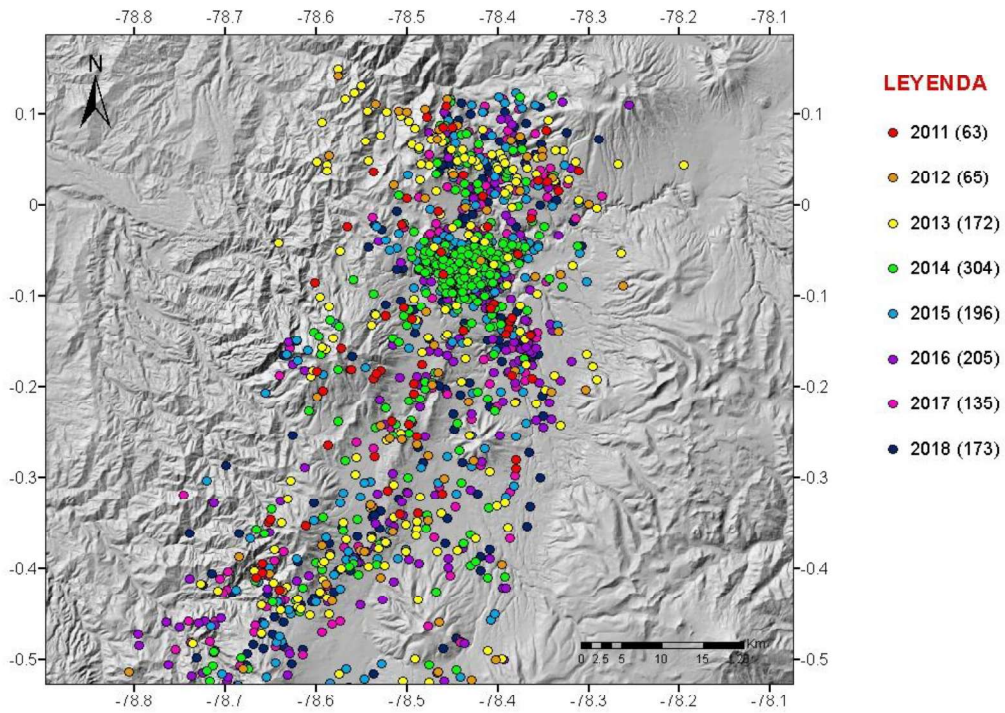


Figura 3.3. Mapa de localizaciones de los eventos sísmicos ocurridos entre los años 2010 y 2018 en la ciudad de Quito. Entre paréntesis se encuentra el número total de sismos localizados en el respectivo año.

De estos sismos ocurridos en Quito, se describen a continuación, aquellos eventos que han sido relevantes para la ciudad.

El 10 de agosto de 1990 en Pomasqui se registró un sismo de magnitud Mw 5.3 y mecanismo inverso (GCMT; Figura 3.4) a las 22h00 (tiempo local), con una intensidad máxima de VII. La actividad sísmica de ese año correspondió casi en su totalidad a este sismo y sus réplicas.



Figura 3.4. Mecanismo focal obtenido de CGMT, del 10 de agosto de 1990

Entre 1991 y 1992 la actividad sísmica se mantiene baja, sin embargo, se registraron 3 eventos importantes: un evento 3.8 Mb en Pomasqui y otros de 3,9 y 4,1 Mb en Amaguaña (Calahorrano, 2001).

Durante 1993 la actividad permaneció baja hasta 1994, donde se incrementa levemente, pero muestra localizaciones dispersas. En este año se registraron 2 eventos con magnitudes de 4.0 Mb, localizados uno en Calderón y el otro en el sector de La Bota (Calahorrano, 2001).

En 1995 ocurrieron 3 eventos: el primero, el 13 de enero en Calderón de magnitud 4.5 Mb; el segundo, el 4 de julio en el valle de Cumbayá con magnitud 4.1 Mb y el tercero, registrado el 5 de julio cerca de Pomasqui con una magnitud Mb de 4.0 (Calahorrano, 2001).

Para 1996 se registraron 3 eventos, de los cuales el evento mayor ocurrido el 17 de enero, tuvo una magnitud de 4.4 Mb y se localizó en Pomasqui. Los otros dos eventos fueron registrados el 26 de marzo y el 26 de junio, con epicentros al norte de Quito y cerca de Amaguaña respectivamente, tuvieron una magnitud Mb de 4.1.

En 1997 se registró un incremento en la sismicidad con respecto a anteriores años. La actividad estaba distribuida a lo largo de toda la ciudad. En este año el sismo del 17 de octubre fue el de mayor magnitud, con Mb de 4.2 y estuvo localizado cerca de Pomasqui. (Calahorrano, 2001).

Durante 1998 se registró una fuerte variación en la actividad sísmica, teniendo entre enero y mayo un promedio de 75 sismos localizados, mientras que en junio este promedio aumentó considerablemente a 856 eventos. Finalmente, en noviembre la actividad disminuyó a un promedio de 78 sismos. Entre junio y agosto de 1999 vuelve a presentarse un incremento en la sismicidad con un promedio de 299 eventos al mes, sin embargo, para el mes de septiembre la actividad decae a una media de 45 sismos.

La tabla 3.2 describe los sismos más representativos que fueron localizados en Quito entre 2000 y 2014. Cabe señalar que la fuente de la información utilizada para esta tabla se encuentra en los informes sísmicos en el sitio web del Instituto Geofísico de la EPN ("INFORMES SÍSMICOS PARA EL ECUADOR". IGEPN, [www.igepon.edu.ec/inf-sism/sismicos-anales](http://www.igepon.edu.ec/inf-sism/sismicos-anales)).

**Tabla 3.2.** Principales eventos sentidos ocurridos en la ciudad de Quito desde el 2000 hasta el 2014, la información utilizada fue obtenida de la página del Instituto Geofísico.

Fecha		Hora (GMT)	Epicentro	Magnitud (mb)	Observaciones
2000	1 de enero	14h54	Quito	3.9	Sentido en Quito.
	15 de abril	01h16	Quito	4.2	Sentido fuertemente en Quito.
2001	19 de febrero	16h15	Guayllabamba	4.1	No reportado.
	1 de junio	22h01	Quito	4.1	Sentido.
	14 de diciembre	20h09	Quito	4.0	Sentido, evento del enjambre norte de Quito.
2002	5 de junio	01h44	San Antonio de Pichincha	3.9	Sentido.
	7 de junio	02h48	San Antonio de Pichincha	3.8	Sentido por la población.
2003	1 de agosto	18h31	Pomasqui	3.9	Sentido por la zona norte de la ciudad.
	13 de septiembre	09h26	Quito	3.8	Sentido.
2004	8 de marzo	05h37	Quito	4.0	Sentido en forma moderada.
	16 de agosto	15h23	Quito	4.2	Sentido en el Valle de los Chillos, Fajardo, Sangolquí
2005	14 de junio	06h05	Quito	4.0	Sentido en Quito, 10.86 km de profundidad.
	2 de julio	00h49	Quito	3.8	Sentido en la capital, a 9.6 km de profundidad
	30 de julio	10h53	Pomasqui	4.0	Sentido en Quito, 13.58 km de profundidad.
	5 de agosto	05h28	Quito	4.0	Sentido en la capital, a 9.83 km de profundidad.
	19 de septiembre	20h01	Quito	4.0	Sentido en Quito, profundidad a 10.68 km.
2006	5 de febrero	02h52	SE de Quito	4.1	Sentido en Amaguaña.
	25 de febrero	02h13	Centro de Quito	4.0	Sentido al norte de Quito.
	28 de abril	13h33	Centro de Quito	3.9	Sentido en Valle de los Chillos.
	2 de agosto	00h20	Norte de Quito	4.0	Sentido en el norte de Quito y en Pomasqui.
		15h34	Norte de Quito	4.2	Sentido en la ciudad.
15 de octubre	15h44	Norte de Quito	4	Sentido, réplica del sismo d las 15h34.	
	14 de agosto	17h04	Norte de Quito	4.0	Sentido en San Antonio de Pichincha, hipocentro 9.32 km.
2009	7 de noviembre	19h29	Norte de Quito	4.2	Sentido en San Antonio de Pichincha, a 8.37 km de profundidad.
	12 de enero	00h21	Al sur de Quito, Tambillo	3.9	Sentido por el sur de la población.
2010	17 de febrero	00h04	Quito	4.1	Localizado en centro oriente de Quito.
		00h46	Quito	3.9	Localizado en centro oriente de Quito. Réplica del 00h04.
	29 de octubre	13h50	Quito	4.3	Hipocentro de 16.9 km de profundidad.
	26 de noviembre	01h50	Quito	3.7	profundidad 16.95 km.

2014	12 de agosto	19h57	Norte de Quito	5.1 (MLv)	Profundidad menor a 10 km. Daños leves en edificios y deslizamientos.
2016	12 de enero	19h06	Norte de Quito	2.7	Asociado al segmento Bellavista-Catequilla, profundidad 7.4 km.
	15 de marzo	13h02	Quito	4.1	Sentido y asociado al SFQ. Profundidad 7.1 km
2018	1 de enero	14h24	Puembo	3.8 (MLv)	Profundidad 7.2 km, sentido en Quito
	2 de abril	01h15	Quito	4.2	Profundidad focal 3 km.
	2 de junio	01h51	Puembo	3.3 (MLv)	Profundidad 4.8 km.

Durante el 2000 en total se registraron 5 sismos importantes con epicentro en Quito y magnitudes entre 3.1 y 4.2.

En el año 2001, al Norte de Quito se registró un total de 762 eventos con magnitudes entre 1.4 y 4.2 grados, cabe señalar que los eventos se los relaciona con la actividad del volcán Guagua Pichincha.

Durante el año 2002 se mantuvo el enjambre sísmico al Norte de Quito con 432 eventos en total y cuya actividad sísmica estuvo relacionada con actividad del volcán Pichincha. Las magnitudes mayores que alcanzaron estos eventos fueron de 3.9 Mb en los días 5 y 7 junio y 21 de julio.

El año 2003 la actividad, en la zona norte de Quito, estuvo relacionada con el SFQ y estrechamente vinculada con la actividad del volcán Pichincha, se registraron 222 eventos en total, de los cuales el 50% tuvo magnitudes menores a 2 grados en la escala de Richter.

En 2004, se registraron 206 eventos con magnitud máxima de 4.2 y profundidades máximas de 40km. El 8 de marzo del 2004 a las 00h37 (tiempo local) se registró un sismo a 5 km al SSO del centro de la ciudad. Este evento tuvo una profundidad de 10.7 km y 4.0 grados de magnitud, siendo sentido moderadamente en la ciudad y los valles aledaños. El sismo se originó en el segmento sur de la falla de Quito.

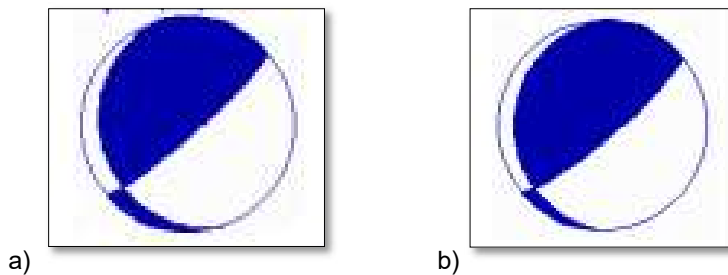
En el 2005, el segmento norte de la falla se mantuvo activo generando sismos de forma esporádica y de baja magnitud. En total se tuvo 294 eventos, de los cuales, 5 fueron de magnitud 4. Adicionalmente, se debe mencionar que, a causa de la poca profundidad de los hipocentros (menor a 12 km), estos sismos fueron sentidos ampliamente en la capital.

Durante el 2006 se localizaron un total 196 eventos en Quito, con magnitudes mínimas de 1.4 y máximas de 4.2. A inicios del año se observó un aumento en la sismicidad hasta el mes de abril, después del cual se nota un descenso continuo hasta agosto, cuando se presentaron sismos de magnitud moderada en la zona norte de la falla, en San Antonio- Calacalí, estos eventos fueron sentidos y causaron alarma en la población.

Para el 2007 actividad sísmica se mantuvo baja, en total se produjeron 132 eventos con magnitudes máximas de 4.2 grados y profundidades someras.

En Quito se registraron alrededor de 156 sismos para el año 2008, estos sismos estuvieron caracterizados por presentar magnitudes entre 2.9 y 3.9 grados en la escala de Richter y profundidades someras.

En el 2009 en la capital se registraron 143 eventos sísmicos, con magnitudes entre 2.8 y 4.2. Los eventos fueron localizados en San Antonio de Pichincha. Los mecanismos focales calculados para los sismos del 6 de julio (Figura 3.5a) y 7 de noviembre (Figura 3.5b), presenta movimiento inverso con ligera componente dextral, con un plano de falla de bajo ángulo en dirección NS. El otro plano es de alto ángulo y dirección NE. Los esfuerzos tectónicos causantes son semihorizontales de dirección NO – SE.

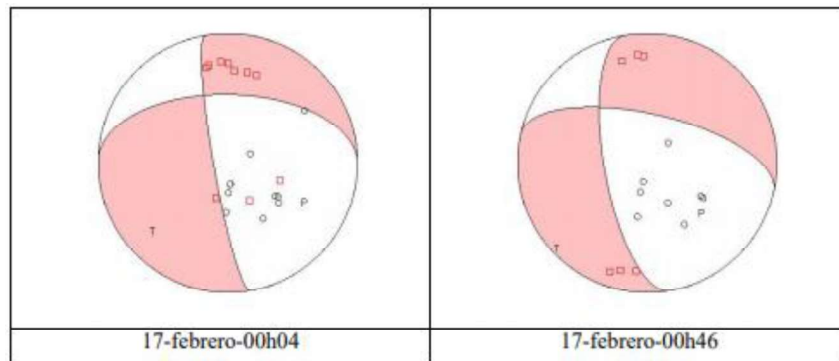


**Figura 3.5.** Mecanismos focales para los eventos del (a) 6 de julio y (b) 7 de noviembre del 2009, en Quito. Tomado de “INFORMES SÍSMICOS PARA EL ECUADOR”. IGEPN.

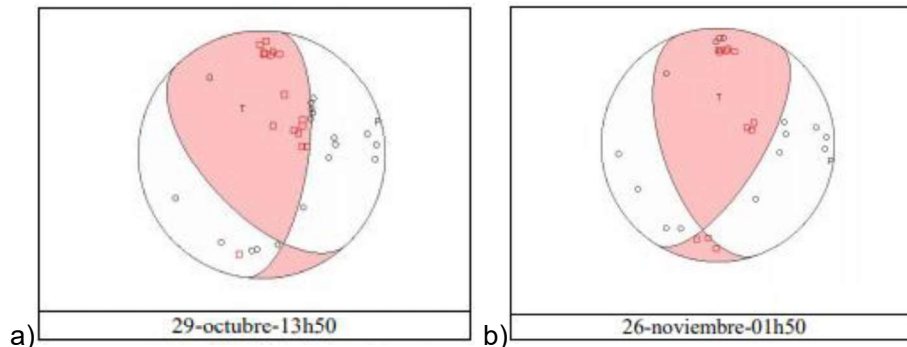
Para el 2010, ocurrieron un total 102 eventos en Quito, con magnitudes entre 3.9 grados y 3.6 grados. Varios eventos ocurrieron en la zona durante enero, de los cuales 4 se localizaron al sur de la ciudad y fueron descritos como fuertes sacudones por los pobladores.

Los sismos en el 2011 se ubicaron en la franja de deformación que comprende fallas inversas resultado del ambiente compresivo de rumbo N – S. Los eventos ocurridos en febrero indican un movimiento sinistral con componente normal en un plano de falla semivertical buzando al oeste (Figura 3.6). Los eventos registrados en octubre (Figura

3.7a) y noviembre (Figura 3.7b) localizados al NE de la ciudad, donde la franja de deformación cambia la dirección con rumbo NE, indican más bien un mecanismo inverso con componente dextral.



**Figura 3.6.** Mecanismos focales para el evento principal y la réplica del 17 de febrero. Tomado de “INFORMES SÍSMICOS PARA EL ECUADOR”. IGEPN.



**Figura 3.7.** Mecanismos focales para los eventos del 29 de octubre y del 26 de noviembre del 2011. Tomado de “INFORMES SÍSMICOS PARA EL ECUADOR”. IGEPN.

Para los años 2012 y 2013 no hubo sismos importantes reportados en la capital según los informes sísmicos anuales publicados por el Instituto Geofísico. De manera general en 2012 para la fuente Quito se reportaron entre 90 y 70 sismos y en 2013 se registraron 101 eventos.

Durante el 2014, el SFQ presentó gran actividad sísmica, sobre todo en el segmento norte. El sismo principal se reportó con una magnitud de 4.9 Mw y 5.1 MLv, producido el 12 de agosto a las 19h57 tiempo universal (14h57 tiempo local), a una profundidad recalculada de 3.8 km y tuvo un movimiento inverso (CGMT; Figura 3.8). El evento tuvo alrededor de 660 réplicas, sin embargo, solo se pudo localizar alrededor de 130 (Alvarado, 2014).

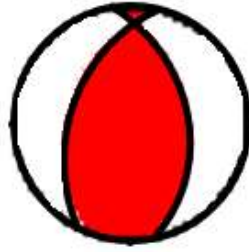


Figura 3.8. Mecanismo focal obtenido de CGMT, para el evento principal del 12 de agosto del 2014.

De acuerdo con reportes recibidos, la intensidad calculada fue de VI en la Escala Macrosísmica Europea (EMS-98) en el Norte de la capital, dejando como resultado daños leves en edificios y deslizamientos en la loma Calderón – Catequilla. Para el sur de la ciudad la intensidad fue de IV EMS-98. Estos eventos se encuentran asociados al segmento Calderón – Catequilla del SFQ.

En el 2015 se contabilizaron 275 eventos en la fuente Quito – Latacunga, con magnitudes máximas de 3.41 MLv.

Durante el 2016 se localizaron 196 eventos con una magnitud promedio de 2.0, algunos asociados al SFG y otros al segmento Bellavista – Catequilla de orientación N – S. Los mecanismos focales obtenidos muestran fallas inversas con direcciones N-S (Figura 3.9) y componente dextral

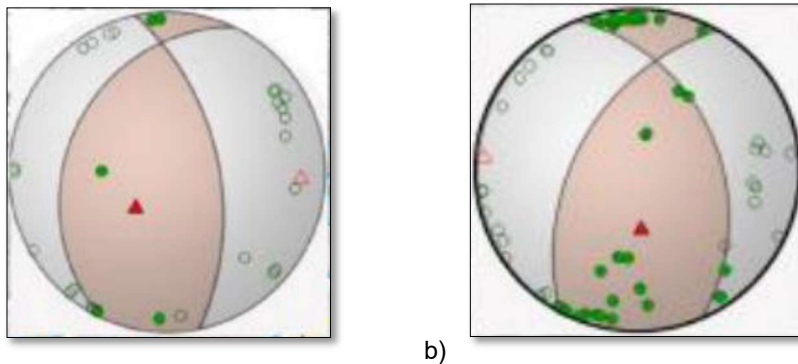


Figura 3.9. Mecanismos focales obtenidos para los sismos del (a) 12 de enero y (b) el 15 de marzo. Tomado de “INFORMES SÍSMICOS PARA EL ECUADOR”. IGEPN.

En el año 2017 la actividad sísmica en Quito permaneció baja, tubo 235 eventos en total con magnitud máxima de 3.42 MLv y magnitud promedio de 1.72 MLv.

El 2018 se registraron 2 eventos en Puenbo y uno al occidente de la caldera del volcán Guagua Pichincha. Los sismos de Puenbo tuvieron hipocentros entre 4 y 7 km de profundidad.

### **3.3. Características de la Red Sísmica de Quito para el Monitoreo**

En la actualidad, la ciudad de Quito está monitoreada con varios tipos de estaciones sísmicas permanentes a lo largo y alrededor de la misma. Se cuenta con 5 estaciones de período corto instaladas en el volcán Guagua Pichincha (PINO, TERV, YANA, GGP, JUA2) y 3 estaciones de banda de ancha, 2 ubicadas en los flancos del volcán Guagua Pichincha (GGPC, GGPT) y una en el volcán Pululahua (PULU), las estaciones sísmicas son parte de la RENSIG (Red Nacional de Sismógrafos) (Alvarado et al., 2018).

Las 24 estaciones acelerométricas de la RENAC (Red Nacional de Acelerógrafos) están conformadas por equipos Guralp 4G y 2G, compuestas por digitalizador CMG-DM24 MK3 y un sensor CMG 5 TDC y muestrean 100 muestras por segundo.

Las estaciones de banda ancha están compuestas por sensores Nanometrics Trillium Compact 120 segundos acompañadas de digitalizadores Quanterra de 24 bits, con digitalización a 100 muestras por segundo.

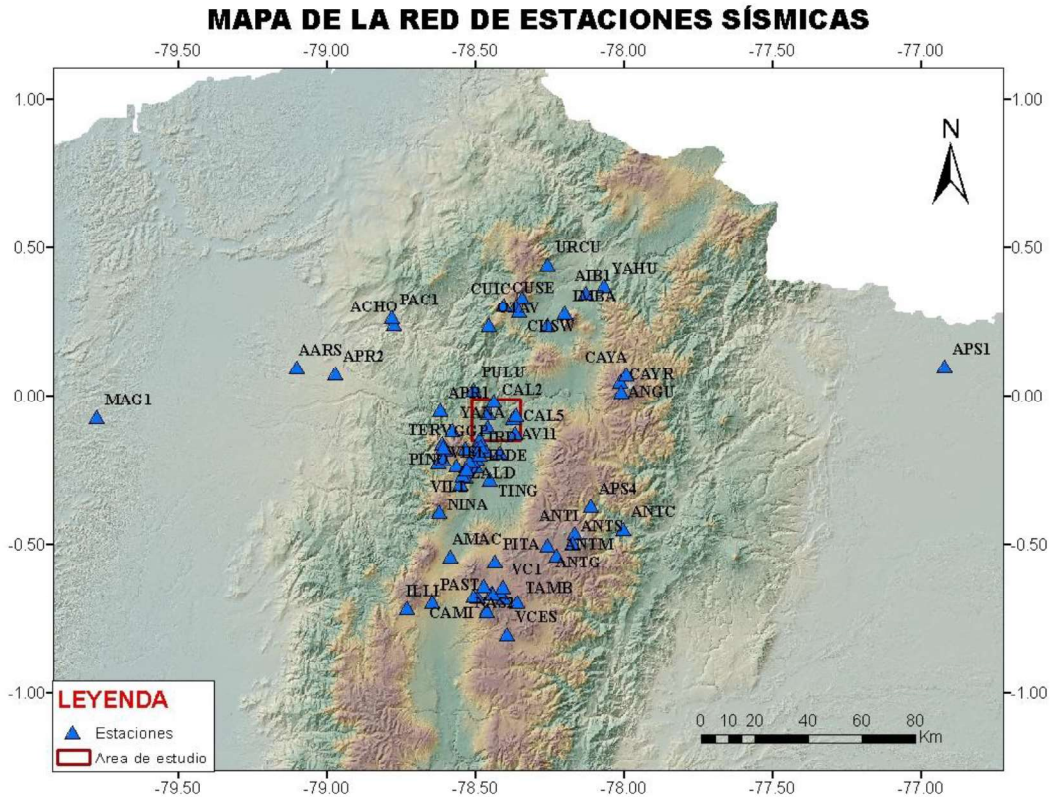
Los equipos de periodo corto están compuestos por sensores L4C - 1D (componente vertical) excepto la estación de PINO, la cual tiene un sensor L4C – 3D (tres componentes). Están ubicados principalmente en el Volcán Guagua Pichincha.

Para el análisis de la sismicidad en Quito, en este trabajo otras estaciones de la red de vigilancia sísmica y volcánica fueron integradas. Para esto se consideró un polígono de 80 km \* 70 km en dirección NS y EW respectivamente. Para ilustrar, se tomó las estaciones desde Urcuquí hasta la red del Cotopaxi y desde las estaciones de la red del Cayambe hasta los acelerógrafos de Arashá y Santo Domingo.

La red utilizada, presenta un Gap Azimutal de 53 grados, respecto al centro de la misma, dando una buena cobertura que permite generar localizaciones de alta calidad.

A continuación (Figura 3.10) se indica la ubicación de todas las estaciones con las que se trabajó en este estudio.



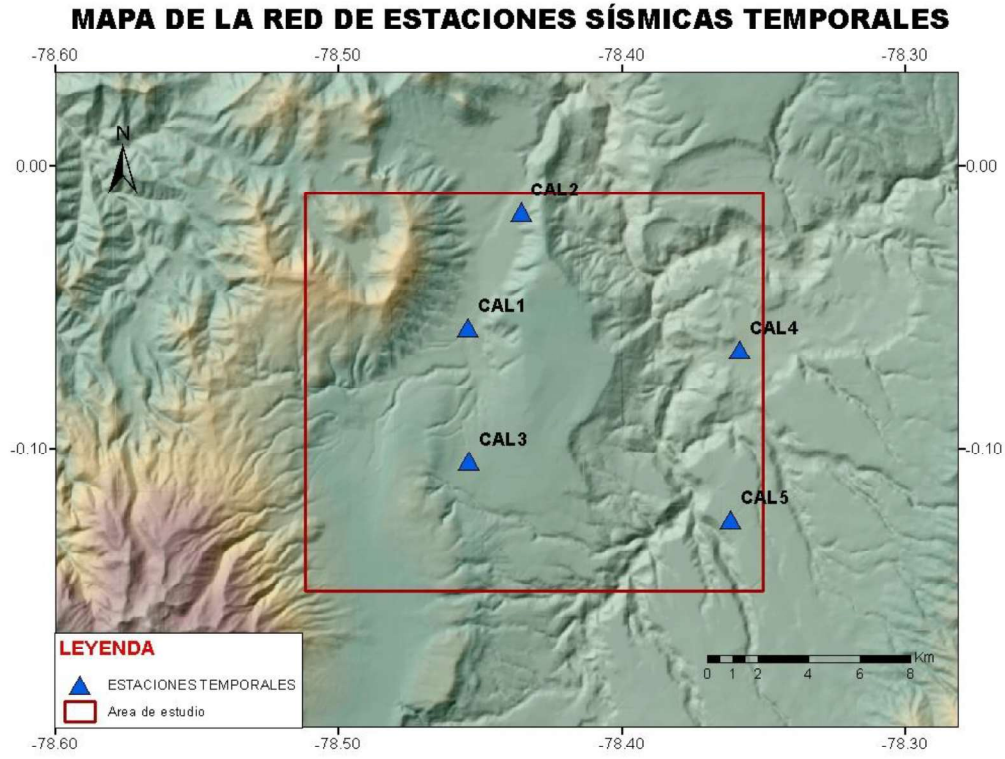


**Figura 3.10.** Mapa de distribución de las estaciones sísmicas utilizadas para este estudio.

Luego del sismo de 12 de agosto del 2014 se instaló una red temporal compuesta por 5 estaciones de la red de emergencia del Instituto Geofísico. Las estaciones estuvieron compuestas por sensores Geo Space OYO HS-1-LT de 3810 Ohms y digitalizadores Reftek 125-37, con una tasa de muestreo de 200 muestras por segundo. La red funcionó desde el 13 de agosto del 2014 hasta el 11 de septiembre del 2014. La ubicación de las estaciones se describe en la tabla 3.3 y Figura 3.11.

**Tabla 3.3.** Ubicación de las estaciones temporales

Código de Estación	Latitud	Longitud	Altura
CAL1	-0.05708	-78.45431	2464m
CAL2	-0.01578	-78.43561	2416m
CAL3	-0.10397	-78.45406	2661m
CAL4	-0.06472	-78.35825	2136m
CAL5	-0.12492	-78.36142	2378m



**Figura 3.11.** Mapa de distribución de las estaciones sísmicas temporales

## 4. LOCALIZACIÓN DE LOS EVENTOS TECTÓNICOS LOCALES

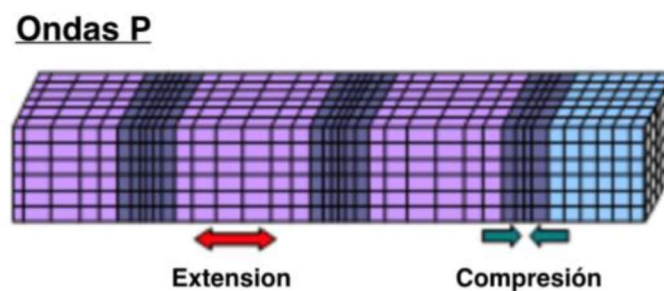
### 4.1. Conceptos

#### 4.1.1. Los sismos y la generación de ondas sísmicas

Los sismos generan dos tipos de ondas las superficiales que viajan en la superficie y las de cuerpo que viajan a través de distintos materiales del interior de la tierra. Las ondas de cuerpo se clasifican en ondas primarias u ondas de compresión y las ondas secundarias o de corte.

##### Ondas primarias o de compresión

Conocidas también como ondas P, son ondas longitudinales, donde el suelo es comprimido y dilatado en la misma dirección en que se propaga la onda. La velocidad de la onda P es por lo general  $\sim 1.73$  veces la velocidad de la onda S, por lo que son las primeras ondas registradas de un sismo determinado, además están ondas pueden viajar a través de cualquier medio ya sea fluido o sólido. La velocidad típica en el agua es de 1,45 km/s, en el aire de 0.33 km/s y en rocas como el granito es de 4 - 6 km/s. (Figura 4.1) (Baptiste, 2016; LPI, 2015).

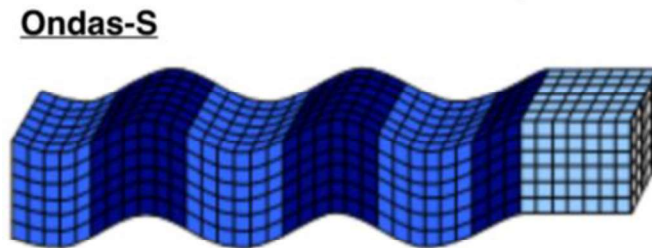


**Figura 4.1.** Ondas P donde se observa la dilatación y compresión del material en la dirección de propagación. Tomado de Sáez, 2016

##### Ondas secundarias o de cizalla

Las ondas de cizalla o llamadas también ondas S, son ondas transversales, es decir, que hacen que el suelo sea desplazado perpendicular a la dirección de propagación. A diferencia de las ondas P, estas ondas no pueden propagarse por medios líquidos ya

que los líquidos no son capaces de soportar esfuerzos de corte. Estos trenes de onda suelen presentar mayor amplitud y pueden generar mayores daños que las ondas primarias. (Figura 4.2) (Baptiste, 2016; LPI, 2015).



**Figura 4.2.** Ondas de corte, se observa cómo se propagan con movimientos en un plano perpendicular a la dirección de propagación. Tomado de Sáez, 2016

#### **4.1.2. Métodos de Localización**

Una ubicación precisa de la fuente depende de varios factores y uno de ellos es un método de localización. Existen 2 enfoques de localización de la fuente y son:

El enfoque triaxial que utiliza la amplitud del primer arribo de la onda P en las tres direcciones ortogonales (NS, EW y vertical) y la diferencia de los tiempos de arribo de las ondas P y S, para definir la ubicación del evento (Maochen, 2003). Este método es más geométrico.

El enfoque con tiempos de arribo, utiliza los tiempos de arribo de las ondas P y S. En este método se calcula arribos teóricos a las diferentes estaciones, usando un modelo de velocidades (velocidades de propagación de las ondas en el medio). El método ajusta una localización por minimización de los residuos entre las observaciones (tiempos de arribo observados en los sismogramas) y los tiempos teóricos calculados en un modelo de velocidades. La ubicación se va ajustando (e.g. iteraciones) hasta que el residuo o la diferencia de tiempo sea mínima. Este resultado es más estable que el obtenido con la amplitud de las ondas, debido a que los tiempos de viaje son menos sensibles al cambio en las propiedades del medio que influye en la amplitud de las ondas (Maochen, 2003).

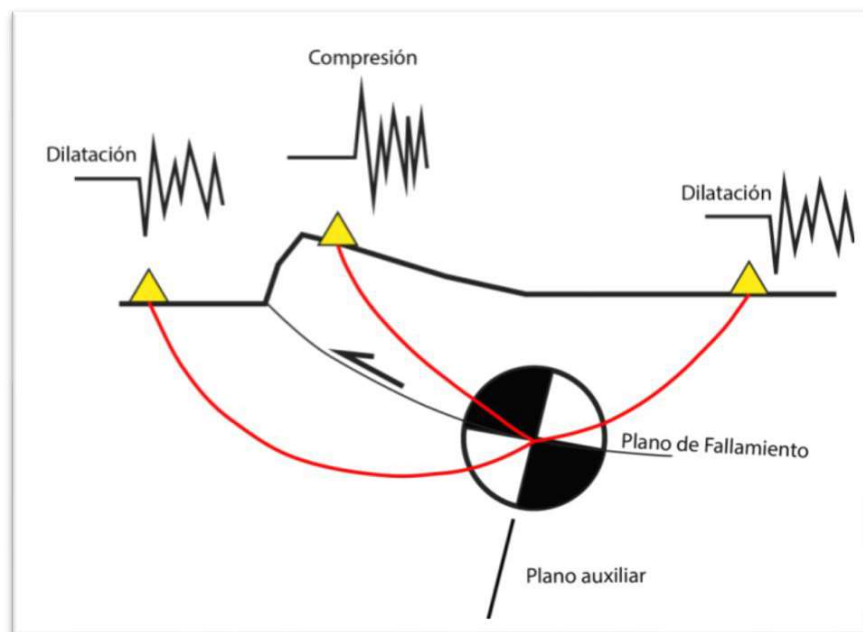
Dentro del enfoque con tiempos de arribo se encuentran los métodos iterativos y no iterativos (Maochen, 2003).

Los algoritmos de localización iterativos utilizan el tiempo de arribo de las ondas, un modelo de velocidades y un hipocentro preliminar. El método general para realizar localizaciones se basa en calcular los tiempos de viaje teóricos y compararlos con los tiempos de viaje observados, obteniendo así un residuo: la raíz cuadrada de la suma al cuadrado de los residuos es el RMS (Calahorrano, 2001).

En el presente trabajo, se utilizará el método iterativo que usa los tiempos de arribo de las ondas a las estaciones y se determinará la localización puntual.

#### 4.1.3. Identificación y Caracterización de los Arribos de las Ondas P y S

Para la localización y el análisis del mecanismo de origen de los sismos, se necesita identificar y marcar en cada una de las estaciones sísmicas los tiempos de arribo de las fases P y la polaridad (dirección del impulso del primer arribo) respectiva, esto se lo realiza en la componente vertical (Z). La polaridad puede ser de dilatación (por convención "-") o compresión (por convención "+") (Figura 4.3). También se debe marcar los tiempos de arribo de las ondas S en las componentes Norte-Sur o Este-Oeste, que se los reconoce como un cambio de amplitud y/o frecuencia.



**Figura 4.3.** Polaridad del primer arribo de la onda P relacionado con su patrón de radiación a partir de la fuente que tiene un mecanismo determinado (cuadrantes negros: compresión, cuadrantes blancos: dilatación). Los triángulos amarillos son las estaciones. Tomado de Jean-Baptiste, 2016.

## 4.2. Software utilizado

Para la determinación de los tiempos de arribo de las ondas P y S y la polaridad de las ondas P se utilizó el módulo “scolv” del paquete de procesamiento y almacenamiento sísmico SeisComP3 (SC3) de Gempa®. El software es un programa sísmológico de adquisición de datos, análisis y procesamiento interactivos y de diseminación de información sísmica que se utiliza para el monitoreo sísmico en tiempo real y también permite otros análisis en tiempo diferido (Pérez, 2016).

En la Figura 4.4, se muestra un ejemplo del reconocimiento de arribos o fases (*picados*) de las ondas P y S para el evento en el segmento norte del SFQ registrado el 12 de agosto del 2014.

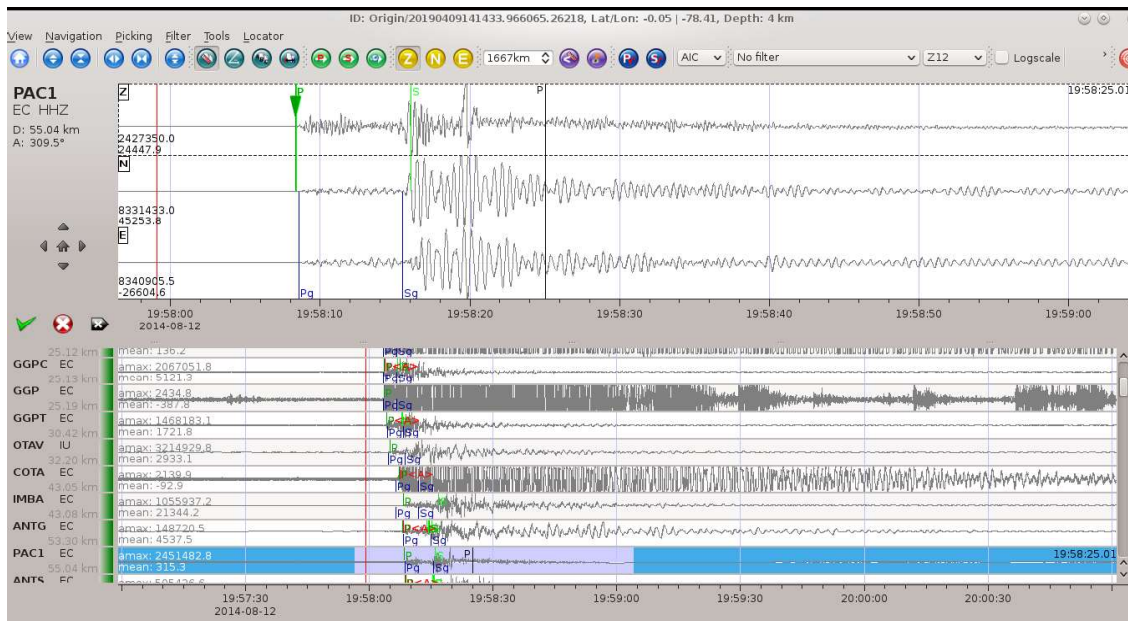


Figura 4.4. Arribo de las ondas P y S para el sismo principal ocurrido el 12 de agosto del 2014. Software: SeisComp3.

El SC3 maneja una estructura de almacenamiento de datos o SDS (Seiscomp *Data Structure*). La información es almacenada en formato mseed (*Standard for the Exchange of Earthquake Data*) de señales continuas con ventanas de duración de un día y para cada componente de las estaciones.

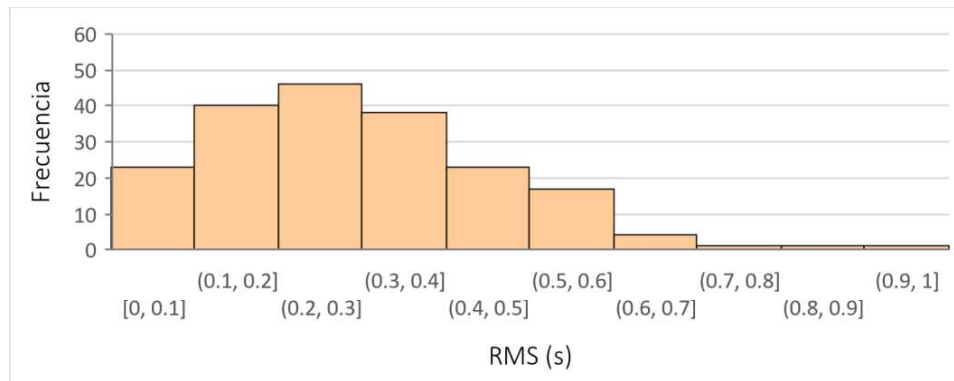
### 4.3. Base de Datos utilizada

La selección de los sismos a analizar en el presente trabajo se hizo a partir del polígono delimitado en el capítulo I, y solo se escogió los sismos clasificados como *earthquakes* (sistema de clasificación de SeisComP3). 159 sismos, relacionados con la crisis de agosto de 2014, fueron seleccionados para el tratamiento de datos, debido a que se registraron en el segmento norte. Los eventos fueron repicados, con un reconocimiento más preciso del arribo de las fases y además del reconocimiento de las polaridades, manteniendo un criterio uniforme.

Uno de los parámetros que permiten cuantificar la calidad de una localización es el RMS (raíz cuadrada del sumatorio de residuos al cuadrado ponderados ( $W$ ) de los tiempos de llegada a cada estación) (Ec. 1). Tomando en cuenta que mientras menor sea el RMS, la solución encontrada será más confiable, según el modelo de velocidades utilizado. En la Figura 4.5 se observa que la mayor parte de los eventos de la crisis sísmica tienen valores de RMS entre 0.1 y 0.4 s.

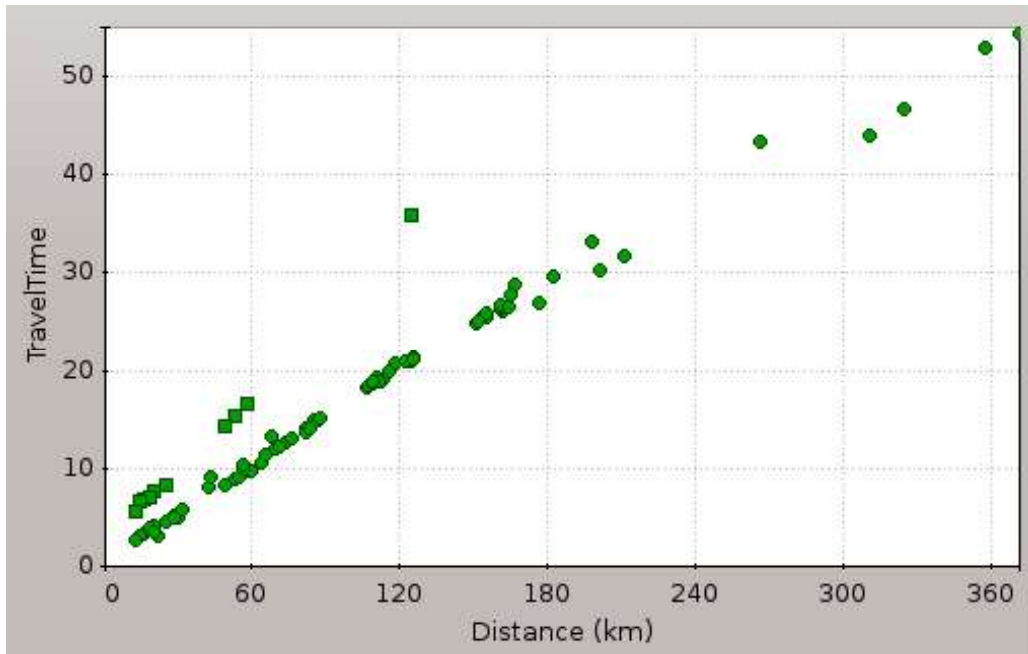
$$\text{Ec. (1)} \quad \text{RMS} = \sqrt{\sum [W * (t_{\text{obs}} - t_{\text{cal}})]^2}$$

Donde  $t_{\text{obs}} - t_{\text{cal}}$  es la diferencia entre el tiempo observado y el tiempo calculado en una estación,  $W$  es el peso o incertidumbre asignado al tiempo observado en esa estación (lectura del tiempo realizada).



**Figura 4.5.** Histograma de RMS de los eventos sísmicos de la crisis de agosto de 2014. En el eje horizontal se encuentran rangos de los RMS con valores desde 0 hasta 1. En el eje vertical se observa el número de eventos para cada rango del RMS.

Otro indicador fundamental para el análisis de la calidad de las lecturas es el *Travel Time* que es la relación entre el tiempo de viaje de la onda y la distancia (ver Figura 4.6).



**Figura 4.6.** Gráfico del *travel time*, donde se observa la relación entre la distancia y el tiempo de arribo para un sismo en particular. Los puntos verdes corresponden a las fases P y los cuadrados verdes a las fases S. Tomado del SeisComP3.

Una vez leídos los tiempos de llegada (y polaridades) de los sismos, se generan los boletines (archivos de texto) donde se tomará la información para los análisis posteriores.

Los hipocentros (X, Y, Z) y el tiempo de origen (tiempo de inicio de la ruptura) son determinados en el SC3 mediante un algoritmo llamado LOCSAT y un modelo de velocidades de ondas P y S llamado IASPESI91 (Kennett y Engdahl, 1991; Pérez, 2016).

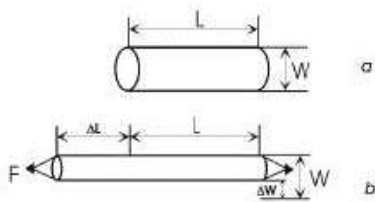
La selección de la mejor solución para la localización se basa en la mayor cantidad de lecturas de P, RMS pequeño y elipses de error de localización bajos (Pérez, 2016).



#### 4.4. Caracterización del Medio en Base a Datos Sismológicos

A partir de las observaciones de los eventos sísmicos (tiempos de llegada de las ondas a las estaciones) se pueden inferir propiedades del medio a través del cual se propagan dichas ondas. Uno de ellos es el coeficiente de Poisson.

Este coeficiente es utilizado para caracterizar las propiedades elásticas de un material, pues indica la relación entre la deformación longitudinal que sufre el material en sentido perpendicular a la fuerza aplicada y la deformación longitudinal en el mismo sentido de la fuerza aplicada, Figura 4.7 y Ecuación (2) (Pérez, 2018). Si la resistencia del material crece hacia el infinito el coeficiente tiende a 0.



**Figura 4.7.** Deformación de un testigo al aplicar una fuerza a lo largo del eje más largo para la definición del coeficiente de Poisson (Bormann, 2009).

Ec. (2) 
$$\sigma = \left(\frac{\Delta W}{W}\right) / \left(\frac{\Delta L}{L}\right)$$

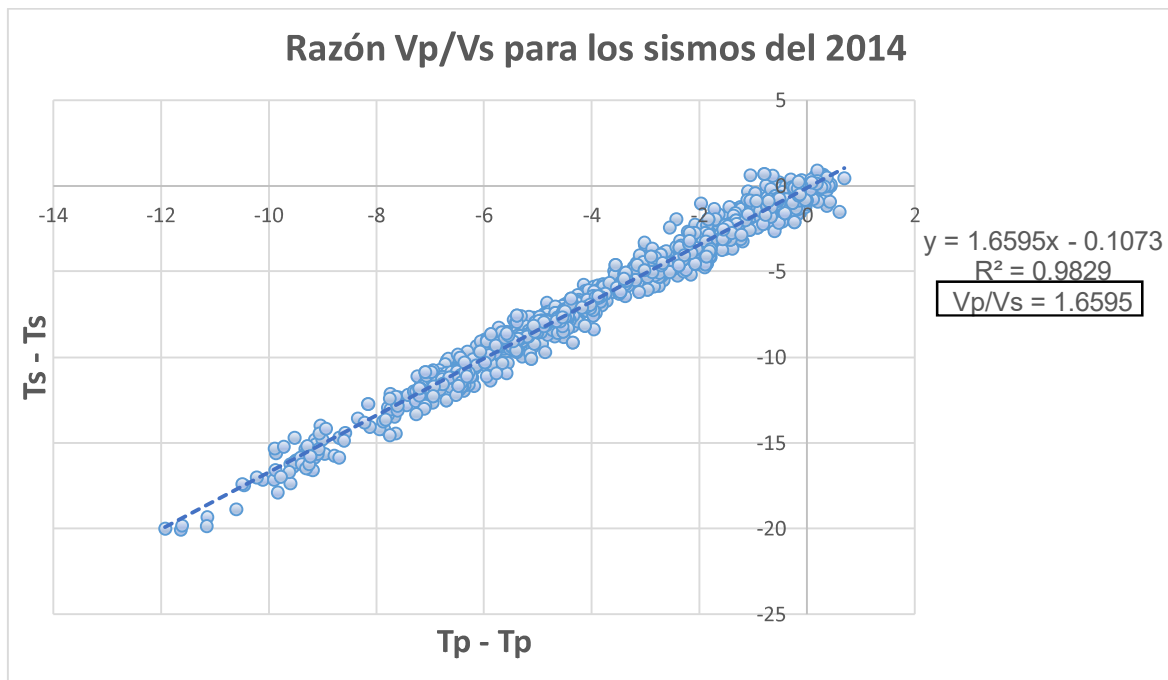
El  $\sigma$  está comprendido entre 0 y 0.5 y se puede determinar a partir de la razón  $V_p/V_s$  (Ec. 3).

Ec (3). 
$$\sigma = \frac{\left(\frac{V_p}{V_s}\right)^2 - 2}{2 * \left(\frac{V_p}{V_s}\right)^2 - 2}$$

La razón  $V_p/V_s$  está definida para un medio, y se puede determinar a partir de los tiempos de arribo de las ondas P y S que atraviesan ese medio. este valor se calculó por medio del diagrama de Wadati modificado (Chantelain, 1978), el cual utiliza la diferencia de tiempos de arribo de P ( $T_p - T_p$ ) y de arribo de S ( $T_s - T_s$ ) en las diferentes estaciones en las que se ha registrado un mismo evento. Luego se grafican las

diferencias  $T_s - T_s$  vs.  $T_p - T_p$  de todos los sismos. La pendiente de esta línea corresponde al valor de  $V_p/V_s$ . Y si los datos se ajustan a esta línea o no presentan mucha desviación, se puede decir que las lecturas son confiables.

El conjunto de sismos analizado (159 eventos seleccionados, ver Anexo 2) presenta un  $V_p/V_s$  de 1.66 (Figura 4.8), lo que da un coeficiente de Poisson igual a 0.215 (Ec. 3) que es un valor dentro de los rangos esperados para el sustrato presente en el arco volcánico (Bormann, 2009).



**Figura 4.8.** Diagrama de Wadati modificado, con  $V_p/V_s$  para los sismos de la crisis de agosto de 2014.

## 5. RELOCALIZACIÓN DE LOS EVENTOS TECTÓNICOS LOCALES

Para la caracterización de la geometría del SFQ es necesario contar con localizaciones confiables de los sismos. La incorporación de observaciones de las estaciones temporales instaladas para registrar la crisis de agosto de 2014, permitió conseguir este objetivo. Para la relocalización de los eventos del segmento norte se utilizó el software HYPOELLIPSE (Lahr, 1999), con la utilización de las lecturas de los tiempos de arribo realizadas en SC3. La selección de este programa se basa en la posibilidad de utilizar correcciones de estaciones durante el proceso de localización.

HYPOELLIPSE es un programa que se utiliza para determinar los hipocentros y magnitudes de los sismos registrados por una red regional de sismógrafos dispersos.

Para obtener localizaciones de buena calidad se necesita un adecuado modelo de velocidades mínimo en 1 dimensión (MVM1D). El MVM1D es una representación simplificada de la velocidad a la que viajan las ondas sísmicas al atravesar las capas geológicas inferidas como horizontales (Araya et al., 2016).

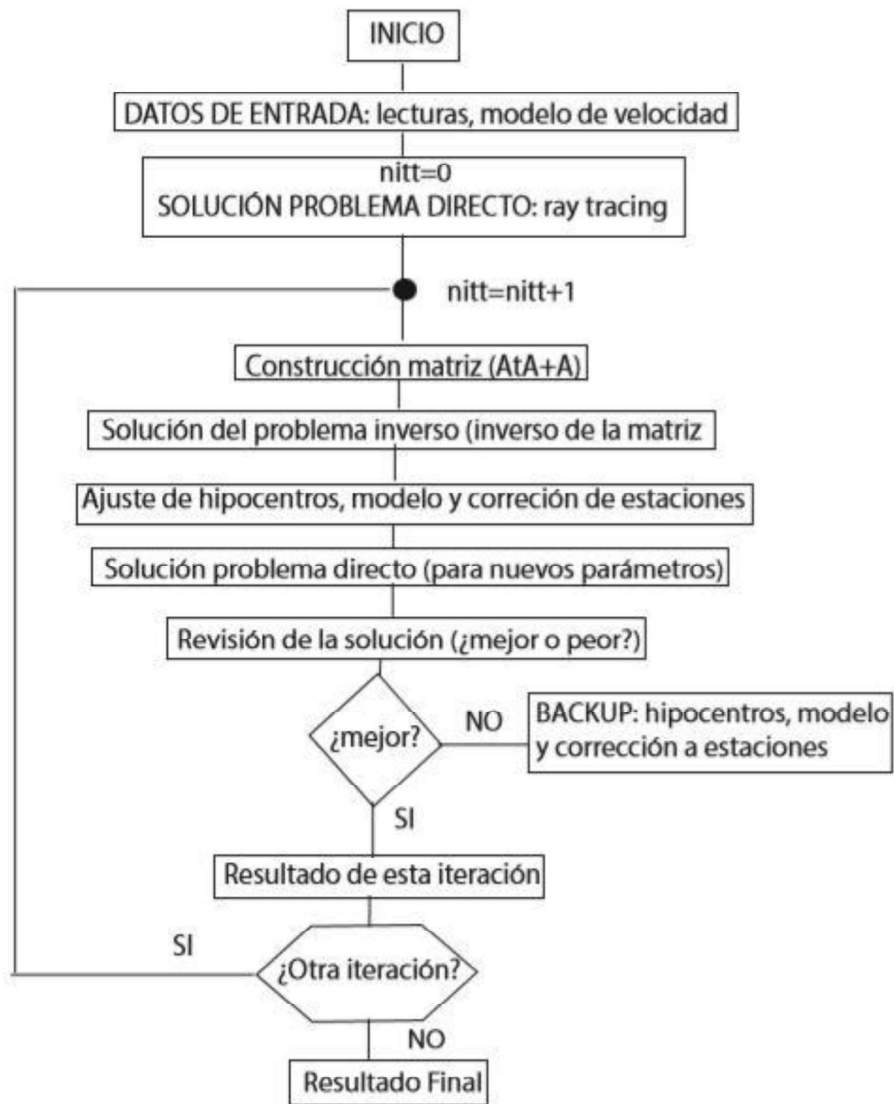
### 5.1. Metodología

#### Cálculo de un modelo de velocidades

Para encontrar un modelo mínimo 1D (MVM1D) se utilizó el programa VELEST (Kissling et al., 1995). Este software realiza una búsqueda simultánea de los hipocentros y las velocidades de las ondas P y S a través del método de inversión, utilizando como parámetros de entrada, las localizaciones iniciales, un modelo de velocidad a priori y los tiempos de arribos de las fases P y S de cada sismo. (Figura 5.1)

Al realizar estas inversiones, se obtiene un modelo de velocidades y nuevas localizaciones que a su vez pueden ser utilizadas como un nuevo input para un nuevo proceso de búsqueda (inversiones), hasta conseguir minimizar los residuos entre los tiempos observados y los tiempos calculados de los arribos a las estaciones para cada sismo. En el *output* del proceso de inversión constan además las correcciones a las estaciones que deben tenerse en cuenta en cada *input* para la búsqueda del modelo y

finalmente, al usar el modelo resultante en un nuevo proceso de localización (Figura 5.1).

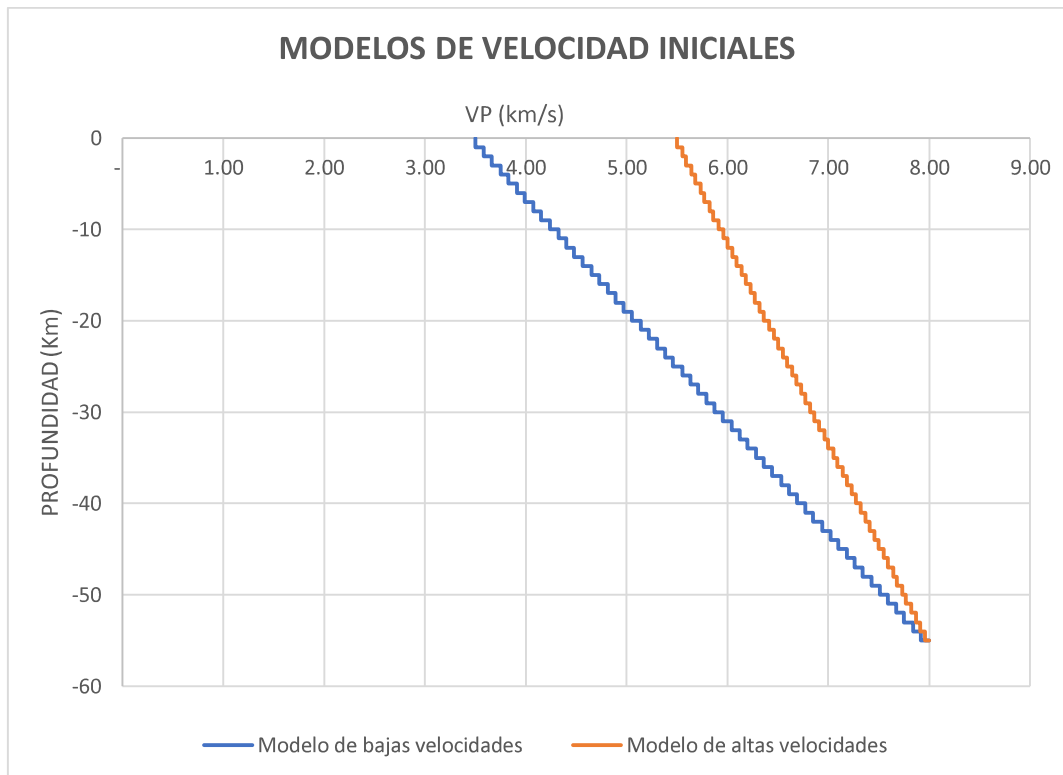


**Figura 5.1.** Resumen del esquema de trabajo de VELEST. Modificado de Alvarado et al., 2014b

## 5.2. Aplicación de la metodología

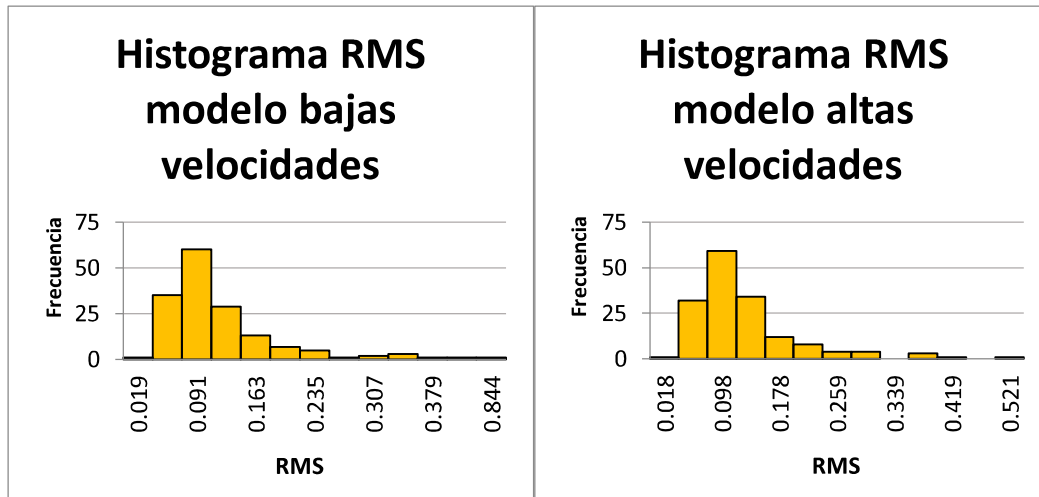
En el presente estudio, se determinó (por inversión) únicamente un modelo de velocidad de las ondas P y el valor de la velocidad de la onda S se lo determinó en base a la razón  $V_p/V_s = 1.65$  encontrada (ver capítulo 4)

Para la inversión, se utilizaron 2 modelos de velocidad iniciales construidos hasta los 55 km de profundidad, donde se estima que está el Moho bajo los Andes del Ecuador (e.g., Font et al., 2013). Ambos modelos se parametrizaron con capas de 1 km de espesor. La velocidad inicial de la onda P en el primer modelo fue de 3.5 km/s (Figura 5.2, modelo de bajas velocidades) y para el segundo, 5.5 km/s (Figura 5.2, modelo de altas velocidades). Hasta los 8 km/s que es una velocidad aproximada de la onda P en el Moho (Font et al., 2013).



**Figura 5.2.** Modelos iniciales de velocidad el primero en azul de bajas velocidades y el segundo en naranja de velocidades altas. Usado para la inversión realizada con el programa VELEST.

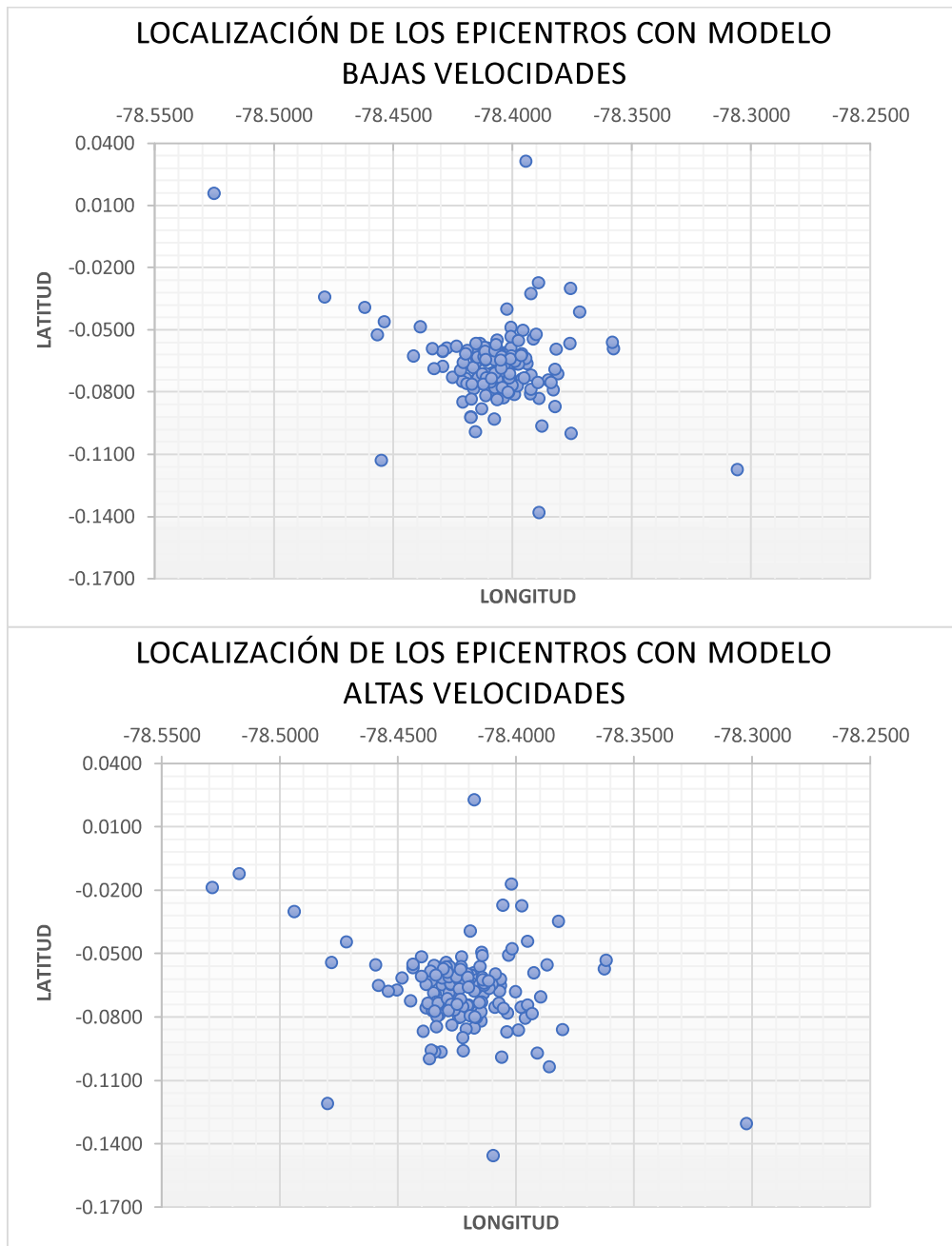
Luego de haber efectuado las inversiones con cada modelo por separado, se compararon los resultados y se seleccionó el mejor, en función del RMS (Figura 5.3) y de las localizaciones finales (Figura 5.4).



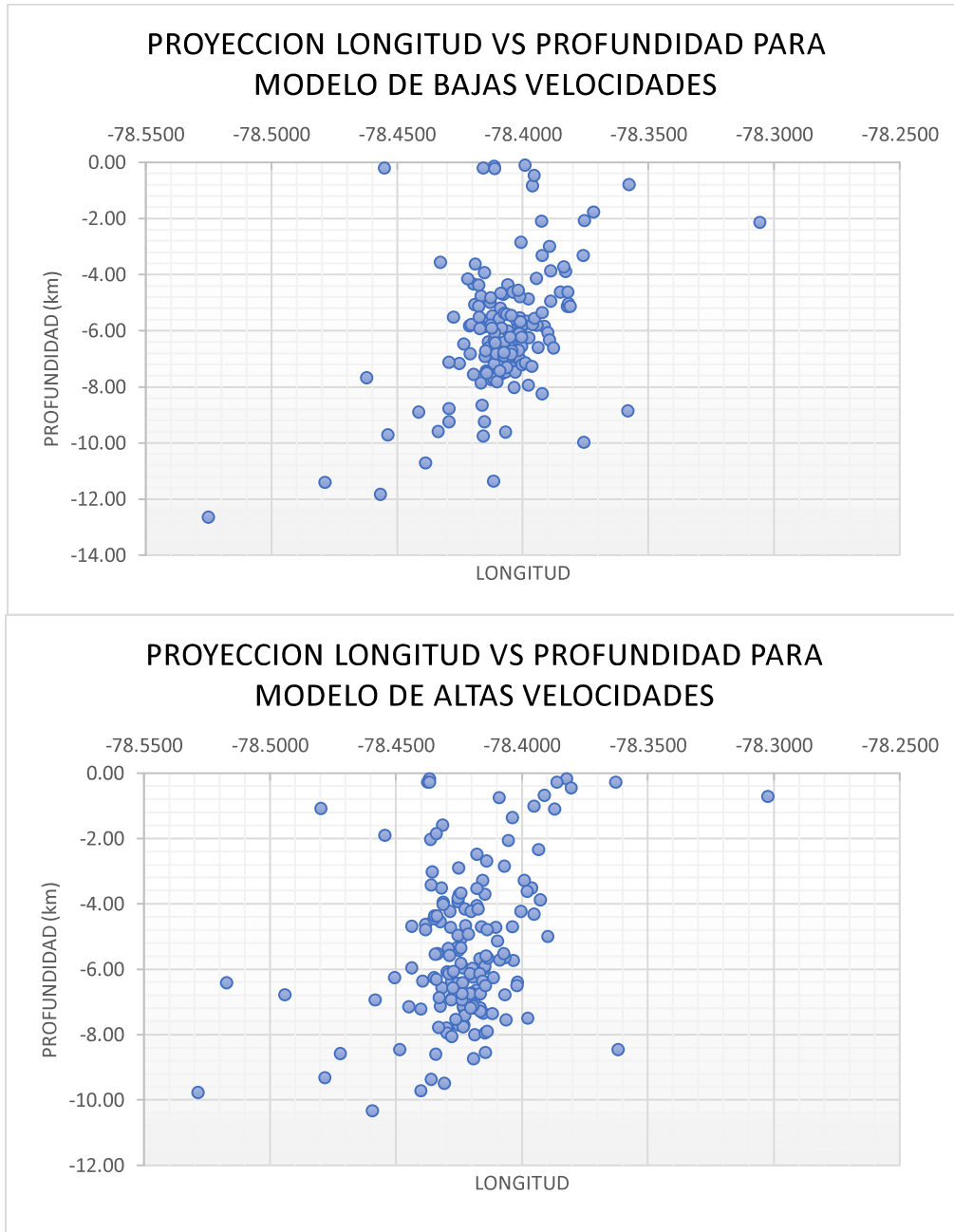
**Figura 5.3.** Histograma del RMS respectivo para los 2 modelos de velocidades iniciales. En el eje horizontal están los RMS y en el eje vertical el número de eventos para cada rango de RMS

La selección del modelo de velocidades se basa principalmente en el resultado obtenido. Las localizaciones de los 159 eventos escogidos (Anexo 2) obtenidas con el modelo resultante del modelo inicial de bajas velocidades, se muestran menos dispersas en planta (ver la distribución epicentral en la Figura 5.4) pero sobre todo en profundidad (ver Figura 5.5), lo que permite determinar en forma preliminar la zona sismogénica de la crisis objeto de este estudio.

Para una visualización apropiada y conveniente para los análisis, se escoge una proyección de la sismicidad en longitud (~perpendicular a la falla), permitiendo observar la distribución de los eventos en profundidad y su relación con la falla.



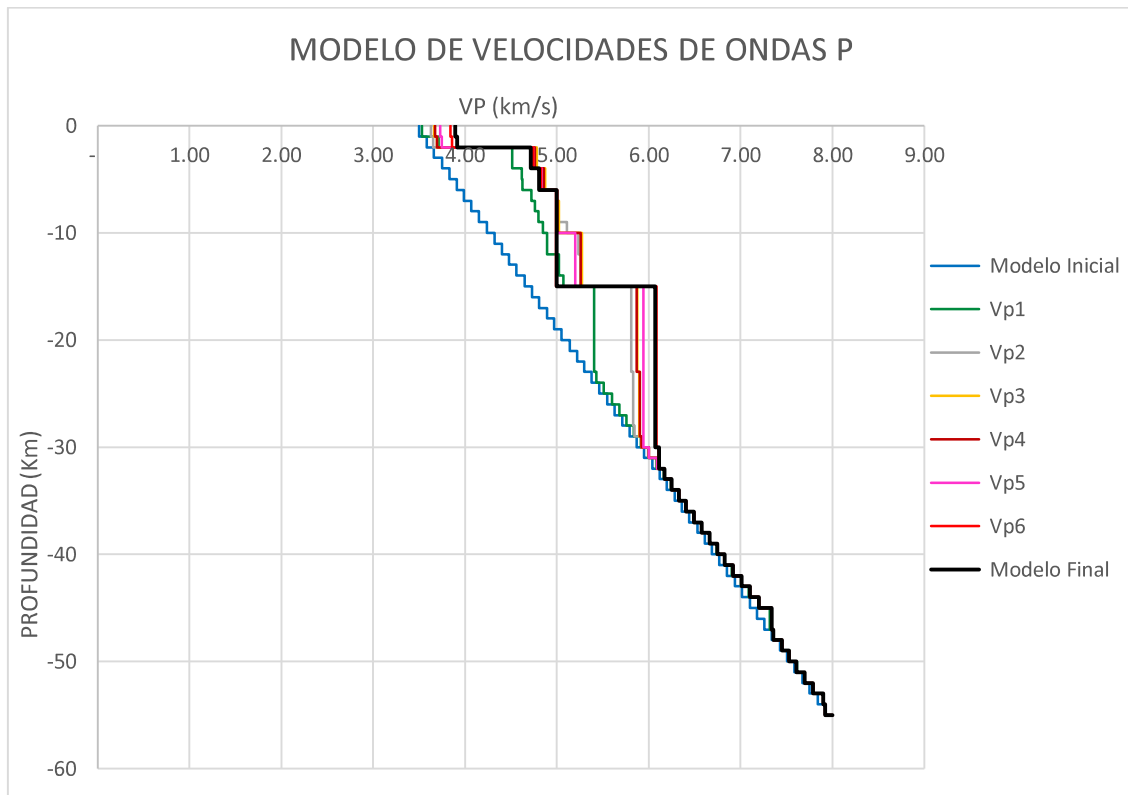
**Figura 5.4.** Localizaciones de los epicentros para los dos modelos de velocidades iniciales.



**Figura 5.5.** localizaciones de los hipocentros respecto a la longitud para los dos modelos de velocidades iniciales.



Adicionalmente el valor de RMS se tomó como un parámetro para seleccionar el modelo de bajas velocidades como el más óptimo. Estos resultados muestran menor dispersión de las localizaciones tanto en planta como en profundidad. El modelo escogido (Figura 5.6), se caracteriza por velocidades entre 3.9 – 6.1 Km/s en los primeros 30 Km. Con respecto al modelo inicial, en profundidad no hay mayor variación, debido a la baja cobertura de rayos sísmicos que muestrearon el modelo durante la inversión (Figura 5.8)



**Figura 5.6.** Modelo de velocidades después de realizar las inversiones. Vp1 es el modelo después de la primera inversión, Vp2 es el modelo después de la segunda inversión, Vp3 después de la tercera inversión, Vp4 después de la cuarta inversión, Vp5 después de la inversión 5, Vp6 después de la sexta inversión y el modelo final después de la séptima inversión.

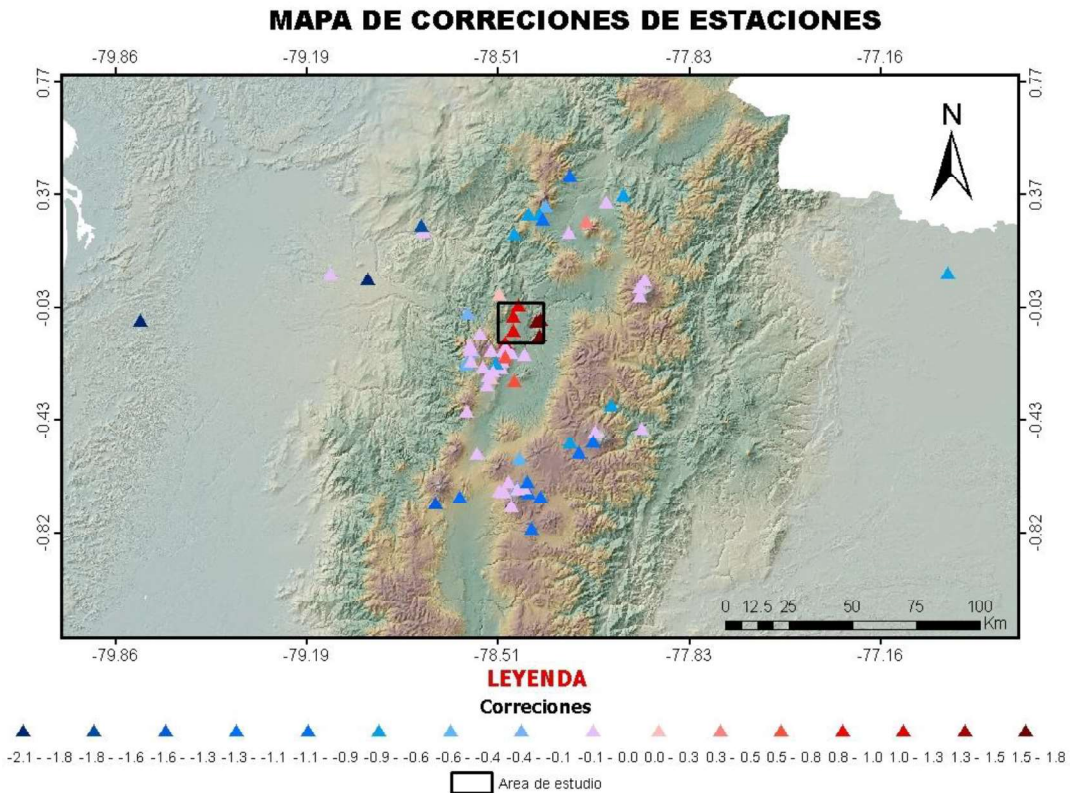
Este modelo tiene asociadas correcciones a las estaciones (tabla 5.1): tiempos que deben añadirse o restarse a los tiempos observados durante el proceso de localización utilizando dicho modelo (Figura 5.7).

**Tabla 5.1.** Correcciones de tiempo para cada estación sísmica utilizada.

Estación	Latitud	Longitud	Corrección	Estación	Latitud	Longitud	Corrección
24MA	-0.1767	-78.4738	0.797	CUSE	0.3053	-78.3991	-0.700
AARS	0.0958	-79.0988	0.000	CUSW	0.2862	-78.3508	-1.054
ACHO	0.2434	-78.7710	0.000	EPNL	-0.2120	-78.4917	0.000
AEPN	-0.2120	-78.4917	0.588	FENY	-0.1470	-78.4815	0.843
AIB1	0.3466	-78.1254	0.000	GGP	-0.1778	-78.5962	-0.139
ALLO	-0.2327	-78.5610	0.000	GGPC	-0.1788	-78.5968	-0.213
AMAC	-0.5409	-78.5818	0.000	GGPT	-0.2240	-78.6200	-0.639
ANGU	0.0469	-78.0084	0.000	IESS	-0.1757	-78.4910	0.000
ANTC	-0.4500	-78.0000	0.000	ILLI	-0.7146	-78.7279	-1.579
ANTG	-0.5031	-78.2546	-0.870	IMBA	0.2799	-78.1969	0.366
ANTI	-0.4618	-78.1629	0.000	IRD	-0.1972	-78.4810	0.000
ANTM	-0.5362	-78.2228	-1.066	IRDE	-0.1972	-78.4810	0.751
ANTS	-0.4973	-78.1704	-0.916	JUA2	-0.2138	-78.6052	0.000
AOTA	0.2401	-78.2557	0.000	LILI	-0.2718	-78.5313	0.112
APR1	-0.0464	-78.6137	-0.218	MAG1	-0.0700	-79.7713	-2.024
APR2	0.0767	-78.9676	-2.127	NAS2	-0.6400	-78.4700	0.000
APS1	0.0998	-76.9189	-0.660	NINA	-0.3903	-78.6185	0.000
APS4	-0.3709	-78.1064	-0.836	OTAV	0.2376	-78.4508	-0.787
AV11	-0.0727	-78.3714	1.619	PAC1	0.2661	-78.7791	-1.691
BELL	-0.1823	-78.4618	0.000	PAST	-0.6942	-78.6418	-1.270
BMOR	-0.7250	-78.4591	0.000	PINO	-0.1580	-78.6077	-0.124
BNAS	-0.6748	-78.4875	0.000	PITA	-0.5585	-78.4327	-0.533
BREF	-0.6637	-78.4408	-0.692	PULU	0.0218	-78.5022	0.117
BTAM	-0.6785	-78.3991	-1.035	QTOE	-0.1700	-78.4800	0.000
BVC2	-0.6610	-78.4142	0.000	QUEM	-0.2370	-78.4970	0.000
CAL1	-0.0571	-78.4543	1.056	QUIB	-0.2963	-78.5482	0.000
CAL2	-0.0158	-78.4356	1.212	QUIT	-0.2963	-78.5482	0.000
CAL3	-0.1040	-78.4541	1.189	RUMP	-0.1753	-78.5313	0.000
CAL4	-0.0647	-78.3583	1.788	SANF	-0.2193	-78.5158	-0.739
CAL5	-0.1249	-78.3614	1.636	TAMB	-0.6937	-78.3575	-0.962
CAMI	-0.6727	-78.5028	0.000	TERV	-0.1743	-78.6043	0.000
CAYA	0.0715	-77.9901	0.000	TING	-0.2825	-78.4485	0.616
CAYR	0.0153	-78.0067	0.000	URCU	0.4417	-78.2533	-1.005
CIRC	-0.1963	-78.4875	0.621	VC1	-0.6420	-78.4031	-0.933
CIVI	-0.2118	-78.4912	0.568	VCES	-0.8033	-78.3898	-1.055
CMEA	-0.1962	-78.4895	0.618	VIFL	-0.2487	-78.5252	0.000
COSF	-0.2365	-78.5257	0.000	VILL	-0.2487	-78.5252	0.000
COTA	0.3319	-78.3403	-0.482	YAHU	0.3717	-78.0650	-0.799
COV1	-0.6658	-78.4392	0.000	YANA	-0.1167	-78.5725	-0.100

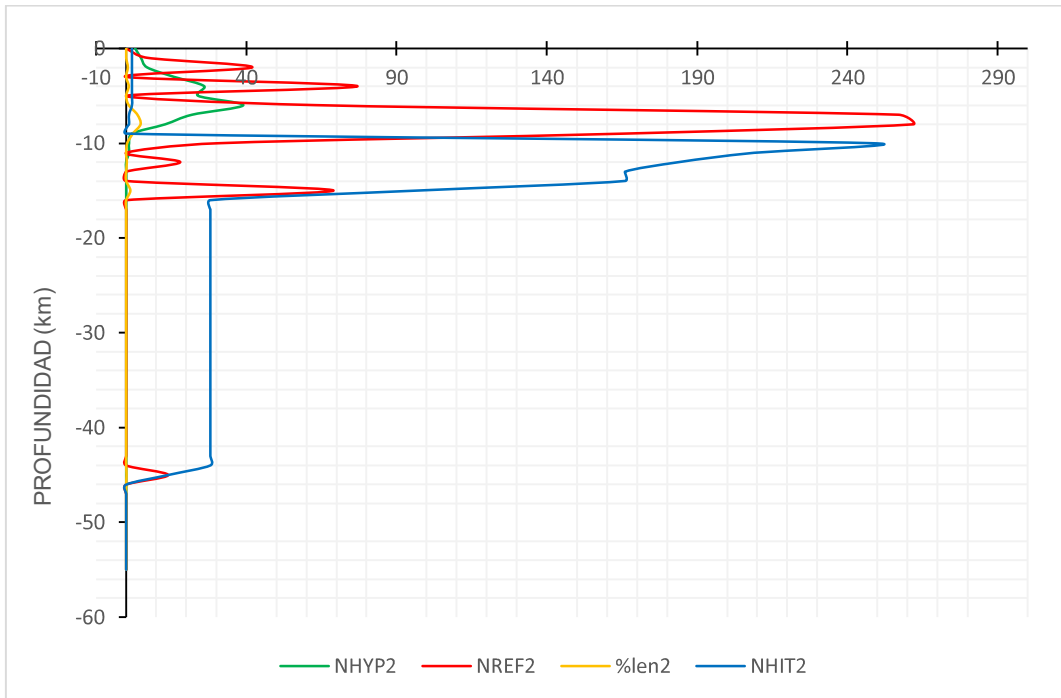
CUIC	0.3040	-78.3611	-0.674	ZALD	-0.2665	-78.5413	-0.078
CUMY	-0.1908	-78.4137	0.000				

Los valores de las correcciones de estaciones están entre -2.13 y 1.79 segundos (tabla 5.1). Las correcciones positivas indican un retardo en el arribo del rayo, es decir que la diferencia entre el tiempo observado (más lento) y el tiempo calculado es mayor a 0, mientras que las correcciones negativas evidencian un arribo rápido del rayo y por lo tanto la diferencia entre el tiempo observado y el calculado será menor a cero.



**Figura 5.7.** Mapa de correcciones de estación, los tonos azules son utilizados para correcciones negativas mientras que los rojos son utilizados para correcciones positivas. El polígono negro es el área de estudio.

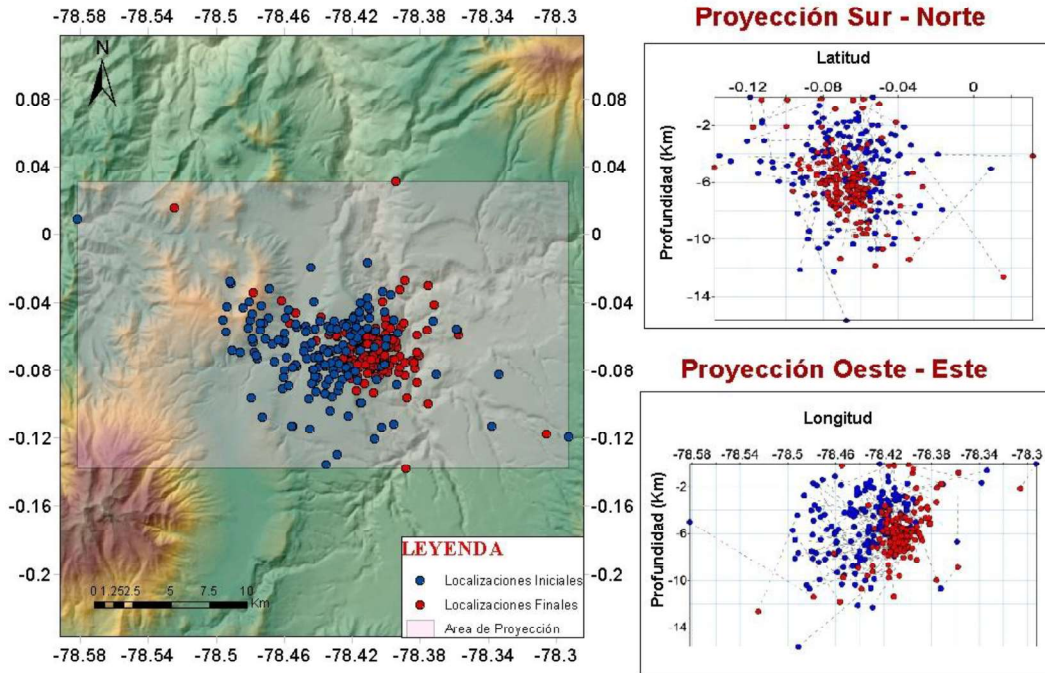
La resolución de este modelo se analiza en función del número de rayos sísmicos que muestrean las diferentes capas (Figura 5.8: NHIT2), notándose que éstos atraviesan el modelo hasta una profundidad de 46 km donde se observan rayos refractados *headwaves* (NREF2).



**Figura 5.8.** Estadísticas de acuerdo con los resultados de VELEST, incluyendo estaciones lejanas. NHYP es el número de hipocentros, NREF es el número de *headwaves*, %len2 es el porcentaje de km refractado con respecto a todos los km refractados, NHIT es el número de rayos que atravesaron cada capa.

Como ya se indicó anteriormente, la búsqueda del modelo de velocidades con la metodología utilizada por VELEST, proporciona también localizaciones de los eventos sísmicos. A continuación, se presenta en la Figura 5.9 una comparación de las localizaciones iniciales (RENSIG-SeisComp3) con las localizaciones de VELEST

## MAPA COMPARATIVO ENTRE LOCALIZACIONES OBTENIDAS CON SC3 Y LAS RELOCALIZACIONES CON VELEST, PARA EL 2014



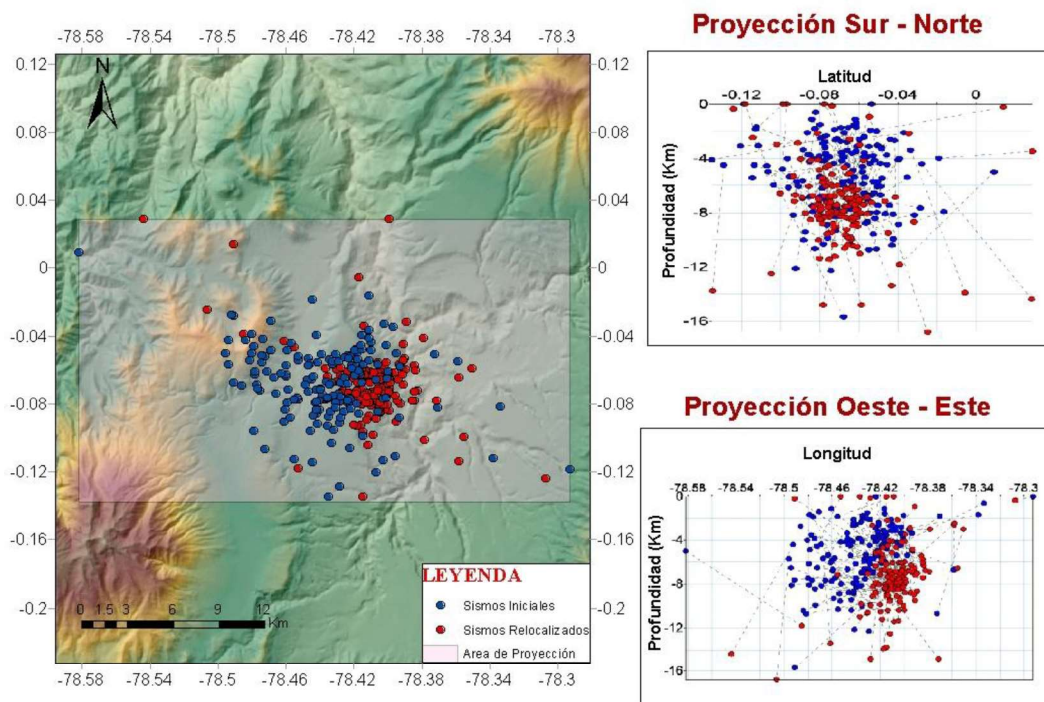
**Figura 5.9.** Mapa con las relocalizaciones obtenidas en VELEST comparadas con las localizaciones iniciales (eventos de la crisis de agosto 2014). En azul las localizaciones iniciales (RENSIG – SC3), en rojo las localizaciones finales de VELEST. Al lado derecho se encuentran las proyecciones latitud vs profundidad y longitud vs profundidad, las líneas entrecortadas muestran la variación de localizaciones inicial.

En el mapa de la Figura 5.9 se observa como las localizaciones de VELEST (puntos rojos) se agrupan hacia el oriente de la zona con profundidades entre 3 y 12. km.

### 5.3. Relocalizaciones mediante HYPOELLIPSE

A partir de este modelo de velocidades y las correcciones a las estaciones, se realizó una relocalización con HYPOELLIPSE (Figura 5.10).

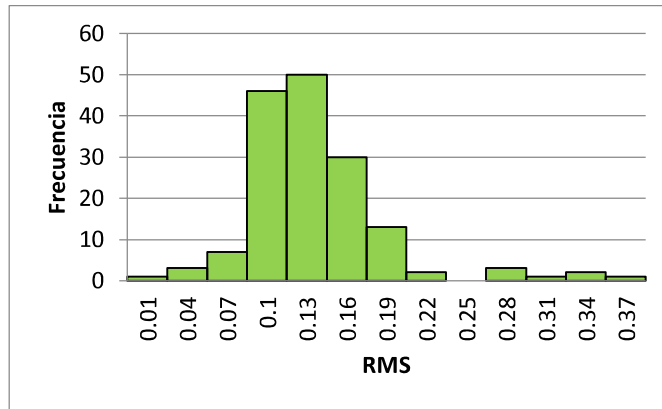
**MAPA COMPARATIVO ENTRE LOCALIZACIONES OBTENIDAS CON SC3 Y  
RELOCALIZACIONES CON HYPOELLIPSE, PARA EL 2014**



**Figura 5.10.** Mapa de relocalizaciones obtenidas con HYPOELLIPSE (eventos de la crisis de agosto de 2014). Los puntos azules: localizaciones iniciales; puntos rojos: localizaciones finales. Al lado derecho se encuentran las proyecciones latitud vs profundidad y longitud vs profundidad, las líneas entrecortadas muestran la variación de localizaciones inicial y la final. El polígono representa el área de la proyección.

Las localizaciones finales en la Figura 5.10 (puntos rojos) se agrupan hacia el Este en el mapa, observándose una tendencia similar con respecto a las localizaciones finales obtenidas con VELEST (Figura 5.9). De manera similar en las proyecciones se observa que con respecto a la longitud los sismos relocalizados se agrupan hacia el Este, mientras que en la proyección en latitud se nota una concentración de las localizaciones finales. Estos eventos se localizan a profundidades entre 0 y 16.79 km.

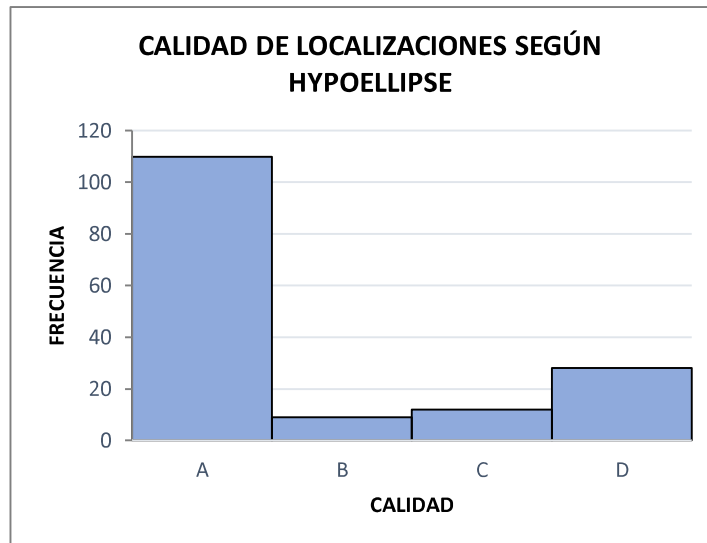
La distribución de los residuos RMS de estas localizaciones se ven en la Figura 5.11.



**Figura 5.11.** Histograma correspondiente al RMS de la crisis del 2014, determinado por HYPOELLIPSE. En el eje horizontal están los RMS y en el eje vertical el número de eventos para cada rango de RMS.

En el histograma se observa que la mayor cantidad de eventos tienen un RMS menor a 0.2, por tanto, las localizaciones son de buena calidad.

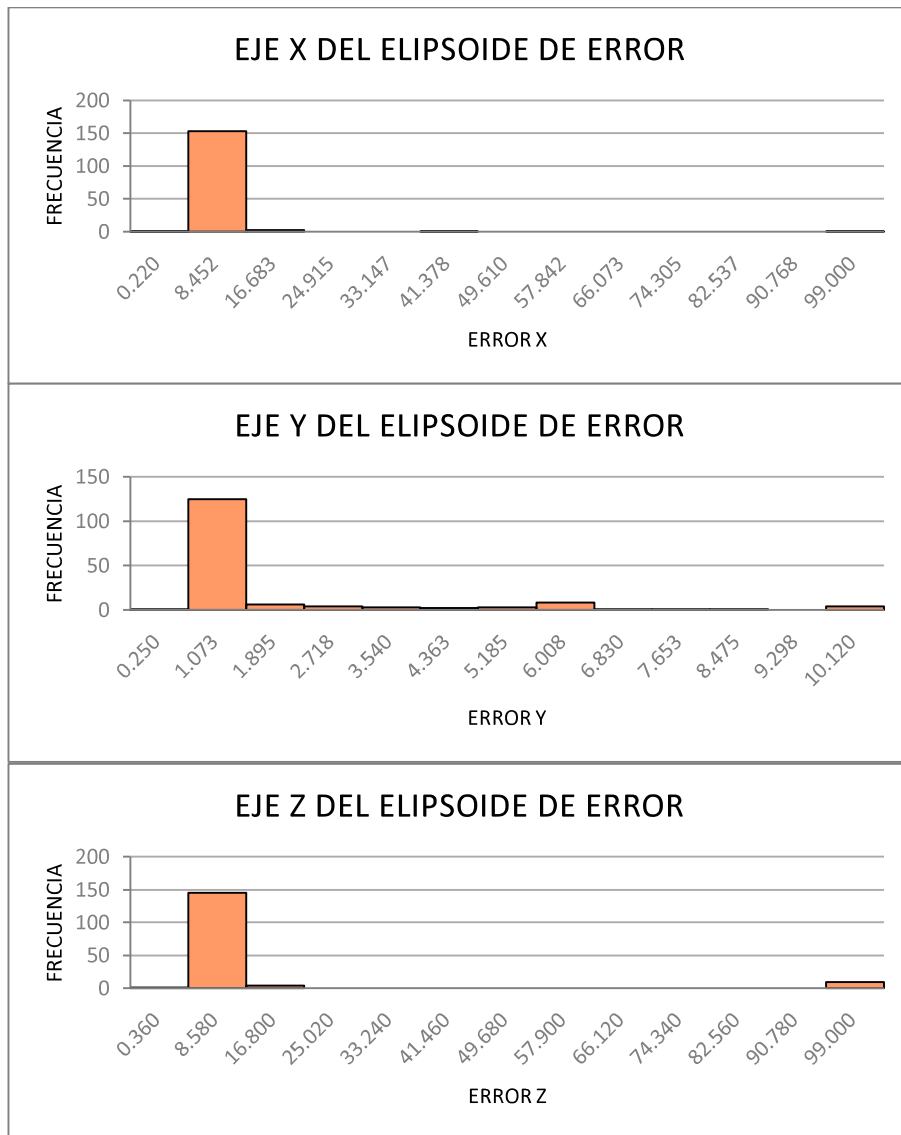
Por otra parte, se analiza también la calidad de la solución y los 3 ejes del elipsoide de error en las Figuras 5.12 y 5.13



**Figura 5.12.** Histograma de calidad de localizaciones dadas por HYPOELLIPSE para la crisis del 2014. En el eje horizontal se encuentra la calidad de las localizaciones y en el eje vertical el número de eventos para cada rango de calidad

HYPOELLIPSE clasifica la calidad de las localizaciones en 4 tipos A, B, C y D. De acuerdo a esta clasificación se tiene que 110 de los 159 sismos en 2014 son de clase A (ver Figura 5.12), por tanto, se corrobora la buena calidad de las localizaciones finales.

Los ejes del elipsoide de error se presentan en los 3 histogramas:



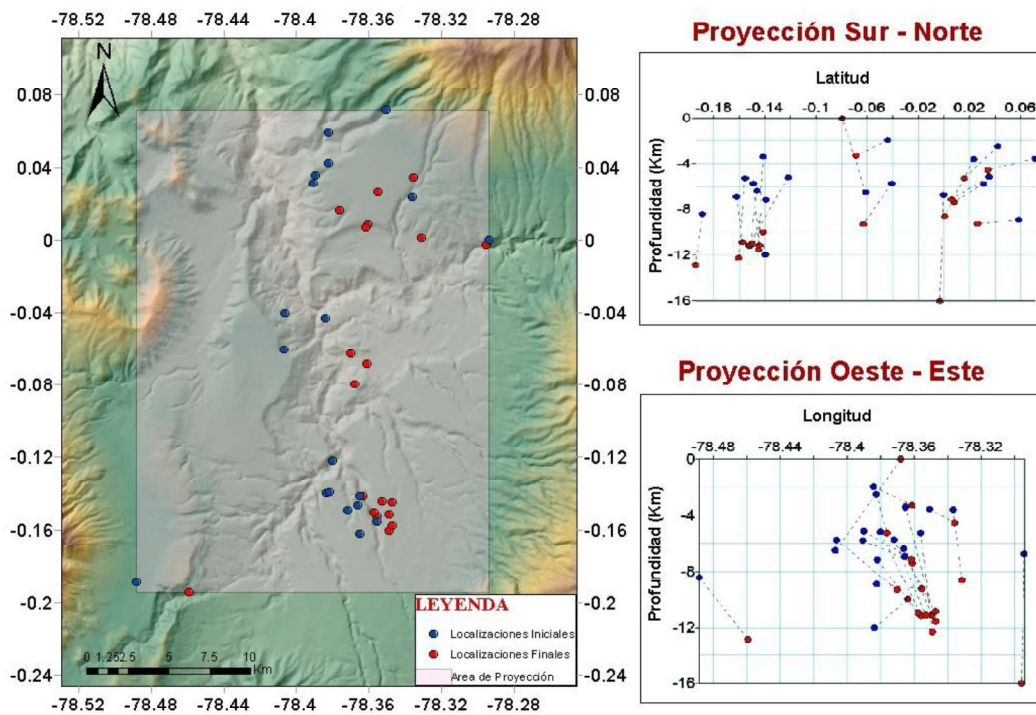
**Figura 5.13.** Histogramas de los 3 ejes del elipsoide de error determinado por HYPOELLIPSE para los eventos del 2014. En el eje horizontal se encuentra el error en km y en el eje vertical está el número de eventos para cada rango de error

Los histogramas de la Figura 5.13 muestran que los errores son mayores en la vertical y en el eje X (longitud) que en el eje Y (latitud).

Con el fin de caracterizar mejor la actividad de la falla (capítulo siguiente), se procedió a localizar con el mismo programa, modelo de velocidades y correcciones a las estaciones, otros eventos significativos que ocurrieron entre los años 2011 y 2018 (ver Anexo 2) (Figura 5.14).



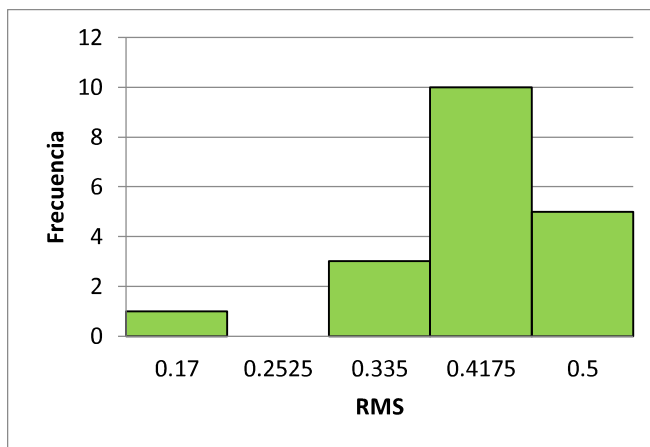
**MAPA COMPARATIVO DE LAS LOCALIZACIONES OBTENIDAS CON SC3 Y LAS RELOCALIZACIONES CON HYPOELLIPSE, PARA OTROS EVENTOS SIGNIFICATIVOS**



**Figura 5.14.** Mapa de relocalizaciones obtenidas en HYPOELLIPSE para los 19 sismos ocurridos entre 2011-2018. Puntos azules: las localizaciones iniciales (RENSIG – SC3); puntos rojos: localizaciones finales. Los gráficos de la derecha son las proyecciones latitud vs la profundidad y longitud vs profundidad, las líneas entrecortadas muestran la variación de localizaciones inicial. El polígono representa el área de la proyección.

La Figura 5.14 muestra que los sismos se localizan a profundidades entre 0 y 16.02 km aproximadamente y en la proyección Oeste- Este se agrupan hacia el Este. Tanto el mapa como las proyecciones muestran una tendencia a concentración de los hipocentros.

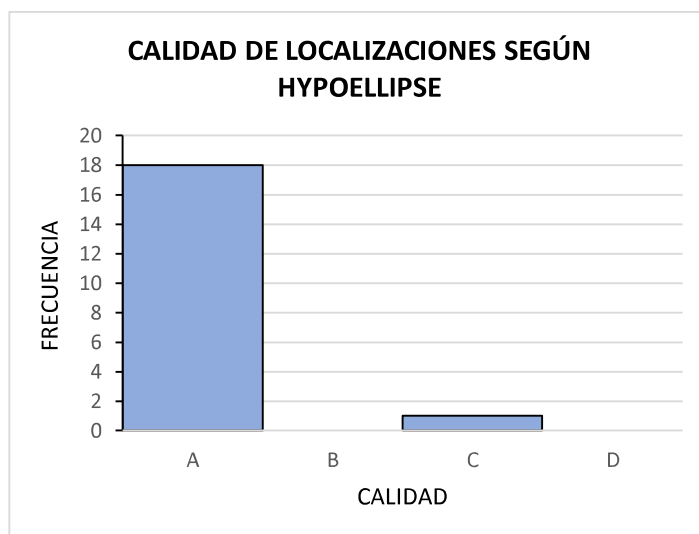
La distribución de los residuos RMS de estas relocalizaciones se presenta en el histograma a continuación (Figura 5.15):



**Figura 5.15.** Histograma correspondiente al RMS determinado por HYPOELLIPSE para los otros eventos ocurridos entre 2011 y 2018. En el eje horizontal están los RMS y en el eje vertical el número de eventos para cada rango de RMS.

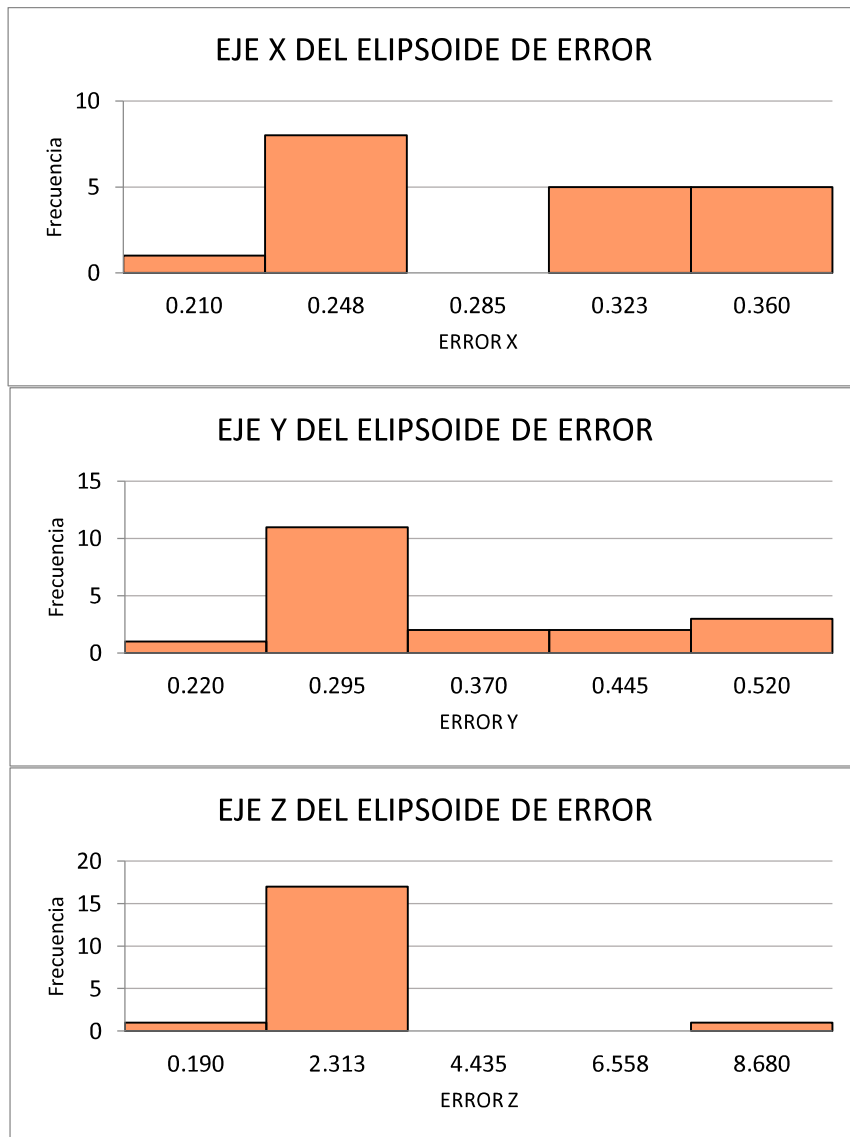
Los eventos registrados entre los años 2011 y 2018 muestran un RMS menor a 0.5. Aún cuando el valor es mayor al RMS de la crisis del 2014, los valores son relativamente bajos, indicando localizaciones confiables.

Asimismo, se analiza la calidad de la solución y los 3 ejes del elipsoide de error en las Figuras 5.16 y 5.17:



**Figura 5.16.** Histograma de calidad de localizaciones dadas por HYPOELLIPSE para los otros eventos. En el eje horizontal se encuentra la calidad de las localizaciones y en el eje vertical el número de eventos para cada rango de calidad

De acuerdo a la calidad de las localizaciones (Figura 5.16), 18 de los 19 eventos registrados en otros años, muestran una calidad A, confirmando la buena calidad de las localizaciones.



**Figura 5.17.** Histogramas de los 3 ejes del elipsoide de error determinados por HYPOELLIPSE para los otros eventos. En el eje horizontal se encuentra el error y en el eje vertical está el número de eventos para cada rango de error

Los valores en los 3 ejes del elipsoide de error muestran que la mayor cantidad de eventos en otros años tienen errores menores a 2.3 km.

En general las relocalizaciones (Figura 5.9, 5.10 y 5.14) muestran epicentros que se agrupan hacia el Este.

## 6. CARACTERIZACIÓN DE LA FUENTE DE LOS EVENTOS TECTÓNICOS LOCALES

Un evento sísmico se origina debido a una ruptura a través de una discontinuidad o falla, y su mecanismo es caracterizado a través de parámetros como el azimut y buzamiento del plano de falla y la dirección del movimiento. Si la fractura aflora en superficie se puede realizar medidas en ella, pero si no, se recurre a la observación de los registros sísmicos para obtener información sobre sus características.

Para grandes eventos, las propiedades de la fuente sísmica se pueden determinar a partir de la inversión de las formas de onda. Sin embargo, la mayoría de los sismos son de pequeña magnitud, por lo que no se puede usar esta técnica. Por esta razón, se utilizan otros métodos que permiten determinar los mecanismos de ruptura (mecanismos focales). Uno de estos métodos es el denominado de “primeros arribos” de las ondas P (Hardebeck y Shearer, 2002).

Para determinar la orientación del plano de falla y el movimiento durante un sismo, se considera el patrón de radiación de las ondas P y S durante el fallamiento de una fuente puntual. Para esto se usa el signo o polaridad del primer arribo de ambas ondas. En el presente estudio, se utilizarán solamente las observaciones de las ondas P.

### 6.1. Conceptos

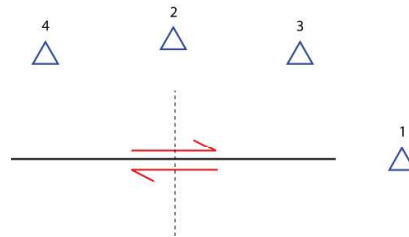
#### Mecanismos focales

Los mecanismos focales se construyen en base al ángulo entre la fuente y la estación (azimut), el ángulo de incidencia y la polaridad del arribo de la primera onda P a cada estación. Un mecanismo focal es una representación (proyección horizontal) de cómo los rayos sísmicos que se generan en la fuente llegan (como compresión o dilatación) a cada sitio de observación (estación).

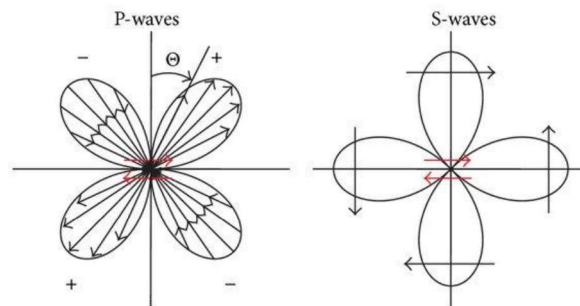
El gráfico resultante se asemeja a una pelota de playa (de ahí su nombre en inglés: *beach ball*) que muestra zonas en compresión y otras zonas en extensión separadas por dos planos que son perpendiculares entre sí.

Si se analiza el movimiento a lo largo de una falla vertical con un movimiento dextral (para el caso más fácil de representar), ver Figura 6.1a, en las estaciones 1 y 2, en la dirección en la que ocurre el movimiento y a  $90^\circ$  con respecto a la falla respectivamente, no se registrarán ondas P, mientras en las estaciones 3 y 4, a  $45^\circ$  se observará la onda P con su máxima amplitud, pero con signos opuestos. En cambio, para el caso de las ondas S, debido a que su movimiento es perpendicular a la dirección de propagación de las ondas P, en las estaciones 1 y 2, las ondas S serán muy claras y tendrán la máxima amplitud, mientras que en la estación 3 y 4, no se observarán ondas S. En la Figura 6.1b se representa el patrón de radiación (amplitudes y signos) de las ondas P y S para la misma falla transcurrente dextral.

a)



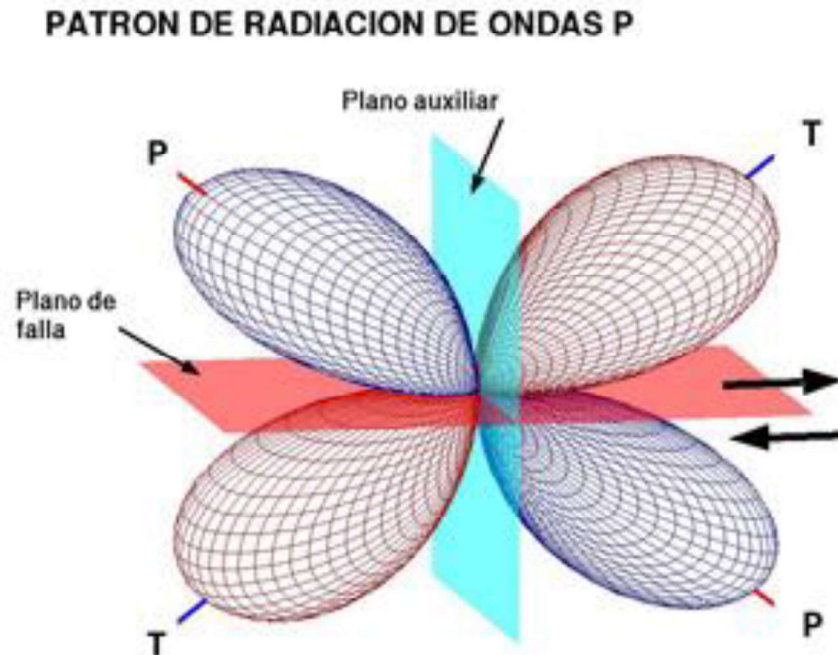
b)



**Figura 6.1.** a) representación del movimiento en una falla transcurrente dextral. b) patrones de radiación de las ondas P y S para una falla transcurrente dextral. Tomado de Gosar (2014).

En la Figura 6.2 se representa el patrón de radiación de las ondas P. La proyección de este patrón tridimensional en un plano ecuatorial, es lo que constituye el mecanismo focal: una esfera de radio uno y con el centro en la fuente donde se genera el sismo dividida en cuatro cuadrantes que están alternados con movimientos compresionales o anasísmicos (movimientos que salen de la fuente) y distensionales o katasísmicos (que van hacia la fuente). Siendo así, el cambio de sentido del primer movimiento de la fase P (polaridad) va a presentarse cuando las amplitudes de las ondas tiendan a cero y los

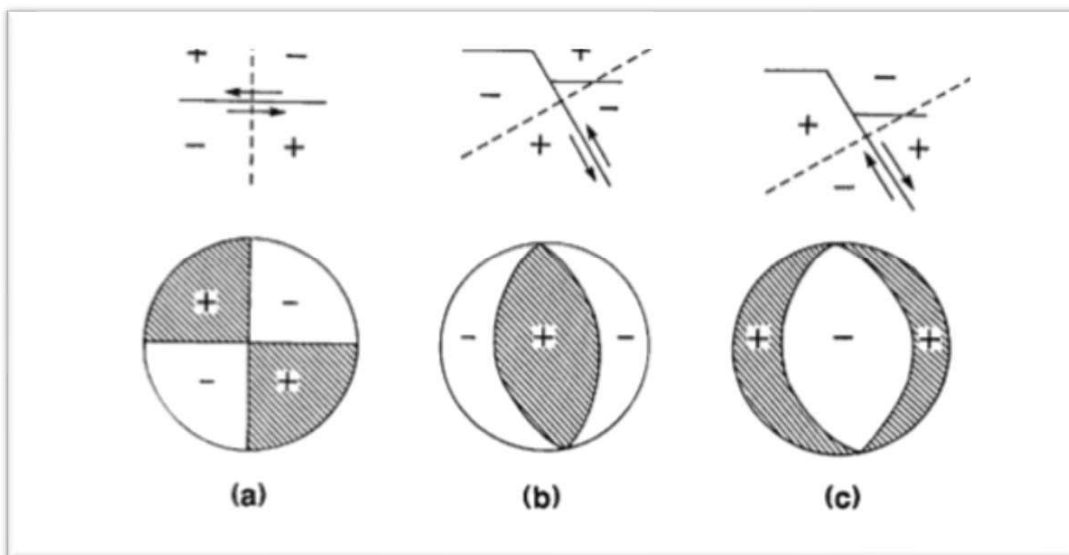
arribos más impulsivos se ubicarán en la mitad de cada cuadrante. (Hardebeck y Shearer, 2002; Calahorrano, 2001).



**Figura 6.2.** Patrón de radiación de fases P: en rojo los cuadrantes en compresión, en azul los cuadrantes en dilatación. Se observa el plano principal en rojo y el plano auxiliar en celeste. Los ejes de tensión T que atraviesa 2 cuadrantes de dilatación y el eje de compresión P que pasa por los 2 cuadrantes compresivos. Tomado del glosario de sismología del Centro Sismológico Nacional de la Universidad de Chile.

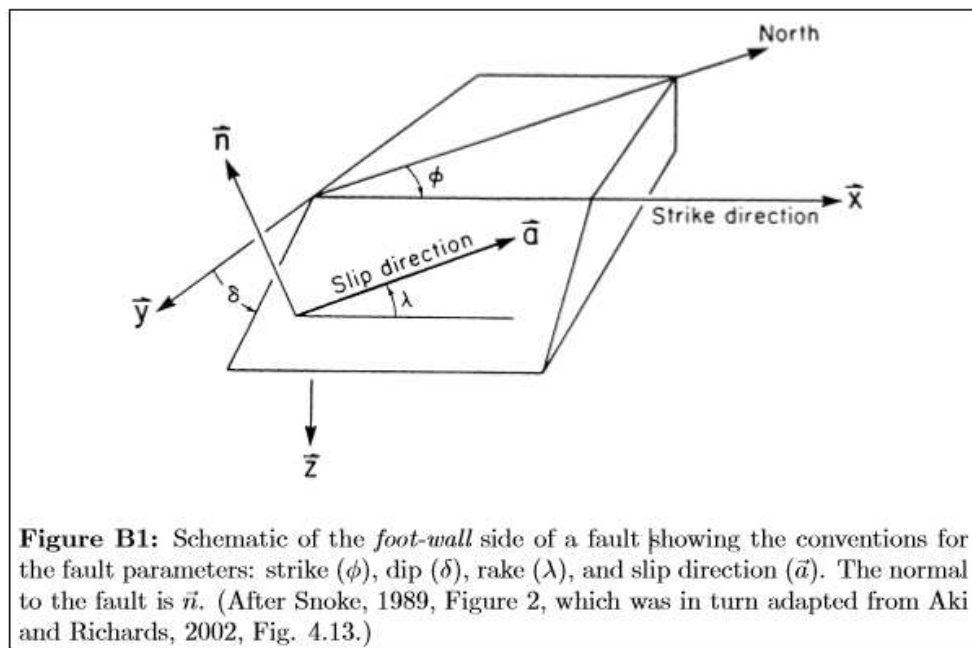
Para construir el mecanismo focal, se deben dibujar los rayos sísmicos en la proyección de la esfera focal. Los rayos sísmicos están caracterizados por el ázmut y el ángulo de incidencia (*takeoff angle*). El ángulo de incidencia se mide desde la vertical hacia arriba y es un parámetro que resulta de la localización del evento sísmico y por lo tanto, depende del modelo de velocidades 1D utilizado. Los *takeoff angles* que están entre  $0^\circ$  y  $90^\circ$  representan a los rayos que viajan desde la fuente hacia abajo, mientras que los ángulos mayores a  $90^\circ$  van desde la fuente hacia arriba (Hardebeck y Shearer, 2002).

Una vez, proyectados los rayos sísmicos, se procede a separar zonas con movimientos en compresión de las zonas con movimientos en dilatación con un plano y luego se busca un segundo plano (plano auxiliar) que sea perpendicular al primero y que separe de igual forma zonas con diferente tipo de movimiento, generando diversos patrones que definirán el tipo de fallamiento (Figura 6.3). Estos patrones son conocidos como mecanismos focales (Calahorrano, 2001).



**Figura 6.3.** Ejemplos de fallas con su respectivo mecanismo focal. Sobre cada mecanismo existe un boceto de la geometría de la falla. (a) Falla de rumbo, (b) falla inversa y (c) falla normal. Los cuadrantes compresionales están sombreados y el signo de la dirección del primer movimiento se incluye en cada cuadrante. La línea discontinua representa el plano auxiliar. Modificado de Snoko (2009).

Los planos están representados por 3 ángulos: el *dip* o ángulo de inclinación de la falla, el *strike* o rumbo y el *rake* o ángulo de deslizamiento (Figura 6.4) (Snoko, 2009).



**Figure B1:** Schematic of the *foot-wall* side of a fault showing the conventions for the fault parameters: strike ( $\phi$ ), dip ( $\delta$ ), rake ( $\lambda$ ), and slip direction ( $\vec{a}$ ). The normal to the fault is  $\vec{n}$ . (After Snoko, 1989, Figure 2, which was in turn adapted from Aki and Richards, 2002, Fig. 4.13.)

**Figura 6.4.** Esquema del plano de falla con los ángulos *strike* ( $\phi$ ), *dip* ( $\delta$ ) y *rake* ( $\lambda$ ). Tomado de Snoko (2009).

*Strike* ( $\phi$ ): es el ázimut de la falla (Snoke, 2009).

*Dip* ( $\delta$ ): este ángulo se mide desde la horizontal hacia abajo y sus valores están entre  $0^\circ$  y  $90^\circ$ ) (Snoke, 2009).

*Rake* ( $\lambda$ ): es el ángulo de deslizamiento, se mide sobre el plano de falla y se encuentra limitado entre  $-180^\circ$  y  $180^\circ$ , de esta manera si el valor es de  $90^\circ$  será una falla inversa, si es  $-90^\circ$  será una falla normal, si  $\lambda=180^\circ$  será una falla transcurrente dextral y sinistral si  $\lambda=0^\circ$  (Cronin, 2010; Snoke, 2009). A continuación, se presenta en la tabla 6.1 una clasificación del tipo de falla de acuerdo al *rake*:

Tabla 6.1. Tipos de falla en base al valor del *rake*, modificado de Cronin (2010)

<b>Rake</b>	<b>Tipo de falla</b>
$0^\circ$ y $180^\circ$	Falla transcurrente pura
$90^\circ$	Falla inversa pura
$-90^\circ$	Falla normal pura
$-20^\circ$ a $20^\circ$	Falla transcurrente sinistral
$20^\circ$ a $70^\circ$	Falla inversa con componente sinistral
$70^\circ$ a $110^\circ$	Falla inversa
$110^\circ$ a $160^\circ$	Falla inversa con componente dextral
$-160^\circ$ a $160^\circ$	Falla transcurrente dextral
$-110^\circ$ a $-160^\circ$	Falla normal con componente dextral
$-70^\circ$ a $-110^\circ$	Falla normal
$-20$ a $-70^\circ$	Falla normal con componente sinistral

### **Tipos de arribos**

El primer movimiento de la onda P (arribo) puede ser catalogado de dos formas: EMERGENTE. – Cuando la amplitud del arribo es muy pequeña en comparación al ruido de fondo y por tal razón la polaridad es un poco ambigua.

IMPULSIVO. – La amplitud del arribo es muy grande con respecto al ruido de fondo y la polaridad se determina fácilmente. En este caso, a la lectura se la califica como de mayor calidad, es decir, se le da un peso alto.

Los arribos menos impulsivos (baja amplitud) son de gran ayuda al momento de determinar la ubicación de los planos principal y auxiliar, debido a que estos arribos se



localizan cerca a los planos nodales (plano de falla y plano auxiliar) (Hardebeck y Shearer, 2002).

## **6.2. Metodología aplicada**

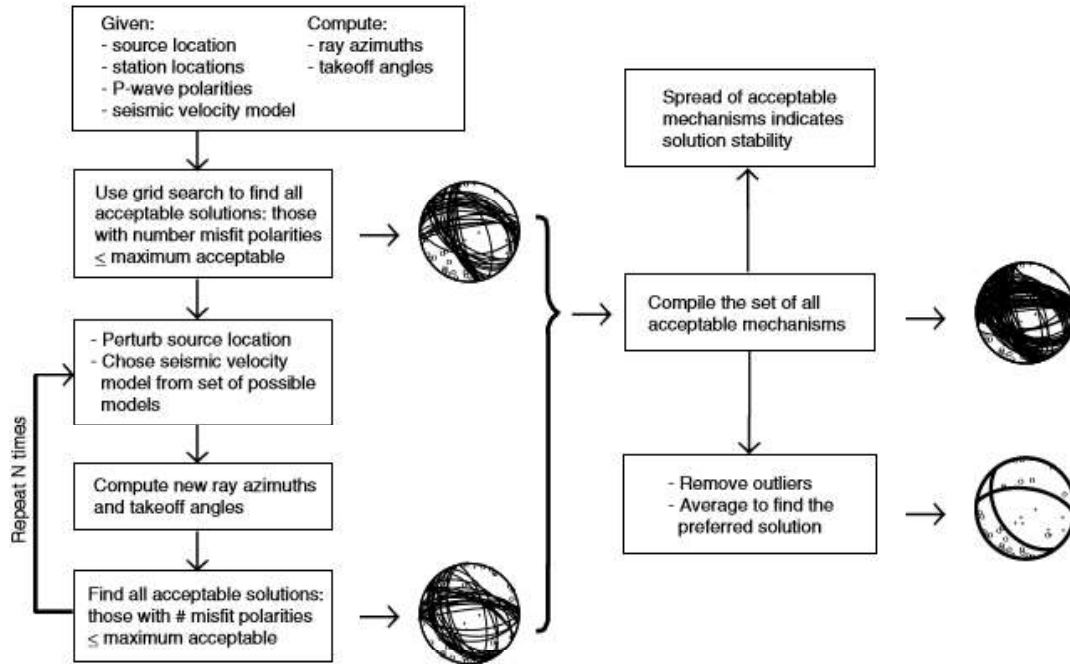
Los cambios en la ubicación del evento como el modelo de velocidades son muy sensibles al momento de elaborar mecanismos focales, esto ocurre porque al modificar estos parámetros, el ázimit y el ángulo de los rayos desde la fuente hasta la superficie pueden cambiar afectando, por lo tanto, el mecanismo focal (Hardebeck y Shearer, 2002).

Se debe tener en cuenta que un cambio de modelo de velocidades 1D, puede afectar al *takeoff angle* (ángulo de incidencia) calculado, mientras que el azimut puede variar en forma mínima (si cambia la localización) (Hardebeck y Shearer, 2002).

Para el cálculo de mecanismos focales en este trabajo, se utiliza el software HASH, el modelo de velocidad (optimizado) y los resultados de la relocalización (Capítulo V).

### **6.2.1. Software HASH**

El método HASH (Hardebeck y Shearer, 2008) se ha desarrollado para determinar los mecanismos focales más estables al momento de trabajar con sismos pequeños. Este método utiliza los archivos de estaciones, las localizaciones, las polaridades y un modelo de velocidades para calcular los ángulos de incidencia y el azimut a las estaciones para cada evento. A partir de estos datos, HASH realiza una búsqueda en una malla para generar un conjunto de mecanismos aceptables que tengan un mínimo de errores en las polaridades. Luego perturba las localizaciones (cambia) y usando otros modelos de velocidades proporcionados, determina una nueva familia de posibles mecanismos. Entre estos dos grupos de mecanismos generados, compila un set de mecanismos aceptables: removiendo las soluciones muy diferentes (*outliers*), promedia las soluciones y encuentra la solución preferible. La dispersión de mecanismos aceptables (posibles) indica a su vez, la estabilidad de la solución (Figura 6.5). (Hardebeck y Shearer, 2008).



**Figura 6.5.** Diagrama de flujo para determinar los mecanismos focales mediante el método HASH. Tomado de Hardebeck y Shearer, 2002

El conjunto de mecanismos aceptables toma en cuenta la incertidumbre en las mediciones de polaridad, de la ubicación y de los *takeoff angles* que dependen del modelo de velocidades, por lo tanto, se necesitará una estimación en la tasa de errores de polaridad, una estimación en la incertidumbre de la ubicación y una estimación en la incertidumbre del *takeoff angle* (Hardebeck y Shearer, 2008). En este caso, solo se consideró un solo modelo de velocidades (el obtenido en el presente estudio)

De esta manera se trabajará entonces con los parámetros descritos a continuación en la Figura 6.6.

```

1 uio.stations
2 uio2.reverse
3 73.hash
4 73_hash.out
5 73_hashb.out
6 8      #(npolmin) Enter mininum number of polarities (e.g., 8)
7 150    #(max_agap) Enter maximum azimuthal gap (e.g., 90)
8 60     #(max_pgap) Enter maximum takeoff angle gap (e.g., 60)
9 5      #(dang) Enter grid angle for focal mech search, in degrees 5(min {0})
10 30    #(nmc) Enter number of trials (e.g., 30)
11 500   #(maxout) Enter maxout for focal mech. output (e.g., 500)
12 0.10  #(badfrac) Enter fraction of picks presumed bad (e.g., 0.10)
13 200   #(delmax) Enter maximum allowed source-station distance, in km
        (e.g., 480)
14 45    #(cangle) Enter angle for computing mechanisms probability, in
        degrees (e.g., 45)
15 0.15  #(prob max) Enter probability threshold for multiples (e.g., 0.1)
16 1     #(vz) Enter maximum of velocity models (e.g., 10)
17 vz.uio

```

Figura 6.6. Parámetros de entrada para el programa.

Los parámetros de control del software HASH son (ver Figura 6.5):

1	Archivo de estaciones 1
2	Archivo de estaciones 2
3	Archivo de entrada
4	Archivo de salida 1
5	Archivo de salida 2
6	Número mínimo de polaridades para realizar el proceso
7	Máximo gap o ángulo entre estaciones para realizar el proceso
8	Máximo gap entre los ángulos de incidencia para realizar el proceso
9	Ángulo de la malla de búsqueda
10	Número de intentos para la búsqueda
11	Máximo número de mecanismos de salida (resultado)
12	Número máximo de polaridades erróneas permitidas (fracción)
13	Máxima distancia entre fuente y estación permitida
14	Ángulo para determinar la probabilidad del mecanismo
15	Umbral mínimo para determinar múltiples mecanismos
16	Número de modelos de velocidad a utilizar
17	Nombres de los modelos (archivos) de velocidad

### **6.2.2. Selección de eventos sísmicos**

Para esta parte de la investigación, se seleccionaron los eventos con magnitudes superiores a 3 o con un mínimo de 10 arribos catalogados como impulsivos (polaridad muy clara). Tomando en cuenta esta consideración, se realizó la búsqueda del mecanismo focal para 34 eventos. A este grupo se decidió añadir 19 eventos significativos ocurridos en otros años, en el sistema de fallas de Quito (aunque en otros segmentos) para lo cual, primero fueron relocalizados con el HYPOELLIPSE y el modelo de velocidades encontrado.

Con el programa HASH (Hardebeck y Shearer, 2008) se obtuvo un total de 34 mecanismos focales preliminares para el 2014 y 16 para el otro grupo mencionado.

Finalmente se realizó una nueva selección de los eventos con mecanismos focales de buena calidad y con planos mejor constreñidos, obteniendo 19 eventos para el 2014 y 9 para los otros años, que se muestran en las tablas 6.3 y 6.4.

### **6.2.3. Comparación de mecanismos focales resultado de dos métodos**

Se consideró interesante comparar los resultados proporcionados por HASH con los resultados de la localización con HYPOELLIPSE. Como ya se explicó anteriormente, el primero determina los ángulos de incidencia y el ázimut de los rayos sísmicos en función de la localización y el modelo de velocidad proporcionados y encuentra el mecanismo focal preferido. El segundo, deriva los ázimuts y los ángulos de incidencia durante el proceso de localización, pero no determina un mecanismo focal. Entonces, lo que se va a comparar es la proyección de los arribos a las estaciones que hacen ambos programas.

En las tablas 6.3 y 6.4 se presentan los mecanismos obtenidos con HASH.

Los mecanismos focales obtenidos mediante HASH muestran resultados de diferente calidad en función del número de polaridades que no calzan y de la dispersión de la familia de planos aceptables de acuerdo a los siguientes rangos (ver tabla 6.2)

**Tabla 6.2.** Resumen de la calidad de mecanismos focales obtenidos por Hash. Tomado de Hardebeck y Shearer (2008)

Calidad	RMS
A	0.0 - 0.15
B	0.15 - 0.30
C	0.30 - 0.50

Las localizaciones y los mecanismos de la crisis de 2014, caracterizan la parte superficial del segmento norte del SFQ, como un plano de dirección  $186.16^\circ \pm 52.6^\circ$  buzando al Oeste  $43.16^\circ \pm 12^\circ$ . Durante esta crisis, la falla funcionó con un movimiento principalmente inverso de acuerdo a tabla 6.1 (*rake*  $102.47^\circ \pm 23.8^\circ$ ). Trece eventos de los 19 registrados en agosto (1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 12, 14, 16, 17, 18 y 19 de acuerdo a la tabla 6.3), presentan mecanismos focales similares.

Los mecanismos focales 9, 10, 11, 13 y 15 (tabla 6.3) muestran valores que salen del patrón de la falla.

Otros eventos como el del 15 de marzo del 2016 (ver mecanismo 3 en la tabla 6.4) en el segmento Ilumbisí – La Bota, presenta un plano con dirección  $149^\circ$  buzando  $56^\circ$  al Oeste y un movimiento inverso con un *rake* de  $40^\circ$  y de acuerdo a la tabla 6.1 tiene componente sinistral.

En la zona de Puenbo los mecanismos focales de los eventos 5 y 7 (tabla 6.4) muestran un plano de falla con dirección  $200.5^\circ \pm 0.7^\circ$  y buzando  $35.5^\circ \pm 3.5^\circ$  y un desplazamiento inverso de acuerdo a la tabla 6.1 (*rake*:  $105.5^\circ \pm 7-8^\circ$ ). Los mecanismos 4 y 9 (tabla 6.4) muestra un movimiento inverso con componente transcurrente dextral de acuerdo al *rake* de  $154^\circ \pm 17^\circ$  (tabla 6.1), de rumbo  $218.5^\circ \pm 23.3^\circ$  buzando  $62^\circ \pm 1.4^\circ$  al Oeste.

El mecanismo focal del 4 de octubre del 2015 localizado en el segmento Bellavista – Catequilla (ver mecanismo 2 en tabla 6.4), presenta un movimiento inverso con componente transcurrente dextral de acuerdo al *rake* de  $138^\circ$  (tabla 6.1) con un rumbo de  $253^\circ$  y buzando  $74^\circ$  al NO.

Para los eventos 1 y 8 (ver tabla 6.4) localizados en la zona de Guayllabamba, el movimiento descrito por los mecanismos es principalmente inverso con componente dextral de acuerdo al *rake* de  $111.5^\circ \pm 37^\circ$  en la tabla 6.1 con rumbo  $201^\circ \pm 1.4^\circ$ , un buzamiento de  $66.5^\circ \pm 2.1^\circ$  hacia el Oeste.

El mecanismo focal 6 presenta otra forma diferente al patrón de la falla.

**Tabla 6.3.** Sismos seleccionados del 2014 para la obtención de los mecanismos focales utilizando el programa HASH, donde se observa la fecha, hora (GTM), magnitud, *strike*, *dip*, *rake*, probabilidad de que el mecanismo sea cercano a la solución y calidad del mecanismo.

Mecanismo focal	Fecha	Hora (GTM)	Magnitud (MLv)	Strike (°)	Dip (°)	Rake (°)	Probabilidad de que mecanismo sea cercano a la solución	Calidad
1	12-08-2014	19h57	5.1	173	23	90	68	B
2	12-08-2014	20h02	3.9	202	36	108	76	B
3	12-08-2014	21h49	3.7	178	32	89	85	B
4	12-08-2014	23h11	3.3	197	38	91	73	B
5	13-08-2014	00h16	3.0	188	36	103	69	B
6	13-08-2014	01h40	3.0	202	48	125	60	C
7	13-08-2014	03h23	3.6	181	42	92	65	B
8	14-08-2014	04h16	3.8	178	37	83	100	A
9	14-08-2014	10h10	2.7	98	52	76	67	B
10	16-08-2014	15h08	4.6	92	52	74	93	A
11	16-08-2014	17h27	3.8	85	53	74	55	C
12	16-08-2014	21h10	3.1	176	31	90	73	B
13	17-08-2014	10h24	2.5	260	52	132	53	C
14	17-08-2014	12h37	2.9	215	72	132	81	C
15	17-08-2014	15h50	3.4	303	60	158	69	B
16	17-08-2014	16h30	3.9	183	30	88	79	B
17	17-08-2014	21h00	3.0	213	47	126	59	C
18	21-08-2014	19h50	2.9	190	33	90	52	C
19	22-08-2014	21h02	3.2	223	46	126	63	B

**Tabla 6.4.** Sismos seleccionados de otros años para la obtención de los mecanismos focales utilizando el programa HASH, donde se observa la fecha, hora (GTM), magnitud, *strike*, *dip*, *rake*, probabilidad de que el mecanismo sea cercano a la solución y calidad del mecanismo.

Mecanismo focal	Fecha	Hora (GTM)	Magnitud (MLv)	Strike (°)	Dip (°)	Rake (°)	Probabilidad de que mecanismo sea cercano a la solución	Calidad
1	01-09-2013	03h32	3.3	202	65	138	81	B
2	04-10-2015	19h41	3.3	253	74	138	80	B
3	15-03-2016	13h02	4.1	149	56	40	56	C
4	09-08-2016	04h23	4.6	202	61	142	85	B
5	14-08-2016	15h31	4.1	201	33	111	72	B
6	15-06-2017	20h30	3.1	107	48	78	86	B
7	01-01-2018	14h24	3.7	200	38	100	82	C
8	21-01-2018	11h52	3.4	200	68	85	88	A
9	03-06-2018	01h51	3.5	235	63	166	60	C

Los gráficos de los mecanismos focales obtenidos mediante HASH se presentan en las Figuras 6.7 y 6.8 y en los Anexos 3 y 4 se comparan estos (todos los gráficos de literal a) con los resultados (azimut y ángulo de incidencia) determinados por HYPOELLIPSE durante el proceso de localización (todos los gráficos de literal b).

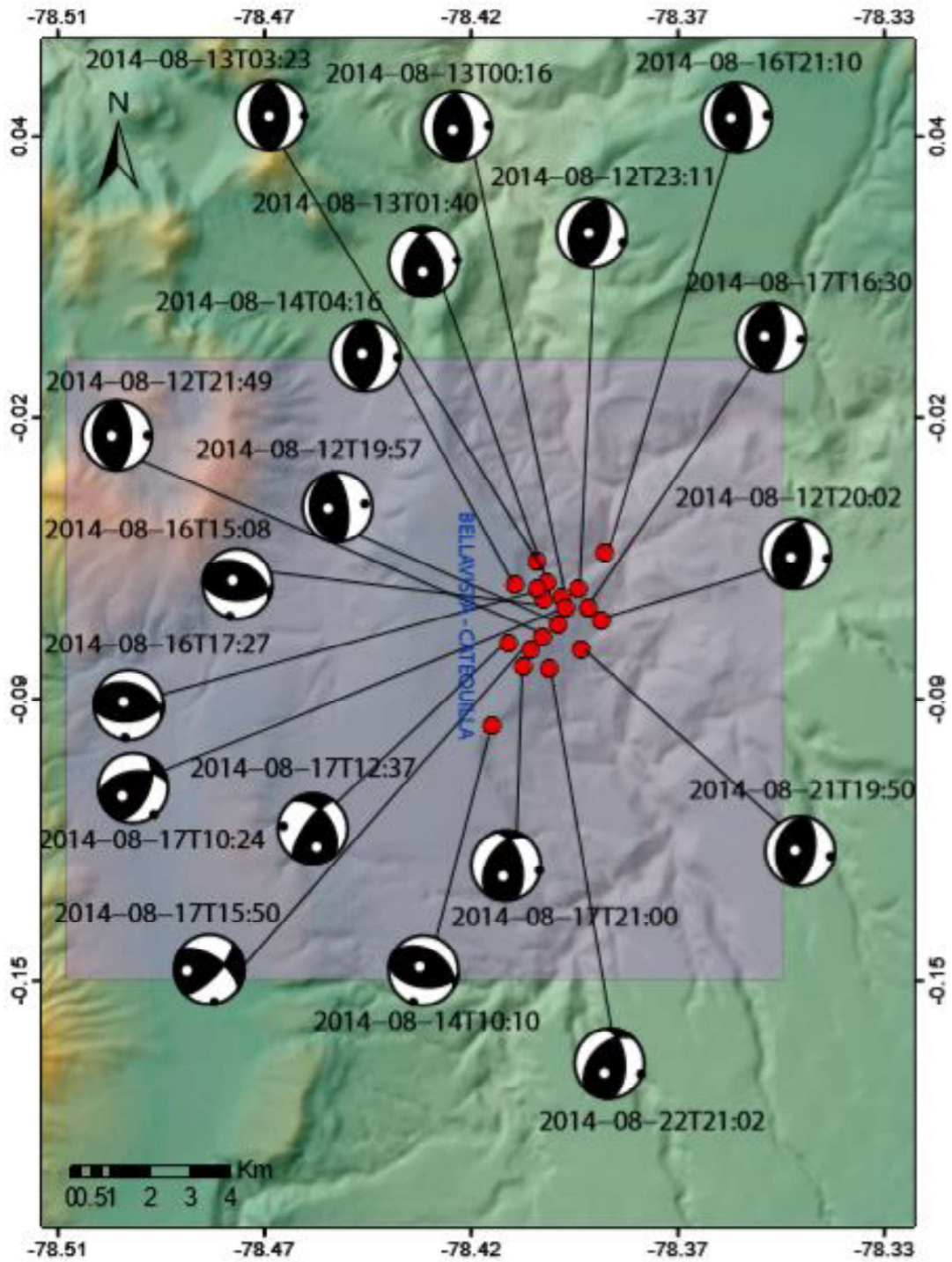


Figura 6.7. Mecanismos focales de los eventos ocurridos en la crisis del 2014.

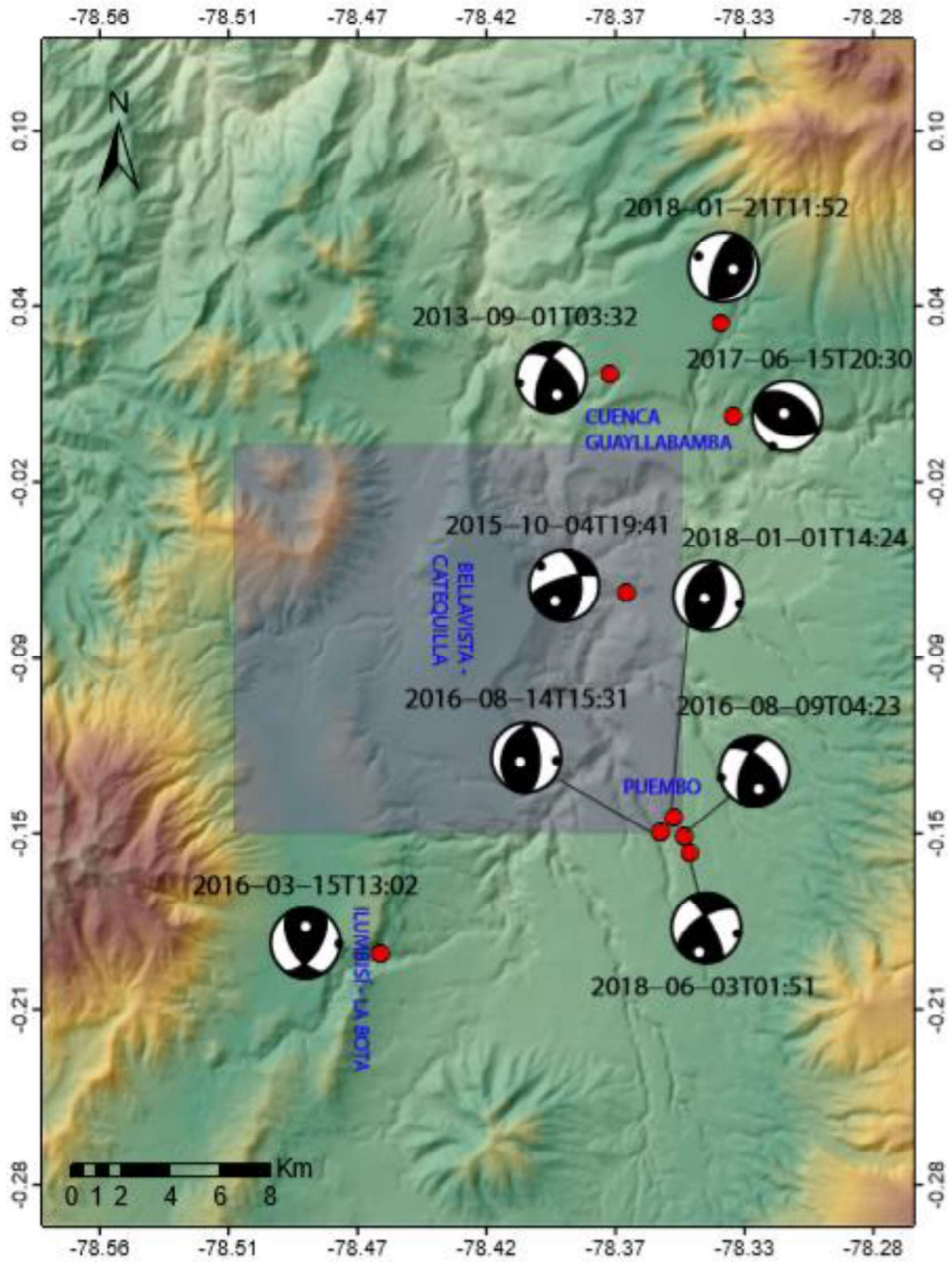


Figura 6.8. Mecanismos focales de los eventos significativos ocurridos en otros años.



#### 6.2.4. Discusión de los resultados de HASH e HYPOELLIPSE

De las figuras presentadas en los Anexos 3 y 4 se desprende que ambos programas determinan de manera diferente la dirección de los rayos sísmicos al salir de la fuente y cómo estos llegan a la superficie (estaciones sísmicas).

Pese a que ambos programas parten de la localización determinada previamente por HYPOELLIPSE, los ángulos de incidencia o *takeoff* son diferentes. Sin embargo, debido a que las variaciones no son considerables y debido a la simetría del patrón de radiación de la fuente, las proyecciones de las polaridades conducirían a obtener mecanismos bastante similares.

Por ejemplo, para los gráficos de los eventos del 12 de agosto del 2014 (Anexo 3) y 1 de enero del 2018 (Anexo 4) se observa que la proyección de los arribos (polaridades) de HYPOELLIPSE y HASH varían, pero manteniendo el patrón compresivo en el centro y extensivo hacia los lados. Asimismo, para el evento del 14 de agosto del 2014 se observa que la proyección de las polaridades de HASH (gráfico 8a de Anexo 3) y las de HYPOELLIPSE (gráfico 8b de Anexo 3) son muy similares.

Entonces, como conclusión, los mecanismos focales obtenidos son confiables y son representativos del movimiento en los segmentos del SFQ.

## 7. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

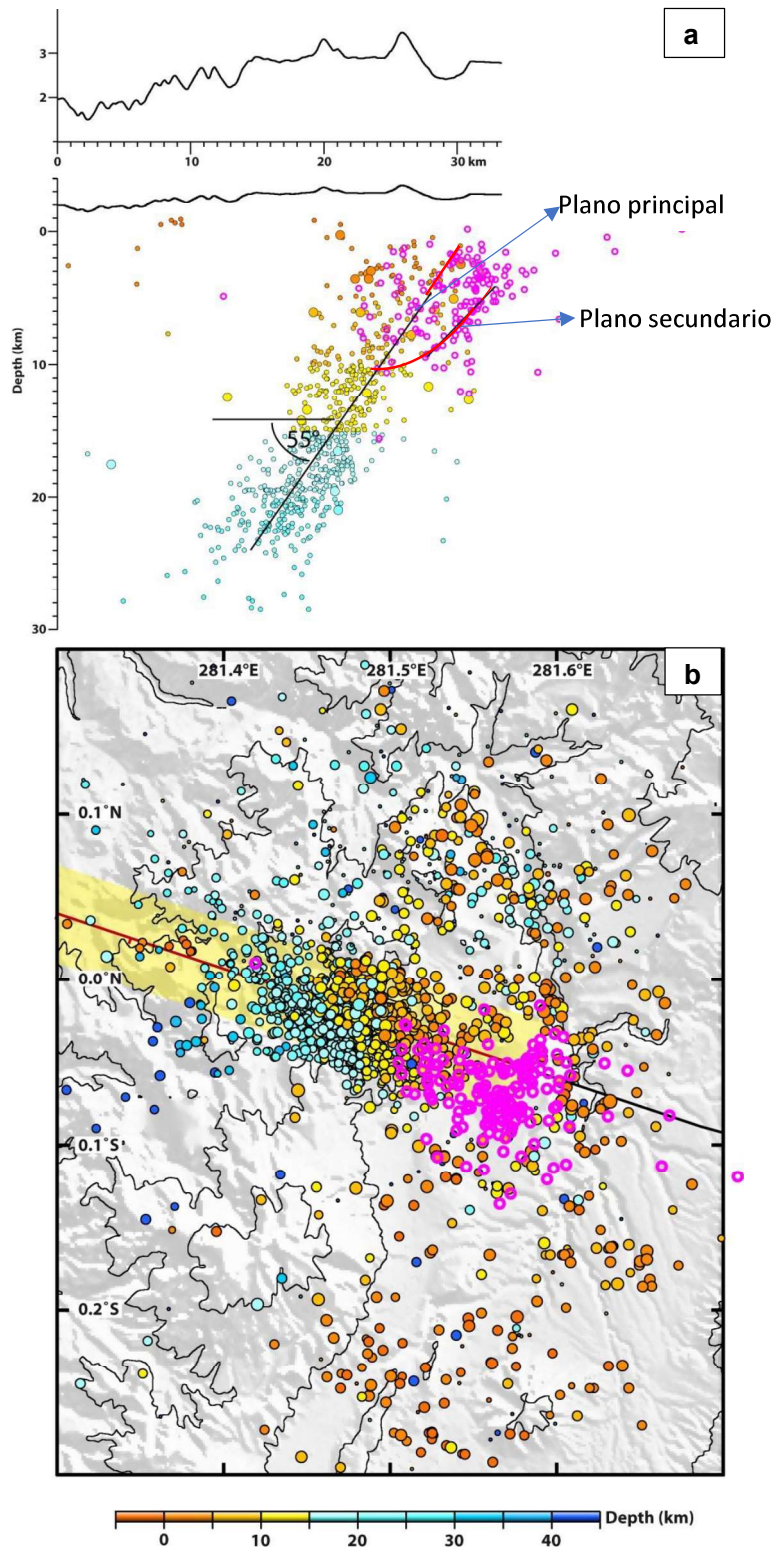
El sistema de fallas de Quito (SFQ) está formado por varios segmentos cuyos planos de falla no afloran en superficie. Evidencias morfológicas como colinas segmentadas, drenajes desviados y la clara diferencia de un desnivel entre 400 y 500 m de Quito con respecto a los valles orientales revelan su presencia y su segmentación. En profundidad, la sismicidad sugiere un plano buzando  $\sim 55^\circ$  hacia el Oeste entre 0 y 30 km de profundidad (Alvarado et al., 2014). Esta imagen de la falla se obtuvo principalmente con el análisis de los enjambres sísmicos ocurridos entre 1994 y 2009 y corresponde al segmento norte (Alvarado et al., 2014).

La crisis de 2014, también en el segmento norte, ocurrió más hacia el Este en su parte más superficial. Para definir la geometría más oriental del segmento y caracterizar el movimiento de la falla durante esta crisis se procedió a analizar con detalle los datos sísmicos de una red sísmica temporal instalada con el propósito de registrar las réplicas del evento principal ocurrido el 12 de agosto y que tuvo una magnitud de 5.1 MLv (Alvarado et al., 2014b)

Para caracterizar el segmento, se consideró dos aspectos: la localización precisa de los eventos y los mecanismos focales.

Para una localización de buena calidad se necesita un adecuado modelo de velocidades. La definición de un modelo más adecuado se lo realizó usando el método VELEST (Kissling et al., 1995). Para esto se partió con dos modelos: uno con velocidades bajas y otro con velocidades altas. Después de la inversión simultánea de localizaciones y de modelo de velocidades, se seleccionó el modelo que arrojó localizaciones con menor valor de RMS y que mostraron la menor dispersión de los hipocentros. Este modelo está caracterizado por velocidades entre 3.9 y 6.1 km/s los primeros 30 km (ver Figura 5.6); a mayor profundidad, el modelo no fue constreñido debido a la baja cobertura de rayos sísmicos durante la inversión.

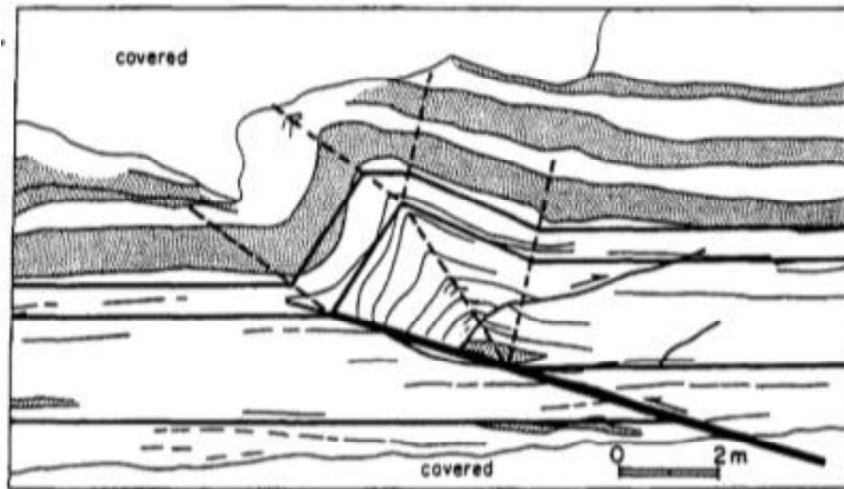
Para la relocalización de los eventos se utilizó HYPOELLIPSE, el modelo de velocidades encontrado y las correcciones de estación definidas previamente por el método de VELEST (ver Figura 5.7). Los resultados muestran hipocentros que se localizaron entre 0 y 16.79 kilómetros de profundidad. Al poner en contexto con las localizaciones de Alvarado et al. (2014b) (ver Figura 7.1), se observa que la sismicidad de la crisis de 2014 se alinea en un plano entre 4 y 9.5 km de profundidad y que podría sugerir que es casi paralelo al plano definido por Alvarado et al. (2014b).



**Figura 7.1:** Sismicidad Quito (a) Corte NO-SE, las líneas rojas son la prolongación del plano de falla y un plano secundario. (b) Localizaciones finales de los eventos de la crisis de 2014 en relación a la sismicidad de la zona de Quito de acuerdo a Alvarado et al., (2014) (eventos relocados con el método MAXI, Alvarado et al. (2014)) y de acuerdo con este estudio (relocados con HYPOELLIPSE). Los puntos de color rosado representan los eventos

relocalizados en este estudio. Los puntos de colores naranja, amarillo, celeste y azul son las localizaciones calculadas por Alvarado et al., (2014). Figura cortesía de Y. Font

Esta alineación de los eventos más superficiales (línea roja en la Figura 7.1a) podría explicarse como la continuación del plano de  $55^\circ$ , mientras que el otro plano casi paralelo como un plano secundario formado durante el movimiento de la falla, estructuras que se ha observado en modelaciones numéricas de fallas inversas como lo observado en Chester y Chester (1990) en Tennessee (ver Figura 7.2), donde se aplica el modelo de propagación de pliegues a lo largo de fallas inversas con buzamiento constante.



**Figura 7.2.** Modelo de propagación de pliegues a lo largo de fallas inversas con buzamiento constante. Tomado de Chester y Chester (1990)

Los mecanismos focales se utilizaron para caracterizar la cinemática del movimiento. Para la crisis de 2014 se obtuvieron 19 mecanismos focales de calidad A, B y C con el método HASH.

Los mecanismos caracterizan al segmento Bellavista – Catequilla en su parte más superficial (ver Figura 7,1) como un plano, con rumbo  $186.16^\circ \pm 52.6^\circ$  buzando  $43.16^\circ \pm 12^\circ$  hacia el Oeste; durante la crisis del 2014 el movimiento de la falla fue principalmente inverso con un *rake*:  $102.47^\circ \pm 23.8^\circ$ . Estos valores están definidos con 13 de los 19 mecanismos focales obtenidos. Seis mecanismos focales presentan una forma diferente del patrón de la falla y podrían responder a fallas transversales conectando segmentos de un plano principal (ver tabla 6.3).

Adicionalmente se realizó un análisis de otros eventos significativos ocurridos en otros segmentos, aprovechando el modelo de velocidades y las correcciones para las estaciones obtenidas.

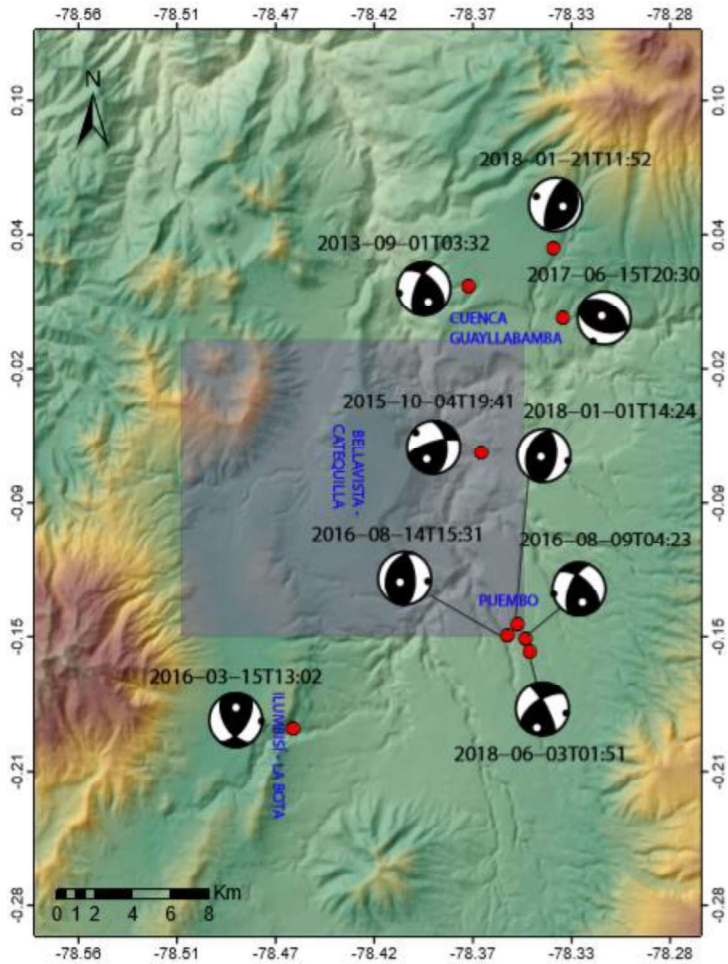
Al sur, en el segmento Ilumbisí – La Bota, el evento del 15 de marzo del 2016, ubicado a 12.85 km de profundidad, presenta un plano con dirección  $149^\circ$  buzando  $56^\circ$  hacia el Oeste y un movimiento inverso con componente transcurrente de acuerdo al *rake* de  $40^\circ$  (Figura 7.3).

En el sector de Puenbo, hay cuatro eventos con profundidades entre 10.85 km y 11.13 km: dos eventos (ver 5 y 7 en tabla 6.4) con mecanismos que muestran planos con rumbo  $200.5^\circ \pm 0.7^\circ$ , buzando al Oeste  $35.5^\circ \pm 3.5^\circ$  y un desplazamiento inverso (*rake*:  $105.5^\circ \pm 7-8^\circ$ ). Y otros dos eventos (ver 4 y 9 en tabla 6.4) que presentan un plano de falla con rumbo  $218.5^\circ \pm 23.3^\circ$ , buzando  $62^\circ \pm 1.4^\circ$  y un movimiento inverso con componente transcurrente dextral *rake* de  $154^\circ \pm 17^\circ$  (Figura 7.3).

En la parte más oriental del segmento Bellavista – Catequilla, el evento del 4 de octubre del 2015 (ver Figura 7.3) tiene una profundidad 9.31 km e indica un movimiento inverso con componente dextral de acuerdo al *rake*  $138^\circ$  de rumbo  $253^\circ$  y buzando  $74^\circ$  al NO.

En la zona de Guayllabamba se analizaron 2 eventos (ver 1 y 8 en tabla 6.4), con profundidades de 4.52 km y 5.23 km respectivamente, caracterizando a la falla como un plano con dirección  $201^\circ \pm 1.4^\circ$  buzando  $66.5^\circ \pm 2.1^\circ$  hacia el Oeste y un movimiento inverso con un *rake* de  $111.5^\circ \pm 37^\circ$  (Figura 7.3).

Estos eventos son superficiales, debido a que la mayoría no supera los 10 – 12 km de profundidad y en este rango estaría la zona sismogénica.



**Figura 7.3.** Mapa de los 9 eventos significativos ocurridos en otros años relocalizados en el presente estudio con sus respectivos mecanismos focales.

De acuerdo al análisis de los sismos significativos, se concluye que la actividad sísmica en el sur es más profunda y en la zona central y norte, las profundidades son comparables a lo observado durante la crisis

El movimiento en los segmentos de la falla, de acuerdo a los gráficos de mecanismos focales, en general es inverso con una componente transcurrente dextral (Figura 6.7 y 7.3) y es consecuente con lo sugerido por Alvarado et al., (2014b) y Calahorrano, (2001).

## BIBLIOGRAFÍA

- IGEPN, (2017). "INFORME SÍSMICO PARA EL ECUADOR." [www.igepn.edu.ec/inf-sism/sismicos-anuales](http://www.igepn.edu.ec/inf-sism/sismicos-anuales).
- Alvarado A., Audin L., Nocquet J-M., Jaillard E., Mothes P., Jarrín P., Segovia M., Rolandone F., Cisneros D. (2016). Partitioning of oblique convergence in the northern Andes subduction zone: migration history and present-day boundary of the North Andean Sliver in Ecuador, *Tectonics*, DOI: 10.1002/2016TC004117.
- Alvarado A., Audin L., Nocquet, J. M., Lagreulet S., Segovia M., Font Y., Lamarque G., Yepes H., Mothes P., Rolandone F., Jarrín P., and Quidelleur X. (2014). Active tectonics in Quito, Ecuador, assessed by geomorphological studies, GPS data, and crustal seismicity. *Tectonics*, 33(2), 67-83. doi:10.1002/2012tc003224
- Alvarado, A., Segovia, M., Pacheco, D., Santo, J., Lema, V., Vaca S., Ruiz, M., Viracucha, G., (2014b). Sismo de Quito 12 de agosto 2014-resultados preliminares. Reunión Internacional-2014 LMI – SVAN
- Alvarado, A., Ruiz, M., Mothes, P., Yepes, H., Segovia, M., Vaca, M., Córdova, A., (2018). Seismic, Volcanic, and Geodetic Networks in Ecuador: Building Capacity for Monitoring and Research. *Seismological Research Letters*, 89(2A), 432–439. doi:10.1785/0220170229
- Araya M., Linkimer I., Taylor W., (2016). Modelo Mínimo Unidimensional De Velocidades De La Onda P Para La Cordillera Volcánica De Guanacaste, Costa Rica. *Revista Geológica De América Central*, vol. 54, 2016, doi:10.15517/rgac.v54i0.23283.
- Aspden, J., Litherland M., (1992) The geology and Mesozoic collisional history of the Cordillera Real, Ecuador. *Tectonophysics* 205: 187-204.
- Baptiste, J., (2016), Estudio de la estructura litosférica de la Precordillera Occidental y deformación activa asociada. Tesis Doctoral – Doctorado en Geofísica. 12-19 p.
- Bates, L., Jackson, A., (1989). Glossary of geology. Alexandria: American Geological Institute.
- Beauval, C., Yepes, H., Bakun, W., Egred, J., Alvarado, A., Singaicho, J. (2010). Locations and magnitudes of historical earthquakes in the Sierra of Ecuador (1587-1996), *Geophys. J. Int.* 181,1613-1633, doi; 10.1111/j.1365-246X.2010.04569.

- BECK, L., and CHRISTENSEN, D., (1991), Rupture Process of the February 4, 1965, Rat Islands Earthquake, *J. Geophys. Res.* 96, 2205-2221.
- Benítez, S., (1995). Evolución geodinámica de la provincia costera surecuatoriana del Cretácico superior - Terciario. *Geología Alpina*. <https://doi.org/1995\r95 gre1 0071>.
- Boland, M., Pilatasig, L., Ibandango, C., McCourt, W., Aspden, J., Hughes, R., Beate, B., (2000), *Geology of the Western Cordillera between 0°-1°N*, Proyecto de Desarrollo Minero y Control Ambiental, Programa de Información cartográfica y Geológica, Informe No. 10. CODIGEM-BGS, Quito, Ecuador, 72 pp.
- Bormann, P., Baumbach, M., Bock, G., Grosser, H., Choy, G., Boatwright, J., (2009), Seismic sources and source parameters, in *New Manual of Seismological Observatory Practice (NMSOP)*, edited by P. Bormann, pp. 1–94, Potsdam, Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ.
- Brooks, P., Biederman, J., Condon, K., Chorover, J., McIntosh, J., Meixner, T., Perdrial, J., (2013). Resumen H43B-1445 presentado en la reunión de otoño de 2013, AGU, San Francisco, CA, 9-13 de diciembre.
- Calahorrano, A., (2001). Estudio del origen del enjambre sísmico de la zona norte de la ciudad de Quito, durante 1998 - 1999. Tesis de ingeniería. Escuela Politécnica Nacional - Quito: 190pp.
- Centro Sismológico Nacional (2018), Glosario. Universidad De Chile. Acceso 24 de noviembre del 2018, de: [www.sismologia.cl/links/glosario.html](http://www.sismologia.cl/links/glosario.html).
- Chatelain J., (1978). Etude fine de la sismicite en zone de collision continentale au moyen d'un reseau de stations portables: la region Hindu-Kush Pamir, *Univ.Scient.Medic.de Grenoble*, 219pp
- Chester, J., Chester, F., (1990). Fault-propagation folds above thrusts with constant dip. *Journal of Structural Geology*, 12(7), 903–910. doi:10.1016/0191-8141(90)90063-5
- Chiaradia, M., Fontboté, L., (2001). Radiogenic Lead Signature in Au-Rich Volcanic-Hosted Massive Sulfides Ores and Associated Volcanic Rocks of the Early Tertiary Macuchi Island Arc (Western Cordillera of Ecuador). *Economic Geol* 96: 1361 - 1378.
- Córdova, A., (2013). Estudios de micro-sismicidad para proyectos geotérmicos: Chacana y Chachimbiro. Quito. Tesis de ingeniería. Escuela Politécnica Nacional. 153 p.
- Costa, C., Audemard, M., Audin, L., Benavente, C., (2009). *Geomorphology as a Tool for Analysis of Seismogenic Sources in Latin America and the Caribbean*.



Developments in Earth Surface Processes Natural Hazards and Human-Exacerbated Disasters in Latin America, 29-47. doi:10.1016/s0928-2025(08)10002-5.

- Cronin, V., (2010). A Primer on Focal Mechanism Solutions for Geologists. Baylor University. USA. 6 p.
- Del Pino, L., Yepes, H., (1990). Apuntes para una Historia Sísmica de Quito. Centro Histórico de Quito: Problemática y Perspectivas, Serie Quito. L Municipio de Quito y Junta de Andalucía, Min. de Asuntos Exteriores de España, Quito, 67 - IOOp.
- DGGM, (1982). Hoja geológica San Antonio. Escala 1:25000
- Egbue, O., Kellogg, J., (2010). Pleistocene to Present North Andean “escape”. Tectonophysics, 489(1-4), 248-257. doi:10.1016/j.tecto.2010.04.021
- Ego F, Sebrier M, Lavenu A, Yepes H, Egüez A (1996) Quaternary state of stress in the northern Andes and the restraining bend model for the Ecuadorian Andes. Tectonophysics 259: 101-116.
- Egüez, A., (1986). Evolution Cénozoïque de la Cordillere Occidentale Septentrionale d'Équateur (0°15'S - 1°10'S), les Minéralisations Associeés. Tesis Doctoral. UPMC - Paris: 116pp.
- Egüez, A., Aspden, J. (1993). The mesozoic – cenozoic evolution of the Ecuadorian Andes. Second ISAG, Oxford (UK), 21-23/9/1993.
- Ekström, Nettles, G., Dziewonski, A., (2012) El proyecto global de la CMT 2004-2010: Tensores de momento de Centroid para 13,017 terremotos, Phys. Planeta Tierra. Inter., 200-201, 1-9doi: 10.1016 / j.pepi.2012.04.002
- Fitch, T., (1972). Plate convergence, transcurrent faults, and internal deformation adjacent to Southeast Asia and the western Pacific. Journal of Geophysical Research, 77(23), 4432–4460. doi:10.1029/jb077i023p04432 Fitch, TJ (1972). Convergencia de placas, fallas transcurrentes y deformación interna adyacente al sudeste de Asia y el Pacífico occidental. Journal of Geophysical Research, 77 (23), 4432–4460. doi: 10.1029 / jb077i023p04432
- Gailler, A., (2005). Structure de la marge d'Équateur-Colombie par modélisation des données de sismique angle marines. Influence sur le fonctionnement de la subduction et la sismicité. Thèse de Doctorat. Université de Nice-Sophia Antipolis: 262pp.
- Gosar, A., (2014). “Analysis of the Impact of Fault Mechanism Radiation Patterns on Macroseismic Fields in the Epicentral Area of 1998 and 2004 Km Mountains

Earthquakes (NW Slovenia).” *The Scientific World Journal*, vol. 2014, pp. 1–11., doi:10.1155/2014/206843.

- Gutscher M, Malavieille J, Lallemand S, Collot J (1999) Tectonic segmentation of the North Andean margin: impact of the Carnegie Ridge collision. *Earth and Planetary Science Letter* 168: 255 - 270.
- Hall, M., Beate, B., (1991) El volcanismo Plio-Cuaternario en los Andes del Ecuador. *El paisaje volcánico de la Sierra Ecuatoriana - Estudios de Geografía*. Corporación Editora Nacional, Quito - Ecuador: 6 - 16.
- Hall, M., Samaniego, P., Le Pennec, J., Johnson, J., (2008). Ecuadorian Andes volcanism: A review of Late Pliocene to present activity. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 176(1), 1–6. doi:10.1016/j.jvolgeores.2008.06.012
- Hall M, Mothes P (2008) The Chacana Caldera Complex in Ecuador. *Collapse Calderas Workshop*. IOP Cof Series. *Earth and Environmental Science* 3: doi:10.1088/1755-1307/3/1/012004.
- Hardebeck, J., Shearer, P., (2002). A New Method for Determining First-Motion Focal Mechanisms. *Bulletin of the Seismological Society of America*, vol. 92, no. 6, pp. 2264–2276., doi:10.1785/0120010200.
- Hardebeck, J., (2003). Using S/P Amplitude Ratios to Constrain the Focal Mechanisms of Small Earthquakes. *Bulletin of the Seismological Society of America*, vol. 93, no. 6, pp. 2434–2444., doi:10.1785/0120020236.
- Hardebeck, J., (2008), HASH: A FORTRAN Program for Computing Earthquake FirstMotion Focal Mechanisms – v1.2
- Hibsich C., Alvarado A., Yepes H., Sébrier M., Pérez H., (1996). Falla activa de Quito y fuentes sismogénicas regionales: estudio de riesgo sísmico de Quito (Ecuador) con el análisis de los sedimentos cuaternarios. *Les risques naturels et leur gestion en Équateur*, *Bulletin de l'Institut Français d' Études Andines*. Tomo 25, N°3. Perú. Editorial Grafica Pacilic Press S. A. 359 – 388p.
- Hughes, R., Pilatasig, L., (2002) Cretaceous and Tertiary terrane accretion in the Cordillera Occidental of the Ecuador Andes. *Tectonophysics* 345: 29 – 48.
- Husen, S., Hardebeck, J., (2010), Earthquake location accuracy, *Community Online Resource for Statistical Seismicity Analysis*, doi:10.5078/corssa-55815573.
- Jaillard, E., Lapierre, H., Ordóñez, M., Toro, J., Amortegui, A., Vanmelle, J., (2009) Accreted oceanic terranes in Ecuador: southern edge of Caribbean Plate? *Geol Soc London Special Pub* 328: 469 – 485

- Kendrick, E., Bevis, M., Smalley, R., Brooks, B., Barriga, R., Lauria, E., Souto, L., (2003). The Nazca-South America Euler vector and its rate of change. *Journal South Am Earth Sc* 16: 125 - 131.
- Kennett, B., y Engdahl, E., (1991). Traveltimes for global earthquake location and phase identification. *Geophysical Journal International*, 105(2), 429–465. doi:10.1111/j.1365-246x.1991.tb06724.x
- Kerr, A., Aspden, J., Tarney, J., Pilatasig, L., (2002) The nature and provenience of acreted oceanic terranes in western Ecuador: geochemical and tectonic constrains. *J. Geol Soc London* 159: 577 - 594.
- Kissling, E., Kradolfer, U., Maurer, H., (1995). VELEST user's guide short introduction, Tech. rep., Institute of Geophysics, ETH Zurich, kiss@tomo.ig.erdw.ethz.ch
- Laboratorio de Procesado de Imagen, (2015). Ondas Sísmicas, Acceso: 15 de octubre de 2018. [www.lpi.tel.uva.es/~nacho/docencia/ing\\_ond\\_1/trabajos\\_06\\_07/io3/public\\_html/Ondas/Ondas.html](http://www.lpi.tel.uva.es/~nacho/docencia/ing_ond_1/trabajos_06_07/io3/public_html/Ondas/Ondas.html).
- Lahr J., (1999). revised 2012, HYPOELLIPSE: a computer program for determining local earthquake hypocentral parameters, magnitude, and first-motion pattern, U.S. Geological Survey Open-File Report 99–23, version 1.1, 119 p. and software, available at <https://pubs.usgs.gov/of/1999/ofr-99-0023/>.
- Lavenu, A., Noblet, C., Bonhomme, M., Egüez, A., Dugas, F., (1992). New K/Ar age dates of Neogene and Quaternary volcanic rocks from the Ecuadorian Andes: Implications for the relationship between sedimentation, volcanism and tectonics. *Journal of South American Sciences* 5 (3/4): 309 - 320.
- Lavenu A., Baudino R., Ego F. (1996). Stratigraphie des depots Tertiaires et Quaternaires de la Depression Interandine d'Equateur (entre 0° et 2°15S). *Bull Brit Geol Survey, Overseas Mem* 11: 147pp.
- Lavenu A., Winter T., Dávila F. (1995). A Pliocene – Quaternary compressional basin in the Interandean Depression, Central Ecuador. *Geophys. Journal. Int.* 121, 279 – 300.
- Litherland, M., Aspden, J., (1992). Terrane-boundary reactivation: a control on the evolution of the Northern Andes. *Journal South Am Earth Sci* 5: 71 - 76.
- Litherland, M., Aspden, J., Jemielita, R., (1994). The metamorphic belts of Ecuador. *Brit Geol Survey, Overseas Mem* 11: 147pp.
- Lonsdale, P., (2005). Creation of the Cocos and Nazca plates by fission of the Farallon plate. *Tectonophysics* 404: 237 - 264.

- Maochen, G., (2003). ANALYSIS OF SOURCE LOCATION ALGORITHMS Part I: Overview and non-iterative methods. Acoustic Emission Group. Pennsylvania-USA. 1-15pp.
- McCaffrey, R., (1992). Oblique Plate Convergence, Slip Vectors, and Forearc Deformation, *J. Geophys. Res.* 97, 8905-8915
- McCourt, W., Duque, P., Pilatasig, B., (1997). PRODEMINCA Report No. 3: the Geology of the Cordillera Occidental of Ecuador between 1°S and 2°S.; CODIGEM - British Geological Survey, Quito: 68pp.
- Nocquet, J., Mothes, P., Alvarado, A., (2009). Geodesia, geodinámica y ciclo sísmico en Ecuador. *Geología y geofísica marina y terrestre del Ecuador: desde la costa continental hasta las Islas Galápagos - Guayaquil*: 83 – 95.
- Nocquet, J., Villegas-Lanza, J., Chlieh, M., Mothes, P., Rolandone, F., Jarrin, P., Yepes, H., (2014). Motion of continental slivers and creeping subduction in the northern Andes. *Nature Geoscience*, 7(4), 287-291. doi:10.1038/ngeo2099
- Pacheco, D., (2013). Estudio geológico de las formaciones cuaternarias en la zona San Antonio de Pichincha-Pomasqui. Tesis de ingeniería. Escuela Politécnica Nacional-Quito:157pp
- Pennington, W., (1981). Subduction of the Eastern Panama Basin and seismotectonics of northwestern South America. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 86(B11), 10753-10770. doi:10.1029/jb086ib11p10753
- Pérez, A., (2018). Mecapedia-Coeficiente De Poisson, Universitat Jaume I. Castellón-España. [www.mecapedia.uji.es/coeficiente\\_de\\_Poisson.htm](http://www.mecapedia.uji.es/coeficiente_de_Poisson.htm).
- Pérez, J., (2016). Monitoreo sísmico en tiempo real para la alerta temprana, el caso de SeiscomP. *GEOS*, Vol. 36, N°2, 317-327p., <https://ugm.org.mx/publicaciones/geos/pdf/geos16-2/monitoreo-36-2.pdf>
- Sáez, M., (2016). Correlación cruzada de ruido sísmico para la obtención de perfiles profundos de velocidad de onda de corte en la cuenca de Santiago. Santiago de Chile. Tesis de Maestría. Universidad de Chile. 14 p.
- Sauer, W., (1965). *Geología del Ecuador*, Ministerio de Educación, Quito, Ecuador.
- Snoke, J., (2009). 85.12 FOCMEC: FOCal MEChanism Determinations. *International Geophysics International Handbook of Earthquake and Engineering Seismology*, pp. 1629–1630., doi:10.1016/s0074-6142(03)80291-7.
- Soulas, J.-P., Egüez, A., (1994). Tectónica activa y riesgo sísmico en los Andes Ecuatorianos y el extremo sur de Colombia. *Bol Geol Ecuat* 2, 3-11Desarrollador Crimsoneditor. "Crimson Editor." Softonic, [crimson-editor.softonic.com/](http://crimson-editor.softonic.com/).

- Soulas, J.-P., Egüez, A., Yepes, H., Pérez, H., (1991), Tectónica activa y riesgo sísmico en los Andes Ecuatorianos y el extremo sur de Colombia, Bol. Geol. Ecuat., 2(1), 3–11.
- Spikings, R., Winkler, W., Hughes, R., Handler, R., (2005) Thermochronology of allocthonous terranes in Ecuador: Unraveling the accretionary and postaccretionary history of Northern Andes. *Tectonophysics* 339: 195 - 220.
- Tibaldi A, Ferrari L (1992) From latest Miocene thrusting to Quaternary transpression and transresion in the Interandean Valley, Ecuador. *Journal Geodynamics* 15: 59 - 83.
- Trenkamp, R., Kellogg, J., Freymueller, J., Mora, H., (2002). Wide plate margin deformation, southern Central America and northwestern South America, CASA GPS observations. *Journal South America Earth Science* 15: 157 - 171.
- Vallejo, C., (2007). Evolution of the Western Cordillera in the Andes of Ecuador (Late Cretaceous-Paleogene). PhD thesis. Institute of Geology, ETH Zurich: 208pp.
- Vallejo, C., Winkler, W., Spikings, R., Luzieux, L., Heller, F., Busy, F., (2009). Mode and timing of terrane accretion in the forearc of the Andes in Ecuador. *Geol Soc Am Mem* 204: doi: 10.1130/2009.12.04(09).
- Villagómez, D., (2003). Evolución Plio-Cuaternaria del Valle Interandino Central en Ecuador (zona Quito - Guayllabamba - San Antonio de Pichincha). Tesis de ingeniería. Escuela Politécnica Nacional - Quito: 130pp.
- Villagómez, D., Egüez, A., Winkler, W., Spikings, R., (2002). Plio-Quaternary sediments and tectonic evolution of the Central Inter-Andean Valley in Ecuador. *Fourth ISAG, Toulouse-France*: 689 - 692.
- Winkler, W., Villagómez, D., Spikings, R., Abegglen, P., Tobler, S., Egüez, A., (2005). The Chota basin and its significance for the inception and tectonic setting of the inter-Andean depression in Ecuador. *Journal South Am Earth Sci* 19: 5 - 19.

## ANEXOS

Anexo 1. Sismos de Quito en el 2014 de donde se escogieron los sismos para realizar este proyecto.

FECHA	HORA	LATITUD	LONGITUD	PROF	MAG	RMS	GAP	NPHA	E LATITUD	E LONG	E PROFUNDIDAD	ID	TYPO	MODO
15/9/2014	08:33.8	-0.0051	-79	10	1.21	0.25	242	4	15.9	24.1		igeprn2014scaj	earthquake	manual
31/8/2014	03:30.4	-0.2531	-79	5	1.98	0.24	169	5	7.4	7.3		igeprn2014rbdp	earthquake	manual
10/9/2014	50:44.9	0.0623	-78	6.32	1.48	0.09	234	5	7.4	18.5	20.5	igeprn2014rudz	earthquake	manual
12/9/2014	42:12.2	-0.0598	-78	5	1.17	0.11	278	5	6.4	10.1		igeprn2014rxmu	earthquake	manual
25/9/2014	49:23.0	-0.0574	-78	6.61	1.4	0.05	141	5	5.7	3.7	11.8	igeprn2014svaq	earthquake	manual
12/8/2014	24:30.6	-0.1353	-78	4.1	1.11	0	327	6	11.9	72.7	30.7	igeprn2014pifn	earthquake	manual
15/8/2014	12:17.1	-0.056	-79	9.5	2.93	0.19	337	6	14	19.5	6.1	igeprn2014pyhs	earthquake	manual
19/8/2014	56:27.5	-0.0505	-78	5.71	1.48	0.01	231	6	16.9	42.3	20.1	igeprn2014qepm	earthquake	manual
25/8/2014	53:06.1	-0.019	-78	4	1.62	0.03	254	6	53.9	5.2		igeprn2014qqod	earthquake	manual
9/9/2014	41:02.6	-0.0549	-78	5.16	1.66	0.41	139	6	3.2	4	9.8	igeprn2014rrih	earthquake	manual
9/9/2014	24:44.3	-0.0958	-78	5.37	1.73	0.09	157	6	8.2	4.2	14.4	igeprn2014rppv	earthquake	manual
9/9/2014	32:02.1	-0.305	-78	4.18	1.78	0.11	186	6	8.3	7	3.3	igeprn2014ruaa	earthquake	manual
20/9/2014	11:40.4	-0.0588	-78	6.15	1.35	0.04	206	6	7.2	7.6	18.4	igeprn2014sizv	earthquake	manual
21/9/2014	30:06.5	-0.0164	-79	10.21	0.92	0.05	212	6	61.8	102	34.9	igeprn2014snib	earthquake	manual
26/9/2014	27:06.9	-0.0725	-78	3.35	1.07	0.08	196	6	6.2	5	4.8	igeprn2014swbp	earthquake	manual
27/9/2014	13:36.7	-0.1803	-79	10	1.05	0.3	222	6	4.2	5.7		igeprn2014sygo	earthquake	manual
12/8/2014	23:03.1	-0.1115	-78	3.06	1.65	0.04	336	7	9.7	16.7	7.9	igeprn2014pflf	earthquake	manual
13/8/2014	03:52.8	-0.1016	-78	4.5	1.58	0.13	334	7	9.3	7.4		igeprn2014puik	earthquake	manual
14/8/2014	38:36.3	-0.0971	-79	5	1.65	0.19	335	7	9.2	17.4		igeprn2014pwnc	earthquake	manual
14/8/2014	36:08.5	-0.1293	-78	4.5	1.37	0.3	329	7	10.2	7		igeprn2014pwwx	earthquake	manual
19/8/2014	52:42.5	-0.4032	-78	25.05	1.97	0.39	217	7	9.9	38.7	36.2	igeprn2014qeri	earthquake	manual
20/8/2014	52:04.9	-0.0644	-78	4.69	1.72	0.36	282	7	5.6	21.5	9.4	igeprn2014gggw	earthquake	manual
26/8/2014	27:19.2	-0.0952	-78	10.86	1.69	0.4	117	7	4.5	3.3	8.2	igeprn2014qsev	earthquake	manual

26/8/2014	44:26.1	-0.0662	-78	8.88	1.41	0.15	177	7	6.8	3.5	9	igeprn2014qshi	earthquake	manual
27/8/2014	16:17.8	-0.083	-78	4	1.72	0.04	320	7	14.2	61.1	28.2	igeprn2014qubw	earthquake	manual
3/9/2014	05:59.7	-0.0951	-78	10.79	1.54	0.16	172	7	10.2	2.9	9.2	igeprn2014rhwk	earthquake	manual
3/9/2014	35:34.6	-0.5108	-78	4	2.31	0.07	320	7	10.5	10.5	128.1	igeprn2014rgxc	earthquake	manual
6/9/2014	31:37.7	0.1535	-79	2.79	1.76	0.16	249	7	11.6	25.7	9	igeprn2014rdu	earthquake	manual
10/9/2014	27:00.3	-0.3328	-78	6.03	1.77	0.06	161	7	5.5	4.2	8.2	igeprn2014rszn	earthquake	manual
19/9/2014	58:09.5	-0.1341	-78	2.06	1.15	0.08	278	7	9.8	24.1	9.4	igeprn2014sjsa	earthquake	manual
21/9/2014	47:20.5	0.0534	-79	3.16	1.37	0.1	223	7	3.6	7	4.9	igeprn2014snip	earthquake	manual
12/8/2014	03:13.3	-0.075	-78	3.89	1.57	0.16	235	8	3	11.2	4.5	igeprn2014ptav	earthquake	manual
12/8/2014	46:35.9	-0.0886	-78	3.36	1.53	0.13	284	8	8.5	26.9	12.5	igeprn2014ptch	earthquake	manual
13/8/2014	08:22.7	-0.0674	-78	3.9	1.19	0.11	266	8	4.8	20.6	7.5	igeprn2014ptiy	earthquake	manual
14/8/2014	38:26.5	-0.3801	-78	0	2.29	0.42	248	8	5.2	8.6		igeprn2014pvdI	earthquake	manual
14/8/2014	42:00.5	-0.0991	-78	4.8	1.26	0.09	275	8	8.5	24.5	10.2	igeprn2014pwpe	earthquake	manual
22/8/2014	37:04.3	-0.1013	-78	7.86	1.58	0.12	164	8	7	3.9	9.6	igeprn2014qlmy	earthquake	manual
27/8/2014	36:25.7	-0.0595	-78	4.5	1.7	0.47	211	8	4.4	3.7		igeprn2014quin	earthquake	manual
27/8/2014	57:00.0	-0.1136	-78	4.5	1.16	0.2	335	8	9.2	6.3		igeprn2014qujf	earthquake	manual
13/9/2014	39:18.2	-0.0798	-78	4.29	1.63	0.17	180	8	4.4	3.3	4.2	igeprn2014ryal	earthquake	manual
13/9/2014	59:47.9	-0.0198	-79	9.42	1.73	0.1	145	8	3.5	5	8.9	igeprn2014rzqu	earthquake	manual
22/9/2014	16:04.6	-0.081	-78	1.26	1.41	0.11	300	8	6.9	28.7	12.3	igeprn2014spwx	earthquake	manual
27/9/2014	55:16.3	-0.028	-78	4.38	1.29	0.27	157	8	3.5	3.4	4	igeprn2014sxyb	earthquake	manual
28/9/2014	22:19.5	-0.0842	-78	5.94	1.23	0.25	107	8	3.6	3.3	10	igeprn2014taaj	earthquake	manual
30/9/2014	12:19.8	-0.0342	-78	4.12	1.96	0.21	211	8	3.6	5.2	4.2	igeprn2014teku	earthquake	manual
12/8/2014	41:41.2	-0.0613	-78	1.4	2.19	0.21	134	9	2.1	5	3.4	igeprn2014ptdz	earthquake	manual
13/8/2014	19:52.1	-0.0631	-78	4.88	1.05	0.17	237	9	5.5	16.6	5	igeprn2014ptng	earthquake	manual
14/8/2014	30:08.5	-0.077	-78	3.65	1.26	0.05	278	9	9.4	34.3	16.1	igeprn2014pvfd	earthquake	manual
15/8/2014	36:08.0	-0.0694	-78	7	1.63	0.04	269	9	8.8	36.9	26.9	igeprn2014pxuq	earthquake	manual
18/8/2014	37:18.5	-0.0456	-78	4.46	1.96	0.18	160	9	5.5	3.5	4.4	igeprn2014qdvb	earthquake	manual

31/8/2014	51:39.9	-0.3783	-79	13.16	2.04	0.29	251	9	7.3	20	31.8	igeprn2014rate	earthquake	manual
31/8/2014	01:52.3	-0.1066	-78	4.97	1.63	0.11	92	9	3.4	2.4	3.4	igeprn2014rbvg	earthquake	manual
7/9/2014	07:40.0	-0.082	-79	15.79	1.79	0.15	170	9	2.7	5.9	7.7	igeprn2014roof	earthquake	manual
10/9/2014	43:28.2	-0.0964	-78	4.5	1.28	0.27	167	9	3.2	3.6		igeprn2014rsua	earthquake	manual
19/9/2014	37:49.1	-0.3845	-78	2.12	1.43	0.22	221	9	7.7	5.1	4.2	igeprn2014sknc	earthquake	manual
25/9/2014	59:26.9	-0.037	-78	2.11	1.66	0.28	210	9	5.3	4	4.2	igeprn2014sunc	earthquake	manual
12/8/2014	36:53.0	-0.0776	-78	2.8	2.26	0.14	281	10	7.2	29.6	12.4	igeprn2014ptbz	earthquake	manual
12/8/2014	18:10.4	-0.0737	-78	4.07	2.14	0.25	265	10	13.6	9.9	7.1	igeprn2014ptdi	earthquake	manual
13/8/2014	19:10.5	-0.0448	-78	6.47	1.96	0.08	281	10	8.9	49.8	43.9	igeprn2014puqy	earthquake	manual
13/8/2014	28:54.1	-0.0832	-78	4.16	1.83	0.15	185	10	2.8	5.1	3.6	igeprn2014puxe	earthquake	manual
14/8/2014	49:11.2	-0.0642	-78	7.75	1.98	0.12	251	10	4.6	14.4	13	igeprn2014pvfu	earthquake	manual
14/8/2014	29:43.3	-0.0573	-78	6.54	1.8	0.19	128	10	4.4	4.7	9	igeprn2014pwkv	earthquake	manual
25/8/2014	54:07.8	-0.0938	-78	5.52	2.04	0.21	100	10	3.7	2.5	5.9	igeprn2014qqoe	earthquake	manual
12/9/2014	14:56.7	-0.1686	-78	4.01	1.68	0.08	183	10	3.9	4	2.8	igeprn2014rvme	earthquake	manual
17/9/2014	04:24.3	-0.0717	-78	4.42	1.29	0.2	137	10	4.4	2.7	3.6	igeprn2014sfhk	earthquake	manual
12/8/2014	37:33.1	-0.0662	-78	4.52	2.51	0.19	205	11	2.4	5.9	3.5	igeprn2014ptca	earthquake	manual
12/8/2014	44:58.7	-0.0582	-78	5	1.55	0.52	321	11	10.5	6.9		igeprn2014ptcf	earthquake	manual
13/8/2014	06:14.6	-0.0578	-78	5.85	1.56	0.16	252	11	2.7	11.3	11.7	igeprn2014ptiw	earthquake	manual
13/8/2014	49:18.1	-0.0713	-78	4.32	1.69	0.18	253	11	5.1	16.5	5.8	igeprn2014pueb	earthquake	manual
13/8/2014	52:55.8	-0.066	-78	3.57	1.71	0.07	273	11	6.4	33.3	10.5	igeprn2014pusb	earthquake	manual
13/8/2014	25:46.6	-0.0578	-78	3.75	1.75	0.07	292	11	4.5	37.8	14.5	igeprn2014puzc	earthquake	manual
17/8/2014	22:37.2	-0.0726	-78	1.88	1.87	0.29	130	11	3.2	3.2	3.3	igeprn2014qcta	earthquake	manual
19/8/2014	52:25.5	-0.1206	-78	3.08	2.17	0.15	130	11	3.3	1.8	2.5	igeprn2014qffe	earthquake	manual
20/8/2014	22:34.0	-0.1128	-78	1.84	1.9	0.24	110	11	2.5	3.5	4.4	igeprn2014qgdx	earthquake	manual
27/8/2014	31:57.3	-0.0861	-78	3.71	1.86	0.16	126	11	3.8	2	2.4	igeprn2014qugk	earthquake	manual
1/9/2014	02:04.0	-0.0327	-78	2.97	1.96	0.13	251	11	14.7	8.6	8.7	igeprn2014rchf	earthquake	manual
2/9/2014	39:34.6	-0.0702	-78	8.2	1.36	0.31	97	11	3.2	2.6	8.5	igeprn2014repw	earthquake	manual



4/9/2014	11:09.2	-0.0853	-78	4.91	2.33	0.28	89	11	3.3	3	5.1	igeprn2014rft	earthquake	manual
23/9/2014	57:45.4	-0.053	-78	11.38	1.82	0.18	206	11	3.2	5.8	9.4	igeprn2014srfy	earthquake	manual
13/8/2014	21:48.1	-0.1146	-78	5.41	1.55	0.14	245	12	8.6	8.9	13.7	igeprn2014puvy	earthquake	manual
14/8/2014	57:57.5	-0.4038	-78	5	2.22	0.69	261	12	5	9		igeprn2014pvec	earthquake	manual
16/8/2014	55:24.0	-0.0692	-78	1.73	2.35	0.59	144	12	2.1	1.9	2.2	igeprn2014qagq	earthquake	manual
21/8/2014	41:17.2	-0.1037	-78	9	2.03	0.22	161	12	4.1	2.6	7.3	igeprn2014qjly	earthquake	manual
23/8/2014	01:18.2	-0.0743	-78	12.29	1.72	0.3	101	12	3	2.2	6	igeprn2014qlxr	earthquake	manual
24/8/2014	24:09.0	-0.0518	-78	8.41	2.43	0.24	91	12	2.5	2.7	6.6	igeprn2014qozo	earthquake	manual
9/9/2014	20:05.1	-0.3938	-79	7.36	1.82	0.14	175	12	2.6	6.3	11.6	igeprn2014rqvw	earthquake	manual
10/9/2014	58:50.0	-0.0685	-78	9.24	2.12	0.31	79	12	2.2	2.9	5.4	igeprn2014rsms	earthquake	manual
11/9/2014	59:55.2	-0.0961	-78	6.94	1.81	0.25	98	12	3.5	3.3	7.4	igeprn2014rvtw	earthquake	manual
14/9/2014	14:17.9	-0.085	-78	9.82	1.63	0.23	149	12	2.6	2.2	5.2	igeprn2014sanb	earthquake	manual
17/9/2014	15:47.2	-0.0489	-78	3.11	1.9	0.2	117	12	2	2.8	2.9	igeprn2014sglh	earthquake	manual
21/9/2014	18:22.8	0.0794	-79	19.76	1.5	0.72	158	12	2.5	3.6	5.6	igeprn2014sobm	earthquake	manual
12/8/2014	40:25.8	-0.072	-78	2.66	2.28	0.39	119	13	2	3.5	3.2	igeprn2014pteb	earthquake	manual
14/8/2014	33:16.9	-0.0961	-78	6.14	2.24	0.39	92	13	2.9	2	4.3	igeprn2014pwmx	earthquake	manual
15/8/2014	55:17.8	-0.0503	-78	7.46	2.05	0.22	115	13	1.8	2.8	5.6	igeprn2014pyrb	earthquake	manual
19/8/2014	54:13.3	-0.0799	-78	1.49	2.09	0.43	152	13	2.2	2.7	2.7	igeprn2014qfza	earthquake	manual
20/8/2014	50:39.4	-0.0889	-78	5.64	1.83	0.5	139	13	1.8	2.2	4.4	igeprn2014qgur	earthquake	manual
12/8/2014	17:13.4	-0.0519	-78	4.14	2.73	0.17	204	14	2.6	4.2	3	igeprn2014pszi	earthquake	manual
12/8/2014	33:56.6	-0.0713	-78	2.55	2.64	0.25	122	14	2	3.6	3.4	igeprn2014ptdv	earthquake	manual
12/8/2014	16:30.1	-0.0647	-78	5.67	2.21	0.25	132	14	3	7	9.2	igeprn2014pifg	earthquake	manual
13/8/2014	00:06.9	-0.0559	-78	3.87	2.21	0.29	133	14	1.7	3.5	2.5	igeprn2014ptkq	earthquake	manual
13/8/2014	42:11.9	-0.0489	-78	4.37	2.04	0.23	200	14	3.8	7.9	4.6	igeprn2014pubw	earthquake	manual
23/8/2014	10:42.4	-0.106	-78	5.32	1.52	0.32	90	14	2.6	2.3	6.8	igeprn2014qlqb	earthquake	manual
25/8/2014	52:32.5	-0.0888	-78	5.62	1.85	0.31	108	14	2.7	2.3	6.7	igeprn2014qpgl	earthquake	manual
8/9/2014	42:09.4	-0.0624	-78	9.92	2.39	0.39	78	14	2.6	3.2	5	igeprn2014rqgt	earthquake	manual

21/9/2014	30:27.6	-0.2866	-79	9.35	1.87	0.19	194	14	2.5	6.2	8.1	igeprn2014sohv	earthquake	manual
30/9/2014	24:07.2	-0.41	-78	6.3	1.77	0.17	137	14	2.7	2.8	8.4	igeprn2014tepf	earthquake	manual
13/8/2014	16:37.6	-0.0799	-78	5.35	2.05	0.21	194	15	2.3	4.5	7.3	igeprn2014puyu	earthquake	manual
14/8/2014	54:39.1	-0.0628	-78	5.93	2.43	0.32	87	15	2	2.1	3.7	igeprn2014pwxm	earthquake	manual
24/8/2014	27:25.5	-0.0852	-78	4.23	1.84	0.31	90	15	3.1	1.6	1.9	igeprn2014qnuv	earthquake	manual
11/9/2014	39:00.2	-0.0538	-78	6.71	1.83	0.21	96	15	1.8	2.7	5	igeprn2014rvbj	earthquake	manual
12/8/2014	58:19.8	-0.0526	-78	3.8	2.44	0.53	205	16	2.5	3.4	2.5	igeprn2014ptap	earthquake	manual
13/8/2014	57:17.6	-0.0417	-78	2.67	2.23	0.24	125	16	1.9	3.6	3.2	igeprn2014ptio	earthquake	manual
14/8/2014	01:10.2	-0.0536	-78	6.67	1.86	0.26	126	16	2.4	5.7	12.6	igeprn2014pvef	earthquake	manual
27/8/2014	02:10.6	-0.0178	-78	6.92	1.69	0.38	138	16	2.2	3.1	7	igeprn2014qtrp	earthquake	manual
27/8/2014	54:35.8	-0.0753	-78	7.53	1.95	0.3	91	16	2.5	1.8	3.8	igeprn2014qurb	earthquake	manual
18/9/2014	30:48.6	0.024	-78	12.18	1.8	0.26	112	16	2.3	3.7	7.1	igeprn2014shrq	earthquake	manual
18/9/2014	28:52.3	-0.3714	-78	2.66	1.95	0.22	152	16	4.1	3.2	3.2	igeprn2014sivg	earthquake	manual
19/9/2014	31:25.8	-0.3918	-78	4.54	1.62	0.15	130	16	2.6	3.3	3.5	igeprn2014sjfg	earthquake	manual
29/9/2014	51:16.0	-0.1951	-78	3.35	1.72	0.18	137	16	3.1	2.5	2.6	igeprn2014tcwo	earthquake	manual
15/8/2014	28:27.1	-0.0841	-78	1.12	2.33	0.34	84	17	2	1.9	1.8	igeprn2014pyci	earthquake	manual
17/8/2014	29:10.9	-0.0688	-78	4.19	2.31	0.27	126	17	2.2	2.1	2	igeprn2014qbfm	earthquake	manual
17/8/2014	47:37.7	-0.0765	-78	8.87	2.38	0.32	66	17	2.2	2	4.7	igeprn2014qkbb	earthquake	manual
19/8/2014	58:10.7	-0.0795	-78	4.16	2.19	0.4	140	17	1.8	2.7	2.4	igeprn2014qfj	earthquake	manual
22/8/2014	32:36.8	-0.0924	-78	12.12	2.34	0.22	72	17	1.9	1.8	4.1	igeprn2014qlax	earthquake	manual
23/8/2014	24:39.1	-0.2148	-79	9	2.11	0.57	142	17	2.8	3.2		igeprn2014qmak	earthquake	manual
25/8/2014	17:39.4	-0.0713	-78	7.63	2.09	0.95	79	17	2.1	1.8	4.1	igeprn2014qpfh	earthquake	manual
12/8/2014	28:08.8	-0.0675	-78	2.09	2.79	0.28	196	18	2	3.9	2.6	igeprn2014pszs	earthquake	manual
13/8/2014	04:42.7	-0.069	-78	3.55	2.32	0.53	133	18	1.6	3.4	2.2	igeprn2014ptss	earthquake	manual
15/8/2014	57:53.7	-0.0548	-78	10.71	2.04	0.29	82	18	1.7	2	4.1	igeprn2014pyle	earthquake	manual
10/9/2014	22:45.9	-0.5566	-79	12.03	1.91	0.38	122	18	2.1	2.2	6	igeprn2014rsrl	earthquake	manual
13/8/2014	03:31.5	-0.0393	-78	4.01	1.94	0.29	192	19	2.2	4.2	2.4	igeprn2014ptuq	earthquake	manual

14/8/2014	44:24.4	-0.0777	-78	4.19	2.33	0.43	97	19	1.6	2.1	1.8	igeprn2014pvpr	earthquake	manual
19/9/2014	48:07.2	-0.395	-79	5.24	1.72	0.12	121	19	2.2	3	5.9	igeprn2014sjtr	earthquake	manual
14/8/2014	43:21.7	-0.068	-78	6.21	2.49	0.57	172	20	1.9	3.1	4.8	igeprn2014pwve	earthquake	manual
20/8/2014	09:24.5	-0.0966	-78	4.02	2.24	0.4	79	20	1.7	1.6	1.8	igeprn2014qhld	earthquake	manual
23/8/2014	54:58.3	-0.0806	-78	8.63	1.83	0.43	61	20	2.3	2.6	6.1	igeprn2014qlvm	earthquake	manual
13/8/2014	42:01.1	-0.062	-78	1.12	2.61	0.36	125	21	1.8	3.3	2.7	igeprn2014ptoa	earthquake	manual
13/8/2014	12:31.9	-0.0613	-78	1.68	2.38	0.21	132	21	1.3	3.2	1.9	igeprn2014ptuy	earthquake	manual
13/8/2014	31:41.1	-0.0693	-78	2.73	2.12	0.27	130	21	1.4	2.9	2	igeprn2014ptxo	earthquake	manual
16/8/2014	35:26.5	-0.0709	-78	7.95	2.34	0.34	84	21	2.3	2.5	5	igeprn2014pzyb	earthquake	manual
25/8/2014	43:12.1	-0.0761	-78	9.86	1.88	0.58	71	21	1.6	1.9	4.6	igeprn2014qpkc	earthquake	manual
18/9/2014	19:24.0	-0.0541	-78	3.01	1.72	0.31	162	21	2	2.3	2.2	igeprn2014shfk	earthquake	manual
12/8/2014	32:02.6	-0.0541	-78	1.94	2.69	0.25	72	22	1.6	2.7	2.9	igeprn2014pszv	earthquake	manual
12/8/2014	24:39.4	-0.0628	-78	1.58	2.7	0.27	74	22	1.7	2.2	2.4	igeprn2014ptdo	earthquake	manual
13/8/2014	33:58.8	-0.0659	-78	3.38	2.56	0.36	118	22	1.6	3.1	2.2	igeprn2014ptnt	earthquake	manual
13/8/2014	20:44.5	-0.0509	-78	2	2.4	0.36	201	22	2.1	4.2	2.6	igeprn2014ptpg	earthquake	manual
22/8/2014	24:30.0	-0.5719	-78	5.92	2.4	0.34	77	22	1.8	2	3.2	igeprn2014qkay	earthquake	manual
23/8/2014	08:59.6	-0.0823	-78	7.66	1.89	0.41	93	22	2.6	2.4	5.5	igeprn2014qjzw	earthquake	manual
23/8/2014	41:17.4	-0.0833	-78	5.28	2.02	0.41	72	22	2.1	2	5.6	igeprn2014qmgx	earthquake	manual
8/9/2014	40:58.9	-0.0708	-78	6.66	2.49	0.34	77	23	1.8	2.8	5.4	igeprn2014rqmr	earthquake	manual
15/8/2014	37:32.1	-0.071	-78	11.29	3.04	0.36	65	24	2.1	2.4	5.1	igeprn2014pyom	earthquake	manual
17/8/2014	16:02.2	-0.0746	-78	7.67	2.65	0.47	70	24	1.6	1.5	3.3	igeprn2014qbfh	earthquake	manual
17/8/2014	24:14.6	-0.0839	-78	7.48	2.45	0.36	60	24	1.6	1.8	3.8	igeprn2014qbjh	earthquake	manual
14/8/2014	10:07.8	-0.0864	-78	2.11	2.84	0.39	70	25	1.4	2	2.3	igeprn2014pvwh	earthquake	manual
16/8/2014	31:58.2	-0.0503	-78	10.94	2.58	0.25	90	25	1.7	1.9	3.1	igeprn2014qanu	earthquake	manual
9/9/2014	34:19.5	0.0236	-78	11.62	2.5	0.32	63	25	1.6	2.3	3.3	igeprn2014ruc	earthquake	manual
22/8/2014	59:19.3	-0.0883	-78	10	2.67	0.38	47	26	1.6	1.7	2.6	igeprn2014qlht	earthquake	manual
13/8/2014	38:42.6	-0.0634	-78	3.6	2.88	0.31	62	28	1.4	2.6	2.5	igeprn2014pudt	earthquake	manual

15/8/2014	07:37.6	-0.0443	-78	7.45	2.76	0.83	77	28	1.5	1.8	2.5	igeprn2014pwwy	earthquake	manual
14/8/2014	11:18.9	-0.0521	-78	6.51	2.59	0.39	92	29	1.3	1.8	2.1	igeprn2014pvgn	earthquake	manual
13/8/2014	17:51.6	-0.0574	-78	2.39	2.82	0.3	129	30	1.3	3.1	2.2	igeprn2014ptxc	earthquake	manual
17/8/2014	33:47.7	-0.0682	-78	7.52	2.68	0.46	65	30	1.7	1.7	3.4	igeprn2014qbvm	earthquake	manual
17/8/2014	08:00.6	-0.0497	-78	9.85	2.9	0.48	69	32	1.5	1.6	2.9	igeprn2014qaoz	earthquake	manual
16/8/2014	36:31.4	-0.1036	-78	5.94	2.64	0.51	48	33	1.3	1.3	2.4	igeprn2014pzai	earthquake	manual
16/8/2014	11:59.1	-0.0563	-78	5.83	3.1	0.42	81	35	1.9	2	4.5	igeprn2014pzxg	earthquake	manual
14/8/2014	10:07.4	-0.0909	-78	6.05	2.67	0.38	62	39	1.2	1.5	2.2	igeprn2014pwwi	earthquake	manual
17/8/2014	37:49.1	-0.0782	-78	10.31	2.88	0.35	65	39	1.4	1.6	2	igeprn2014qbns	earthquake	manual
1/9/2014	11:23.5	-0.0875	-78	7.94	2.58	0.54	40	39	1.5	1.5	2.9	igeprn2014rdif	earthquake	manual
12/8/2014	47:21.5	-0.056	-78	3.5	2.73	0.49	63	40	1.2	1.7	1.8	igeprn2014ptaf	earthquake	manual
12/8/2014	19:11.4	-0.051	-78	5.92	3.28	0.3	83	40	1.3	2.8	3.8	igeprn2014ptdj	earthquake	manual
17/8/2014	40:24.3	-0.0643	-78	10.69	2.66	0.37	72	40	1.5	1.8	2.8	igeprn2014qaxy	earthquake	manual
29/9/2014	00:16.3	-0.6934	-78	4.92	2.53	0.48	57	40	1.1	1.5	1.3	igeprn2014tbte	earthquake	manual
13/8/2014	13:57.6	-0.0507	-78	4.96	2.87	0.47	65	41	1.3	2	1.8	igeprn2014ptta	earthquake	manual
13/8/2014	40:19.8	-0.0467	-78	5.67	2.96	0.49	99	48	1.3	2.2	3.5	igeprn2014pijz	earthquake	manual
13/8/2014	16:14.3	-0.0535	-78	6.75	2.82	0.47	56	50	1.2	2	3.1	igeprn2014pthf	earthquake	manual
16/8/2014	16:23.7	-0.065	-78	9.58	2.91	0.59	64	51	1	1.3	2	igeprn2014qadj	earthquake	manual
21/8/2014	50:40.2	-0.0781	-78	6.29	2.75	0.46	46	52	1.1	1.6	2.3	igeprn2014qjjz	earthquake	manual
17/8/2014	00:03.8	-0.0811	-78	9.82	2.97	0.43	40	55	1	1.3	1.8	igeprn2014qceg	earthquake	manual
13/8/2014	45:24.8	-0.445	-79	112.93	3.41	0.39	71	56	2.4	3.5	4.3	igeprn2014ptqc	earthquake	manual
12/8/2014	49:55.9	-0.0567	-78	4.55	3.67	0.32	58	57	1.1	1.6	1.6	igeprn2014ptck	earthquake	manual
12/8/2014	11:54.1	-0.0472	-78	5.91	3.07	0.52	61	57	1.1	1.6	2.4	igeprn2014ptfc	earthquake	manual
22/8/2014	09:39.4	-0.0863	-78	9.76	2.83	0.54	45	57	1.1	1.2	1.9	igeprn2014qlcd	earthquake	manual
16/8/2014	10:58.2	-0.0394	-78	5.91	3	0.57	60	59	0.9	1.5	2.1	igeprn2014qajd	earthquake	manual
22/8/2014	02:18.2	-0.0825	-78	8.81	2.97	0.53	36	65	1	1.2	1.8	igeprn2014qlhw	earthquake	manual
17/8/2014	50:31.9	-0.0749	-78	7.4	3.31	0.68	43	67	0.9	1.2	1.5	igeprn2014qbub	earthquake	manual

13/8/2014	23:58.1	-0.0458	-78	3.86	3.4	0.43	58	69	0.9	1.3	1.2	igeprn2014ptrnk	earthquake	manual
16/8/2014	27:33.3	-0.054	-78	7.25	3.67	0.54	52	71	1.2	1.2	2.1	igeprn2014qabt	earthquake	manual
21/8/2014	58:00.3	-0.0567	-78	7.86	2.96	0.63	50	71	0.9	1.3	1.5	igeprn2014qjkm	earthquake	manual
13/8/2014	23:20.7	-0.0583	-78	4.61	3.85	0.42	58	72	1	1.3	1.1	igeprn2014pund	earthquake	manual
12/8/2014	02:21.7	-0.0536	-78	4.56	3.98	0.51	59	73	1	1.3	1.1	igeprn2014psyv	earthquake	manual
14/8/2014	16:11.2	-0.0488	-78	4.31	3.75	0.45	61	76	0.9	1.2	1.1	igeprn2014pvkq	earthquake	manual
17/8/2014	30:30.2	-0.0545	-78	5.62	3.99	0.65	51	78	1	1.2	1.3	igeprn2014qbvj	earthquake	manual
12/8/2014	57:58.9	-0.0509	-78	5.28	5.14	0.39	60	84	1.2	1.6	1.7	igeprn2014psys	earthquake	manual
16/8/2014	08:22.0	-0.0503	-78	4.17	4.78	0.51	46	95	1	1.1	1.2	igeprn2014pzxe	earthquake	manual

**Anexo 2.** Sismos relocalizados con HYPOELLIPSE y Velest para la crisis del 2014 y para los eventos ocurridos entre el 2011 y 2018.

**SISMOS RELOCALIZADOS CON VELEST PARA EL 2014**

<b>N °</b>	<b>FECHA</b>	<b>HORA</b>	<b>LATITUD</b>	<b>LONGITUD</b>	<b>DEPTH</b>
1	12/8/2014	19:57	-0.0677	-78.4019	-6.33
2	12/8/2014	20:02	-0.0663	-78.3939	-6.59
3	12/8/2014	20:17	-0.0679	-78.4161	-8.65
4	12/8/2014	20:28	-0.0760	-78.4120	-7.55
5	12/8/2014	20:32	-0.0651	-78.4149	-5.85
6	12/8/2014	20:47	-0.0642	-78.4044	-6.32
7	12/8/2014	20:58	-0.0587	-78.4114	-0.13
8	12/8/2014	21:03	-0.0788	-78.3829	-3.89
9	12/8/2014	21:36	-0.0677	-78.4059	-4.36
10	12/8/2014	21:37	-0.0680	-78.4166	-7.85
11	12/8/2014	21:44	-0.0299	-78.3757	-9.98
12	12/8/2014	21:49	-0.0707	-78.4084	-7.53
13	12/8/2014	21:46	-0.0831	-78.3889	-3.86
14	12/8/2014	22:18	-0.0718	-78.3922	-8.24
15	12/8/2014	22:19	-0.0610	-78.4029	-6.58
16	12/8/2014	22:24	-0.0715	-78.4082	-6.71
17	12/8/2014	22:33	-0.0726	-78.4010	-5.53
18	12/8/2014	22:41	-0.0612	-78.4145	-7.43
19	12/8/2014	22:40	-0.0722	-78.4113	-6.95
20	12/8/2014	23:11	-0.0588	-78.4007	-7.10
21	12/8/2014	23:16	-0.0484	-78.4387	-10.71
22	12/8/2014	23:23	-0.0489	-78.4007	-2.85
23	12/8/2014	23:24	-0.0734	-78.4196	-4.34
24	13/8/2014	0:16	-0.0619	-78.4037	-7.06
25	13/8/2014	0:57	-0.0414	-78.3717	-1.77
26	13/8/2014	1:06	-0.0655	-78.4062	-6.67
27	13/8/2014	1:08	-0.0740	-78.4130	-4.98
28	13/8/2014	1:40	-0.0549	-78.4064	-7.32
29	13/8/2014	2:00	-0.0605	-78.4292	-9.25
30	13/8/2014	3:19	-0.0625	-78.4414	-8.89
31	13/8/2014	3:23	-0.0597	-78.4068	-7.47
32	13/8/2014	3:33	-0.0645	-78.4115	-7.37
33	13/8/2014	3:41	-0.0564	-78.3758	-3.32
34	13/8/2014	4:20	-0.0645	-78.4113	-7.19
35	13/8/2014	6:04	-0.0751	-78.4152	-3.93
36	13/8/2014	6:13	-0.0588	-78.4149	-6.93
37	13/8/2014	7:03	-0.0627	-78.4156	-9.76
38	13/8/2014	7:12	-0.0748	-78.4211	-5.82

39	13/8/2014	8:17	-0.0734	-78.4048	-6.82
40	13/8/2014	8:31	-0.0760	-78.4191	-5.07
41	13/8/2014	10:42	-0.0596	-78.4166	-4.76
42	13/8/2014	11:38	-0.0763	-78.4023	-5.66
43	13/8/2014	11:49	-0.0736	-78.3961	-0.83
44	13/8/2014	14:03	-0.0812	-78.3991	-0.10
45	13/8/2014	16:23	-0.0731	-78.4124	-7.74
46	13/8/2014	18:19	-0.0588	-78.4276	-5.52
47	13/8/2014	18:52	-0.0809	-78.3925	-2.09
48	13/8/2014	21:28	-0.0729	-78.4252	-7.17
49	13/8/2014	22:16	-0.0799	-78.4015	-5.87
50	13/8/2014	22:21	-0.0398	-78.4022	-6.97
51	13/8/2014	22:25	-0.0564	-78.4136	-6.39
52	14/8/2014	1:01	-0.0632	-78.4146	-5.63
53	14/8/2014	1:30	-0.0870	-78.3822	-5.12
54	14/8/2014	1:49	-0.0726	-78.4135	-6.59
55	14/8/2014	2:11	-0.0629	-78.4120	-5.47
56	14/8/2014	4:16	-0.0594	-78.4119	-7.57
57	14/8/2014	6:44	-0.0757	-78.4100	-5.71
58	14/8/2014	10:10	-0.0920	-78.4174	-5.12
59	14/8/2014	10:10	-0.0921	-78.4174	-4.37
60	14/8/2014	17:29	-0.0677	-78.4292	-7.12
61	14/8/2014	18:33	-0.0847	-78.4208	-6.81
62	14/8/2014	19:42	-0.0931	-78.4077	-4.71
63	14/8/2014	22:43	-0.0670	-78.4005	-6.56
64	14/8/2014	23:36	-0.1380	-78.3888	-4.94
65	14/8/2014	23:54	-0.0695	-78.4217	-4.15
66	15/8/2014	0:07	-0.0609	-78.4094	-5.58
67	15/8/2014	11:36	-0.0770	-78.3981	-5.65
68	15/8/2014	15:28	-0.0597	-78.4189	-3.62
69	15/8/2014	19:57	-0.0600	-78.4293	-8.78
70	15/8/2014	21:37	-0.0613	-78.4063	-6.98
71	15/8/2014	22:55	-0.0644	-78.4059	-6.00
72	16/8/2014	3:36	-0.0790	-78.4085	-5.90
73	16/8/2014	15:08	-0.0618	-78.4049	-6.60
74	16/8/2014	15:11	-0.0542	-78.3913	-5.85
75	16/8/2014	15:35	-0.0664	-78.4017	-6.12
76	16/8/2014	17:27	-0.0585	-78.4066	-6.96
77	16/8/2014	18:16	-0.0636	-78.4012	-7.00
78	16/8/2014	19:55	-0.0592	-78.3817	-5.03
79	16/8/2014	21:10	-0.0520	-78.3900	-6.06
80	16/8/2014	23:31	-0.0588	-78.4105	-6.82
81	17/8/2014	0:08	-0.0531	-78.4007	-5.93
82	17/8/2014	4:40	-0.0585	-78.4116	-7.69
83	17/8/2014	8:16	-0.0618	-78.4089	-5.18

84	17/8/2014	8:29	-0.0603	-78.4114	-6.35
85	17/8/2014	10:24	-0.0659	-78.4000	-5.78
86	17/8/2014	10:47	-0.0652	-78.4030	-7.47
87	17/8/2014	12:37	-0.0734	-78.4103	-7.82
88	17/8/2014	15:50	-0.0738	-78.4064	-7.31
89	17/8/2014	16:30	-0.0636	-78.3944	-5.81
90	17/8/2014	16:33	-0.0616	-78.3960	-5.77
91	17/8/2014	21:00	-0.0778	-78.4074	-6.90
92	17/8/2014	21:22	-0.0589	-78.4336	-9.58
93	18/8/2014	18:37	-0.0502	-78.3955	-0.47
94	19/8/2014	4:56	-0.0523	-78.4567	-11.82
95	19/8/2014	11:58	-0.0645	-78.4073	-5.38
96	19/8/2014	12:52	-0.0998	-78.3754	-2.07
97	19/8/2014	22:54	-0.0759	-78.4144	-7.48
98	20/8/2014	1:22	-0.0992	-78.4156	-0.19
99	20/8/2014	2:52	-0.0686	-78.4328	-3.55
100	20/8/2014	9:50	-0.0656	-78.4205	-5.77
101	20/8/2014	18:09	-0.0783	-78.4162	-5.89
102	21/8/2014	6:41	-0.0564	-78.4152	-9.25
103	21/8/2014	6:57	-0.0601	-78.4073	-6.39
104	21/8/2014	19:50	-0.0732	-78.3951	-5.56
105	22/8/2014	17:32	-0.0827	-78.4038	-4.61
106	22/8/2014	18:09	-0.0750	-78.4090	-7.42
107	22/8/2014	20:59	-0.0788	-78.4024	-6.15
108	22/8/2014	21:02	-0.0776	-78.4016	-6.70
109	22/8/2014	23:37	-0.0767	-78.4002	-7.21
110	23/8/2014	1:10	-0.0777	-78.4043	-6.72
111	23/8/2014	3:54	-0.0817	-78.4111	-6.08
112	23/8/2014	5:01	-0.0743	-78.3849	-4.62
113	23/8/2014	6:08	-0.0711	-78.3810	-5.13
114	23/8/2014	9:41	-0.0731	-78.4013	-6.11
115	24/8/2014	5:27	-0.0754	-78.3837	-3.73
116	24/8/2014	21:24	-0.0578	-78.4234	-6.48
117	25/8/2014	0:17	-0.0614	-78.4195	-7.55
118	25/8/2014	0:52	-0.0628	-78.4045	-6.83
119	25/8/2014	2:43	-0.0665	-78.3978	-4.87
120	25/8/2014	17:53	0.0314	-78.3945	-4.14
121	25/8/2014	17:54	-0.0836	-78.4063	-5.41
122	26/8/2014	15:27	-0.0670	-78.4034	-8.02
123	26/8/2014	16:44	-0.0572	-78.4069	-9.60
124	27/8/2014	9:02	-0.0271	-78.3892	-6.32
125	27/8/2014	16:16	-0.0879	-78.4128	-4.83
126	27/8/2014	18:31	-0.0785	-78.3923	-3.32
127	27/8/2014	19:36	-0.0709	-78.4115	-11.36
128	27/8/2014	19:56	-0.0690	-78.3821	-4.62



129	27/8/2014	23:54	-0.0665	-78.3975	-6.25
130	31/8/2014	22:01	-0.0712	-78.4010	-4.78
131	1/9/2014	4:02	-0.0590	-78.3576	-0.79
132	1/9/2014	19:11	-0.0709	-78.4074	-6.77
133	2/9/2014	10:39	-0.0652	-78.3989	-7.15
134	3/9/2014	3:05	-0.0754	-78.3894	-2.98
135	4/9/2014	10:11	-0.0735	-78.4147	-6.72
136	8/9/2014	19:42	-0.0551	-78.3976	-7.94
137	8/9/2014	22:40	-0.0730	-78.4144	-7.52
138	9/9/2014	9:41	-0.0712	-78.4127	-5.81
139	9/9/2014	13:24	-0.1174	-78.3057	-2.13
140	10/9/2014	0:58	-0.0627	-78.4004	-6.23
141	10/9/2014	4:43	-0.0962	-78.3877	-6.62
142	11/9/2014	10:38	-0.0640	-78.4009	-5.68
143	11/9/2014	19:59	-0.0833	-78.4173	-5.52
144	12/9/2014	18:42	-0.0459	-78.4537	-9.72
145	13/9/2014	1:39	-0.0732	-78.4109	-6.43
146	13/9/2014	22:59	-0.0390	-78.4620	-7.67
147	14/9/2014	10:14	-0.0762	-78.4122	-5.90
148	17/9/2014	1:04	-0.0733	-78.4087	-4.65
149	17/9/2014	16:15	-0.0683	-78.4046	-5.46
150	18/9/2014	2:19	-0.0624	-78.3964	-7.26
151	19/9/2014	9:58	-0.1130	-78.4549	-0.19
152	20/9/2014	17:11	-0.0646	-78.4050	-6.23
153	23/9/2014	13:57	-0.0561	-78.3582	-8.86
154	25/9/2014	8:59	-0.0643	-78.4112	-0.21
155	25/9/2014	15:49	-0.0342	-78.4786	-11.40
156	26/9/2014	5:27	-0.0801	-78.4019	-4.56
157	27/9/2014	5:55	0.0159	-78.5250	-12.65
158	28/9/2014	9:22	-0.0762	-78.4170	-5.93
159	30/9/2014	19:12	-0.0325	-78.3923	-5.36

#### SISMOS RELOCALIZADOS CON HYPOELLIPSE PARA EL 2014

N °	FECHA	HORA	LATITUD	LONGITUD	DEPTH
1	12/8/2014	19:57	-0.0700	-78.4010	-6.44
2	12/8/2014	20:02	-0.0690	-78.3912	-6.56
3	12/8/2014	20:17	-0.0717	-78.4150	-9.04
4	12/8/2014	20:28	-0.0780	-78.4100	-8.28
5	12/8/2014	20:32	-0.0667	-78.4127	-6.90
6	12/8/2014	20:47	-0.0648	-78.4032	-7.12
7	12/8/2014	20:58	-0.0628	-78.4238	-6.37
8	12/8/2014	21:03	-0.0803	-78.3930	-4.85

9	12/8/2014	21:36	-0.0667	-78.4150	-6.18
10	12/8/2014	21:37	-0.0762	-78.4127	-7.23
11	12/8/2014	21:44	-0.0777	-78.4370	0.00
12	12/8/2014	21:49	-0.0725	-78.4045	-7.87
13	12/8/2014	21:46	-0.0723	-78.4183	-11.21
14	12/8/2014	22:18	-0.0787	-78.3945	-8.80
15	12/8/2014	22:19	-0.0605	-78.4023	-7.25
16	12/8/2014	22:24	-0.0730	-78.4095	-8.04
17	12/8/2014	22:33	-0.0747	-78.4007	-7.10
18	12/8/2014	22:41	-0.0633	-78.4143	-8.58
19	12/8/2014	22:40	-0.0733	-78.4090	-8.15
20	12/8/2014	23:11	-0.0618	-78.3965	-6.79
21	12/8/2014	23:16	-0.0432	-78.4615	-13.39
22	12/8/2014	23:23	-0.0345	-78.4140	-2.16
23	12/8/2014	23:24	0.0140	-78.4912	-0.22
24	13/8/2014	0:16	-0.0638	-78.4002	-6.95
25	13/8/2014	0:57	-0.0413	-78.3792	-6.86
26	13/8/2014	1:06	-0.0695	-78.4040	-8.21
27	13/8/2014	1:08	-0.0813	-78.4058	-2.13
28	13/8/2014	1:40	-0.0558	-78.4058	-8.08
29	13/8/2014	2:00	-0.0638	-78.4280	-9.95
30	13/8/2014	3:19	-0.0810	-78.4102	-4.11
31	13/8/2014	3:23	-0.0605	-78.4035	-7.73
32	13/8/2014	3:33	-0.0662	-78.4108	-8.35
33	13/8/2014	3:41	-0.0575	-78.3842	-7.39
34	13/8/2014	4:20	-0.0637	-78.4085	-8.32
35	13/8/2014	6:04	-0.0770	-78.4177	-5.60
36	13/8/2014	6:13	-0.0610	-78.4118	-6.82
37	13/8/2014	7:03	-0.0673	-78.4305	-10.60
38	13/8/2014	7:12	-0.0740	-78.4238	-7.88
39	13/8/2014	8:17	-0.0715	-78.4010	-8.00
40	13/8/2014	8:31	-0.0772	-78.4188	-6.76
41	13/8/2014	10:42	-0.0648	-78.4268	-2.66
42	13/8/2014	11:38	-0.0753	-78.4020	-7.45
43	13/8/2014	11:49	-0.0767	-78.4065	-4.64
44	13/8/2014	14:03	-0.0913	-78.3950	-2.88
45	13/8/2014	16:23	-0.0742	-78.4097	-7.90
46	13/8/2014	18:19	-0.0598	-78.4303	-7.04
47	13/8/2014	18:52	-0.0847	-78.3995	-4.12
48	13/8/2014	21:28	-0.0783	-78.4263	-8.24
49	13/8/2014	22:16	-0.0837	-78.4018	-6.75
50	13/8/2014	22:21	-0.0575	-78.4022	-4.17
51	13/8/2014	22:25	-0.0590	-78.4212	-8.05
52	14/8/2014	1:01	-0.0657	-78.4103	-5.18
53	14/8/2014	1:30	-0.1002	-78.3555	-6.56

54	14/8/2014	1:49	-0.0755	-78.4137	-8.03
55	14/8/2014	2:11	-0.0633	-78.4110	-7.34
56	14/8/2014	4:16	-0.0610	-78.4107	-8.32
57	14/8/2014	6:44	-0.0755	-78.4125	-7.59
58	14/8/2014	10:10	-0.0927	-78.4160	-6.68
59	14/8/2014	10:10	-0.0935	-78.4182	-5.31
60	14/8/2014	17:29	-0.0725	-78.4268	-9.12
61	14/8/2014	18:33	-0.0930	-78.4203	-7.15
62	14/8/2014	19:42	-0.0970	-78.4148	0.00
63	14/8/2014	22:43	-0.0745	-78.4015	-7.20
64	14/8/2014	23:36	-0.1350	-78.4150	-13.75
65	14/8/2014	23:54	-0.0737	-78.4235	-5.17
66	15/8/2014	0:07	-0.0627	-78.4100	-7.08
67	15/8/2014	11:36	-0.0783	-78.3715	-14.81
68	15/8/2014	15:28	-0.0643	-78.4210	-5.08
69	15/8/2014	19:57	-0.0642	-78.4360	-9.79
70	15/8/2014	21:37	-0.0678	-78.4105	-7.93
71	15/8/2014	22:55	-0.0672	-78.4063	-7.53
72	16/8/2014	3:36	-0.0803	-78.4098	-7.39
73	16/8/2014	15:08	-0.0640	-78.4043	-7.39
74	16/8/2014	15:11	-0.0568	-78.3932	-6.91
75	16/8/2014	15:35	-0.0712	-78.4058	-7.43
76	16/8/2014	17:27	-0.0617	-78.4058	-7.77
77	16/8/2014	18:16	-0.0660	-78.4030	-8.39
78	16/8/2014	19:55	-0.0608	-78.3838	-6.31
79	16/8/2014	21:10	-0.0535	-78.3905	-7.22
80	16/8/2014	23:31	-0.0608	-78.4128	-8.12
81	17/8/2014	0:08	-0.0558	-78.4010	-6.82
82	17/8/2014	4:40	-0.0608	-78.4133	-9.00
83	17/8/2014	8:16	-0.0633	-78.4097	-6.04
84	17/8/2014	8:29	-0.0593	-78.4157	-8.01
85	17/8/2014	10:24	-0.0662	-78.3993	-7.53
86	17/8/2014	10:47	-0.0668	-78.4037	-9.63
87	17/8/2014	12:37	-0.0740	-78.4122	-9.42
88	17/8/2014	15:50	-0.0753	-78.4072	-8.33
89	17/8/2014	16:30	-0.0663	-78.3942	-6.28
90	17/8/2014	16:33	-0.0657	-78.3992	-6.96
91	17/8/2014	21:00	-0.0795	-78.4088	-8.46
92	17/8/2014	21:22	-0.0595	-78.4370	-10.99
93	18/8/2014	18:37	-0.0547	-78.3912	-0.91
94	19/8/2014	4:56	-0.0248	-78.5065	-16.79
95	19/8/2014	11:58	-0.0642	-78.4047	-6.94
96	19/8/2014	12:52	-0.1020	-78.3785	-2.98
97	19/8/2014	22:54	-0.0812	-78.4100	-7.41
98	20/8/2014	1:22	-0.0990	-78.4088	0.00

99	20/8/2014	2:52	-0.0737	-78.4282	-0.14
100	20/8/2014	9:50	-0.0635	-78.4137	-7.33
101	20/8/2014	18:09	-0.0802	-78.4163	-8.47
102	21/8/2014	6:41	-0.0610	-78.4198	-10.50
103	21/8/2014	6:57	-0.0620	-78.4085	-7.41
104	21/8/2014	19:50	-0.0753	-78.3958	-6.81
105	22/8/2014	17:32	-0.0855	-78.4045	-6.05
106	22/8/2014	18:09	-0.0783	-78.4113	-8.34
107	22/8/2014	20:59	-0.0832	-78.4045	-7.60
108	22/8/2014	21:02	-0.0800	-78.4030	-7.85
109	22/8/2014	23:37	-0.0807	-78.4003	-9.99
110	23/8/2014	1:10	-0.0848	-78.4050	-8.48
111	23/8/2014	3:54	-0.0872	-78.4112	-8.02
112	23/8/2014	5:01	-0.0725	-78.3825	-6.77
113	23/8/2014	6:08	-0.0783	-78.3847	-5.74
114	23/8/2014	9:41	-0.0807	-78.4032	-6.98
115	24/8/2014	5:27	-0.0785	-78.3857	-5.45
116	24/8/2014	21:24	-0.0613	-78.4238	-8.78
117	25/8/2014	0:17	-0.0657	-78.4203	-9.85
118	25/8/2014	0:52	-0.0663	-78.4038	-9.24
119	25/8/2014	2:43	-0.0710	-78.3995	-5.99
120	25/8/2014	17:53	0.0288	-78.3992	-3.47
121	25/8/2014	17:54	-0.0890	-78.4070	-6.88
122	26/8/2014	15:27	-0.0725	-78.3997	-10.37
123	26/8/2014	16:44	-0.0630	-78.4137	-10.40
124	27/8/2014	9:02	-0.0318	-78.3895	-8.66
125	27/8/2014	16:16	-0.1048	-78.4117	-12.51
126	27/8/2014	18:31	-0.0598	-78.3897	-7.01
127	27/8/2014	19:36	-0.0753	-78.4083	-11.42
128	27/8/2014	19:56	-0.0767	-78.4025	-6.04
129	27/8/2014	23:54	-0.0745	-78.4018	-6.77
130	31/8/2014	22:01	-0.0450	-78.3908	-9.47
131	1/9/2014	4:02	-0.0647	-78.3583	-2.57
132	1/9/2014	19:11	-0.0795	-78.4107	-7.58
133	2/9/2014	10:39	-0.0732	-78.3995	-8.76
134	3/9/2014	3:05	-0.0800	-78.4047	-11.34
135	4/9/2014	10:11	-0.0810	-78.4155	-8.23
136	8/9/2014	19:42	-0.0630	-78.3917	-8.94
137	8/9/2014	22:40	-0.0780	-78.4160	-8.36
138	9/9/2014	9:41	-0.0743	-78.4188	-5.89
139	9/9/2014	13:24	-0.1242	-78.3073	-0.34
140	10/9/2014	0:58	-0.0668	-78.4013	-8.34
141	10/9/2014	4:43	-0.1143	-78.3582	-2.45
142	11/9/2014	10:38	-0.0685	-78.3998	-8.02
143	11/9/2014	19:59	-0.0897	-78.4123	-4.04

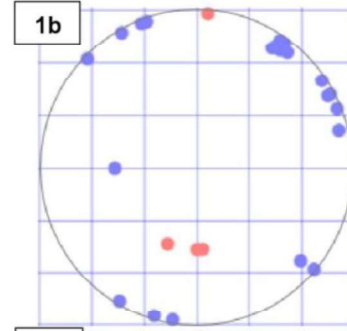
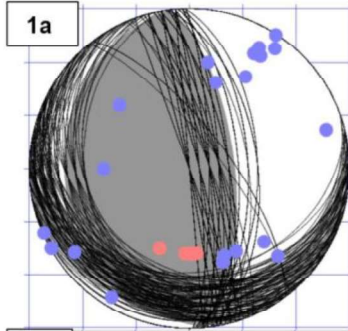
144	12/9/2014	18:42	-0.0733	-78.3847	-6.05
145	13/9/2014	1:39	-0.0798	-78.4110	-8.46
146	13/9/2014	22:59	-0.0467	-78.4553	-7.15
147	14/9/2014	10:14	-0.0795	-78.4128	-7.79
148	17/9/2014	1:04	-0.0752	-78.4138	-4.51
149	17/9/2014	16:15	-0.0727	-78.4062	-9.06
150	18/9/2014	2:19	-0.0680	-78.3990	-7.86
151	19/9/2014	9:58	-0.1182	-78.4530	0.00
152	20/9/2014	17:11	-0.0658	-78.4045	-10.37
153	23/9/2014	13:57	-0.0595	-78.3508	-3.00
154	25/9/2014	8:59	-0.0675	-78.4178	-4.68
155	25/9/2014	15:49	-0.0392	-78.4852	-11.80
156	26/9/2014	5:27	-0.0587	-78.4278	-14.81
157	27/9/2014	5:55	0.0285	-78.5440	-14.36
158	28/9/2014	9:22	-0.0762	-78.4122	-9.53
159	30/9/2014	19:12	-0.0057	-78.4175	-13.91

#### SISMOS RELOCALIZADOS CON HYPOELLIPSE PARA OTROS AÑOS

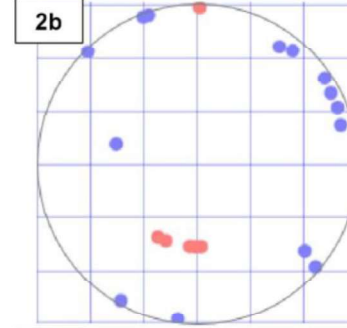
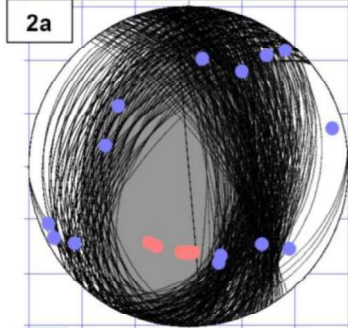
<b>N °</b>	<b>FECHA Y HORA</b>	<b>LATITUD</b>	<b>LONGITUD</b>	<b>DEPTH</b>
1	29/10/2011 13:50	-0.1450	-78.3473	-11.54
2	26/11/2011 01:50	-0.1525	-78.3557	-11.16
3	21/08/2012 07:07	-0.0032	-78.2958	-16.02
4	08/02/2013 19:32	-0.1415	-78.3637	-9.99
5	01/09/2013 03:32	0.0160	-78.3762	-5.23
6	23/01/2014 02:45	0.0080	-78.3610	-7.41
7	23/01/2014 02:55	0.0063	-78.3617	-7.14
8	26/12/2014 09:54	-0.0687	-78.3613	-3.28
9	04/10/2015 19:41	-0.0630	-78.3703	-9.31
10	10/10/2015 13:29	-0.0795	-78.3680	0.00
11	17/02/2016 18:37	0.0262	-78.3555	-9.25
12	15/03/2016 13:02	-0.1942	-78.4592	-12.85
13	09/08/2016 04:23	-0.1515	-78.3493	-11.13
14	14/08/2016 15:31	-0.1502	-78.3577	-10.95
15	05/09/2016 00:22	-0.1605	-78.3492	-12.29
16	15/06/2017 20:30	0.0007	-78.3315	-8.60
17	01/01/2018 14:24	-0.1445	-78.3530	-11.12
18	21/01/2018 11:52	0.0345	-78.3360	-4.52
19	03/06/2018 01:51	-0.1575	-78.3473	-10.85

**Anexo 3. Mecanismos focales de los eventos ocurridos en el año 2014**

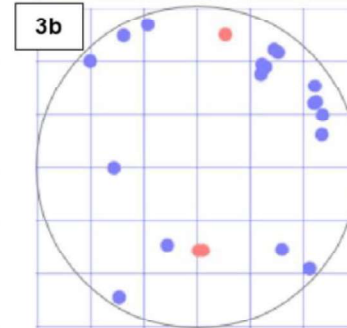
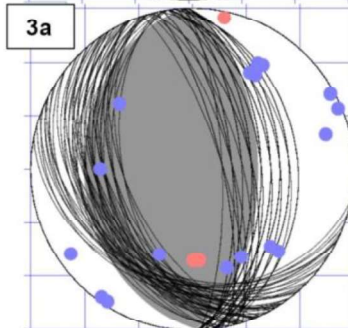
12 de agosto del 2014;  
19h57 (GTM)



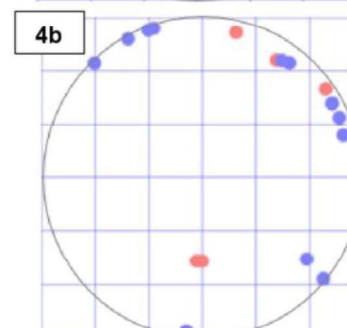
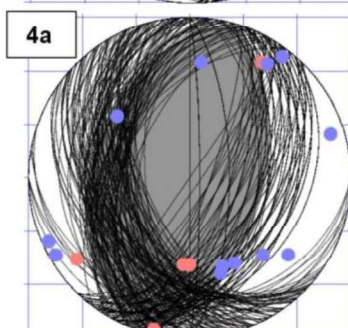
12 de agosto del 2014;  
20h02 (GTM)



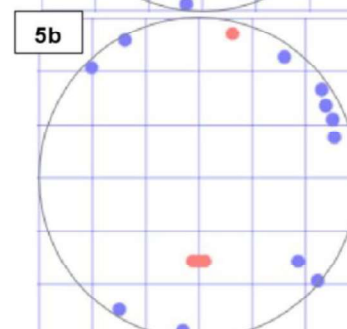
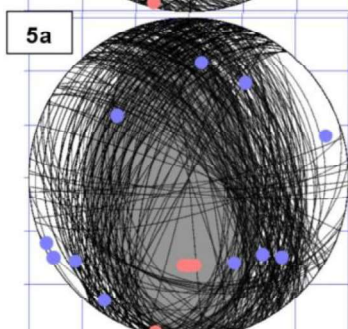
12 de agosto del 2014;  
21h49 (GTM)



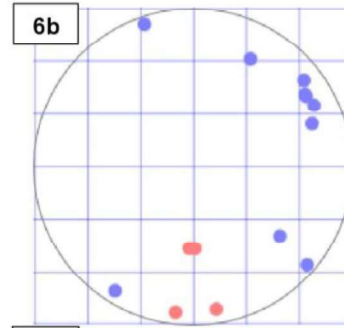
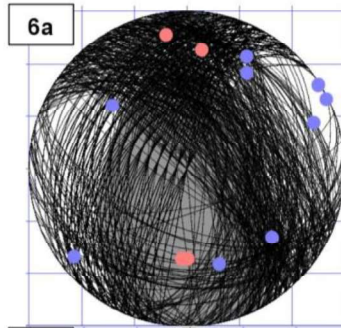
12 de agosto del 2014;  
23h11 (GTM)



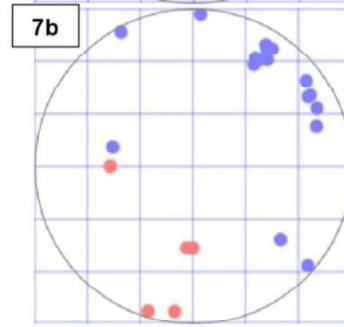
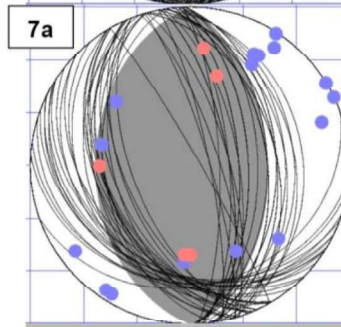
13 de agosto del 2014;  
00h16 (GTM)



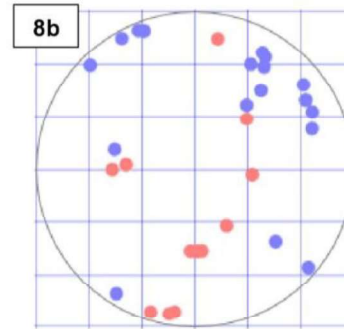
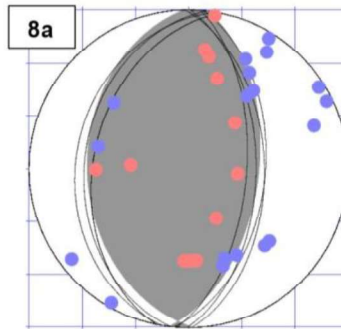
13 de agosto del 2014;  
01h40 (GTM)



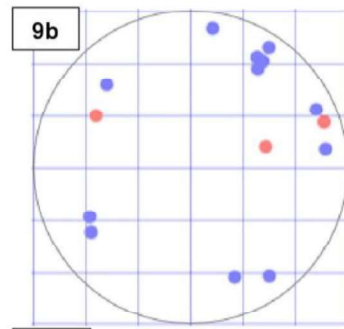
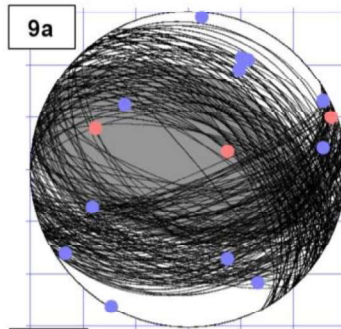
13 de agosto del 2014;  
03h23 (GTM)



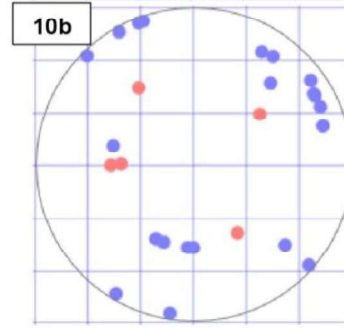
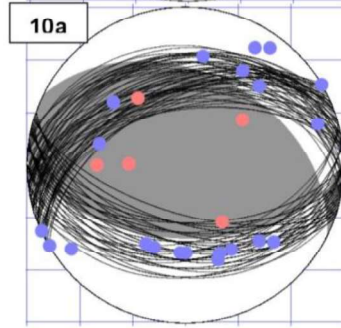
14 de agosto del 2014;  
04h16 (GTM)



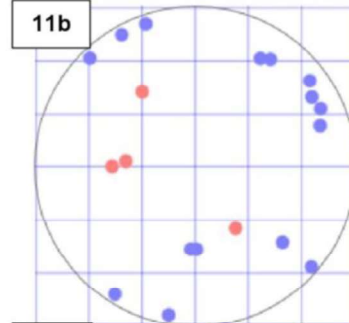
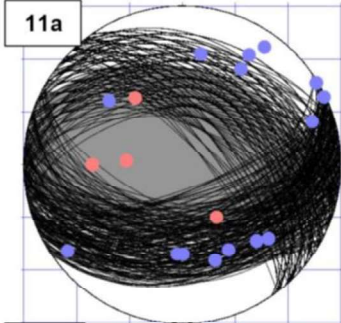
14 de agosto del 2014;  
10h10 (GTM)



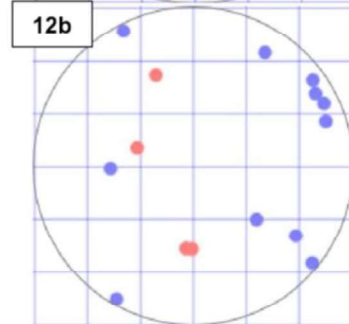
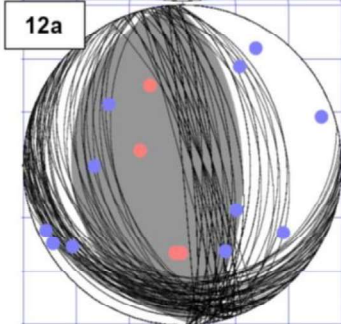
16 de agosto del 2014;  
15h08 (GTM)



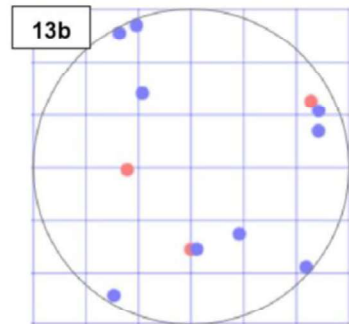
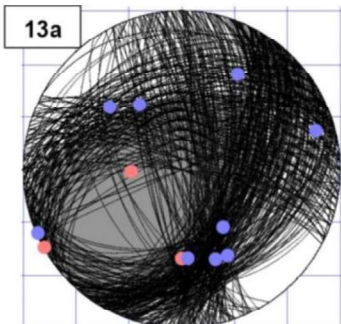
16 de agosto del 2014;  
17h27 (GTM)



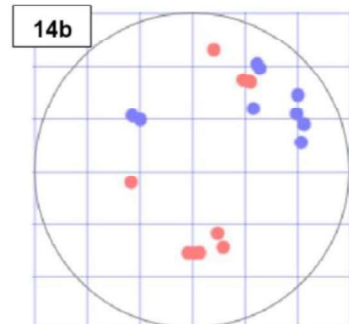
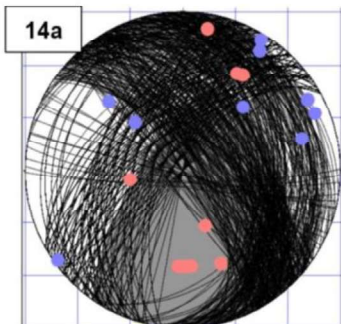
16 de agosto del 2014;  
21h10 (GTM)



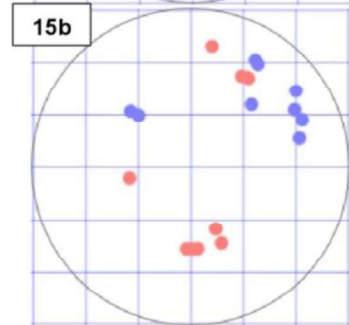
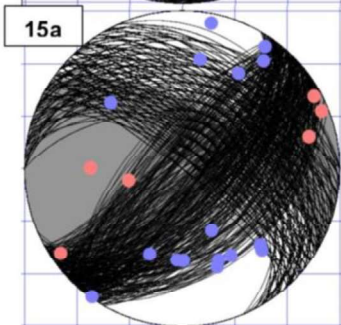
17 de agosto del 2014;  
10h24 (GTM)



17 de agosto del 2014;  
12h37 (GTM)

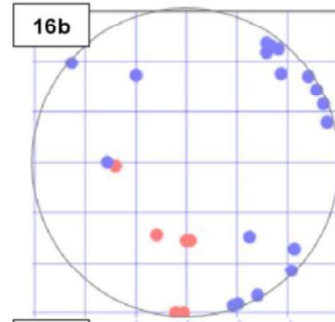
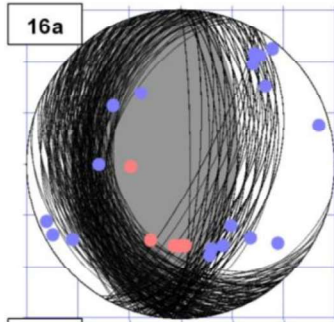


17 de agosto del 2014;  
15h50 (GTM)

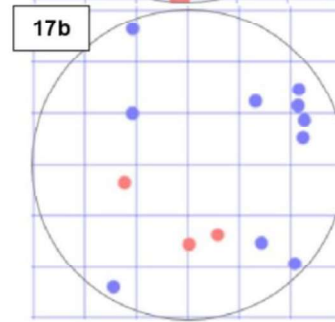
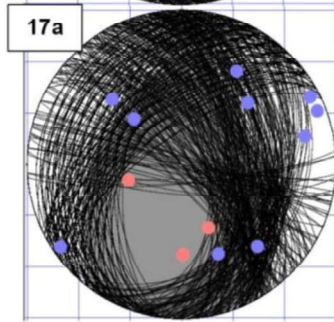




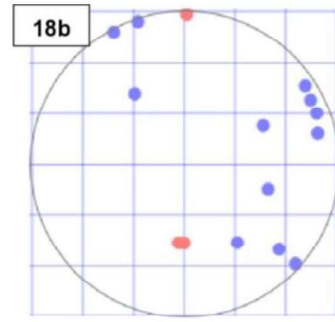
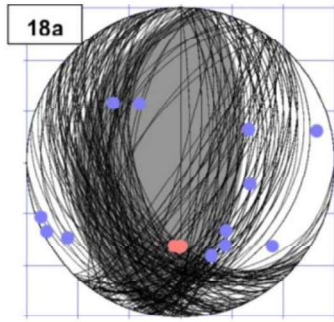
17 de agosto del 2014;  
16h30 (GTM)



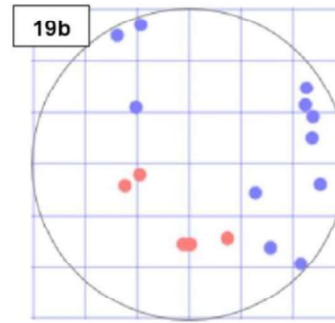
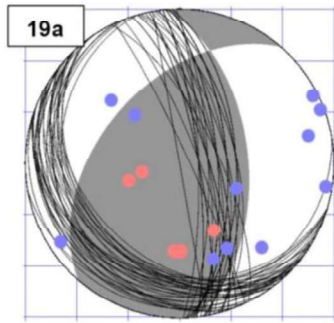
17 de agosto del 2014;  
21h00 (GTM)



21 de agosto del 2014;  
19h50 (GTM)

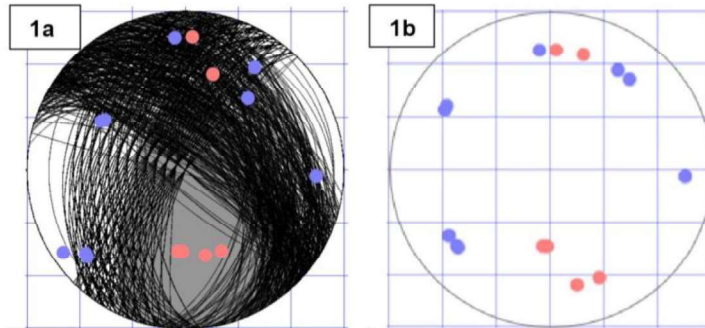


22 de agosto del 2014;  
21h02 (GTM)

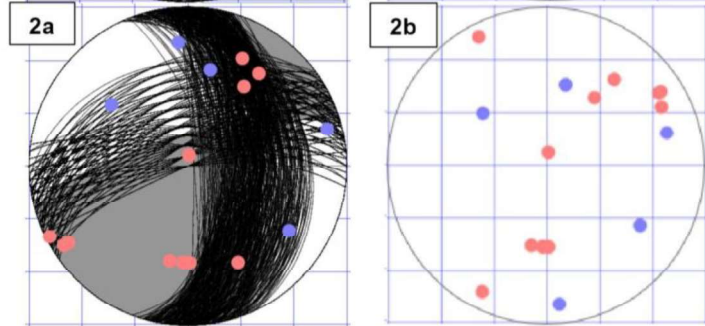


**Anexo 4.** Mecanismos focales de eventos significativos ocurridos en otros años

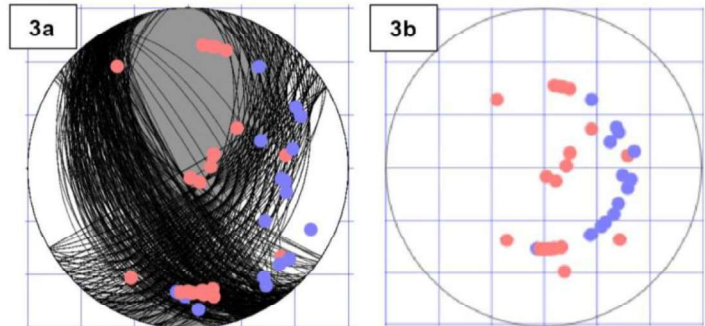
1 de septiembre del 2013; 03h32 (GTM)



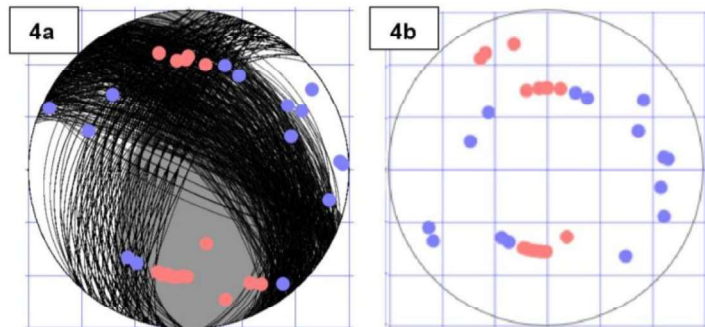
4 de octubre del 2015; 19h41 (GTM)



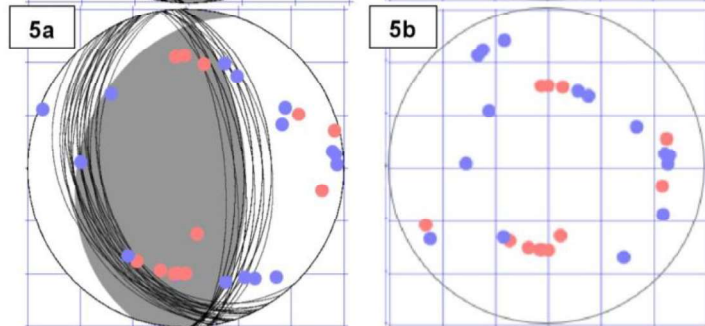
15 de marzo del 2016; 13h02 (GTM)



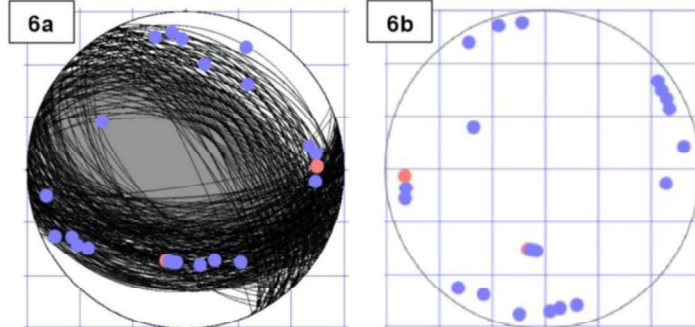
9 de agosto del 2016; 04h23 (GTM)



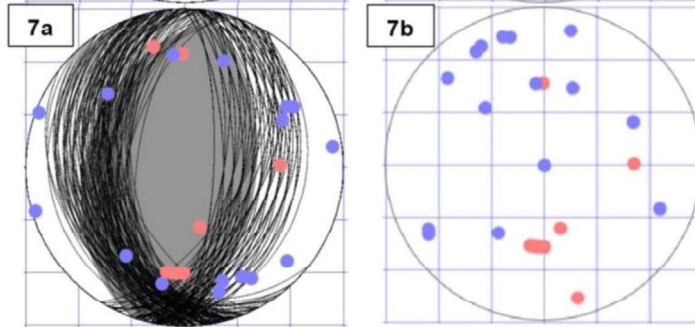
14 de agosto del 2016; 15h31 (GTM)



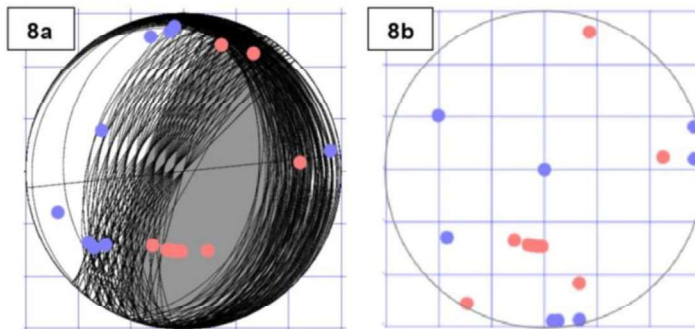
15 de junio del 2017;  
20h30 (GTM)



1 de enero del 2018;  
14h24 (GTM)



21 d enero del 2018;  
11h52 (GTM)



3 de junio del 2018;  
01h51 (GTM)

